

Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung

Endbericht (April 2017)

Forschungsprogramm

Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Forschungsprojekt

Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung

Projektlaufzeit

01. September 2016 – 30. April 2017

Aktenzeichen:

10.08.17.7-16.33

im Auftrag

des Bundesinstitutes für Bau, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Dipl.-Ing. Christine Knaus und Prof. Dr.-Ing. Thomas Hartmann (ITG Dresden)

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Spitzner (Ingenieurbüro ener // bauph // proj)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	4
2	Abstract.....	11
3	Einführung und Hintergrund	18
4	Methodik der Datenerhebung.....	21
4.1	Literaturrecherche und Studienauswahl.....	21
4.2	Fragebogen und Anschreiben.....	22
4.3	Überblick der betrachteten Studien	24
5	Methodik der Auswertung	27
5.1	Ermittlung der Schulstunden	27
5.2	Darstellung von Konzentrationsverläufen mit Carpet-Plots	38
5.3	Darstellung von Mittel- und Maximalwerten mit Streudiagrammen	40
5.4	Darstellung von statistischen Kenngrößen mit Boxplots	46
6	Ergebnisse.....	48
6.1	Allgemeines	48
6.2	Fensterlüftung.....	48
6.2.1	Unterrichtseinheit.....	48
6.2.2	Klassenraum.....	55
6.2.3	Bewertung.....	58
6.3	Hybride Lüftung.....	59
6.3.1	Unterrichtseinheit.....	59
6.3.2	Klassenraum.....	64
6.3.3	Bewertung.....	65
6.4	Lüftungsanlage	65
6.4.1	Unterrichtseinheit.....	65
6.4.2	Klassenraum.....	68
6.4.3	Bewertung.....	71
6.5	Vergleich der Lüftungskonzepte.....	72
6.6	Einfluss der Belegungsdichte.....	73
7	Fazit und Ausblick.....	75
	Literaturverzeichnis	82

Anhang A: Fragebogen (gekürzter Entwurf).....	84
Anhang B: Zusammenstellung der Studienparameter	96
Anhang C: Beispielhafte Grafiken zur Bestimmung von Schulstunden	121
Anhang D: Darstellungen mit Carpet-Plots.....	127
Anhang E: Detaillierte Ergebnisse.....	130
Anhang F: Vorträge beim AIVC-Workshop	165

1 Kurzfassung

In der für die Weiterentwicklung des BNB beauftragten Metastudie „Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung“ ist mit dem Fokus auf Deutschland eine wertende Übersicht über den aktuellen (veröffentlichten) Stand der Forschung hinsichtlich der Thematik „Kohlendioxidgehalte während der Unterrichtseinheit“ erstellt worden.

Von den insgesamt 15 angefragten Studien konnten 6 Studien nicht ausgewertet werden, da keine Messwerte mehr zur Verfügung standen oder keine Rückmeldung erfolgte. Von insgesamt neun Studien konnten Rohdaten entsprechend einer festgelegten methodischen Herangehensweise aufbereitet werden.

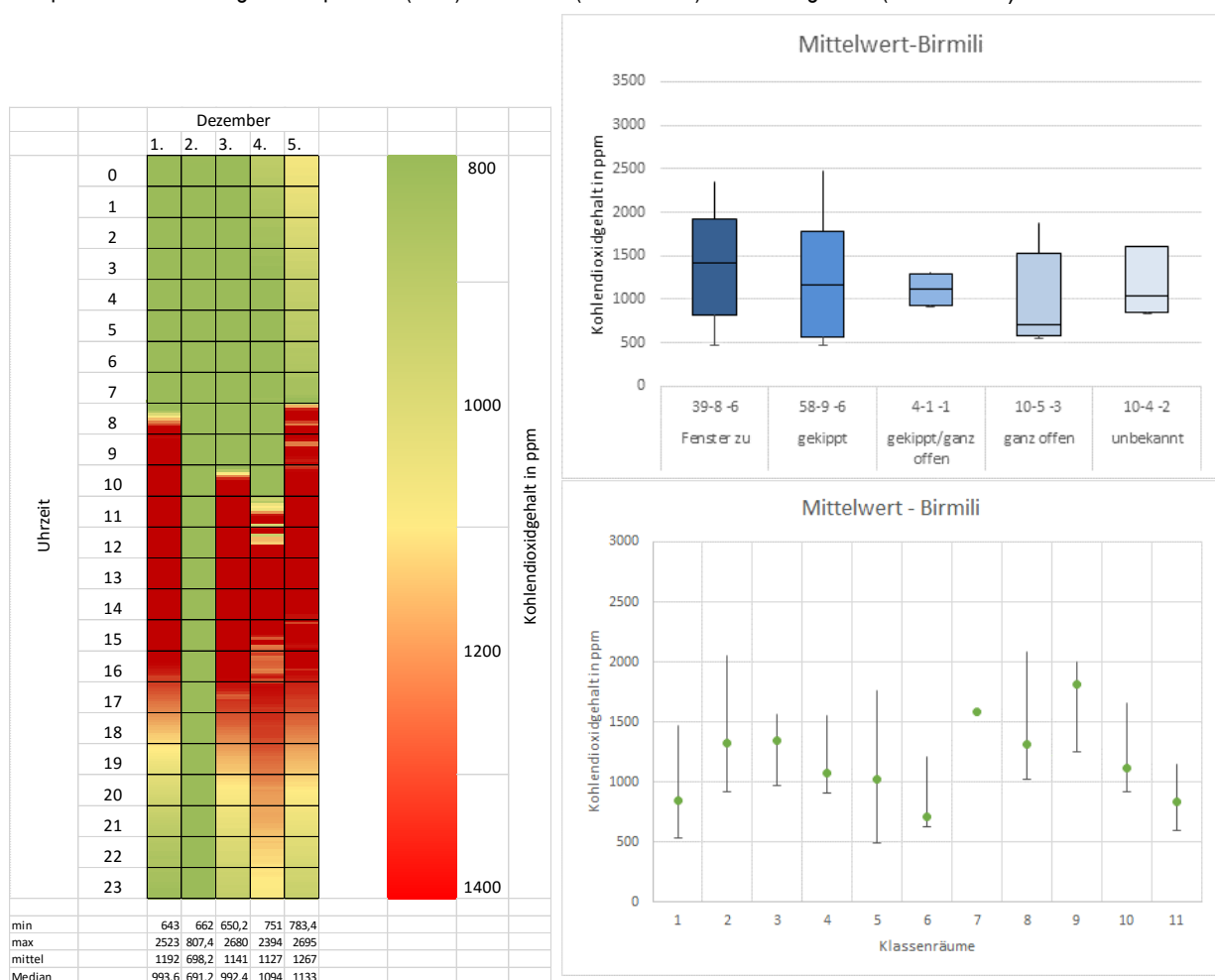
Zusammenstellung der betrachteten Studien

Betrachtete Studien	Kurzbeschreibung
Müller [Müller]	Untersucht wurden neun Berliner Schulen, die sich hinsichtlich des Gebäudetyps, der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen und der Lüftungsart unterscheiden. Während eines Zeitraums von einem Unterrichtstag bzw. einer Woche wurden stichprobenartig Messungen in ausgewählten Klassenräumen durchgeführt bezüglich Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, CO ₂ -Gehalt, Schalldruckpegel sowie Luftgeschwindigkeiten zur Beurteilung der Behaglichkeit. Betrachtet wurden sowohl Fensterlüftung als auch mechanische Lüftungsanlagen.
Bischof [Bebersdorf, Bischof1, Bischof2]	Zehn Erfurter Schulen wurden für diese Studie ausgewählt. Während der Studie wurden die Klassenräume während der Unterrichtsphase nicht gelüftet, sondern nur in der Pause. In allen Klassenräumen wurde jeweils für zwei Tage CO ₂ -Konzentrationen, relative Luftfeuchtigkeit und Operative Temperatur und zusätzlich in einigen Klassenräumen die Luftkeimzahl gemessen. Die Klassenräume wurden alle über Fensterlüftung belüftet.
Fromme [Fromme1, Fromme2]	Schulen aus München und dem Landkreis Dachau wurden für diese Studie ausgewählt. Während der Wintermessung wurden 46 Schulen (insgesamt 62 Raumtage) und der Sommermessung 38 Schulen näher betrachtet. Gemessen wurden CO ₂ -Gehalt, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und teilweise weitere luftchemische Parameter. Soweit bekannt, handelt es sich bei den betrachteten Lüftungssystemen um Fensterlüftung.
Lambertz [Lambertz]	Ein Berufskolleg in Aachen wurde in dieser Studie nach einer Renovierung näher betrachtet. Unterschiedliche Lüftungsanlagen konnten anhand Messungen von CO ₂ -Konzentration, Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, VOC-Gehalt und Energieverbrauch untereinander verglichen werden. Zu Vergleichszwecken wurde vor der Renovierungen Messungen mit Fensterlüftung durchgeführt.
Dietz/Sick [Dietz]	Die Grundschule Hohen Neuendorf wurde mit einer hybriden Lüftung (mechanische Grundlüftung in Kombination mit automatisch öffnbaren Fenstern und normalen Fenstern ergänzt um eine CO ₂ -Lüftungssampel) ausgestattet. In zwei ausgewählten Klassenräumen wurden detaillierte Parameter hinsichtlich Innenraumluftqualität (CO ₂ -Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Strahlungstemperatur, Klimadaten) aufgezeichnet.
Bolsius [Bolsius]	Beim Schulkomplex in Olbersdorf wurden nach energetischer Sanierung die einzelnen Sanierungsbausteine beurteilt. Die in Olbersdorf realisierte energieeffiziente Schullüftung bestand aus einer Zuluftführung über Zuluft-Kastenfenster in Verbindung mit einer CO ₂ -gesteuerten Abluftanlage. Für ausgewählte Klassenräume wurden die Größen CO ₂ -Konzentration, Temperatur, Beleuchtungsstärke und das Außenklima aufgezeichnet.
Wargocki [Wargocki]	In der dänischen Studie wurden zwei ventilatorgestützt gelüftete Klassenzimmer einer Gesamtschule (Schüleralter: 6-16 Jahre) näher betrachtet. In einem Blind-Doppel-Crossover-Test mit neuen und gebrauchten Luftfiltern sowie hohen und niedrigen Lüftungsraten wurde die Leistungsfähigkeit durch Tests, die Innenraumparameter (CO ₂ -Konzentration, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit,...) sowie über Fragebögen die Wahrnehmung dokumentiert. Die Randbedingungen sind für jeweils eine Woche festgelegt worden. Das Experiment wurde im Winter und im Sommer durchgeführt.
Lahrz [Lahrz]	Energetisch sanierte Berliner Schulen wurden während der Heizperiode näher bezüglich der Luftqualität betrachtet. Es wurden sowohl Klassenräume betrachtet, die mittels der Fenster frei belüftet worden sind als auch maschinell mit Raumlufttechnischen Anlagen ausgestattete Klassenräume. Parameter wie Kohlendioxid, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und diverse Staubfraktionen wurden für eine Schulwoche dokumentiert.
Birmili [Sinphonie]	Studie zur Überprüfung des UBA-Schulleitfadens „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamt (UBA) sowie des EU-Verbundvorhabens „Sinphonie“ (weitere Informationen liegen nicht vor, da keine Veröffentlichungen verfügbar sind)

Um über längere Zeiträume gemessene CO₂-Konzentrationen sinnvoll bewerten zu können, ist eine möglichst genaue Kenntnis der Unterrichtszeiten erforderlich. Für die Auswertung von Studien, bei denen die Unterrichtsstunden nicht bekannt sind, wird die Herangehensweise einer VBA-basierten Auswertung mit Hilfe von Makros in Excel beschrieben und angewendet.

Für den systematischen Vergleich von Messergebnissen wurde eine Reihe von Möglichkeiten zur graphischen Aufbereitung wie Carpet-Plots, Box-Plots und Streudiagramme untersucht. In der vorliegenden Studie selbst erfolgten die Auswertungen hauptsächlich mit Streudiagrammen für einzelne Unterrichtseinheiten und auch für einzelne Klassenräume, um eine etwaige größere Wichtung durch einzelne Studien zu vermeiden.

Beispielhafte Darstellung als Carpet-Plot (links) – Box-Plot (rechts oben) – Streudiagramm (rechts unten)

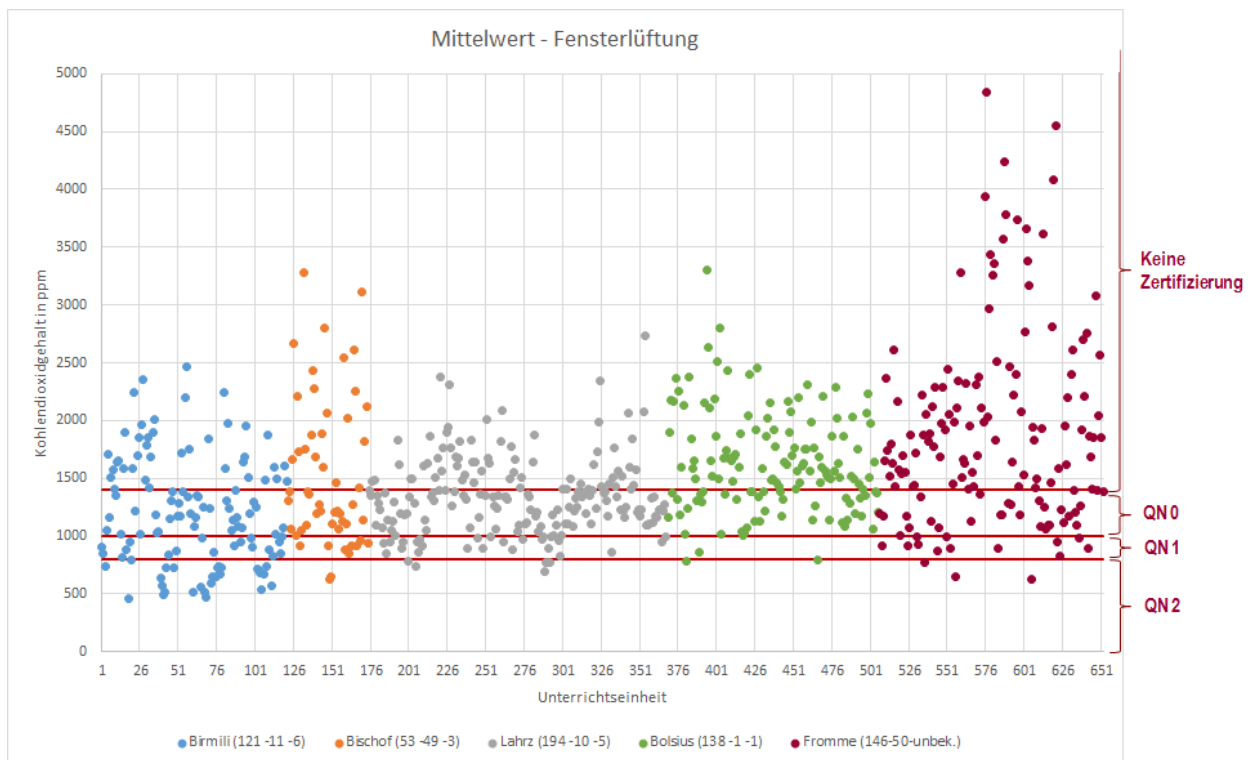


Im Rahmen dieser Studie lagen insgesamt Messungen der CO₂-Konzentration wie folgt vor:

- Freie Lüftung (5 Studien): 652 Unterrichtseinheiten in 121 Klassenräumen in mindestens 16 Schulen
- Hybride Lüftung (1 Studie): 375 Unterrichtseinheiten in 2 Klassenräumen in einer Schule
- Ventilatorgestützte Lüftung (5 Studien): 513 Unterrichtseinheiten in 38 Klassenräumen in 12 Schulen

Zu den einzelnen Lüftungskonzepten lassen sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Metastudie sowie aus den Veröffentlichungen zu den einzelnen Studien und aus der Teilnahme beim AIVC-Workshop folgende Empfehlungen ableiten:

Fensterlüftung

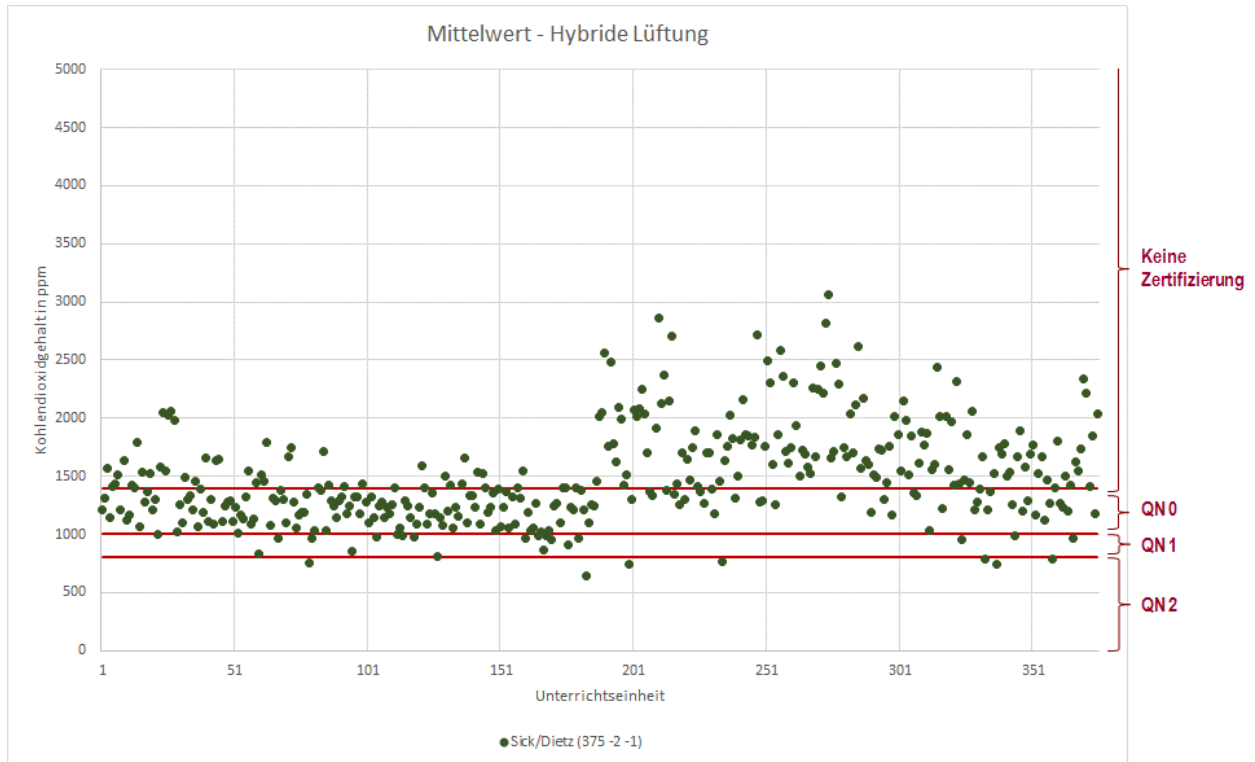


Streudiagramm des arithmetischen Mittelwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

- In ca. 16% der Unterrichtseinheiten erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2 und entspricht somit einer positiven BNB-Bewertung des Gebäudes und damit den Maßgaben der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm = 0 Punkte nach BNB / Nichteinhaltung der ASR) wird in 35% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 10% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 6% erreicht.
- Der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration hängt deutlich von der Tageszeit ab. In späteren Stunden sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass arithmetische Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können (1. und 2. Schulstunde mit 23% bzw. 21% < 1000 ppm vs. 6. und 7. Schulstunde mit 7% bzw. 3% < 1000 ppm).
- Eine klare Korrelation zwischen der CO₂-Konzentration und den in den Studien gemachten Angaben zum Lüftungsverhalten kann nicht nachgewiesen werden. So werden bei der Angabe „gekippte und geschlossene Fenster“ ähnliche Häufigkeiten von mittleren CO₂-Konzentrationen unter 1000 ppm (35% bzw. 40%) erreicht, während sich bei der Angabe „ganz geöffnete Fenster“ die Raumluftqualität im Mittel deutlich schlechter darstellt (nur 15% der Unterrichtseinheiten im arithmetischen Mittel < 1000 ppm). Ursächlich für die unklare Korrelation dürfte sein, dass in den Fragebögen die Dauer der Lüftungsvorgänge nicht erfasst worden ist, so dass der effektive Luftaustausch nicht mit den Angaben zum Lüftungsverhalten korreliert.

Hybride Lüftung

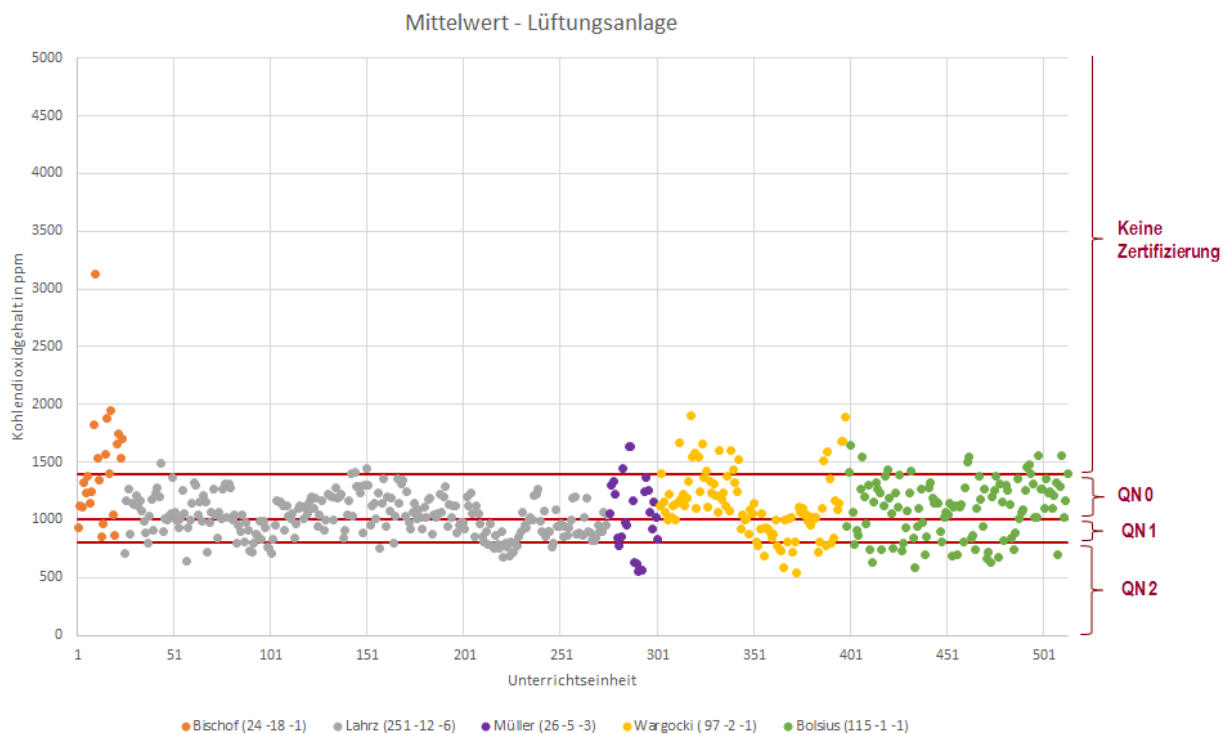
Im Rahmen dieser Studie wird unter hybrider Lüftung die Kombination aus ventilatorgestützter Lüftung, die für eine Grundlüftung ausgelegt wird, mit einer nutzerunabhängigen, automatischen Fensterlüftung, z.B. mit Stellmotoren an den Fenstern, verstanden.



Streudiagramm des arithmetischen Mittelwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

- In ca. 7% der Unterrichtseinheiten erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2 und entspricht somit einer positiven BNB-Bewertung des Gebäudes und damit den Maßgaben der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm = 0 Punkte nach BNB / Nichteinhaltung der ASR) wird in 42% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 5% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 2 % erreicht.
- Der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration hängt deutlich von der Tageszeit ab. In späteren Stunden sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass arithmetische Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können (1. Schulstunde mit 52% < 1000 ppm vs. 5. Schulstunde mit 4% < 1000 ppm). Der beobachtete Anstieg guter Raumluftqualität nach der 5. Unterrichtsstunde lässt sich wahrscheinlich auf die nachmittags geänderte Nutzung zurückführen. Typisch für Grundschulen sind dann auch bei Ganztagsangeboten kleinere Gruppen z.B. für AGs oder Hausaufgabenbetreuung.

Ventilatorgestützte Lüftung



Streudiagramm des arithmetischen Mittelwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

- In ca. 39% der Unterrichtseinheiten erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2 und lässt somit eine BNB-Zertifizierung des Gebäudes zu. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm = Ausschluss aus der Gebäudezertifizierung / Nichteinhaltung der ASR) wird in 53% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 27% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 12% erreicht.
- Für Klassenräumen wurden auf Basis der arithmetische Mittelwerte und der Maximalwerte der gemessenen CO₂-Konzentrationen statistische Kenngrößen (Median sowie 10. und 90. Perzentile) abgeleitet, wenn für mehrere Unterrichtseinheiten pro Klassenraum Messwerte vorlagen.

Eine vergleichende Übersicht der CO₂-Konzentrationen zeigt, dass mit einer Lüftungsanlage in 38% der insgesamt 513 betrachteten Unterrichtsstunden ein Unterrichtsstundenmittelwert von unter 1000 ppm eingehalten werden kann, unter 1500 ppm liegen 94%. Im Vergleich dazu liegt der arithmetische Mittelwert der Kohlendioxidkonzentration einer Unterrichtsstunde bei Fensterlüftung in 16% der insgesamt 652 betrachteten Unterrichtsstunden unter 1000 ppm und in 58% der Fälle unter 1500 ppm.

Unabhängig vom Lüftungskonzept kann auch eine Verringerung der Schülerzahlen bzw. eine Vergrößerung der Klassenräume, letztendlich also eine erhöhte Fläche pro Person, zu verringerten Kohlendioxidkonzentration in den Klassenräumen führen. Dieser Einfluss konnte aufgrund fehlender Angaben nicht systematisch über alle Studien untersucht werden, sondern nur punktuell für zwei Studien dargestellt werden.

Bei Fensterlüftung und bei hybrider Lüftung können arithmetische Mittelwerte der CO₂-Konzentration unter 1000 ppm am leichtesten in den frühen Unterrichtsstunden erreicht werden. In späteren Schulstunden ist eine niedrige CO₂-Konzentration zwingend an die Einhaltung bestimmter Randbedingungen, wie beispielsweise große Pause mit intensiver Querlüftung, ein längerer Zeitraum ohne Unterricht oder kleinere Klassenteiler gebunden.

Hybride Lüftungskonzepte kombinieren mechanische Lüftungsanlagen mit nutzerunabhängiger automatisierter Fensterlüftung (z.B. motorisierte Fensterflügel). Die mechanischen Lüftungsanlagen können kosten- und schalloptimiert für eine Grundlüftung sorgen und die automatisierte Fensterlüftung unterstützt diese Grundlüftung bei Lastspitzen.

Lüftungsanlagen sollten z.B. durch Auslegung nach DIN EN 13779 IDA 2 so konzipiert sein, dass kein Zusatzlüften während der Schulstunde erforderlich ist. Damit können organisatorische Einschränkungen des Unterrichts, Beeinträchtigungen der Behaglichkeit (Temperatur, Zugluftrisiko) und Schallbelästigungen durch Fensterlüftung vermieden werden. Durch die Optimierung der Regelung der ventilatorgestützten Lüftung kann eine Verbesserung der Innenraumluftqualität und eine Erhöhung der Akzeptanz erreicht werden.

Im aktuellen Bewertungssystem BNB für Schulgebäude erfolgt die Bewertung für den Kohlendioxidgehalt anhand von Anforderungen an den (arithmetischen) Mittelwert und an den Maximalwert einer Unterrichtseinheit über 45 Minuten. Zukünftig können folgende Erweiterungsmöglichkeiten erwogen werden:

1. Festlegung von Maximalwerten anhand des gleitenden Mittelwert über 5 Minuten
2. Festlegung von Mittelwerten anhand der zulässigen Häufigkeit der Kohlendioxidwerte pro Unterrichtseinheit über einen Grenzwert (mathematisch: Perzentil)
3. Festlegung einer kumulierten Grenzwertüberschreitung der CO₂-Konzentration in ppmh (pro Unterrichtseinheit, Unterrichtstag, Unterrichtswoche)
4. Erstellung und ggf. BNB-Zertifizierung eines (evtl. excelbasierten) Tools für Klassifizierung nach BNB-Bewertungssystem

Die Auswertung verdeutlicht, dass durch die unterschiedliche Zielsetzung der einzelnen Studien ein direkter Vergleich unter verschiedenen Studien kaum möglich ist. Für zukünftige Studien, insbesondere im Kontext zur Bewertung und Verbesserung des BNB, können Anforderungen an die Parameter einer „Idealstudie“ abgeleitet werden.

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass trotz der vielen bereits durchgeführten Untersuchungen noch viele Fragen offen bleiben bzw. nicht abschließend geklärt werden konnten. Diese offenen Fragstellungen sollten in Zukunft durch weitere Untersuchungen beantwortet werden. Solche zukünftige Untersuchungen zu diesem

Thema sollten sich an der hier definierten "Idealstudie" für BNB unter Beachtung der Mindestanforderungen an die zu dokumentierenden Angaben/Größen) orientieren.

Parameter einer „Idealstudie“

Allgemeine Parameter	
<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungssystem (Fensterlüftung, Lüftungsanlage, Hybride Lüftung) - Anzahl der Schulen - Schultyp (Grundschule, weiterführende Schulen) - Anzahl der Klassenräume (gleiche Anzahl pro Lüftungssystem) - Anzahl der Unterrichtseinheiten (gleiche Anzahl von Unterrichtseinheiten pro Klassenraum) - Raumbelagung (Protokoll) - Alter der Schüler (Klassenstufe) - Raumfläche und Raumvolumen - Unterrichtszeiten und Pausenzeiten - Messzeiträume (z.B. eine Woche im Sommer, Winter, Übergangszeit) Mindestvorgaben definieren - Messung der Außenluftverhältnisse am Standort (Wind, Temperatur, CO₂ usw.) - Kohlendioxidmessung im Klassenraum (im Minutentakt) - Protokollierung der Pausensituation - Unsicherheit Messtechnik, Automatisierung → Auswertung nicht unmittelbar nach Inbetriebnahme, erst wenn Fehler beseitigt sind, stabil laufende Systeme - Kalibrierungsgüte der Messtechnik - Messtechnik (Anordnung, Typ, Genauigkeit) - Komfortbetrachtung (Thermische Behaglichkeit, Schall usw.) als Messung und/oder Umfrage 	
zusätzlich bei Fensterlüftung	zusätzlich bei Lüftungsanlage
<ul style="list-style-type: none"> - Fensterquerschnitt (Fenstermaße, Flügelanzahl, Öffnungsmöglichkeit (Kipp, Dreh usw.)) - Lüftungsprotokolle mit Angabe zur Fensterstellung und Lüftungsdauer für die Unterrichtsstunden und die Pausen inkl. Angaben welche Fenster wie geöffnet werden - Art der Lüftung (einseitige oder Querlüftung) - Lüftungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungssysteminformationen (Betriebszeiten, Betriebsmodi, Kontaktschalter am Fenster, CO₂-Steuerung, Kombination mit automatischen Fensterflügeln usw.) - Luftvolumenstrom (Planung, Ist-Zustand) - Planungsgröße (CO₂, Temperatur, Volumenstrom usw.)
zusätzlich bei hybrider Lüftung	
Kombination aus aufgeführten Parametern in Fensterlüftung und Lüftungsanlage - geplante Luftvolumenströme (Anteile ventilatorgestützt und frei)	
Ergänzende (optionale) Empfehlungen	
<ul style="list-style-type: none"> - Schadstoffmessung im Klassenraum (Formaldehyd, Radon, Feinstaub usw.) (Feinstaub wird als Partikel Matter PM nach dem aerodynamischen Durchmesser 10 µm, 2,5 µm bzw. 1 µm mit PM10, PM2,5 und PM1klassifiziert) - Durchführung von Leistungstests 	

2 Abstract

For the further development of BNB (evaluation system for sustainable buildings) the meta study “Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung” (fundamentals and concept development for the analysis of practice-oriented ventilation concepts for mechanical or window ventilation) shows with the focus on Germany an evaluative overview of the current (published) state of research regarding to CO₂-concentration during lessons in schools.

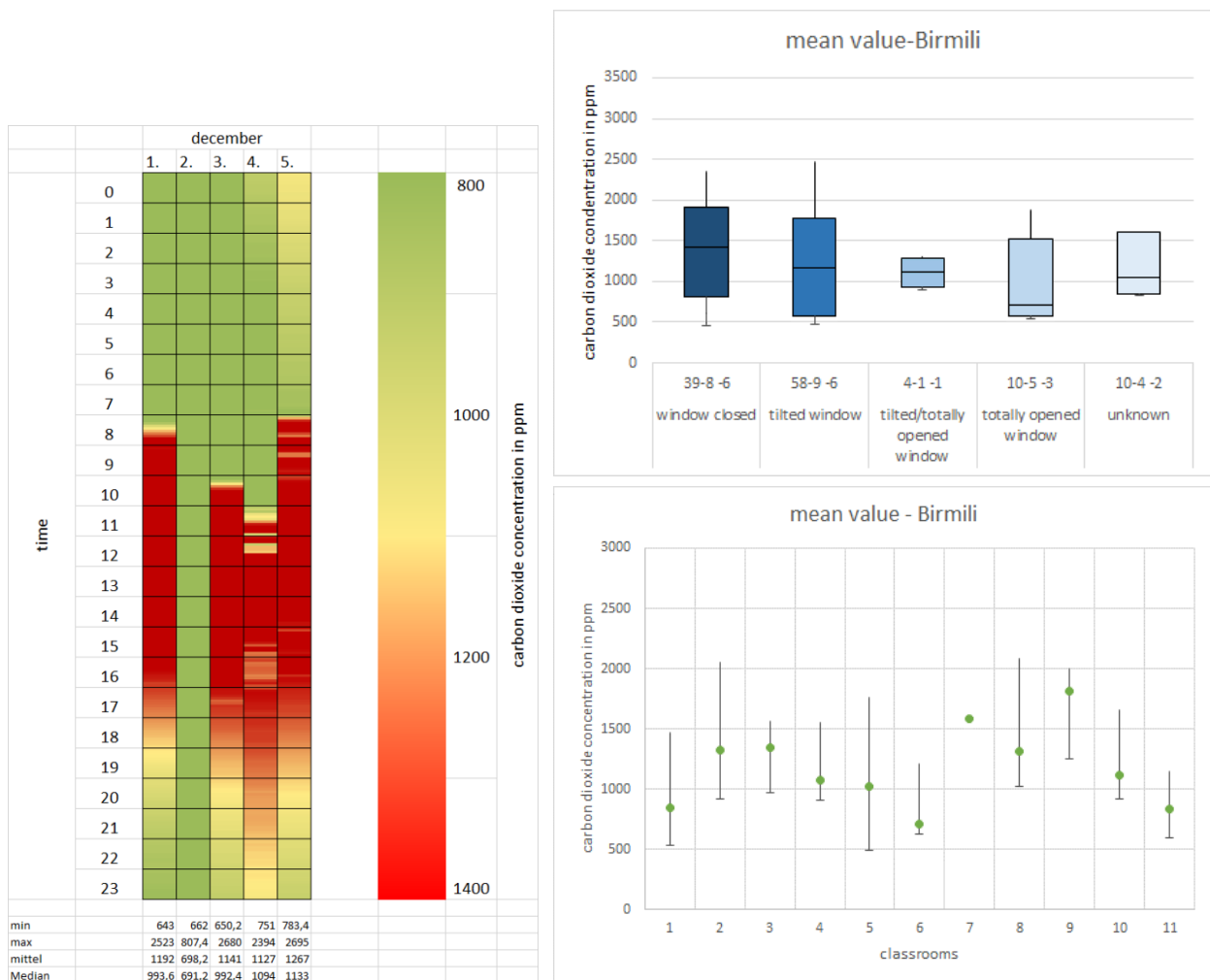
6 studies of the requested 15 studies could not be analysed, because no measurement values were available or no feedback was received. The raw data of the other 9 studies could be prepared according to a standard procedure.

Summary of the considered studies

Considered studies	Brief description
Müller [Müller]	9 schools in Berlin were examined. They were different regarding to type of building, implemented restructuring measures and ventilation concepts. For a period of one day of class respectively one week of class random measurements in selected classrooms were done with regard to indoor air temperature, relative humidity, CO ₂ -concentration, sound pressure level and air velocity. Window ventilation as well as mechanical ventilation were considered.
Bischof [Bebersdorf, Bischof1, Bischof2]	10 schools in Erfurt were selected for this study. During the study the classrooms where not ventilated during the lessons, but only in the breaks In all classrooms for two days CO ₂ -concentrations, relative humidity and operative temperature and additionally in some classrooms the airborne germ rate was measured. The classrooms were ventilated by window ventilation, shaft ventilation and mechanical ventilation systems.
Fromme [Fromme1, Fromme2]	Schools located in Munich and in the District of Dachau were chosen for this study. During the measurement in the winter 46 schools (in total 62 days) and during the measurement in the summer 38 schools have been more closely analysed. CO ₂ -concentration, relative humidity, temperature and sometimes further air chemistry parameters were measured. So far as this is known, the classrooms were ventilated by window ventilation.
Lambertz [Lambertz]	This study took a closer look at a vocational college in Aachen after renovation. Different mechanical ventilation systems were compared among each other by measuring the CO ₂ -concentration, temperature, relative humidity, VOC emissions and energy consumption. For comparative purposes measurements with window ventilation were done bevor the renovation started.
Dietz/Sick [Dietz]	The primary school Hohen Neuendorf has been equipped with a hybrid ventilation (mechanical ventilation for the basic ventilation in combination with automatically opening windows and normal windows with a “ventilation signal light”). In two selected classrooms detailed parameters with regard to indoor air quality (CO ₂ -concentration, relative humidity, air temperature, radiation temperature and climate data) were recorded.
Bolsius [Bolsius]	The individual elements of the rehabilitation were assessed after the energy rehabilitation of the school complex in Olbersdorf. The energy-efficient school ventilation consists of supply box-type windows (windows with framed grounds) in combination with a CO ₂ controlled exhaust ventilation system. For selected classrooms the CO ₂ -concentration, temperature, illuminance and outside climate were recorded.
Wargocki [Wargocki]	A Danish study took a closer look at two mechanically ventilated classrooms of a comprehensive school (age of pupils: 6 to 16 years). In a blind crossover design with new and soiled filters, high and low ventilation rates performance test, indoor air parameters (CO ₂ -concentration, temperature, relative humidity, etc.) and as well questionnaires were documented. The boundary conditions were defined for one week. The experiment was performed both in winter and in summer.
Lahrz [Lahrz]	A closer look at energetically rehabilitated schools in Berlin regarding the air quality during the heating period was taken in this study. Classrooms with window ventilation were considered as well as classrooms with mechanical ventilation. Parameters like carbon dioxide, temperature, relative humidity and diverse dust fractions were documented for a school week.
Birmili [Sinphonie]	Study to determine the „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ (Guideline for Indoor Air Hygiene in schools) of the Federal Environmental Agency (UBA) as well as the EU joint project “Sinphonie” (further information are not available, because no publications are available)

To evaluate CO₂-concentrations measured over a longer period usefully, it is necessary to know the school hours. Studies where the school hours remained unknown are analysed by a VBA-based evaluation. For a systematised comparison of measurement results a number of options to the graphical presentation like Carpet-Plots, Box-Plots and scatter diagrams were examined. In this study the evaluation was carried out mainly with scatter diagrams for individual lessons or individual classrooms to avoid possible increased weighting caused of individual studies.

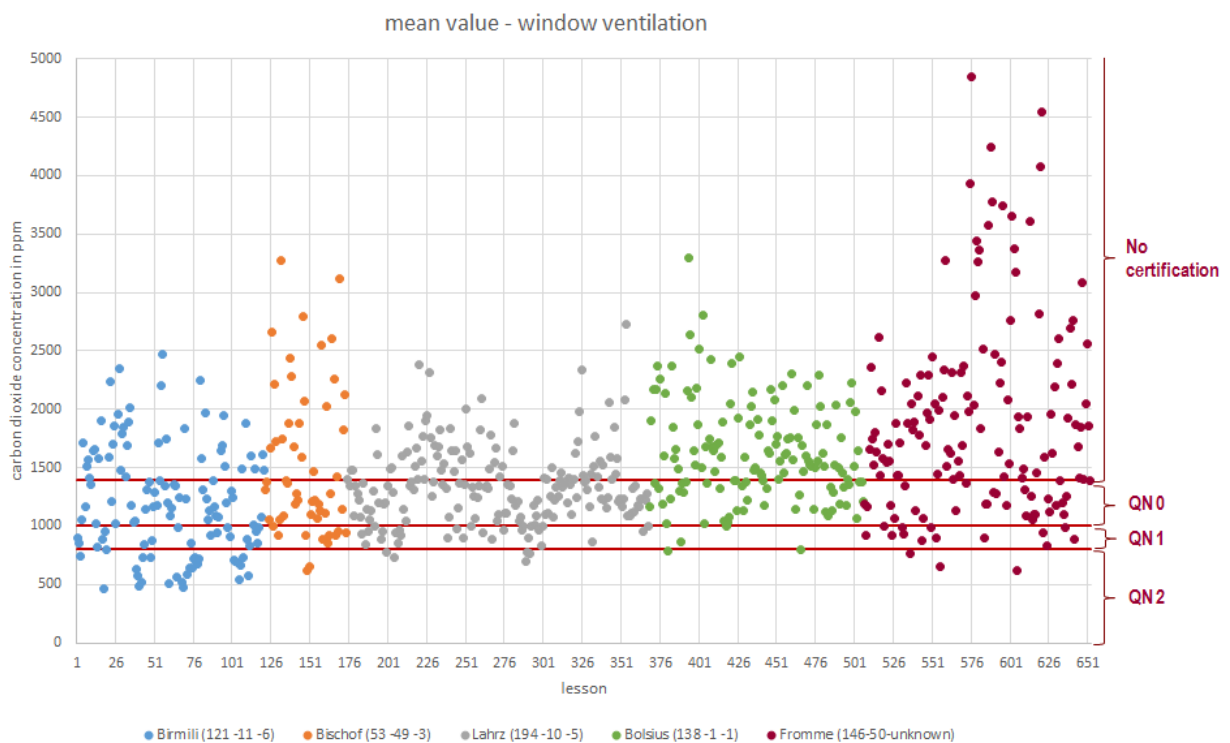
Exemplary presentation as Carpet-Plot (left) – Box-Plot (top right) – scatter diagram (on the bottom right)



In the framework of this study the following measurements of CO₂-concentration exist:

- Window ventilation (5 studies): 652 lessons in 121 classrooms in at least 16 schools
- Hybrid ventilation (1 study): 375 lessons in 2 classrooms in 1 school
- Mechanical ventilation (5 studies): 513 lessons in 38 classrooms in 12 schools.

The following recommendations can be concluded for the individual ventilation concept due to the findings of the meta study as well as of the publications on individual studies and the participation in the AIVC-Workshop:

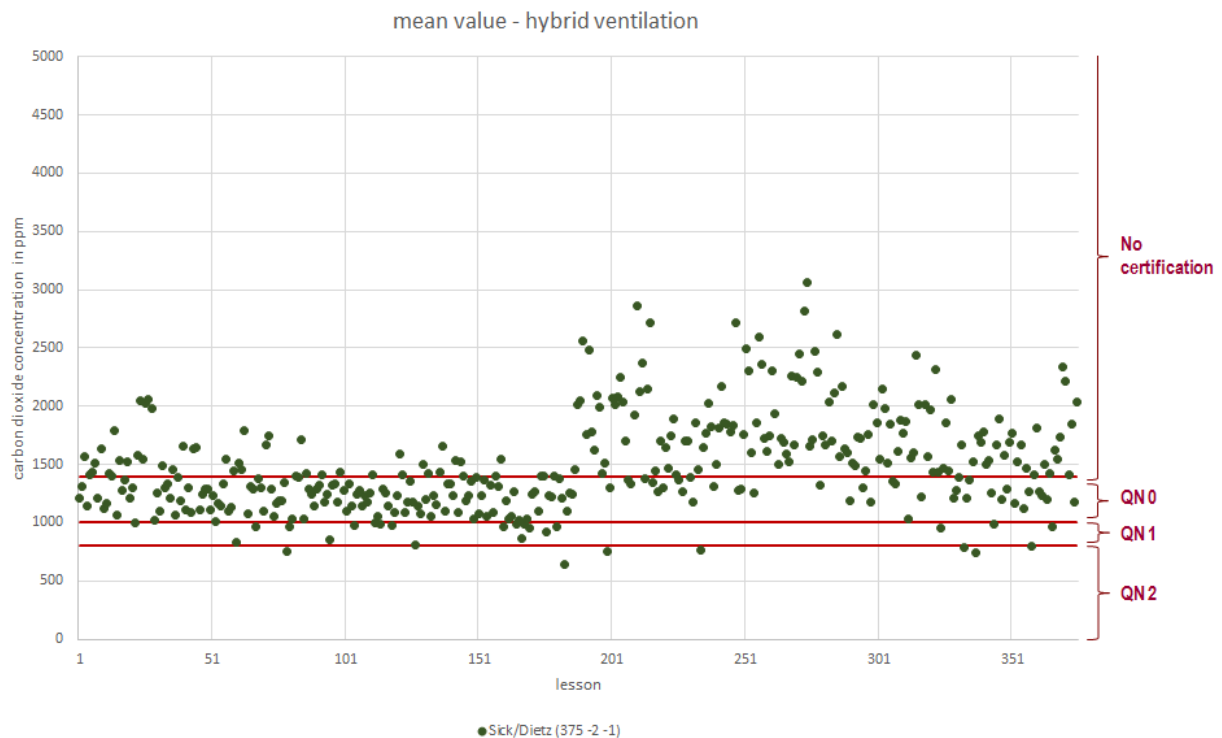
Window ventilation

Scatter diagram of the arithmetic mean for window ventilation of the considered studies (lessons)

- 16 % of the lessons have an arithmetic mean of the CO₂-concentration that meets the quality level 1 or 2 of BNB and comply with a positive BNB evaluation of the building and with the workplace regulation ASR A3.6. 35 % of the lessons meet the quality level QN 0 (1000 ppm to 1400 ppm = 0 points according to BNB / non-compliance with ASR (workplace regulations)), 10 % quality level QN 1 (800 to 1000 ppm) and 6% quality level QN 2 (<800 ppm).
- The arithmetic mean of the CO₂-concentration depends clearly on time. In later hours of the day the probability that the arithmetic mean is under 1000ppm decreases. (1. and 2. lesson with 23% and 21% < 1000 ppm vs. 6. and 7. lesson with 7% respectively 3% < 1000 ppm).
- A clear dependence of the CO₂-concentration on the ventilation habits could not be shown. Lessons with tilted windows and closed windows lead to similar frequency of mean CO₂-concentrations under 1000 ppm (35 % respectively 40 %), whereas full opened windows lead to a decreased room air quality (only 15 % of lessons with arithmetic mean < 1000 ppm). Causal should be that in the questionnaires the duration of ventilation processes were not documented.

Hybrid ventilation

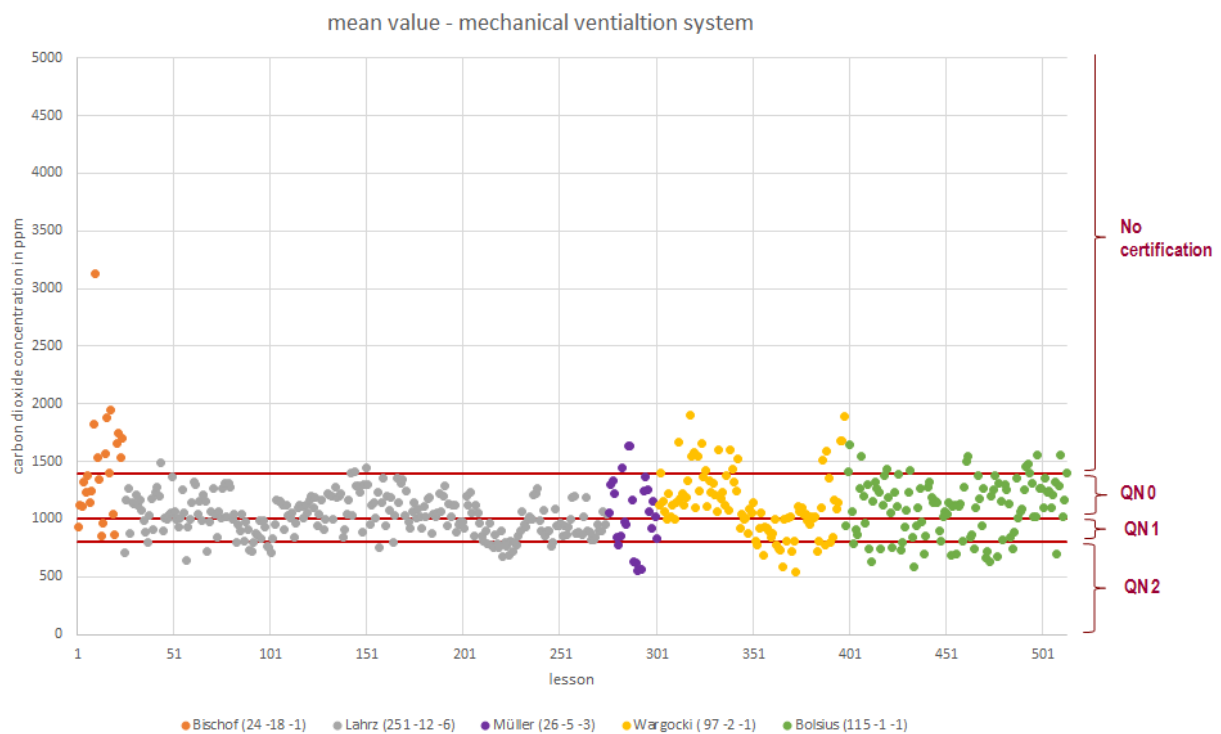
In the framework of this study hybrid ventilation is the combination of mechanical ventilation which is designed for the basic ventilation and an user-independent automatically window ventilation for example with servomotors at the windows.



Scatter diagram of the arithmetic mean for hybrid ventilation of the considered studies (lessons)

- 7 % of the lessons have an arithmetic mean of the CO₂-concentration that meets the quality level 1 or 2 of BNB and comply with a positive BNB evaluation of the building and with the workplace regulation ASR A3.6. 42 % of the lessons meet the quality level QN 0 (1000 ppm to 1400 ppm = 0 points according to BNB / non-compliance with ASR (workplace regulations)), 5 % quality level QN 1 (800 to 1000 ppm) and 2% quality level QN 2 (<800 ppm).
- The arithmetic mean of the CO₂-concentration depends clearly on time. In later hours of the day the probability that the arithmetic mean is under 1000ppm decreases. (1. lesson with 52 % < 1000 ppm vs. 5. lesson with 4 % < 1000 ppm). The observed increase in the room air quality after the 5. lesson can be probably traced back to a change in use in the afternoon. Characteristic of elementary schools are also whole-day classes in smaller groups for example joint ventures or homework done under supervision.

Mechanical ventilation



Scatter diagram of the arithmetic mean for mechanical ventilation of the considered studies (lessons)

- 39 % of the lessons have an arithmetic mean of the CO₂-concentration that meets the quality level 1 or 2 of BNB and earns a certification of the building according to BNB. 53 % of the lessons meet the quality level QN 0 (1000 ppm to 1400 ppm = exclusion from building certification according to BNB / non-compliance with ASR (workplace regulations)), 27 % quality level QN 1 (800 to 1000 ppm) and 12% quality level QN 2 (<800 ppm).
- Based on arithmetic mean values and maximum values of the measured CO₂-concentration statistical parameters (median as well as 10. and 90. percentile) were determined for classrooms if there are measurement values for more than one lesson per classroom.

A comparative overview of the CO₂-concentrations shows that with mechanical ventilation 38% in the total of 513 considered lessons meet an average value under 1000ppm, respectively under 1500ppm are 94% of the lessons. The arithmetic mean of the CO₂-concentration of a lesson with window ventilation is under 1000ppm in 16% of cases in the total of 652 considered lessons, 58% meet under 1500 ppm.

Regardless of the ventilation concept a reduction of number of students respectively an increase of classrooms, finally a larger area per person, results in lower CO₂-concentrations in classrooms.

Arithmetic mean values of the CO₂-concentration under 1000 ppm can be met for window ventilation and hybrid ventilation easiest in the early lessons. In the later lessons of the day a lower CO₂-concentration can only be reached taking into account certain boundary conditions like for example long break with intensive cross ventilation, a longer duration without teaching or smaller students per class.

Hybrid ventilation concepts combine mechanical ventilation with user-independent automatically window ventilation (for example motorised casements). The mechanical ventilation system provide a cost- and sound-optimised basic ventilation. This basic ventilation is supported by the automatically window ventilation in case of peak loads.

Ventilation systems should be designed for example according to DIN EN 13779 IDA 2, so no additional ventilation during the lesson is necessary. Organisational restrictions, discomfort of the persons in the room (temperature, draft risk) and disturbance through sound by window ventilation could be avoided with such a design. By optimising the control and operation mode of mechanical ventilation an improvement of the indoor air quality and an increase of acceptance can be reached.

In the current evaluation system BNB for school buildings the evaluation of the CO₂-concentration is made on the basis of requirements regarding to the (arithmetic) mean value and the maximum value of a lesson of 45 minutes. In future, the following extension options could be considered:

- Determination of maximum values based on the moving average over 5 minutes
- Determination of mean values based on the acceptable frequency of CO₂-values per lessons over a limit value (mathematical: percentile)
- Determination of a cumulative CO₂-exposure in ppmh (per lesson, school day, school week)
- Creation and if necessary BNB certification of a tool to classify according to BNB evaluation system

The analysis shows that caused by the different aims of the individual studies a direct comparison between different studies is hardly possible. For future studies, especially in the context of the evaluation and optimization of the BNB, the requirements for the parameters of an "ideal study" can be derived.

The research project shows that although so many different studies were implemented many questions are still open respectively have not been finally clarified yet. Answering these open questions should be tried in future studies. Such future studies regarding this subject should be oriented towards the defined "ideal study" taking into consideration minimum requirements for the documented information/factors.

Parameter of the „ideal study“

General parameters	
<ul style="list-style-type: none"> - Ventilation system (window ventilation, mechanical ventilation, hybrid ventilation) - Number of schools - Type of school (primary school, secondary school) - Number of classrooms (same number of ventilation system) - Number of lessons (same number of lessons per classroom) - Room occupancy (protocol) - Age of pupils (class level) - Area and volume of the classroom - Lesson and break time - Measurement period (for example one week in summer, winter, transition period) define minimum standards - Measurement of outdoor air conditions where the school is located (wind, temperature, CO₂, etc.) - Measurement of carbon dioxide in classrooms (one-minute interval) - Logging of the situation in the breaks - Uncertainty of the measurement technique, automation → Analysis not immediately after the commissioning, after all errors have been eliminated, stable running system - Calibration of the measurement technique - Measurement technique (arrangement, type, precision) - Comfort (thermal comfort, sound...) as measurement or/and questionnaire 	
Additionally, with window ventilation	Additionally, with mechanical ventilation system
<ul style="list-style-type: none"> - Window profile (dimensions, number of casement, opening options [bottom hung, side-hung]) - documentation of ventilation with information about window position and duration of the ventilation for the lessons and the breaks including information which window is opened - Kind of ventilation (one-sided or cross ventilation) - Ventilation concept 	<ul style="list-style-type: none"> - Information of the ventilation system (operating period, operating mode, contact switches at the windows, CO₂-control, combination of automatically casements etc.) - Volume flow rate (development, actual state) - Planned size (CO₂, temperature, volume flow etc.)
Additionally, with hybrid ventilation	
Combination of the listed parameters of window ventilation and mechanical ventilation system - planned volume flow rates (shares mechanical ventilation and window ventilation)	
Supplementary (optional) recommendations	
<ul style="list-style-type: none"> - Measurement of pollutants in classrooms (formaldehyde, radon, particulate matter etc.) (particulate matter PM based on the aerodynamic diameter 10 µm, 2,5 µm respectively 1 µm with PM10, PM2,5 and PM1 classified) - Performance tests 	

3 Einführung und Hintergrund

Um den zukünftigen Anforderungen an ganzheitlich optimierte Gebäude gerecht zu werden, hat das Bundesbauministerium für Bundesgebäude den Leitfaden Nachhaltiges Bauen und im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) entwickelt. Seit Oktober 2013 ist er für Bundesbauten verpflichtend und wurde 2015 (teilweise) überarbeitet und weiterentwickelt. Hinsichtlich der Innenraumlufthygiene werden insbesondere Verunreinigungen der Innenraumluft durch Schadstoffe aus Bauprodukten und durch Kohlendioxidemissionen der Raumnutzer betrachtet. Derzeit erfolgt die Bewertung des Punkts Innenraumhygiene im BNB-Leitfaden Abschnitt 3.1.3 zu gleichen Anteilen (jeweils maximal 50 von 100 Punkten) anhand der VOC-Konzentration und anhand der CO₂-Konzentration.

Beim Neubau von Büro- und Unterrichtsgebäuden ist nach BNB für eine hygienisch unbedenkliche Raumluftqualität eine maximale CO₂-Konzentration von 1.000 ppm im Mittel eines Zeitintervalls und 1.400 ppm als Maximalwert einzuhalten. Für die Rahmen dieser Untersuchung im Fokus stehenden Unterrichtsräume gilt dabei eine Unterrichtseinheit von 45 Minuten als maßgebliches Zeitintervall. Für einen angemessen niedrigen Kohlendioxidgehalt in der Raumluft ist ein ausreichender Luftwechsel bzw. Außenluftvolumenstrom erforderlich, welcher seinerseits durch tragfähige Lüftungskonzepte sicherzustellen ist.

Die Punktebewertung bzw. Einstufung hinsichtlich CO₂ erfolgt derzeit nur anhand des personenbezogenen Außenluftvolumenstroms, welcher zu belegen ist z.B. durch:

- Messung nach DIN EN 12599 oder alternativ Berechnung nach DIN EN 15242 und zusätzlichen stichprobenartigen Messungen in unterschiedlichen Raumtypen bei oder mechanischer Lüftung
- Berechnungsvorschrift für die vorhandenen personenbezogenen Außenluftvolumenströme für Aufenthaltsräume mit Fensterlüftung gemäß DIN EN 15242

Für den Fall der Fensterlüftung ist es empfehlenswert Kontrollinstrumente wie eine sensorgesteuerte Lüftungsampel (CO₂-Ampel) einzusetzen.

Fachdiskussionen und Praxiserfahrungen zeigen, dass insbesondere bei Räumen mit einer hohen Personenanzahl Probleme hinsichtlich des CO₂-Gehalts in der Innenraumluft und ggf. des thermischen Komforts aufgrund von nicht optimaler Raumlüftung bestehen. Das betrifft insbesondere die reine Fensterlüftung, aber auch die mechanische Lüftung oder die Kombination aus Beidem. Derzeit liefert die Normung Empfehlungen für personenbezogene Außenluftvolumenströme, die jedoch nicht alle erforderlichen Parameter für die Wirksamkeit der Lüftung angemessen berücksichtigt.

Das auch international ähnliche Problemstellungen diskutiert werden, zeigte der am 14. und 15. März 2017 vom Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) in Brüssel ausgerichtete Workshop zum Thema Innenraumluftqualität. Die ca. 65 Teilnehmer aus 14 Ländern kamen überwiegend aus Europa (u. a. Niederlande, Belgien, Frankreich, Großbritannien, Schweden, Dänemark, Irland, Spanien, Rumänien und Deutschland), aber auch aus der USA, Neuseeland und Südkorea. Die meist mit lüftungstechnischem oder bautechnischem

Hintergrund (teilweise Hygieniker) teilnehmenden Workshop-Besucher waren überwiegend von Universitäten oder auch Vertreter von Behörden und Normungsinstitutionen und nur vereinzelt Hersteller.

Ziel des Workshops war es, die Vor- und Nachteile von leistungsbasierten Ansätzen zu identifizieren und Größen, die für die Bewertung der Innenraumluftqualität herangezogen werden können, zu benennen und deren Anwendung in Normen und Verordnungen zu diskutieren.

Die Projektbearbeiter dieser Studie waren mit einer Präsentation „Suitable ventilation in schools – mechanical or natural?“ auf dem Workshop vertreten und zeigten erste Ergebnisse aus der Projektbearbeitung und regten die Teilnehmer zu einer allgemeinen Diskussion über Schullüftung in den unterschiedlichen Ländern an. Im Ergebnis dieser Diskussion zeigte sich, dass im Bestand ganz überwiegend bzw. ausschließlich freie Lüftung in Schulgebäuden vorliegt (Äußerungen aus Frankreich, Niederlande, Belgien, Rumänien, USA). Schweden bildet mit mechanischen Lüftungen in Schul-Bestands-Gebäuden eindeutig eine Ausnahme, bedingt durch das vorherrschende Außenklima (kalte Winter, milde Sommer). Im Neubau auf dem Gebiet der Schulgebäude verschiebt sich das Verhältnis vermehrt hin zu mechanischen oder hybriden (Frankreich, Niederlande, Belgien, USA) sowie mechanischen Lüftungsanlagen mit WRG (Schweden). Lediglich Rumänien baut aus wirtschaftlichen Gründen auch im Neubau auf freie Lüftung.

Obwohl die Hauptthemen des Workshops nicht die Schullüftung betrafen und der Fokus eher auf Themen wie Faktoren mit Einfluss auf die Innenraumluftqualitätsbewertung; Kohlendioxid als Innenraumschadstoff; Potenzial und Grenzen kohlendioxidbasierter Kennwerte; Gesundheitsschäden; wahrgenommene Luftqualität; Mischverhalten von Luft und Schadstoffverteilung in einem Raum; Potenzial und Grenzen kombinierter Kennwerte; Definition und Nutzen von Ratingverfahren; „Smart Ventilation“, Hemmnisse für leistungsbasierte Standards lag, konnten dennoch auch für die Schullüftung interessante Diskussionen und Vorschläge gesammelt werden:

- Bewertung von Kurzzeit- vs. Langzeiteffekten verschiedener Schadstoffe unter Berücksichtigung von Maximal- und Mittelwerten auf die Gesundheit – Abadie, Frankreich
- Empfundene Luftqualität (olf, decipol) nicht als alleiniger Maßstab für IAQ geeignet – Wargocki, Dänemark
- mg/m^3 statt ppm als geeignete Einheit ($1800 \text{ mg}/\text{m}^3 = 1000 \text{ ppm}$) – Persily, USA (von weiteren Vortragenden bzw. in der Diskussion nicht gestützt)
- kein Zusammenhang zwischen Gesundheit und CO_2 -Konzentration – Persily, USA
- in 31 Green-Building-Programmen weltweit beträgt die Wichtung der Indoor Air Quality (IAQ) 7,5% mit Formaldehyd, anderen VOCs und CO_2 als häufigste Belastungen - Teichman, USA
- zur Bewertung von IAQ sind Messungen unter verschiedenen Betriebsbedingungen, Erfassung der Belegungsdichte und des Aktivitätsgrads sowie Bewertung des Gefährdungspotenzials einzelner Schadstoffe durch Vergleich mit Grenzwerten o.ä. erforderlich - Teichman, USA

- „More uniform studies in buildings are needed“- Teichman, USA
- International große Unterschiede (Faktor 4) bei den Anforderungen an Luftvolumenströme, fast alle Anforderungen basieren auf Geruch (CO₂ als Indikator) oder Feuchte – Borsboom, Niederlande
- Lüftungseffektivität zur Bewertung der Lüftungswirksamkeit substantiell – Loomans, Niederlande
- Beschreibung IAQ mit einem Kennwert ohne Nutzereinfluss (Gebäudevergleichbarkeit) und Skalierung vergleichbar mit Energie-Bandtacho – Walker, USA
- Schullüftung in Rumänien momentan getrieben durch Radon-Thematik, nur freie Lüftung finanziell darstellbar – Catalina, Rumänien
- Smart ventilation als Trend (bedarfsgeführte Lüftung + mögliche Nutzereingriffe) – Guyot, Frankreich
- in Frankreich, Spanien, Niederlande für Wohngebäude kumulative (integrale) Bewertung der CO₂-Konzentration in ppm*h pro Betrachtungszeitraum und pro Raum oder Person mit Vorgabe von Grenzwerten – Guyot, Frankreich

Zusammenfassend hat sich während des Workshops gezeigt, dass sich die Beurteilung von Innenraumluftqualität in Abhängigkeit von Kohlendioxid als Bewertungskenngröße in zumindest bei den im Workshop vertretenden Ländern bewährt hat. Eine Aussage zu den Grenzwerten ist allerdings schwierig und nicht eindeutig festlegbar (großer Bereich). Alle Länder kämpfen mit den gleichen Schwierigkeiten hinsichtlich Schullüftung (Kosten, Thermische Behaglichkeit, Schall, Akzeptanz,...). Generell geht ein Trend in den Workshop-Teilnehmer-Ländern bei den Schul-Neubauten zu hybriden bedarfsgeführten Lüftungsanlagen, wenn die finanzielle Situation nicht eingeschränkt ist. Neue Bewertungsansätze wie z.B. kumulative (integrale) Bewertung von CO₂-Konzentrationen in ppm*h kommen vermehrt in Wohngebäuden (Frankreich, Spanien, Niederlande) vor. Eine Übertragung dieses Ansatzes für Schulgebäude ist denkbar und sollte auch für das BNB näher betrachtet werden/in Erwägung gezogen werden.

Ziel des Forschungsprojektes ist die Erarbeitung von Grundlagen und Konzepten, um praxisbezogene Untersuchungen zu erfolgreich realisierten Lüftungskonzepten für unterschiedliche Fallbeispiele und Rahmenbedingungen durchführen zu können. Hierfür sollen zunächst verfügbare Untersuchungen und Messergebnisse ausgewählter Projekte ermittelt und nach Verwendbarkeit hinsichtlich von CO₂-Konzentrationsverläufen bei verschiedenen Raumvolumina, Personenanzahlen und Außenluftvolumenströmen sowie unterschiedlichen Parametern der Außenluft und Lüftungsszenarien analysiert werden.

Aus dieser Betrachtung sollen die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Lüftungskonzepte und Raumkonstellationen sowie die Ableitung eines Vorschlags für einen fundierten und tragfähigen Bewertungsansatz im BNB für Räume mit hohen Belegungsdichten ermöglichen, sofern die verfügbaren Daten solche Aussagen zulassen. Anderenfalls sind im Ergebnis des Forschungsprojektes Vorschläge für die Vorgehensweise und das Konzept für ein Nachfolgeprojekt zu erarbeiten.

4 Methodik der Datenerhebung

4.1 Literaturrecherche und Studienauswahl

Das Forschungsprojekt wird als Meta-Studie konzipiert, die auf bereits durchgeführte Daten von Studien zurückgreift, ohne selbst Messungen durchzuführen. Aus einer Vielzahl von in der einschlägigen Fach- und Forschungsliteratur vorgestellten Studien aus dem überwiegend deutschsprachigen Raum sind für das Forschungsprojekt 15 Studien zur näheren Betrachtung ausgewählt worden, die eine CO₂-Messung in Klassenräumen bei realem Unterrichtsbetrieb - im günstigsten Fall über einen längeren Zeitraum – vorweisen (Tabelle 1). Bei der Auswahl geeigneter Studien ist durch die Autoren und den Auftraggeber auch darauf geachtet worden, dass möglichst detaillierte Angaben zur Schülerzahl, zur Raumgeometrie und zum Lüftungssystem vorlagen und die Stichprobe die Vorgaben im Forschungsprojekt (ca. 30 bis 50 Objekte mit möglichst großer Bandbreite an Lüftungssystemen) erfüllt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der ausgewählten Studien

Angefragte Studien	Kurzbeschreibung:
Müller [Müller]	Untersucht wurden neun Berliner Schulen, die sich hinsichtlich des Gebäudetyps, der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen und der Lüftungsart unterscheiden. Während eines Zeitraums von einem Unterrichtstag bzw. einer Woche wurden stichprobenartig Messungen in ausgewählten Klassenräumen durchgeführt bezüglich Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, CO ₂ -Gehalt, Schalldruckpegel sowie Luftgeschwindigkeiten zur Beurteilung der Behaglichkeit. Betrachtet wurden sowohl Fensterlüftung als auch mechanische Lüftungsanlagen.
Bischof [Bebersdorf, Bischof1, Bischof2]	Zehn Erfurter Schulen wurden für diese Studie ausgewählt. Während der Studie wurden die Klassenräume während der Unterrichtsphase nicht gelüftet, sondern nur in der Pause. In allen Klassenräumen wurde jeweils für zwei Tage CO ₂ -Konzentrationen, relative Luftfeuchtigkeit und Operative Temperatur und zusätzlich in einigen Klassenräumen die Luftkeimzahl gemessen. Die Klassenräume wurden alle über Fensterlüftung belüftet.
Fromme [Fromme1, Fromme2]	Schulen aus München und dem Landkreis Dachau wurden für diese Studie ausgewählt. Während der Wintermessung wurden 46 Schulen und der Sommermessung 38 Schulen näher betrachtet. Gemessen wurden CO ₂ -Gehalt, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und weitere chemische Parameter. Die betrachteten Lüftungssysteme sind nicht weiter spezifiziert.
Hellwig [Hellwig1]	Die Studie untersuchte den Einfluss des Fensteröffnungsverhaltens der Nutzer auf die raumklimatischen Bedingungen in Klassenräumen in zwei Schulen. Gemessen wurde Innentemperatur, Kohlendioxidgehalt sowie außenklimatische Parameter. Außerdem wurde in einer Schule die Fensteröffnungszeit erfasst.
Grams [Grams1, Grams2]	Im Rahmen der Studie wurde an sieben niedersächsischen Schulen CO ₂ -Gehalt, Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit in Unterrichtsräumen gemessen. Die meisten Klassenräume wurden durch Fensterlüftung belüftet, zwei jedoch mit mechanischer Lüftungsanlage.
Steiger [Steiger1, Steiger2, Hellwig2]	Nach Begehung von mehreren Klassenräumen in mehreren Schulen wurde auf Grundlage der gesammelten Daten ein Testgebäude mit zwei Testklassenräumen gebaut. In diesen Testklassenräumen wurde durch 24 installierte Dummies die Wärmeabgabe und CO ₂ -Abgabe von realen Personen simuliert und Untersuchungen zu unterschiedlichen Fensterstellungen zur Belüftung des Raumes durchgeführt.
Gremli [Gremli]	Die österreichische Studie untersuchte 16 verschiedenen Schulen und Kindergärten mit ventilatorgestützten Lüftungssystemen. Erfasst wurden CO ₂ -Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur sowie der VOC-Gehalt. Über Fragebögen wurde zusätzlich die Akzeptanz der mechanischen Lüftungsanlagen ermittelt.
Heinss [Heinss]	Im Schweizer Kanton Aargau wurde in sechs Schulen, davon drei mit Fensterlüftung und drei mit mechanischer Lüftungsanlage, kontinuierlich Messungen bezüglich CO ₂ -Konzentration, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit über mindestens eine Woche durchgeführt. Zusätzlich wurde die Feinstaubkonzentration und die Gesamtkeimzahl der Außenluft und der Zuluft dokumentiert.

Angefragte Studien	Kurzbeschreibung:
Lambertz [Lambertz]	Ein Berufskolleg in Aachen wurde in dieser Studie nach einer Renovierung näher betrachtet. Unterschiedliche Lüftungsanlagen konnten anhand Messungen von CO ₂ -Konzentration, Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, VOC-Gehalt und Energieverbrauch untereinander verglichen werden. Zu Vergleichszwecken wurde vor der Renovierungen Messungen mit Fensterlüftung durchgeführt.
Tappler [Tappler]	Die österreichische Studie untersuchte in neun Schulen den Einfluss der Innenraumluft auf die Gesundheit von Kindern. Für die betrachteten Klassenräume wurden gasförmige und partikelgebundene Luftschadstoffe im Hausstaub, Feinstaub und in der Luft sowie die CO ₂ -Konzentration analysiert.
Dietz/Sick [Dietz]	Die Grundschule Hohen Neuendorf wurde mit einer hybriden Lüftung (mechanische Grundlüftung in Kombination mit automatisch öffnbaren Fenstern und normalen Fenstern ergänzt um eine CO ₂ -Lüftungsampel) ausgestattet. In zwei ausgewählten Klassenräumen wurden detaillierte Parameter hinsichtlich Innenraumluftqualität (CO ₂ -Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Strahlungstemperatur, Klimadaten) aufgezeichnet.
Bolsius [Bolsius]	Beim Schulkomplex in Olbersdorf wurden nach energetischer Sanierung die einzelnen Sanierungsbausteine beurteilt. Die in Olbersdorf realisierte energieeffiziente Schullüftung bestand aus einer Zuluftführung über Zuluft-Kastenfenster in Verbindung mit einer CO ₂ -gesteuerten Abluftanlage. Für ausgewählte Klassenräume wurden die Größen CO ₂ -Konzentration, Temperatur, Beleuchtungsstärke und das Außenklima aufgezeichnet.
Wargocki [Wargocki]	In der dänischen Studie wurden zwei ventilatorgestützt gelüftete Klassenzimmer einer Gesamtschule (Schüleralter: 6-16 Jahre) näher betrachtet. In einem Blind-Doppel-Crossover-Test mit neuen und gebrauchten Luftfiltern sowie hohen und niedrigen Lüftungsraten wurde die Leistungsfähigkeit durch Tests, die Innenraumparameter (CO ₂ -Konzentration, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit,...) sowie über Fragebögen die Wahrnehmung dokumentiert. Die Randbedingungen sind für jeweils eine Woche festgelegt worden. Das Experiment wurde im Winter und im Sommer durchgeführt.
Lahrz [Lahrz]	Energetisch sanierte Berliner Schulen wurden während der Heizperiode näher bezüglich der Luftqualität betrachtet. Es wurden sowohl Klassenräume betrachtet, die mittels der Fenster frei belüftet worden sind als auch maschinell mit Raumluftechnischen Anlagen ausgestattete Klassenräume. Parameter wie Kohlendioxid, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und diverse Staubfraktionen wurden für eine Schulwoche dokumentiert.
Birmili [Sinphonie]	Studie zur Überprüfung des UBA-Schulleitfadens „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamt (UBA) sowie des EU-Verbundvorhabens „Sinphonie“ (weitere Informationen liegen nicht vor, da keine Veröffentlichungen verfügbar sind)

4.2 Fragebogen und Anschreiben

In einem zweiten Schritt ist die Vorgehensweise zur Datenerhebung konzipiert worden. Nach Festlegung der im Rahmen dieser Studie benötigten Daten und der Bestimmung der benötigten Anzahl an unterschiedlichen Räumen und Gebäuden ist ein Formular zur Datenerhebung erstellt worden. Dieser Fragebogen (gekürzter Fragebogen siehe Anhang A) beinhaltet alle Parameter, die für die Datenanalyse benötigt werden. Der erarbeitete Fragebogen wurde letztendlich wegen seines großen Umfangs und der Komplexität nicht zur Datenerhebung genutzt, da den angeschriebenen Beteiligten der ursprünglichen Studien nicht noch zusätzlich Hemmnisse, die die Beteiligung und die Zurverfügungstellung der Rohdaten hätten gefährden können, auferlegt werden sollten.

Die Datenerhebung erfolgte letztendlich mit einem Anschreiben und der Bitte um Bereitstellung von vorhandenen Daten zur Erfassung und Analyse im Rahmen einer Meta-Studie des BBSR.

„Sehr geehrte Damen und Herren,

wir bitten Sie im Namen unseres Auftraggebers des BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung), um freundliche Unterstützung für ein Forschungsvorhaben des Bundes, in dem Messdaten zu CO₂-Konzentrationen in Klassenzimmern analysiert werden sollen. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Lüftungskonzepte sowie einem fundierten Bewertungsansatz für Räume mit hoher Personenanzahl im Rahmen des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen des Bundes. Um Doppelforschung zu vermeiden soll in der Studie eine Auswertung von bereits in Schulgebäuden erhobenen Daten unter Verwendung von vergleichbaren Parametern erfolgen.

Die durch Sie durchgeführte bzw. beauftragte Studie wurde ausgewählt und wir würden uns freuen, wenn Sie das Forschungsvorhaben des BBSR unterstützen, indem

- Sie uns die **gemessenen Rohdaten zur Verfügung stellen** (insbesondere CO₂-Konzentrationsverläufe) unter Angabe der entsprechenden Messbedingungen.

Die erhobenen Daten werden ausschließlich intern für die Studie verwendet, nicht weitergegeben und die abgeleiteten Ergebnisse ausschließlich anonymisiert veröffentlicht und für die Weiterentwicklung des BNB-Bewertungskriteriums „Innenraumlufthygiene“ genutzt.

Wir, das sind

- das Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH (ITG Dresden), Prof. Dr. Thomas Hartmann und Dipl.-Ing. Christine Knaus, Dresden
- in Zusammenarbeit mit ener // bauph // proj Ingenieurbüro für Energie, Bauphysik, Projekte, Prof. Dr. Martin H. Spitzner, München.

Die Arbeiten erfolgen

- im Rahmen des vom BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) finanzierten Forschungsprogramms „Zukunft Bau“
- und dort im Rahmen der Meta-Studie „**Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten**“.

(Weitere Informationen zu dem Forschungsprojekt (AZ 10.08.17.7-16.33) erhalten Sie in den nächsten Tagen über die Homepage des BBSR:

<http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/cluster.html?nn=436654>)

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung und würden uns über eine Rückmeldung bis zum **XX.XX.2016** freuen.

Außerdem können Sie sich für Rückfragen zur Studie gerne auch direkt an Frau XXX (Tel: +49 (0) XX XXXXX XXXX und Email: XXX@bbr.bund.de) im BBSR wenden.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe.

Hintergrund zum Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen:

Um den zukünftigen Anforderungen an ganzheitlich optimierte Gebäude gerecht zu werden, hat das Bundesbauministerium für Bundesgebäude den Leitfaden Nachhaltiges Bauen mit dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) entwickelt, das seit Oktober 2013 für Bundesbauten verpflichtend anzuwenden ist und 2015 überarbeitet und weiterentwickelt wurde. Hinsichtlich der Innenraumlufthygiene werden insbesondere Verunreinigungen der Innenraumluft durch Schadstoffe aus Bauprodukten und durch Kohlendioxidemissionen der Raumnutzer betrachtet.

Derzeit erfolgt die Bewertung im BNB für Unterrichtsräume [<https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-unterrichtsgebaeude/kriterien-bnb-unterrichtsgebaeude-neubau-bnb-un.html>] hinsichtlich CO₂ anhand des personenbezogenen Außenluftvolumenstroms, der für die Fensterlüftung um „Nebenanforderungen“ wie CO₂-Kontrolle, Unfallsicherungskonzept und Zwischenlüftungskonzept ergänzt wird.

Die aktuellen Vorgaben und Empfehlungen berücksichtigen allerdings nicht alle erforderlichen Parameter. So zeigen Fachdiskussionen und Praxiserfahrungen insbesondere bei Räumen mit hohen Belegungsdichten wie Unterrichtsräumen die Problematik von CO₂-Konzentrationen und thermischer Behaglichkeit durch nicht optimale Raumlüftung. Dies betrifft sowohl die Fensterlüftung als auch die mechanische Lüftung sowie deren Kombination.

Eine hohe Luftqualität im Sinne eines ausreichend niedrigen CO₂-Gehalts in der Raumluft ist gerade in Schulen wichtig, weil zu hohe CO₂-Gehalte zu Müdigkeit, Konzentrationsverlust und reduzierter Aufnahmefähigkeit führen. Gemäß Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6 (Januar 2012) ist die max. CO₂-Konzentration auf 1000 ppm zu begrenzen. Um diese Anforderung in der Praxis gerade auch für Lüftungskonzepte, die Fensterlüftung mit heranziehen, einerseits planbar zu gestalten und andererseits prüffähig zu machen, müssen Wege und Hintergründe zu funktionierenden Lösungen mit konkreten Beispielen aufgezeigt werden. BBSR plant dafür einen Leitfaden zu Raumlüftung, der als Arbeitshilfe im Rahmen des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen bereit gestellt wird.“

4.3 Überblick der betrachteten Studien

Von den 15 ausgewählten Studien konnten letztendlich 9 Studien in der Metaanalyse berücksichtigt werden, da bei einigen Studien die erforderlichen Rohdaten nicht mehr vorlagen oder nicht zur Verfügung gestellt werden konnten. Tabelle 2 zeigt die Zusammenstellung der betrachteten Studien in Kurzfassung. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle ausdrücklich bei den teilnehmenden und in Tabelle 2 namentlich genannten Studienbeteiligten für die Bereitstellung der Rohdaten und deren Unterstützung bei der Bearbeitung. Tabelle 3 gibt die Randbedingungen der betrachteten Studien als Überblickstabelle der Tabelle B. 1 bis Tabelle B. 2 aus Anhang A auf einen Blick wider.

Tabelle 2: Zusammenstellung der betrachteten Studien

Betrachtete Studien	Kurzbeschreibung
Müller [Müller]	Untersucht wurden neun Berliner Schulen, die sich hinsichtlich des Gebäudetyps, der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen und der Lüftungsart unterscheiden. Während eines Zeitraums von einem Unterrichtstag bzw. einer Woche wurden stichprobenartig Messungen in ausgewählten Klassenräumen durchgeführt bezüglich Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, CO ₂ -Gehalt, Schalldruckpegel sowie Luftgeschwindigkeiten zur Beurteilung der Behaglichkeit. Betrachtet wurden sowohl Fensterlüftung als auch mechanische Lüftungsanlagen.
Bischof [Bebersdorf, Bischof1, Bischof2]	Zehn Erfurter Schulen wurden für diese Studie ausgewählt. Während der Studie wurden die Klassenräume während der Unterrichtsphase nicht gelüftet, sondern nur in der Pause. In allen Klassenräumen wurde jeweils für zwei Tage CO ₂ -Konzentrationen, relative Luftfeuchtigkeit und Operative Temperatur und zusätzlich in einigen Klassenräumen die Luftkeimzahl gemessen. Die Klassenräume wurden alle über Fensterlüftung belüftet.
Fromme [Fromme1, Fromme2]	Schulen aus München und dem Landkreis Dachau wurden für diese Studie ausgewählt. Während der Wintermessung wurden 46 Schulen (insgesamt 62 Raumtage) und der Sommermessung 38 Schulen näher betrachtet. Gemessen wurden CO ₂ -Gehalt, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und teilweise weitere luftchemische Parameter. Soweit bekannt, handelt es sich bei den betrachteten Lüftungssystemen um Fensterlüftung.
Lambertz [Lambertz]	Ein Berufskolleg in Aachen wurde in dieser Studie nach einer Renovierung näher betrachtet. Unterschiedliche Lüftungsanlagen konnten anhand Messungen von CO ₂ -Konzentration, Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, VOC-Gehalt und Energieverbrauch untereinander verglichen werden. Zu Vergleichszwecken wurde vor der Renovierungen Messungen mit Fensterlüftung durchgeführt.
Dietz/Sick [Dietz]	Die Grundschule Hohen Neuendorf wurde mit einer hybriden Lüftung (mechanische Grundlüftung in Kombination mit automatisch öffnbaren Fenstern und normalen Fenstern ergänzt um eine CO ₂ -Lüftungsampel) ausgestattet. In zwei ausgewählten Klassenräumen wurden detaillierte Parameter hinsichtlich Innenraumluftqualität (CO ₂ -Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Strahlungstemperatur, Klimadaten) aufgezeichnet.
Bolsius [Bolsius]	Beim Schulkomplex in Olbersdorf wurden nach energetischer Sanierung die einzelnen Sanierungsbausteine beurteilt. Die in Olbersdorf realisierte energieeffiziente Schullüftung bestand aus einer Zuluftführung über Zuluft-Kastenfenster in Verbindung mit einer CO ₂ -gesteuerten Abluftanlage. Für ausgewählte Klassenräume wurden die Größen CO ₂ -Konzentration, Temperatur, Beleuchtungsstärke und das Außenklima aufgezeichnet.
Wargocki [Wargocki]	In der dänischen Studie wurden zwei ventilatorgestützt gelüftete Klassenzimmer einer Gesamtschule (Schüleralter: 6-16 Jahre) näher betrachtet. In einem Blind-Doppel-Crossover-Test mit neuen und gebrauchten Luftfiltern sowie hohen und niedrigen Lüftungsraten wurde die Leistungsfähigkeit durch Tests, die Innenraumparameter (CO ₂ -Konzentration, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit,...) sowie über Fragebögen die Wahrnehmung dokumentiert. Die Randbedingungen sind für jeweils eine Woche festgelegt worden. Das Experiment wurde im Winter und im Sommer durchgeführt.
Lahrz [Lahrz]	Energetisch sanierte Berliner Schulen wurden während der Heizperiode näher bezüglich der Luftqualität betrachtet. Es wurden sowohl Klassenräume betrachtet, die mittels der Fenster frei belüftet worden sind als auch maschinell mit Raumluftechnischen Anlagen ausgestattete Klassenräume. Parameter wie Kohlendioxid, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und diverse Staubfraktionen wurden für eine Schulwoche dokumentiert.
Birmili [Sinphonie]	Studie zur Überprüfung des UBA-Schulleitfadens „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamt (UBA) sowie des EU-Verbundvorhabens „Sinphonie“ (weitere Informationen liegen nicht vor, da keine Veröffentlichungen verfügbar sind)

Tabelle 3: Überblick der dokumentierten Randbedingungen

	Birmili	Bischof	Bolsius	Fromme	Lahrz	Lambertz	Müller	Sick/Dietz	Wargocki
Anzahl der untersuchten Schulen	6	6	1	46 W, 38 S	11	1	3	1	1 (selbe Schule)
Schultyp	Grundschulen	Weiterführende Schulen ≥ 5.Klasse	Schule mit 1. bis 10. Klasse	Grundschulen und weiterführende Schulen	Überwiegend Grundschulen	Berufskolleg	2x Grundschule, Gymnasium	Grundschule	„elementary school for children aged 6 to 16 years“
Anzahl der untersuchten Unterrichtsstunden	308	127	?	200	445	?	8B, 10S, 8T	?	178, 175
Anzahl der untersuchten Räume	14	104	22	92 W, 76 S	22	6	1B, 2S, 2T	2	2, 2
Angabe zur Raumbelegung (Anzahl der Personen)	Bekannt	Bekannt	Unbekannt (ca. 15/17 Schüler)	unbekannt	Bekannt	Unbekannt	Bekannt: B, T, unbekannt (nur geschätzt) S	Unbekannt	Bekannt (mittlere Anzahl der Schüler)
Angaben zur Raumgeometrie (Raumfläche/Raumvolumen)	Nicht bekannt	Bekannt (Raumfläche und Raumvolumen)	Bekannt (Raumfläche)	Unbekannt	Nicht bekannt	Unbekannt	Bekannt B, bekannt S, unbekannt T	Unbekannt	Bekannt (Raumfläche und Raumvolumen)
Angaben zu Unterrichtszeiten	Bekannt aus Lüftungsprotokoll (in jeder Schule unterschiedlich)	Bekannt aus Messwerten	Bekannt	Unbekannt	Bekannt aus Messwerten	Bekannt von Website	Bekannt B, S, bekannt T (nur für die ersten 4 Stunden)	Bekannt von Website	Bekannt aus Messwerten (eine Unterrichtsstunde = 45 oder 90 Min.)
Messzeitraum	1 Schulwoche	1 Schulstunde	Mehrere Jahre	1 Schultag	1 Schulwoche	2 Wochen	2 Tage B, 1 Tag S, 1 Tag T	Mehrere Jahre	1 Schulwoche je RB
Sommer- und Wintermessung?	S + W	?	S + W	S + W	W	unbekannt	W: B,W S, S + W T	S + W	W (4) + S (2), S (6)
Lüftungssystem	Fensterlüftung	Fensterlüftung, Schachtlüftung, Anlage	Fensterlüftung, Abluftanlage	Fensterlüftung?	Fensterlüftung, RLT	WRG-Lüftungsanlage, Abluft-Lüftungsanlage	Dezentrales Lüftungsgeräte: B, S, zentrales Lüftungsgerät T	Lüftungsanlage mit motorisierten Fensterflügeln	Lüftungsanlage
Bemerkung	Lüftungsprotokoll (zu, gekippt, ganz offen)				Erfassungsbogen liegt nicht vor				Variation von Außenluftfrate und Filterzustand bzw. Lufttemperatur

5 Methodik der Auswertung

5.1 Ermittlung der Schulstunden

Um über längere Zeiträume gemessene CO₂-Konzentrationen sinnvoll bewerten zu können, ist eine möglichst genaue Kenntnis der Unterrichtszeiten erforderlich. Diese kann aus den Rohdaten bekannt sein, wenn die Unterrichtszeiten und Pausen z.B. durch die Angabe der Stundenpläne oder durch Fragebögen erfasst worden sind bzw. ohnehin nur Messdaten für die Unterrichtszeiten vorliegen.

Für die Auswertung von Studien, bei denen die Unterrichtsstunden nicht bekannt sind, wird die Herangehensweise einer VBA-basierten Auswertung mit Hilfe von Makros in Excel beschrieben. VBA (Visual Basic for Applications) ist dabei eine Skriptsprache, die genutzt wird, um automatisierte Abläufe in Excel zu steuern. Die Erarbeitung eines Auswertungsalgorithmus zur Bestimmung der Unterrichtsstunden a 45 Minuten erfolgte schrittweise und wird nachfolgend beispielhaft für die Studie „Bolsius“ beschrieben.

1. Schritt (gleitender Mittelwert über 45 Minuten)

Erster Ansatz für die Ermittlung der Schulstunden bei unbekanntem Unterrichtszeiten ist die Ermittlung der gleitenden Mittelwerte über 45 Minuten, um für den Betrachtungszeitraum von 7 bis 16 Uhr aus den lokalen Maxima des gleitenden Mittelwerts Rückschlüsse auf das Stundenende und damit den Zeitraum einer Schulstunde zu ziehen.

Abbildung 1 zeigt den CO₂-Verlauf für den 5. Schultag im Jahr 2013 der Grundschule in Olbersdorf im Zeitraum der festgelegten Nutzungszeit (7-16 Uhr). Dargestellt sind sowohl der Momentanwert als auch der gleitende Mittelwert über 45 Minuten und 5 Minuten.

Für den gleitenden Mittelwert über 45 Minuten werden im Beispiel 11 lokale Maxima detektiert. Vergleicht man diese jedoch mit dem Verlauf des Momentanwertes, sind diese zeitlich deutlich verzögert. Außerdem werden einige lokale Maxima des Momentanwertes durch die Glättung des gleitenden Mittelwertes über 45 Minuten nicht detektiert, weshalb der gleitende Mittelwert über 45 Minuten nachfolgend nicht genutzt wird.

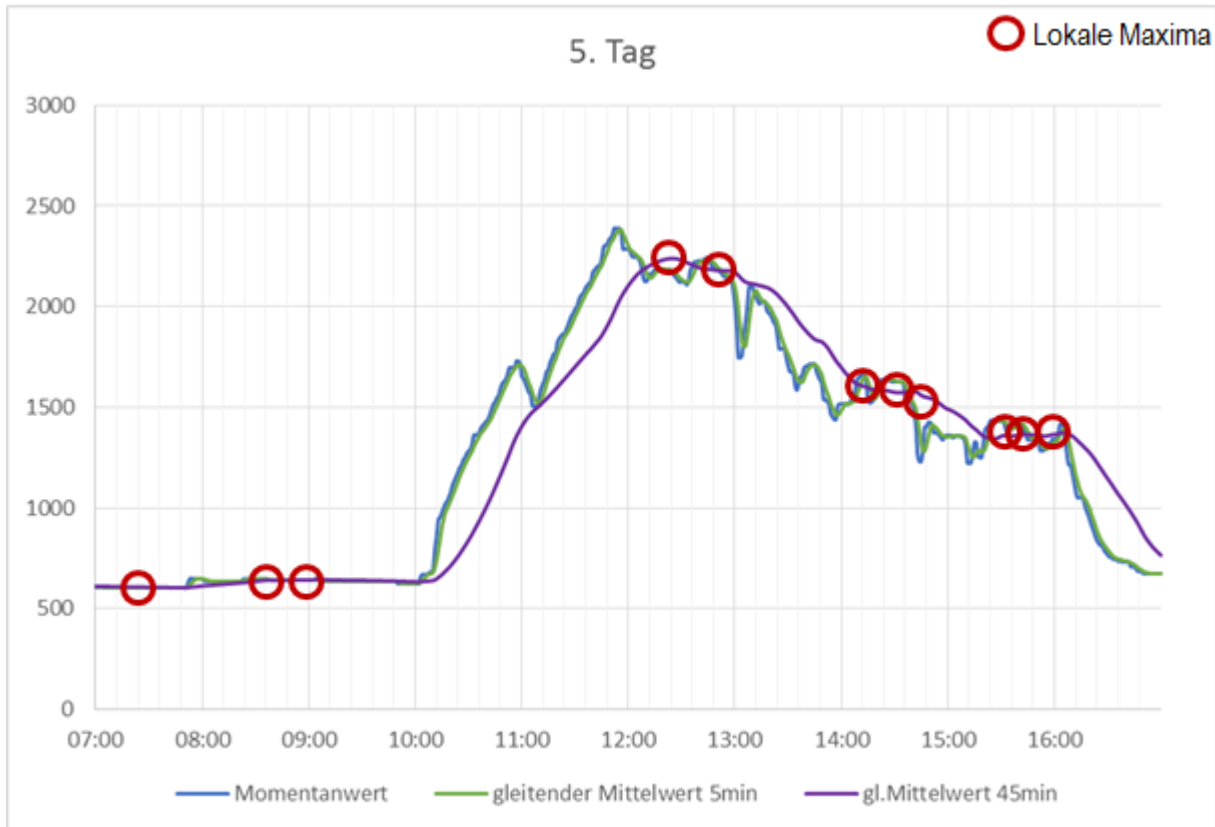


Abbildung 1: CO₂-Konzentration für den 5. Tag, Fensterlüftung, lokale Maxima für gleitenden Mittelwert über 45 Minuten (Datenquelle: Bolsius)

2. Schritt (gleitender Mittelwert über 5 Minuten)

Für die weiteren Betrachtungen wird der gleitende Mittelwert über 5 Minuten herangezogen. Abbildung 2 zeigt die detektierten lokalen Maxima des gleitenden Mittelwertes über 5 Minuten. Es zeigt sich, dass die zeitliche Verzögerung zwischen den lokalen Maxima (Momentanwert und gleitende Mittelwert über 5 Minuten) deutlich geringer ist und dass mehr lokale Maxima ermittelt werden.

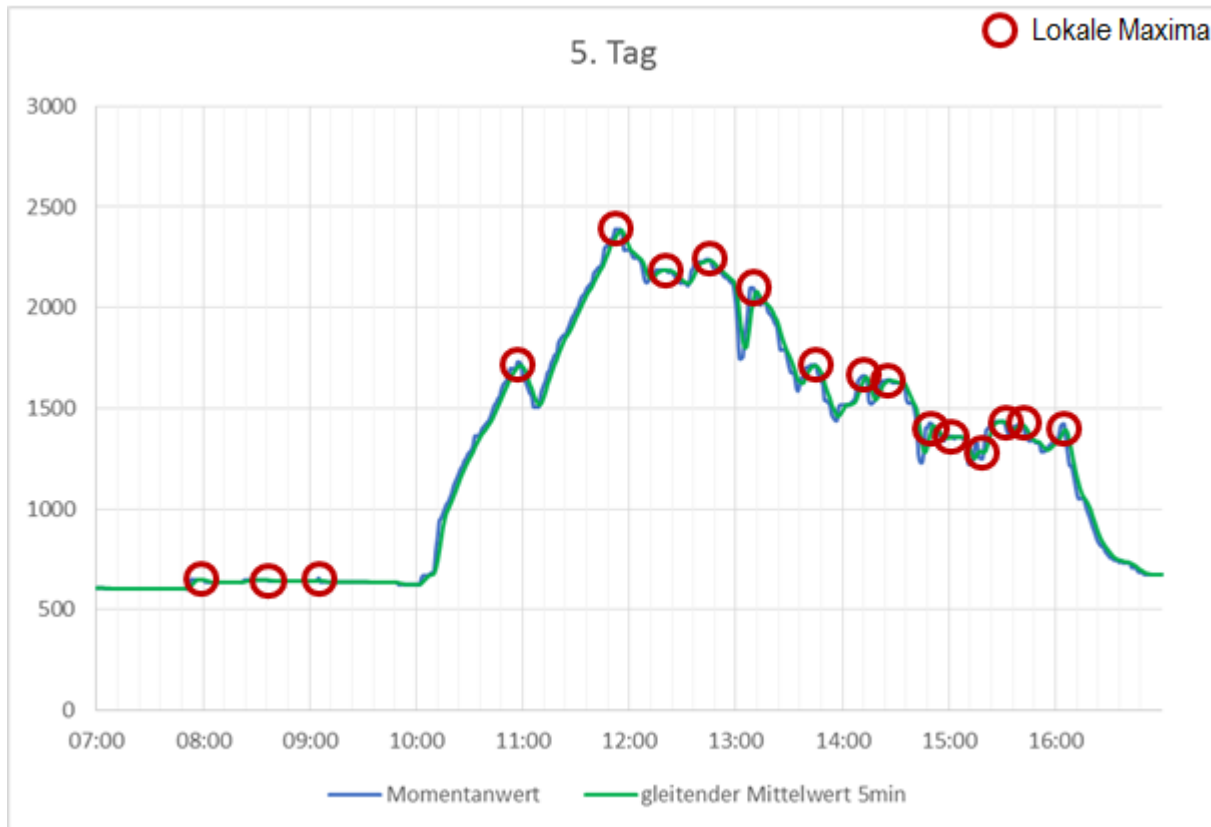


Abbildung 2: CO₂-Konzentration für den 5.Tag, Fensterlüftung, lokale Maxima für gl. Mittelwert über 5 Minuten (Datenquelle: Bolsius)

3. Schritt (Differenzkriterium)

Im Folgenden gilt es, die Detektion der Maxima weiter zu verfeinern, um nach Möglichkeit:

- einerseits alle Schulstunden für die Auswertung zu berücksichtigen und
- andererseits Falsch-Positivmeldungen zu eliminieren.

Zu diesem Zweck wird im nächsten Schritt ein Differenzkriterium eingeführt, welches folgende Bedingungen beinhaltet (siehe auch Abbildung 3):

- Ermittlung des lokalen Maximums des Momentanwertes durch Betrachtung des Zeitraums 0-5 Minuten vor lokalem Maximum des gleitenden Mittelwertes
- Ermittlung des Minimums des Momentanwertes durch Betrachtung des Zeitraums 0-15 Minuten nach lokalem Maximum des Momentanwertes
- Überprüfung, ob die Differenz zwischen ermitteltem Maximum des Momentanwertes und ermitteltem Minimum des Momentanwertes größer oder kleiner als vorgegebene Differenz ist
- Vorgegebene SOLL-Differenz frei wählbar, z.B. 100 ppm oder 50 ppm (nachfolgend immer 50 ppm)
- Peak wird detektiert bei IST-Differenz > SOLL-Differenz,

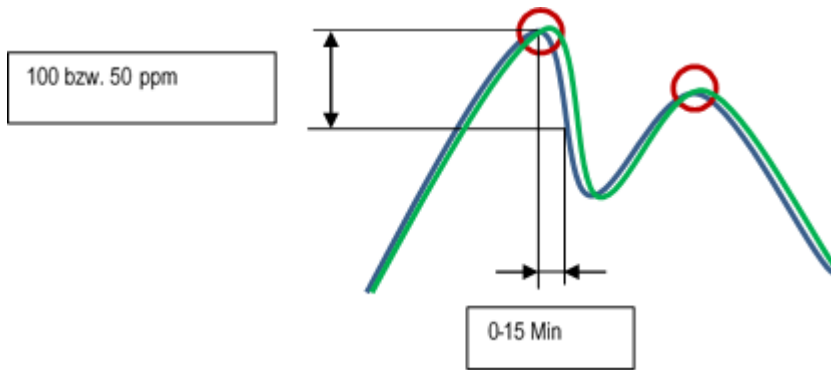


Abbildung 3: Schema des Differenzkriteriums

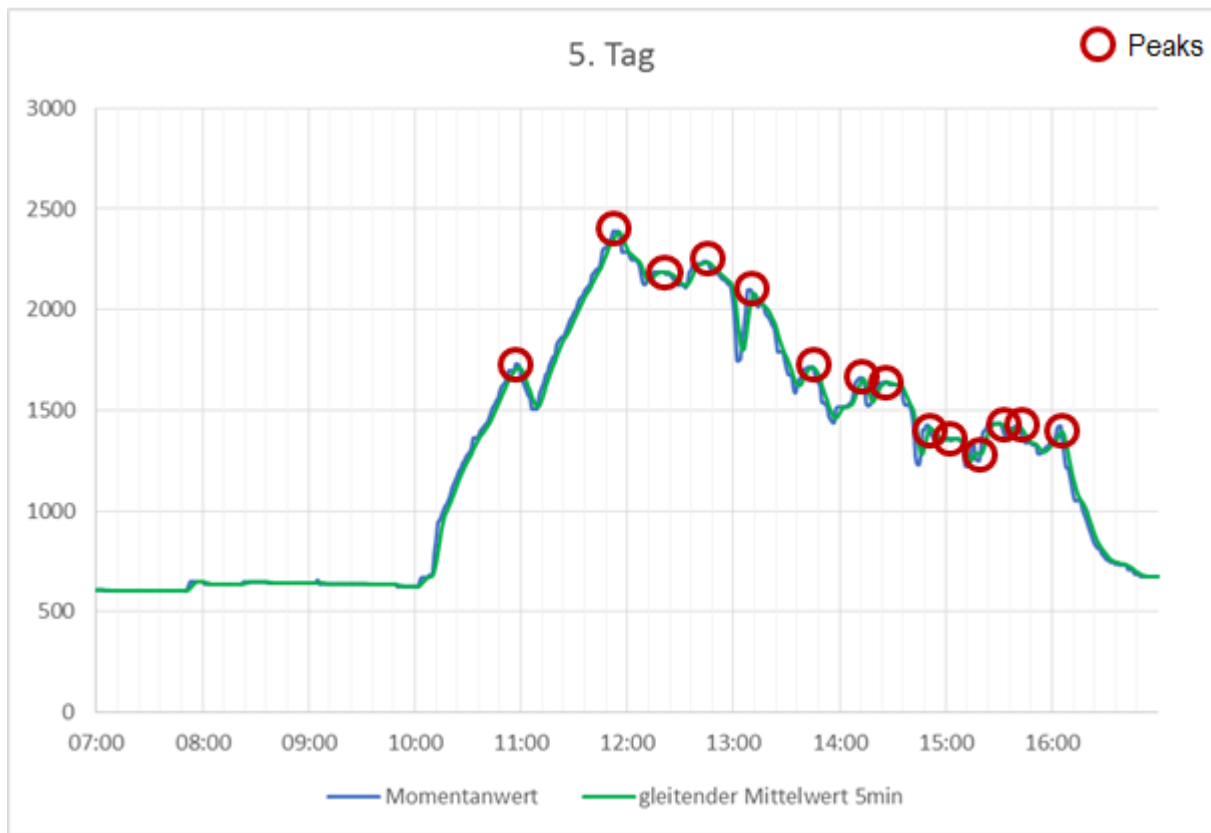


Abbildung 4: CO₂-Konzentration für den 5.Tag, Fensterlüftung, Peaks, die Differenzkriterium erfüllen (Datenquelle: Bolsius)

Abbildung 4 zeigt die detektierten Peaks, die das Differenzkriterium erfüllen. Es lässt sich eine Reduktion von 17 detektierten Schulstunden ohne Differenzkriterium auf 14 Schulstunden mit Differenzkriterium ableiten.

4. Schritt (weitere Zeit- und Peak-Kriterien)

Im nächsten Schritt werden zusätzliche Zeit- und Peak-Kriterien eingeführt, um eine weitere Reduzierung der detektierten Peaks im CO₂-Verlauf zu erreichen (siehe auch Abbildung 5):

- Ermittlung der Differenzzeiten zwischen den einzelnen Peaks
 - a) Einhaltung von Differenzzeit zwischen den Peaks > 50 Minuten
 - b) Einhaltung von CO₂-Differenz zu vorherigen Peaks der letzten 50 Minuten > 20 ppm (aktueller Wert um 20 ppm größer als maximaler Wert der letzten 50 Minuten)
 - c) Einhaltung von CO₂-Differenz zum Zeitpunkt 0-5 Minuten und 15-20 Minuten vor Peak >50 ppm (Peak, der bisherigen Tagesmaximalwert nicht überbieten kann, dann wird der Mittelwert von 45-50 Minuten vorher und 30-25 Minuten vorher gebildet. Mittelwertsteigerung um mehr als 50 ppm)
 - d) Einhaltung von CO₂-Differenz zum Zeitpunkt 45 Minuten vor dem Peak > 100 ppm (CO₂-Wert 45min vor dem Peak mindestens 100 ppm geringer)
 - e) Einhaltung von CO₂-Differenz zum Zeitpunkt 10 Minuten nach dem Peak von <-25 ppm (CO₂-Wert 10min nach dem Peak mindestens 50 ppm geringer)
- Peak wird detektiert bei Einhaltung aller Kriterien

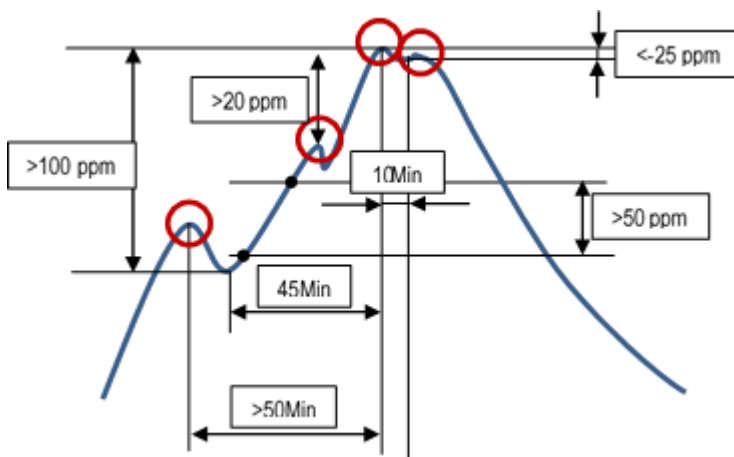


Abbildung 5: Schema der weiteren Zeit- und Peak-Kriterien

Durch die Einführung der eben beschriebenen weiteren Zeit- und Peak-Kriterien verringert sich die Anzahl der ermittelten Schulstunden von 14 auf 2 (siehe Abbildung 6). Die festgelegten Kriterien ermöglichen u.a. das Erkennen der ersten Schulstunde am Schultag, stellen Differenzzeiten von 45 Minuten zwischen den einzelnen Peaks resp. Unterrichtseinheiten sicher und gewährleisten einen relevanten CO₂-Anstieg innerhalb einer Schulstunde.

Dabei wird bewusst das Ziel verfolgt, dass eher weniger, aber nach dem CO₂-Verlauf eindeutige Unterrichtsstunden detektiert werden. Unklare und nicht sicher interpretierbare zeitliche Verläufe der CO₂-Konzentrationen sollen tendenziell ausgeschlossen und nicht als Unterrichtszeit bewertet werden.

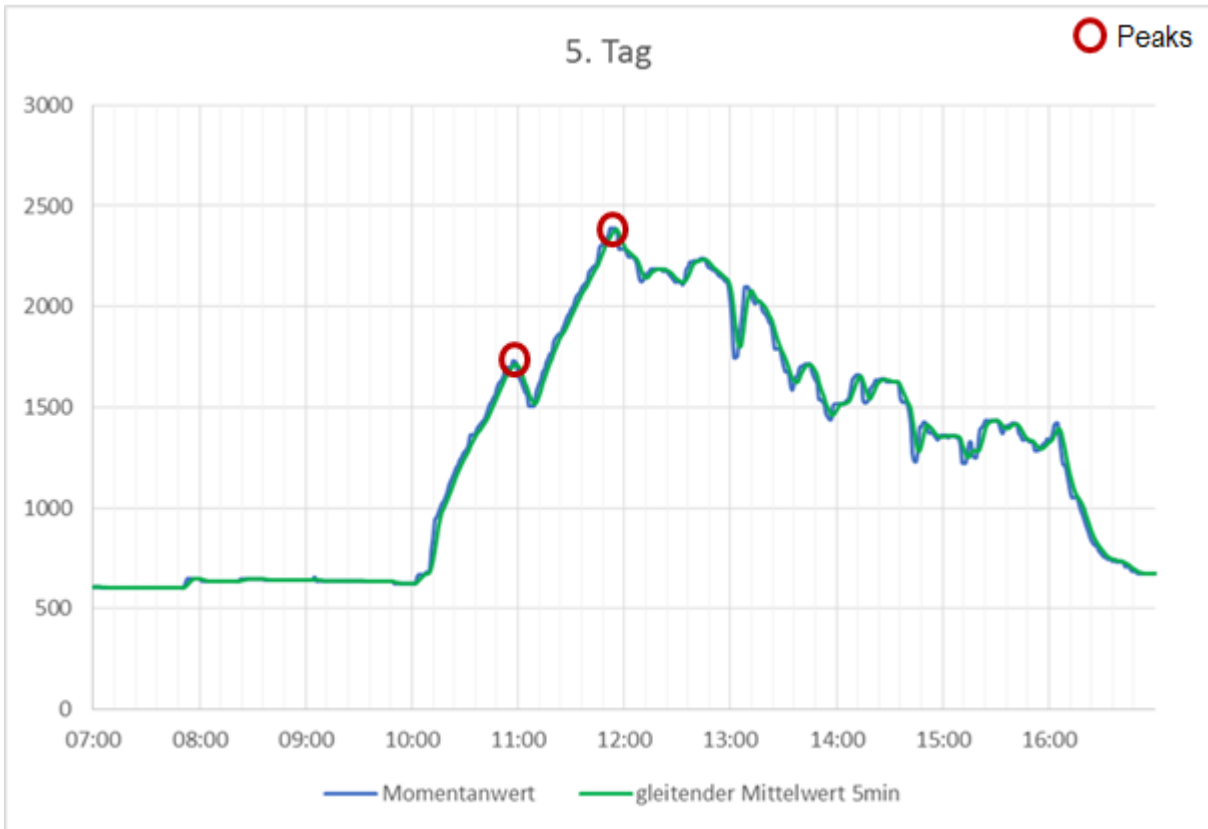


Abbildung 6: CO₂-Konzentration für den 5.Tag, Fensterlüftung, Peaks, die Differenzkriterium und weitere Zeit-und Peak-Kriterien erfüllen (Datenquelle: Bolsius)

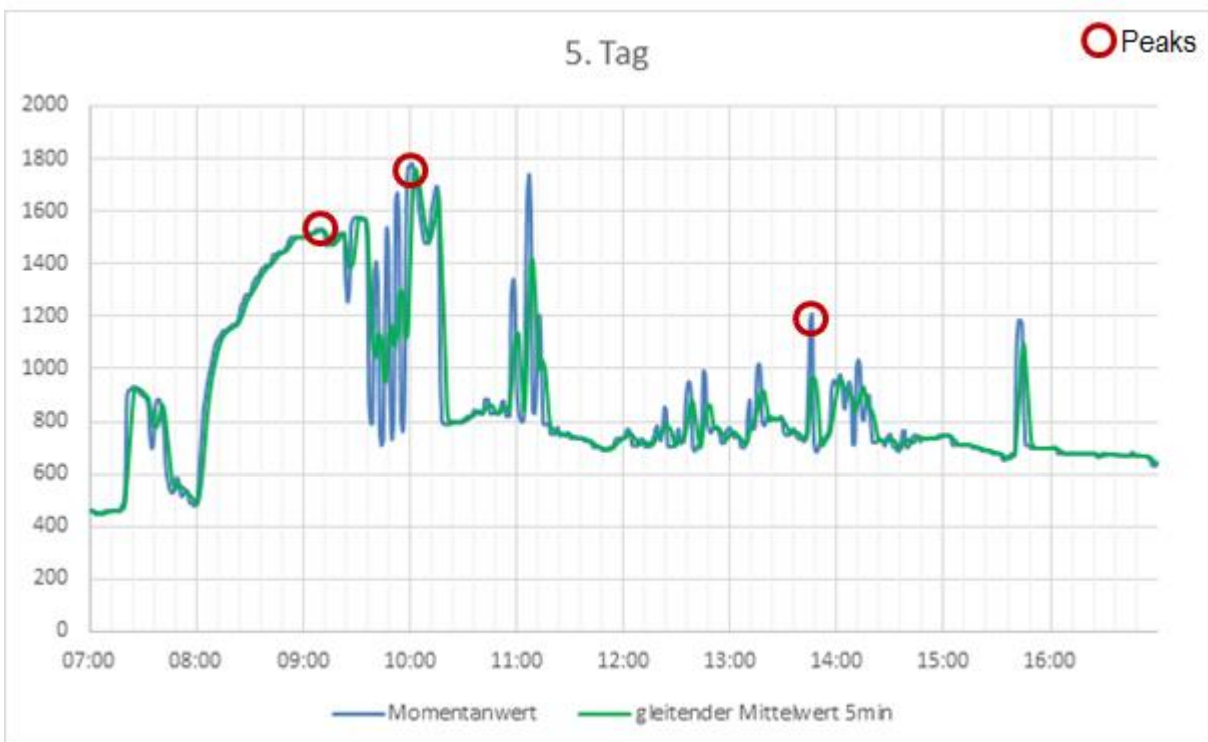


Abbildung 7: CO₂-Konzentration für den 5.Tag, Lüftungsanlage, Peaks, die Differenzkriterium und weitere Zeit-Peak-Kriterien erfüllen (Datenquelle: Bolsius)

Abbildung 7 zeigt die grundsätzliche Eignung des Tools zur Dedektierung von Unterrichtseinheiten auch bei stark abweichenden Verlauf der CO₂-Konzentration. Weitere beispielhafte Tagesverläufe für Fensterlüftung und Lüftungsanlage, sind im Anhang dargestellt.

Weiteres Vorgehen zur Auswertung der Schulstunden

Nach der Ermittlung der relevanten Peaks im CO₂-Verlauf folgt die Auswertung der ermittelten Schulstunden durch:

- Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes der CO₂-Konzentration für die detektierten Peaks bzw. Unterrichtsstunden, Zeitraum: Peakzeitpunkt – 45 Minuten vor Peakzeitpunkt
- Ermittlung des Maximalwertes der CO₂-Konzentration für die detektieren Peaks bzw. Unterrichtsstunden, Zeitraum: Peakzeitpunkt – 45 Minuten vor Peakzeitpunkt

Hinweise zur Nutzung des Tools

Zur Anwendung des Tools müssen zunächst die Rohdaten vorbereitet werden. Dafür werden die CO₂-Messwerte als minütliche Werte (als momentan- oder über eine Minute gemittelte Werte)) benötigt, diese müssen ggf. durch Inter- oder Extrapolation der Rohdaten erzeugt werden. Neben diesen minütlichen Werten muss noch die gleitenden 5-Minuten-Mittelwerte berechnet werden.

Die Anwendung des Excel-Tools (liegt dem Bericht beispielhaft als Datei bei) kann unter Beachtung der stichpunktartigen Kurzerklärung zu den einzelnen Tabellenblättern erfolgen:

- Allgemein: eine Spalte steht für einen Tag, ein Wertepaar besteht aus Uhrzeit und in der darunterliegenden Zeile aus der dazugehörigen CO₂-Konzentration, pro Tag maximal 125 Peaks möglich
- Daten_glMittel: Dieses Tabellenblatt ist ein Eingabeblatt. Hier müssen die Werte des gleitenden Mittels über 5 Minuten für die Nutzungszeit (7:00 bis 16:59 Uhr) eingetragen werden. Ab Zeile 629 werden Zwischenergebnisse des Makros aufgezeigt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Betrachtung																					
2	gl.Mittelwer Dez 14																					
3	07:00	644,6	671	659	751	860,6	655	662	703,2	732	789,4	648	778,2	680,2	826	796	647	668	685	725	719	640
4	07:01	645	671	659	751	860	655	662	700,8	732	788	648	775	680,2	825,4	796	647	668	685	724,4	721,2	640
5	07:02	645,4	671	659	751	859,4	655	662	698,4	732	786,6	648	775	680,2	824,8	798,8	647	668	685	723,8	726,2	640
6	07:03	643	671	659	751	859	655	662	696	732	787,4	648	775	680,2	822	799,2	647	668	685	723,2	731,2	640
7	07:04	643	671	659	751	859,4	655	662	696	732	786,6	648	775	680,2	822	799,6	647	668	685	720	736,2	640
8	07:05	643	673,2	659	751	859,6	655	662	696	732	783	648	775	678	822	800	649,4	668	687,6	723	738,8	640
9	07:06	643	675	659	751	859,8	655	662	696	732	783	648	775	678	822	800,4	649,4	668	686,8	722,6	739,2	640
10	07:07	643	676,8	659	753,8	860	655	662	698,2	732	783	648	775	678	822	798	649,4	668	686	722,2	736,8	640
11	07:08	645,4	678,6	659	754	858	655	665,4	700,4	732	783	648	775	678	822	798	649,4	668	685,2	721,8	734,4	640
12	07:09	646,2	680,4	659	754,2	858	655	664,8	702,6	732	783	648	775	678	824,4	798	649,4	668	687,8	721,4	732	640
13	07:10	647	680	659	754,4	855,8	655	664,2	707,2	735	783	648	775	680,6	823,4	798	647	668	684,4	718	732	640
14	07:11	647,8	680	656,8	754,6	853,6	655	666	709	735,2	783	648	775	679,6	822,4	798	647	668	684,4	718	732	640
15	07:12	648,6	680	654,6	752	851,4	655	664,6	708,6	735,4	783	648	772,6	678,6	821,4	798	647	668	684,4	718	729,6	640

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Daten_glMittel“

- Daten_Momentan: Dieses Tabellenblatt ist ein Eingabeblatt. Hier müssen die Momentanwerte (Messwerte) für die Nutzungszeit (7:00 bis 16:59 Uhr) eingetragen werden. Ab Zeile 609 werden Zwischenergebnisse des Makros aufgezeigt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA		
1	Betrachtung	Dez 14																								Jan 15			
2	Momentanw	1	2	3	4	5	8	9	10	11	12	15	16	17	18	19	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	19		
3	07:00	643	671	659	751	857	655	662	696	732	801	648	775	689	822	796	647	668	685	720	719	640	830	975	924	804	659		
4	07:01	643	671	659	751	857	655	662	696	732	783	648	775	678	822	796	647	668	685	720	730	640	830	975	924	804	648		
5	07:02	643	671	659	751	857	655	662	696	732	783	648	775	678	822	810	647	668	685	720	744	640	830	975	924	804	648		
6	07:03	643	671	659	751	868	655	662	696	732	783	648	775	678	822	798	647	668	685	720	744	640	830	975	924	804	648		
7	07:04	643	671	659	751	858	655	662	696	732	783	648	775	678	822	798	647	668	685	720	744	640	830	975	924	804	648		
8	07:05	643	682	659	751	858	655	662	696	732	783	648	775	678	822	798	659	668	698	735	732	640	830	975	924	804	648		
9	07:06	643	680	659	751	858	655	662	696	732	783	648	775	678	822	798	647	668	681	718	732	640	830	975	924	804	648		
10	07:07	643	680	659	765	858	655	662	707	732	783	648	775	678	822	798	647	668	681	718	732	640	830	975	924	804	648		
11	07:08	655	680	659	752	858	655	679	707	732	783	648	775	678	822	798	647	668	681	718	732	640	830	975	924	817	648		
12	07:09	647	680	659	752	858	655	659	707	732	783	648	775	678	834	798	647	668	698	718	732	640	830	975	924	806	648		
13	07:10	647	680	659	752	847	655	659	719	747	783	648	775	691	817	798	647	668	681	718	732	640	830	975	924	806	648		
14	07:11	647	680	648	752	847	655	671	705	733	783	648	775	673	817	798	647	668	681	718	732	640	830	975	913	806	648		
15	07:12	647	680	648	752	847	655	655	705	733	783	648	763	673	817	798	647	668	681	718	720	640	830	975	913	806	648		

Abbildung 9: Ausschnitt aus dem Tabellenblatt "Daten_Momentan"

- Extremwerte: In diesem Tabellenblatt befinden sich alle Buttons, die mit Makros hinterlegt sind. Soll eine Auswertung durchgeführt werden, ist dies die Bearbeitungsreihenfolge der Makros:
 1. Lokale Extremwerte in gleitenden Mittelwerten suchen (Suche der lokalen Maxima im Datensatz der gleitenden Mittelwerte über 5 Minuten)
 2. Differenzkriterium bei Momentanwerten prüfen (Ermittlung des Maximums in den Momentanwerten in Abhängigkeit des lokalen Maximums in den gleitenden Mittelwerten über 5 Minuten; Ermittlung des Minimums im Zeitraum 0-15 Minuten nach Maximum des Momentanwertes; Prüfung, ob vorgegebene Differenz eingehalten ist (Differenz freiwählbar); am Ende des Makros kommt eine Fehlermeldung, bitte daher nicht wundern, einfach „abbrechen“ drücken, das Makro wird komplett ausgeführt, da in der letzten Spalte allerdings keine Werte mehr findet, kommt es zur Fehlermeldung)
 3. Uhrzeit in hh:mm umstellen (Umformatierung der Uhrzeiten)
 4. Weitere Kriterien prüfen (Prüfung von 5 weiteren Kriterien; Erklärung siehe unten)
 5. Statistikprüfung (Ermittlung der Uhrzeit für Stundenstart und Stundenende sowie Mittelwert und Maximalwert der CO₂-Konzentration für die betrachtete Stunde)
 6. Daten löschen (löscht die Daten in den entsprechenden Tabellenblättern)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Lokale Extremwerte in gleitenden Mittelwerten suchen					Differenzkriterium bei Momentanwerten prüfen				Uhrzeit in hh:mm umstellen			
2													
3													
4													
5													
6		07:02	07:09	07:23	07:11	07:07	07:25	07:08	07:11	07:14	07:03	07:17	07:34
7		645,4	680,4	653,6	754,6	860	657,8	665,4	709	735,8	787,4	650,4	766
8		07:12	07:18	07:29	07:17	07:41	07:49	07:11	07:41	07:29	07:40	07:48	07:59
9		648,6	682,6	654,2	761,2	844,6	658,8	666	700,6	737,6	794,2	651	751,6
10		07:32	07:45	07:59	07:26	08:32	08:14	07:33	07:52	08:14	07:53	07:58	08:08
11		653,4	681,6	689	759	1688,2	660	662	710	756,8	798,4	649,4	747,2
12		07:59	08:47	08:34	07:52	08:40	08:18	07:55	08:40	08:49	08:11	08:02	08:40
13		660,4	679	687,2	825	1347,4	655,6	657,6	867,6	753,4	792	648,2	767
14		08:06	09:32	08:52	07:59	08:50	08:22	08:07	08:54	09:18	08:29	08:05	08:58
15		665,6	676,8	686,6	798	1542,4	657,6	661,4	932	756,8	794,8	651,4	767

Abbildung 10: Ausschnitt aus dem Tabellenblatt "Extremwerte"

- auswertung_peak: Auflistung der Ergebnisse der Kriterien-Prüfung (Button „Weitere Kriterien prüfen“); Felder mit „???” kennzeichnen Peaks, die ein Kriterium nicht erfüllt haben, in der darunterliegenden Zeile geben die negativen Zahlen an, welches Kriterium nicht erfüllt wurde; in Zeile 300 ist die Anzahl der Peaks pro Tag aufgelistet

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Uhrzeit												
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	???	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-3	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	08:30	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	1720	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	???	???	-	-	???	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-5	0	-	-	-5	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	???	-	-	08:50	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	0	-	-	932	-	-	-	-
12	-	08:56	-	-	-	???	-	-	???	-	-	-	-
13	-	1542	-	-	-	0	-	-	0	-	-	-	-
14	-	???	-	-	-	???	-	-	???	-	-	-	?
15	-	0	-	-	-	0	-	-	0	-	-	-	-

Abbildung 11: Ausschnitt aus dem Tabellenblatt "auswertung_peak"

- Statistik: Spaltenweise Auflistung von Uhrzeit für Stundenstart und Stundenende sowie Mittelwert und Maximalwert der CO₂-Konzentration für die betrachtete Stunde (Button „Statistikprüfung“), Erstellung des Boxplots anhand der dargestellten Daten für den Mittelwert und den Maximalwert der CO₂-Konzentration

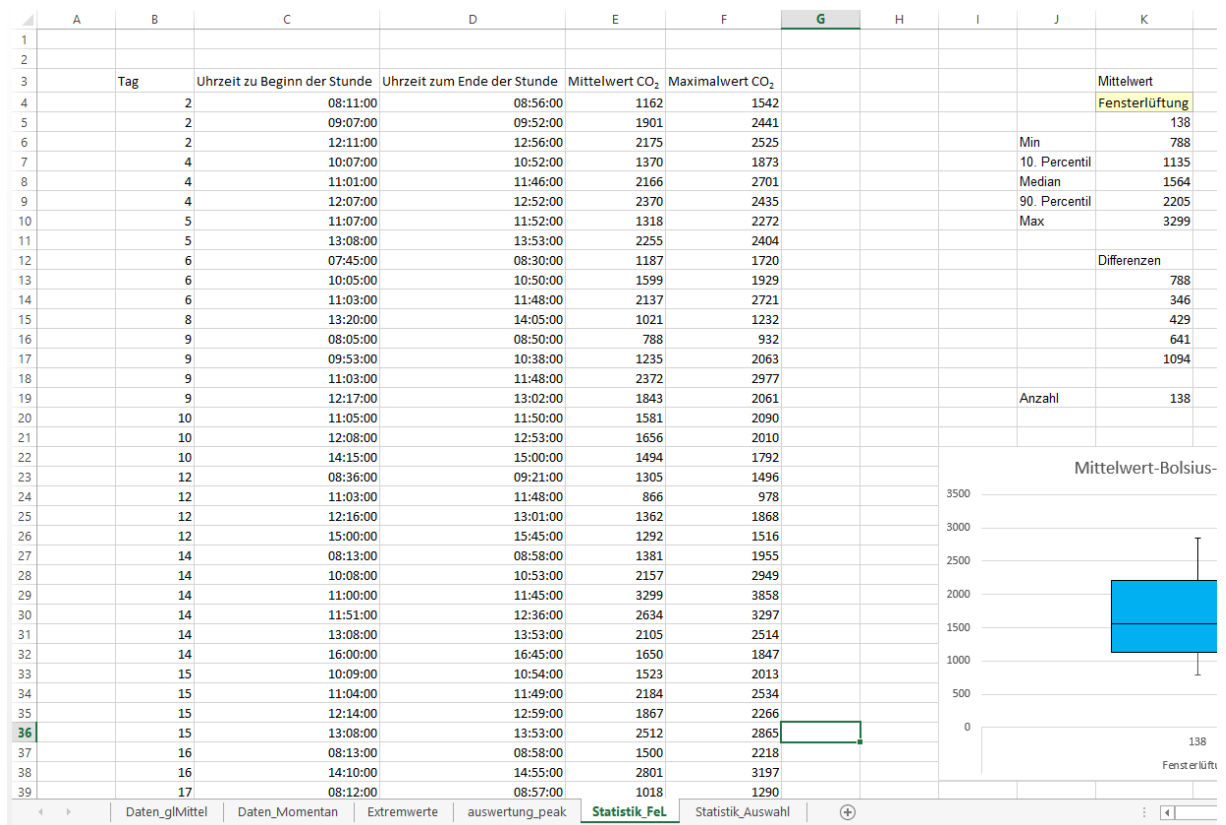


Abbildung 12: Ausschnitt aus dem Tabellenblatt "Statistik"

- Statistik_Auswahl: Kopie des Tabellenblattes „Statistik“, um händisch Ausreißer-Peaks zu entfernen (z.B. durch untypische Uhrzeiten)

Erklärung zu „auswertung_peak“: In diesem Tabellenblatt werden die Peaks aufgelistet, die alle 5 Kriterien des Buttons „Weitere Kriterien prüfen“ erfüllen bzw. nicht erfüllen (???). Werden Sie nicht erfüllt, kann durch die negative Zahl unter den drei Fragezeichen ermittelt werden, an welchem Kriterium der Peak gescheitert ist.

1. Kriterium: Differenzzeit zwischen den Peaks mehr als 50 Minuten (nicht erfüllt, dann „0“)
2. CO₂-Differenz von Peak und Maximum innerhalb der 50 Minuten davor größer 20 ppm (aktueller Wert um 20 ppm größer als MaxWert der letzten 50 min) (nicht erfüllt, dann „-6“)
3. CO₂-Wert 45 min vor dem Peak mindestens 100 ppm geringer (nicht erfüllt, dann „-3“)
4. CO₂-Wert 10 min nach dem Peak mindestens 25 ppm geringer (nicht erfüllt, dann „-4“)
5. Gibt es einen Peak, der aber den bisherigen Tagesmaximalwert nicht überbieten (Kriterium 2) kann, soll ein Mittelwert von 45 - 40 Minuten vorher und 30 - 25 Minuten vorher gebildet werden. Steigt der Mittelwert um mehr als 50 ppm an, so ist der Peak zu identifizieren. (nicht erfüllt, dann „-5“)

Mit dem beschriebenen Excel-Tool erfolgt die Auswertung für die Studien „Bolsius“, „Sick/Dietz“ sowie „Fromme“. Bei allen anderen betrachteten Studien konnte auf die Anwendung des Excel-Tools verzichtet werden, da die Angaben zur Unterrichtszeiten und Pausen aus den Rohdaten vorlagen, durch die Messdatenaufzeichnung selbst ersichtlich waren oder in der Studie jeweils nur eine Unterrichtseinheit gemessen wurde (z.B. Studie „Bischof“).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der Erstellung des Excel-Tools für die Ermittlung von Schulstunden bei Studien mit unbekanntem Unterrichtszeiten die Untersuchung erleichtert wird und mit eindeutig festgelegten Kriterien auch nur Schulstunden als Ergebnis vorliegen, die alle Kriterien erfüllen. Das Ziel für die Ermittlung der Schulstunden mit dem Excel-Tool ist dabei eindeutig das möglichst sichere Detektieren von eindeutigen Schulstunden unter Inkaufnahme der Reduzierung der insgesamt möglichen detektierbaren Schulstunden. Damit gelingt eine deutliche Erhöhung der Objektivität der Bewertung durch eine Abgrenzung zur händischen Auswahl, welche stark vom subjektiven Empfinden abhängig ist und dadurch keine klaren Grenzen für Kriterien aufweist.

Da das Detektieren der Schulstunden allerdings von den gewählten Kriterien abhängt und dieser Ansatz erstmals verwendet wurde, ist die Herangehensweise eindeutig als Trial-and-Error-Methode zu verstehen und bedarf einer weiteren Konsolidierung der gewählten Parameter. Grenzen sind dem Excel-Tool gesetzt, wenn der CO₂-Verlauf über einen längeren Zeitraum nahezu konstant ist (z.B. bei einer sehr guten Regelung nach Kohlendioxid; siehe Studie „Lambertz“), da dann die verwendeten Kriterien nicht mehr greifen und daher auch keine Schulstunden detektiert werden können.

5.2 Darstellung von Konzentrationsverläufen mit Carpet-Plots

Eine Möglichkeit zum Visualisieren der Kohlendioxidkonzentrationen ist die Darstellung von zeitlichen Verläufen als Carpet-Plots. Abbildung 13 zeigt am Beispiel der Schule Olbersdorf [Bolsius] eine Schulwoche im Dezember 2014 mit Zuluft-Kastenfenster als Fensterlüftung und in Kombination mit Abluftanlage.

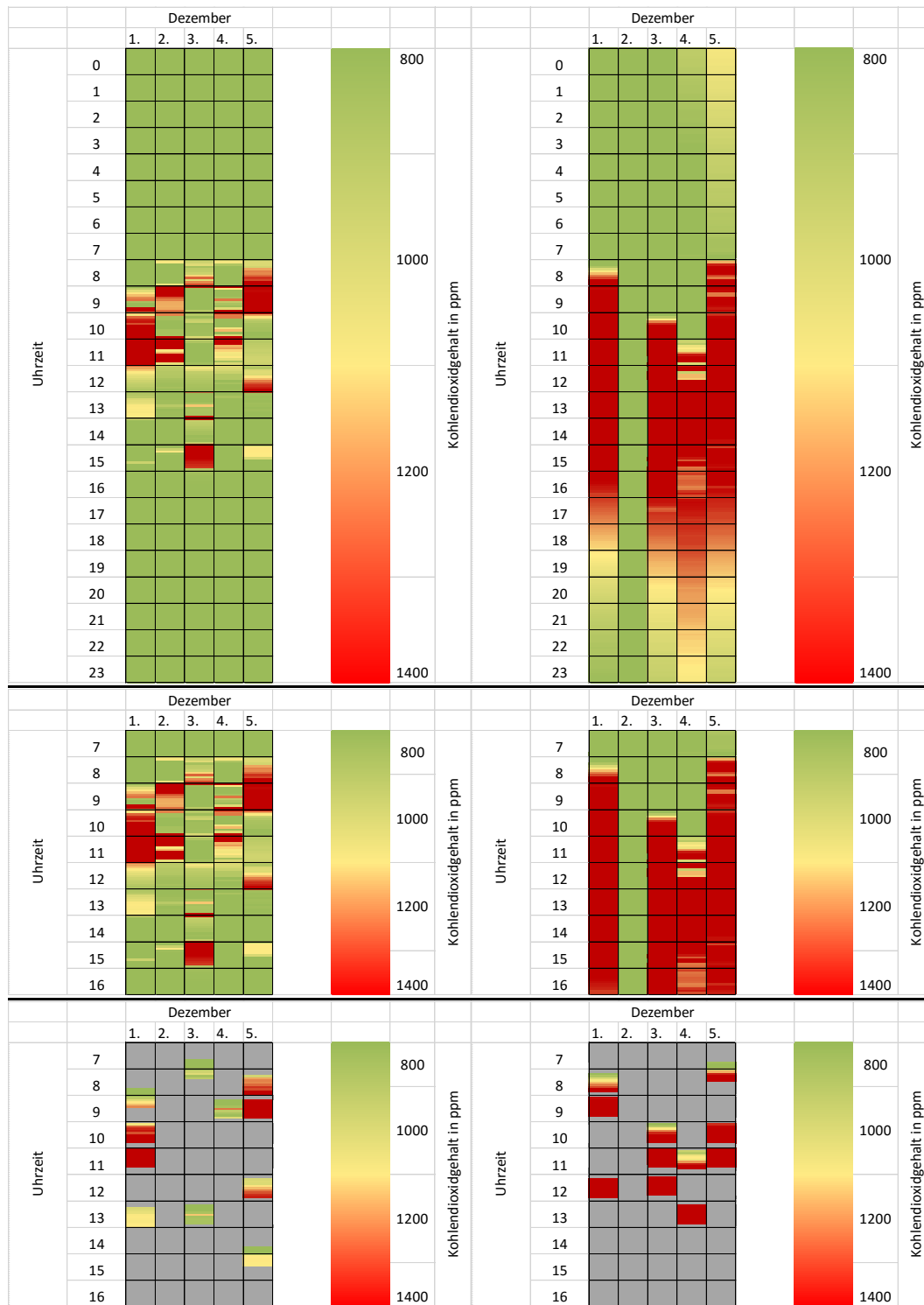


Abbildung 13: Abluftanlage mit Zuluft-Kastenfenster (links) und Fensterlüftung mit Zuluft-Kastenfenster (rechts) Schulwoche gesamt (oben), Schulwoche Unterrichtszeit (Mitte), detektierte Schulstunden mit Excel-Tool (unten)(Datenquelle: [Bolsius])

Im Carpet-Plot (auch Rasterdiagramm genannt) wird jeder betrachtete Punkt (Messpunkt oder Mittelwertbildung mehrere Messpunkte) in ein Koordinatensystem mit Achsen unterschiedlicher Auflösungen (x-Achse Tage und y-Achse Stunden) aufgetragen. Durch die Farbkodierung der betrachteten Punkte (grün für geringe CO₂-Werte → hygienisch unbedenklich, rot für hohe CO₂-Werte → hygienisch bedenklich) lässt sich der Konzentrationsverlauf von CO₂ über den ganzen Tag gut erkennen. Minima und Maxima oder regelmäßige und unregelmäßige Ereignisse können trotz großer Datenmengen durch ein Carpet-Plot schnell vom Betrachter erfasst werden.

Da bei der Darstellung eines Carpet-Plots die Verläufe zwar gut erkennbar sind, die Korrelation zwischen CO₂-Konzentration und Anforderung jedoch nicht ersichtlich ist, kann die Funktion eines Lüftungssystems nicht quantitativ bewertet werden. Daher wird für die weitere Betrachtung auf Carpet-Plots verzichtet, die aber insbesondere bei großen Datenmengen zeitliche Zusammenhänge gut darstellen.

5.3 Darstellung von Mittel- und Maximalwerten mit Streudiagrammen

Bei einer Orientierung der Auswertung auf einzelne Unterrichtseinheiten bietet sich eine Darstellung mit Streudiagrammen (Punktwolken) an. Diese Darstellung kann zum einen für jede einzelne Unterrichtsstunde erfolgen oder aber über alle Unterrichtsstunden eines Klassenraumes erfolgen.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen zunächst Streudiagramme für einzelne Unterrichtseinheiten für den Mittel- und den Maximalwert beispielhaft für die Studie „Birmili“. Ergänzt wird die Grafik durch die vom BNB geforderten Grenzwerte.

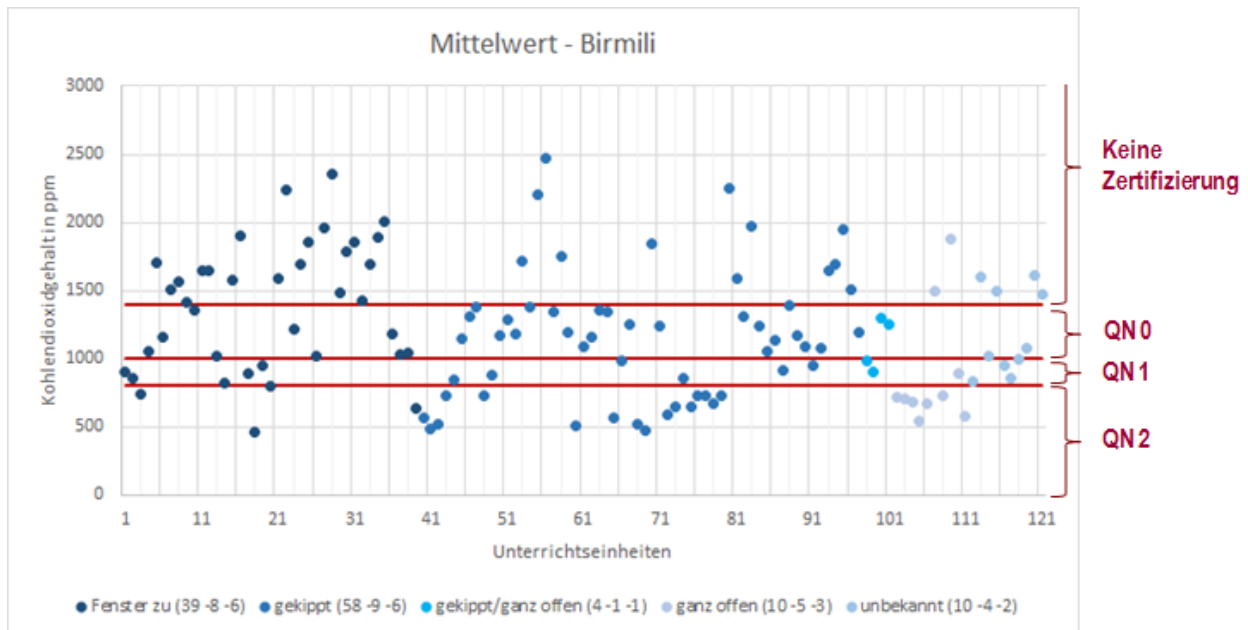


Abbildung 14: Streudiagramm (Unterrichtseinheit) des Mittelwertes der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode

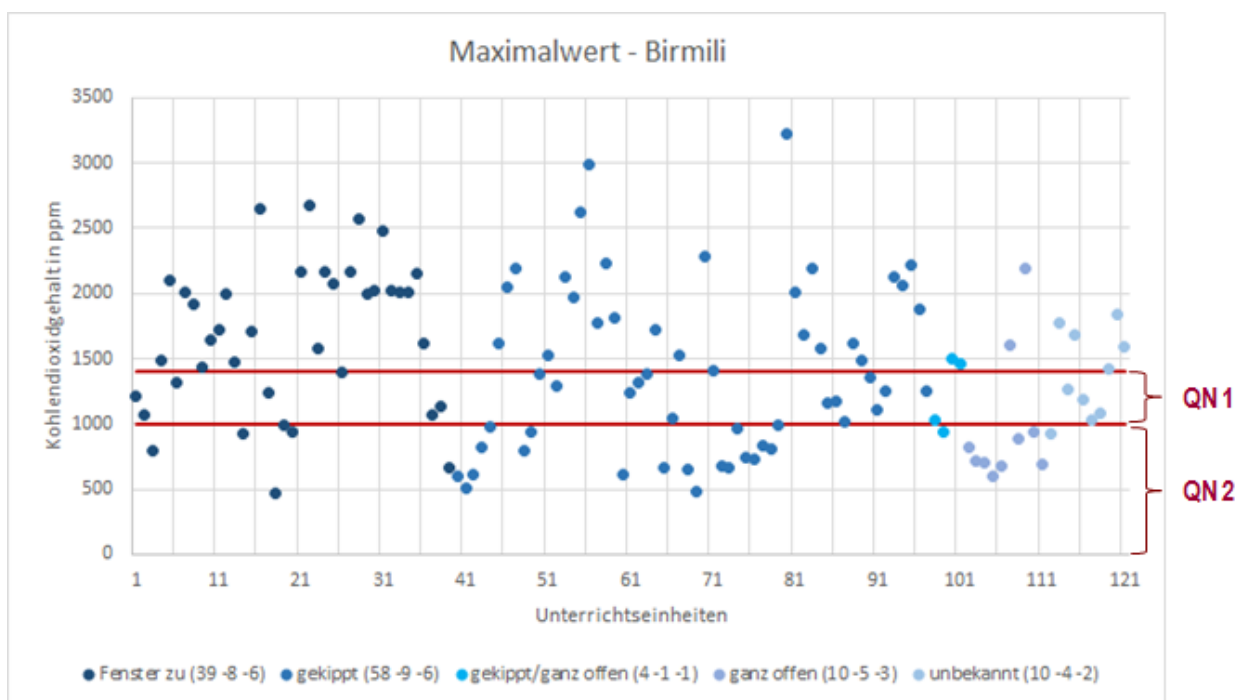


Abbildung 15: Streudiagramm (Unterrichtseinheit) des Maximalwertes der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode

Der Zahlenschlüssel unter den Streudiagrammen gibt dabei an:

- 1. Zahl = Anzahl der Unterrichtseinheiten (Unterrichtsstunde von 45 Minuten)
- 2. Zahl = Anzahl der Klassenräume
- 3. Zahl = Anzahl der Schulen.

Alternativ ist die Darstellung mit Streudiagrammen für einzelne Klassenräume mit allen Unterrichteinheiten je Klassenzimmer möglich. Abbildung 16 zeigt dazu den schematischen Aufbau eines Streudiagramms für Klassenräume und erklärt die wichtigsten Lageparameter. Sind in einem Klassenraum mehrere Unterrichtsstunden dokumentiert worden, dann weist dieser Raum drei Werte auf (10. Perzentil, Median des arithmetischen Mittelwertes bzw. Maximalwertes und 90. Perzentil) – in Abbildung 16 links. Bei Klassenräumen, in denen nur eine Unterrichtsstunde dokumentiert wurde, kann nur ein Wert und kein Wertebereich dargestellt werden – in Abbildung 16 rechts.

Die im weiteren Bericht verwendeten Werte sollen an dieser Stelle kurz genannt bzw. erläutert werden.

- Minimalwert,
- 10. Perzentil (Wert, den 10% der ermittelten Werte unterschreiten),
- Median (Wert, den 50 % der ermittelten Werte über- und unterschreiten),
- 90. Perzentil (Wert, den 90% der ermittelten Werte unterschreiten) und
- Maximalwert.

Abbildung 17 zeigt diese Werte grafisch an einem Beispiel. Zusätzlich ist der arithmetische Mittelwert für den betrachteten Zeitraum aufgetragen.

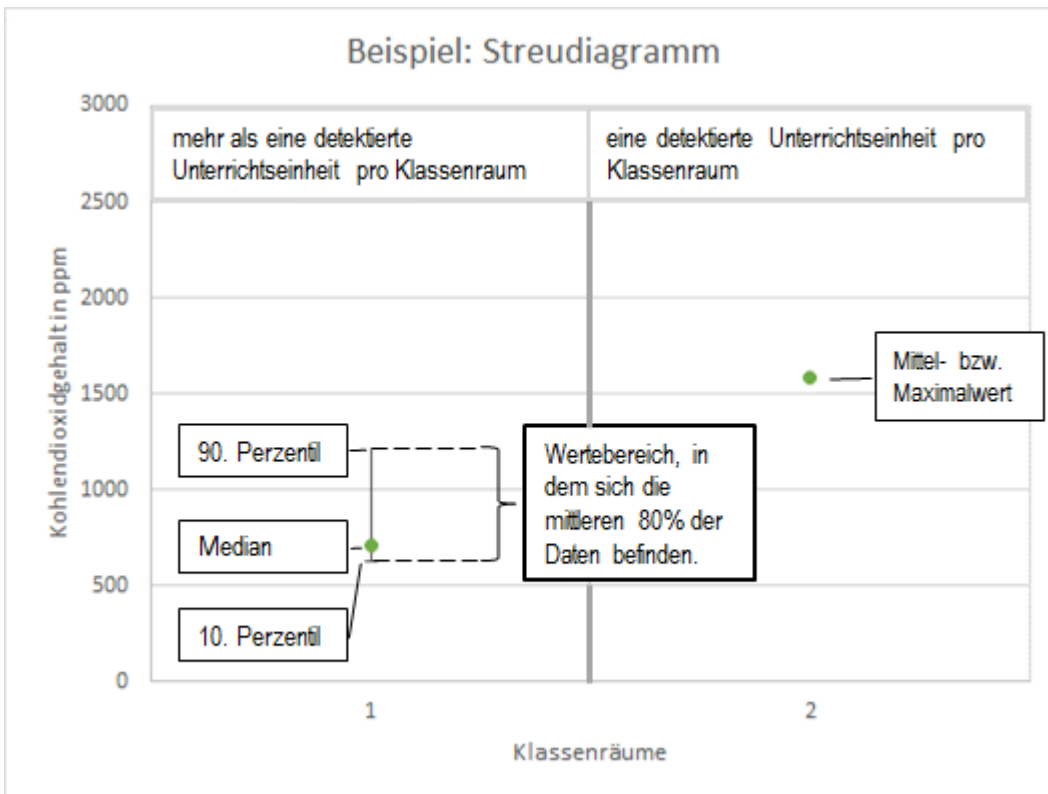


Abbildung 16: Schema Streudiagramm über Klassenräume mit Erklärung

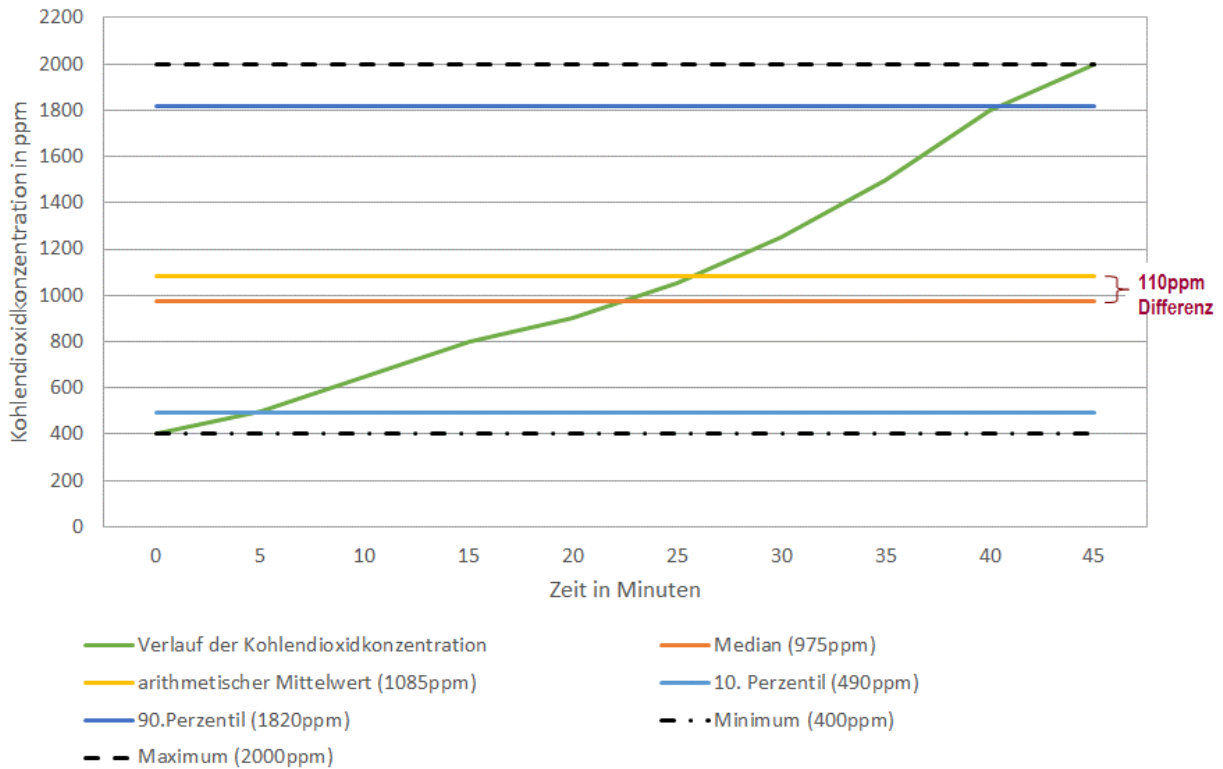


Abbildung 17: Beispiel für die im Bericht in Bezug genommenen Größen

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die Ergebnisse - arithmetischer Mittelwert und Maximalwert - der betrachteten einzelnen Klassenräume beispielhaft für die Studie „Birmili“.

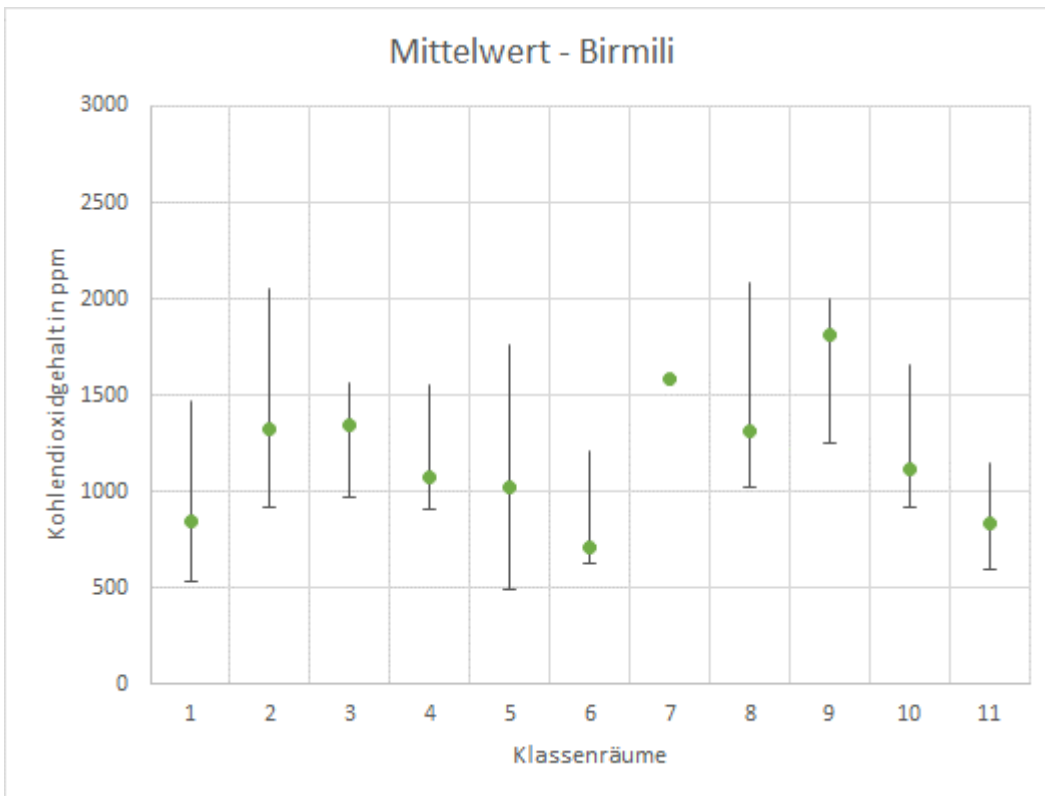


Abbildung 18: Unsortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode

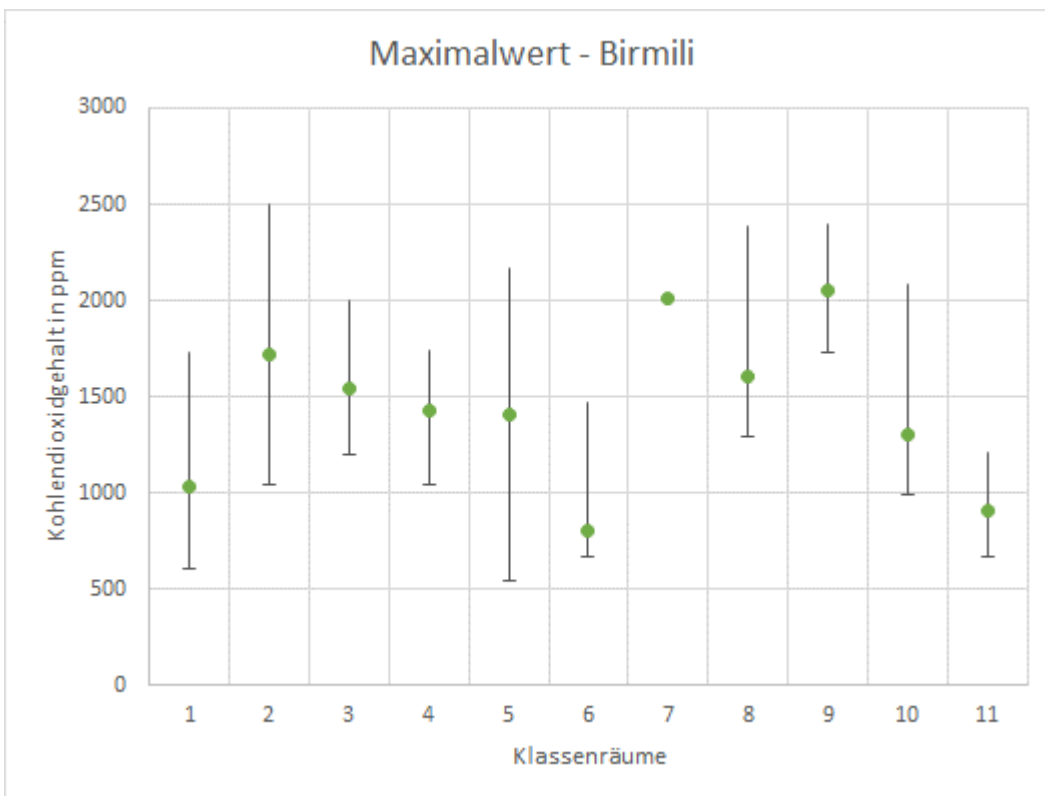


Abbildung 19: Unsortiertes Streudiagramm des Maximalwertes der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Ergebnisse als sortiertes Streudiagramm. Ergänzt wird die Darstellung durch die Qualitätsniveaus des BNB.

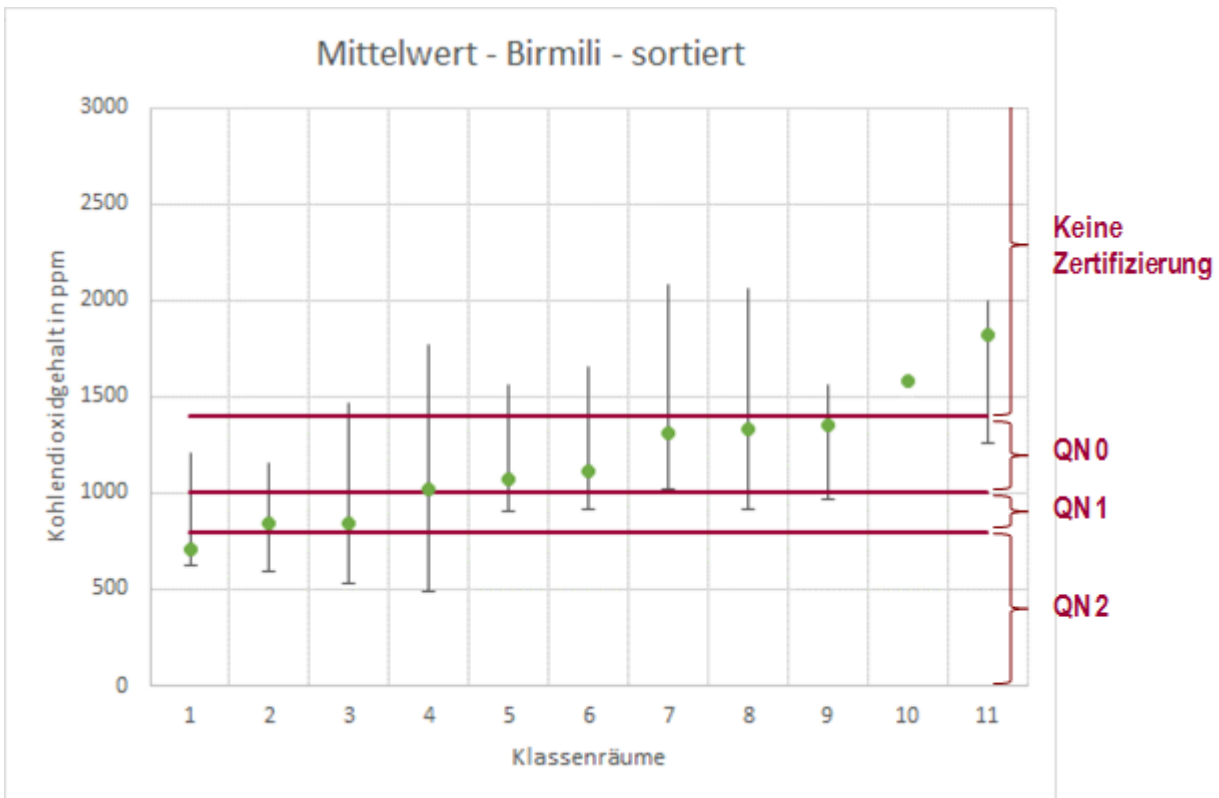


Abbildung 20: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Birmili" mit den Qualitätsniveaus nach BNB in der Wintermessperiode

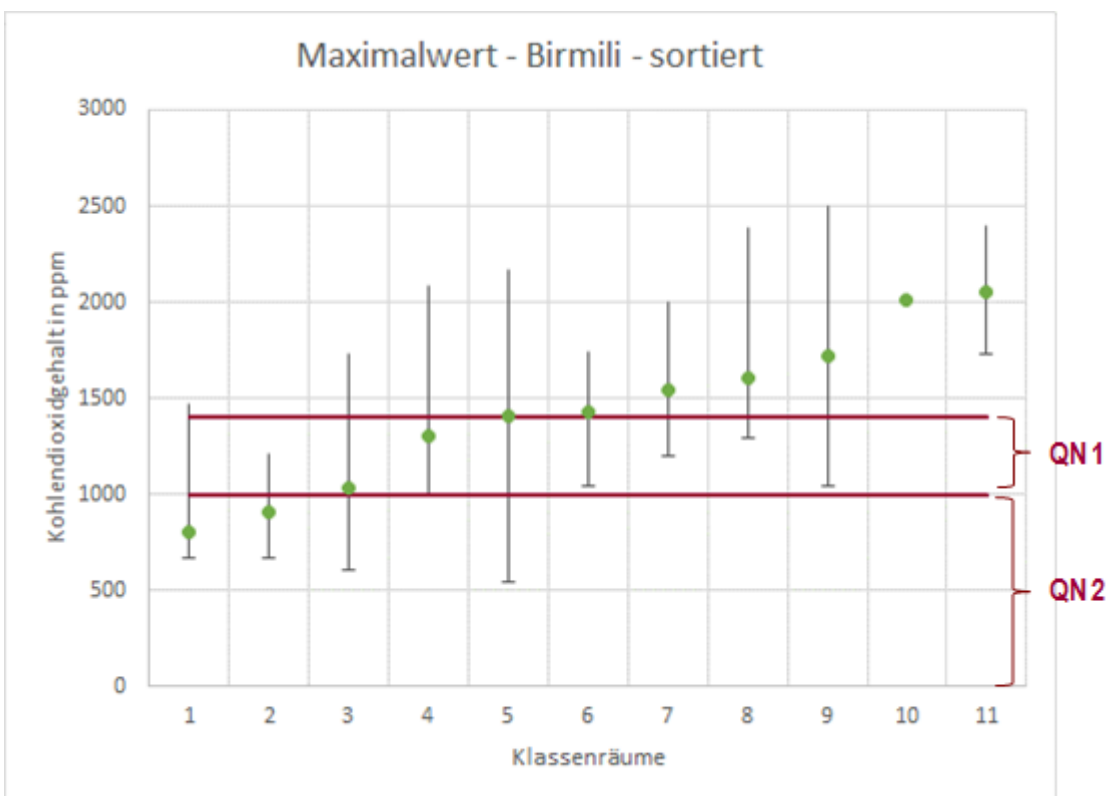


Abbildung 21: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes der Studie "Birmili" mit den Qualitätsniveaus nach BNB in der Wintermessperiode

Liegen die Angaben vor, kann der Kohlendioxidgehalt der Unterrichtsstunde optional bezogen auf die spezifische Raumfläche pro Person aufgetragen werden, siehe Anhang E.

Streudiagramme können für einzelne Unterrichtseinheiten oder für einzelne Klassenräume als Zusammenfassung über die Unterrichtseinheiten dargestellt werden.

Sollen Studien mit gleichem Lüftungssystem in einem Diagramm dargestellt werden, dann lässt sich das als Streudiagramm ebenfalls für einzelne Unterrichtsstunden oder einzelne Klassenräume realisieren. Eine Darstellung für Unterrichtsstunden lässt dann allerdings keine sachgerechte Bewertung mehr zu, da Studien mit sehr vielen gemessenen Unterrichtsstunden zu Tendenzverschiebungen gegenüber Studien mit einzelnen Unterrichtsstunden führen können. So könnte beispielsweise die Messung von 100 Unterrichtsstunden in einem einzigen Klassenraum visuell im Streudiagramm eine größere Bedeutung bekommen, als die Messung von je 30 Unterrichtseinheiten in 30 verschiedenen Klassenräumen. Nachfolgend wird deshalb klar in Darstellungen für Unterrichtseinheiten und für Klassenräume unterschieden. Für Klassenräumen mit mehreren gemessene Unterrichtseinheiten steht dann der Median des arithmetischen Mittels bzw. des Maximalwerts im Zentrum der Auswertung.

Streudiagramme lassen für Unterrichtseinheiten und Klassenräume eine Darstellung von Mittelwerten und Maximalwerten zu. Beide Werte sind momentan im Bewertungsansatz des BNB vertreten. Jedoch sollten die Maximalwerte und ihre Interpretation aus den gezeigten Diagrammen mit Bedacht getätigt werden, da es leichter zu Maximalwertüberschreitungen durch Messfehler oder auch Manipulation kommen kann. Daher sollten die ausgewiesenen arithmetischen Mittelwerte im Fokus stehen und den Maximalwerten eher ein informativer Charakter zugeschrieben werden.

5.4 Darstellung von statistischen Kenngrößen mit Boxplots

Eine Darstellung mit Boxplots erlaubt die statistisch orientierte Bewertung der Ergebnisse auf Basis einzelner Unterrichtsstunden (Unterrichtseinheit von 45 Minuten). Für jede Unterrichtsstunde können der arithmetische Mittelwert und der Maximalwert ermittelt und statistisch unter Angabe von

- Minimalwert,
- 10. Perzentil (Wert, den 10% der ermittelten Werte unterschreiten),
- Median (Wert, den 50 % der ermittelten Werte über- und unterschreiten),
- 90. Perzentil (Wert, den 90% der ermittelten Werte unterschreiten) und
- Maximalwert.

bewertet werden. In der Boxplot-Darstellung werden die oben genannten Werte in der sogenannten Fünf-Punkte-Zusammenfassung dargestellt. Anders als beim „klassischen“ Boxplot wird hier auf die Darstellung der oberen und unteren Quantile verzichtet und stattdessen das 10. und 90. Perzentil gezeigt (schematisch in Abbildung 22). Dabei liegen etwa 80% der Daten innerhalb der Box, etwa 10% der Daten oberhalb und etwa 10% der Daten unterhalb. Über die Boxbreite lässt sich ermitteln, ob etwa 80% der Daten eher nahe am Median oder weiter verstreut liegen. Eine weitere Aussage kann über die Lage des Medians in der Box getroffen werden: Je kleiner eine Boxseite im Vergleich zur anderen Boxseite ist, umso mehr konzentrieren sich die Daten auf dieser Medianseite.

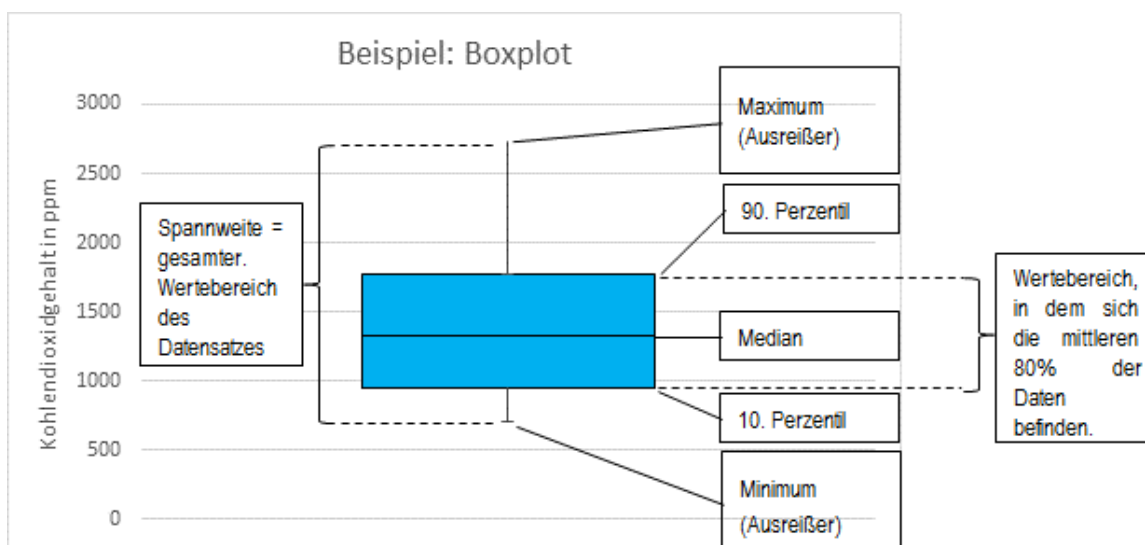


Abbildung 22: Schema Boxplot mit Erklärung

In Abbildung 23 (arithmetischer Mittelwert) und Abbildung 24 (Maximalwert) wird die Darstellung mit Boxplots am Beispiel der Studie „Birmili“ aufgezeigt.

Der Zahlenschlüssel unter den Boxplots gibt an:

- 1. Zahl = Anzahl der Unterrichtseinheiten (Unterrichtsstunde von 45 Minuten)
- 2. Zahl = Anzahl der Klassenräume
- 3. Zahl = Anzahl der Schulen.

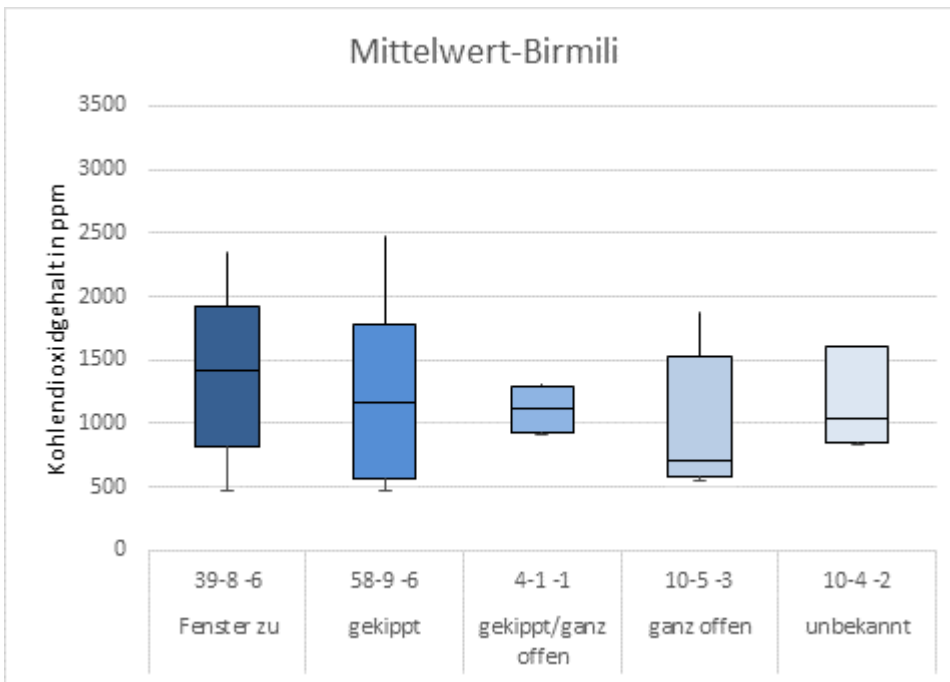


Abbildung 23: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode

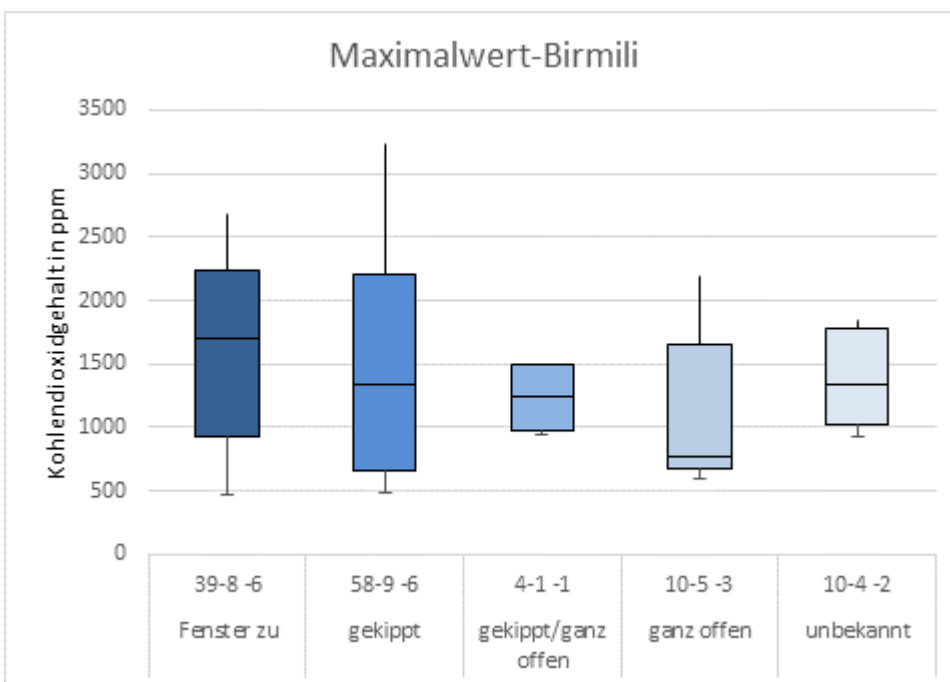


Abbildung 24: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode

Durch die Darstellung als Boxplot kann leicht ein Eindruck vermittelt werden, wie sich die Ergebnisse verteilen. Statistische Größen wie Median, 10. und 90. Perzentil sowie Minimum und Maximum bilden die Grundlage für Boxplots. Ein größerer Datenbereich für den Maximalwert kann als Indiz für Messfehler oder Sensormanipulation gedeutet werden.

6 Ergebnisse

6.1 Allgemeines

In der vorliegenden Metastudie „Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung“ ist mit dem Fokus auf Deutschland eine Zusammenfassung über den aktuellen (veröffentlichten) Stand der Forschung hinsichtlich der Thematik „Kohlendioxidgehalte während der Unterrichtseinheit“ erstellt worden.

Aus den insgesamt 15 angefragten Studien wurden sechs Studien aussortiert. Als Hauptausschlusskriterien stellte sich der zu lange in der Vergangenheit liegende Erhebungszeitraum (keine Messwerte mehr zur Verfügung) oder die fehlende Rückmeldung bei der Datenanfrage heraus. Es wurden insgesamt neun Studien entsprechend einer festgelegten methodischen Herangehensweise aufbereitet. Dabei wurden jeweils fünf hinsichtlich Fensterlüftung und mechanischer Lüftung und eine Studie hinsichtlich hybrider Lüftung ausgewertet.

Für die Auswertung sind sowohl die einzelnen detektierten Unterrichtseinheiten über den Messzeitraum als auch alle detektierten Unterrichtseinheiten für einen einzelnen Klassenraum über den Messzeitraum für das jeweilige Lüftungssystem betrachtet worden. Alle nachfolgenden Abbildungen sind durch die Angaben der Referenzwerte für das BNB ergänzt worden (800 ppm, 1000 ppm und 1400 ppm). Die getrennte Betrachtung für einzelne Klassenräume und einzelne Unterrichtsstunden ist gewählt worden, um etwaige starke Wichtungen von Ergebnissen einzelner Studien aufzuzeigen.

6.2 Fensterlüftung

6.2.1 Unterrichtseinheit

Die Fensterlüftung in Klassenräumen wurde in 5 Studien näher untersucht. Abbildung 25 zeigt zunächst als Streudiagramm die arithmetischen Mittelwerte aller Unterrichtseinheiten. Dabei fallen die unter 800 ppm liegenden arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Unterrichtseinheiten der Studie „Birmili“ auf. Diese Werte entsprechen dem realen Unterrichtsverhalten und sind nicht auf nicht besetzte Klassenzimmer zurückzuführen, viel mehr wurde in diesen Unterrichtsstunden bspw. ganzzzeitiglich mit ganz offenem oder gekipptem Fenster gelüftet und dadurch der CO₂-Anstieg im Klassenraum unterbunden. Das in Abbildung 26 gezeigte sortierte Streudiagramm sowie die Darstellung in Tabelle 4 machen deutlich, welchen Anteile der Unterrichtsstunden die einzelnen Anforderungsstufen des BNB erfüllt werden.

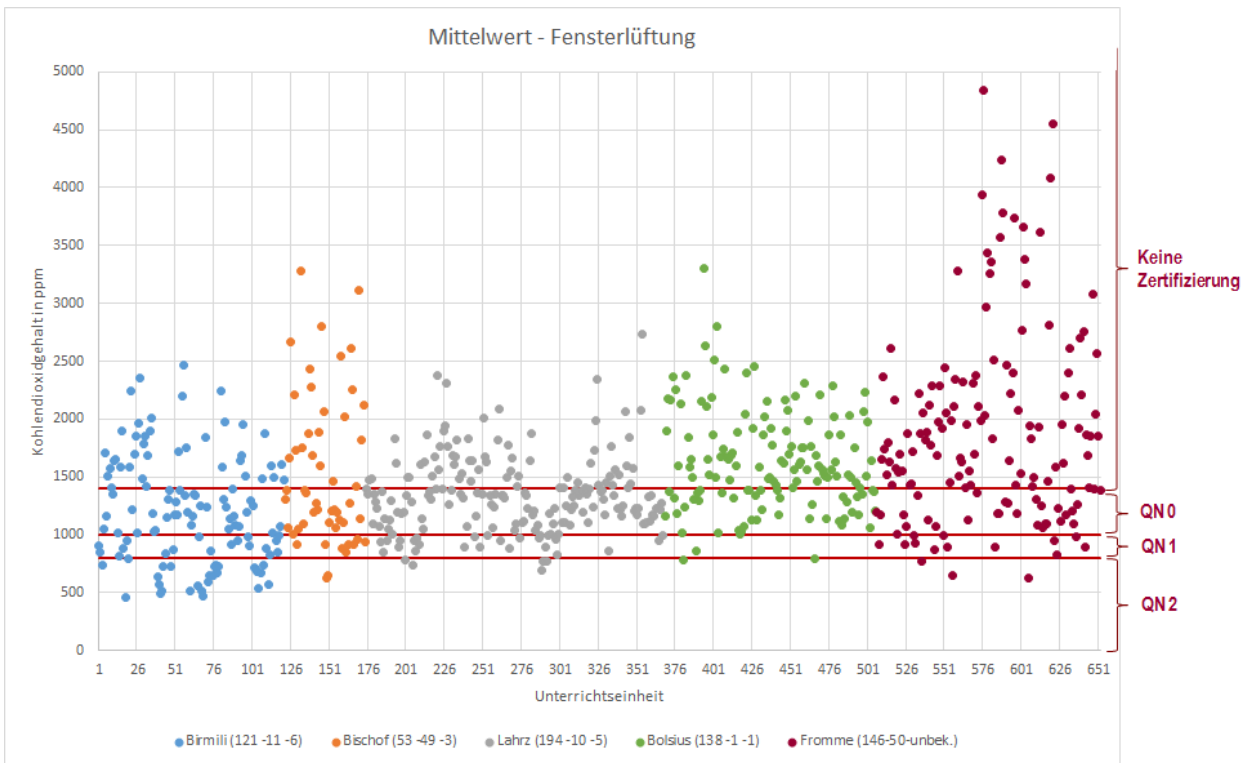


Abbildung 25: Streudiagramm des Mittelwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

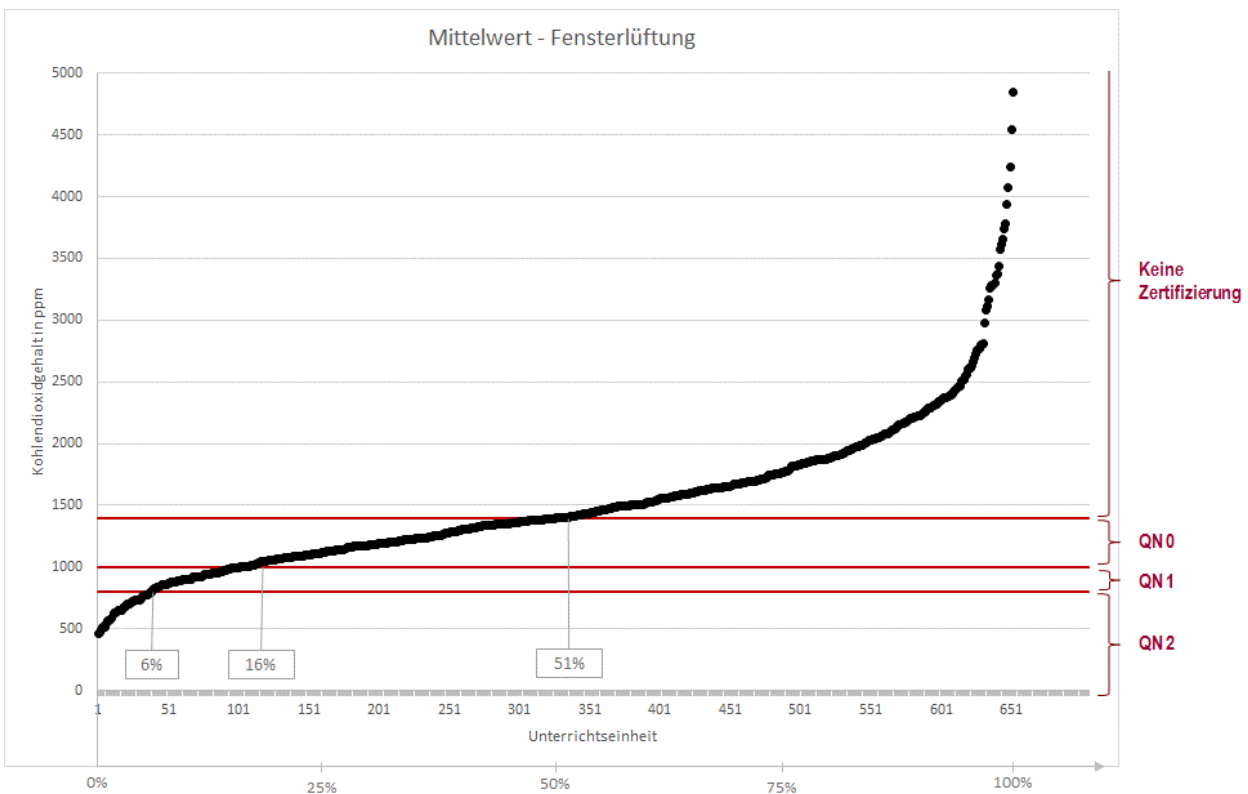


Abbildung 26: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des arithmetischen Mittelwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

Tabelle 4: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Mittelwertes für Fensterlüftung (Unterrichtseinheit)

Mittelwert		
insgesamt	652	100%
$c_{CO_2} \leq 800$ ppm	39	6%
$800 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1000$ ppm	63	10%
$1000 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1400$ ppm	229	35%
$c_{CO_2} > 1400$ ppm	321	49%

Die nachfolgende Tabelle 5 sowie die Abbildung 27 (unsortiertes Streudiagramm) und Abbildung 28 (Sortiertes Streudiagramm) zeigen die Verhältnisse für den Maximalwert für Unterrichtseinheiten bei Fensterlüftung.

Tabelle 5: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Maximalwertes für Fensterlüftung (Unterrichtseinheit)

Maximalwert		
insgesamt	652	100%
$c_{CO_2} \leq 1000$ ppm	46	7%
$1000 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1400$ ppm	104	16%
$c_{CO_2} > 1400$ ppm	502	77%

Abbildung 29 zeigt die Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem arithmetischen Mittelwert unter 1000 ppm in Abhängigkeit von der Unterrichtszeit. Ebenfalls aufgezeigt ist der Median der arithmetischen Mittelwerte. Abbildung 30 zeigt die gleiche Darstellung für Unterrichtsstunden mit einem Maximalwert der Kohlendioxidkonzentration unter 1000 ppm. Die beiden dargestellten Medianwerte für die jeweilige Unterrichtszeit scheinen auf den ersten Blick nicht zusammen zu passen, da die Medianwerte der arithmetischen Mittelwerte größer sind als die Medianwerte der Maximalwerte. Ursache ist die unterschiedliche Größe der Stichprobe, da zwar 87 Unterrichtseinheiten einen arithmetischen Mittelwert unter 1000 ppm CO₂ aufweisen, aber nur 46 Unterrichtseinheiten einen Maximalwert unter 1000 ppm.

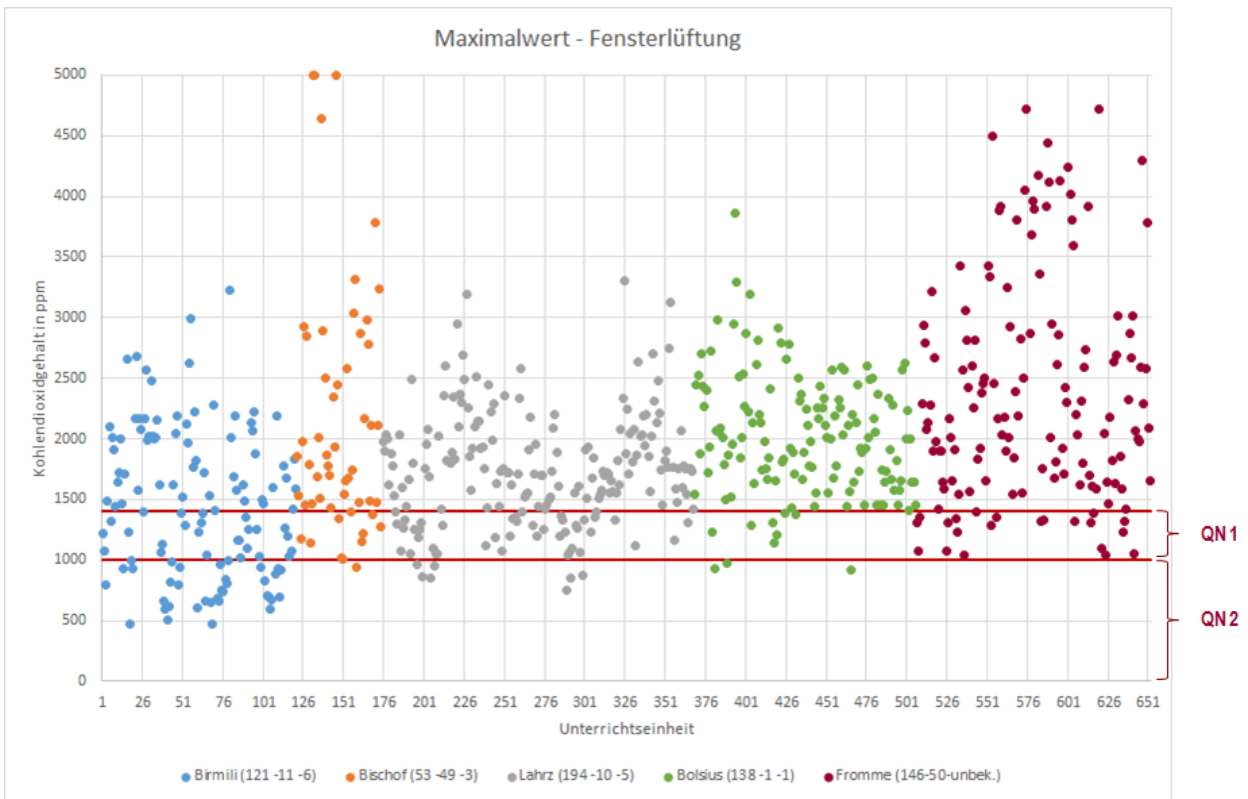


Abbildung 27: Streudiagramm des Maximalwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

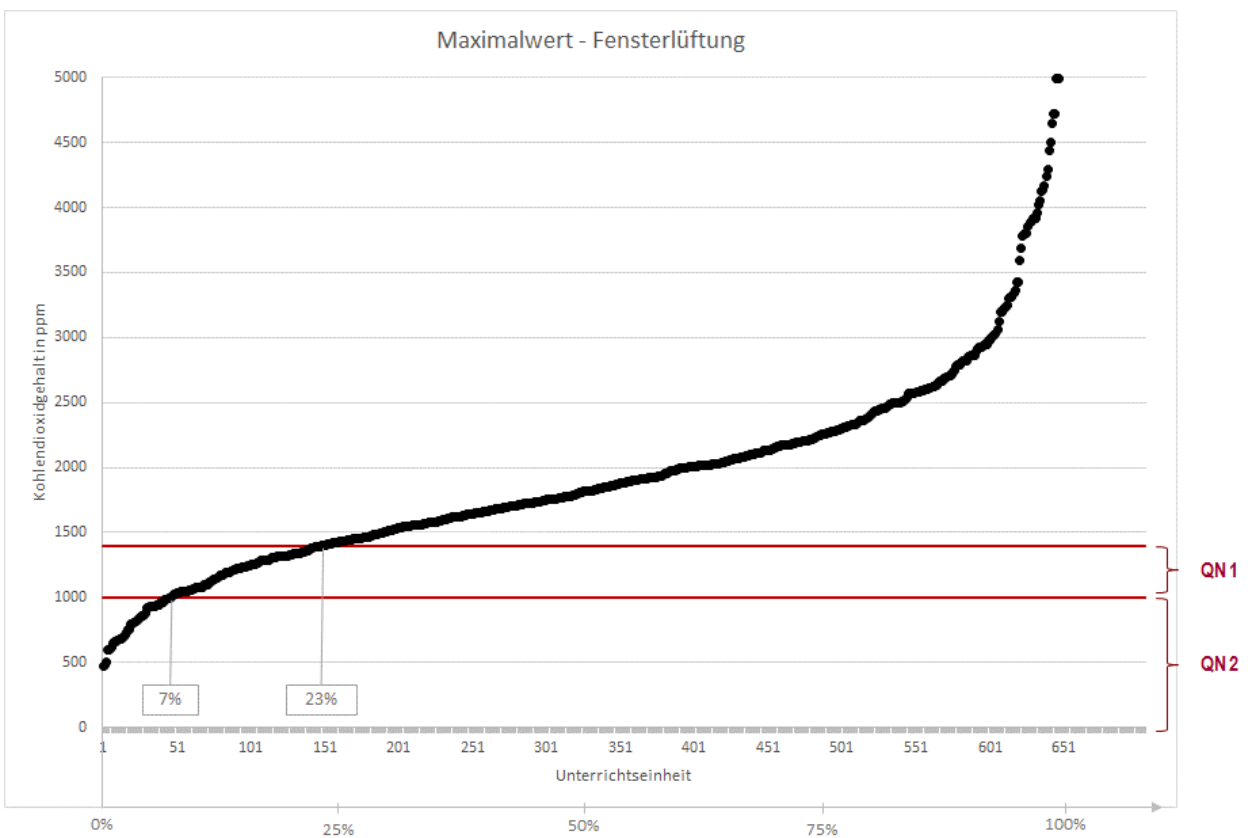


Abbildung 28: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

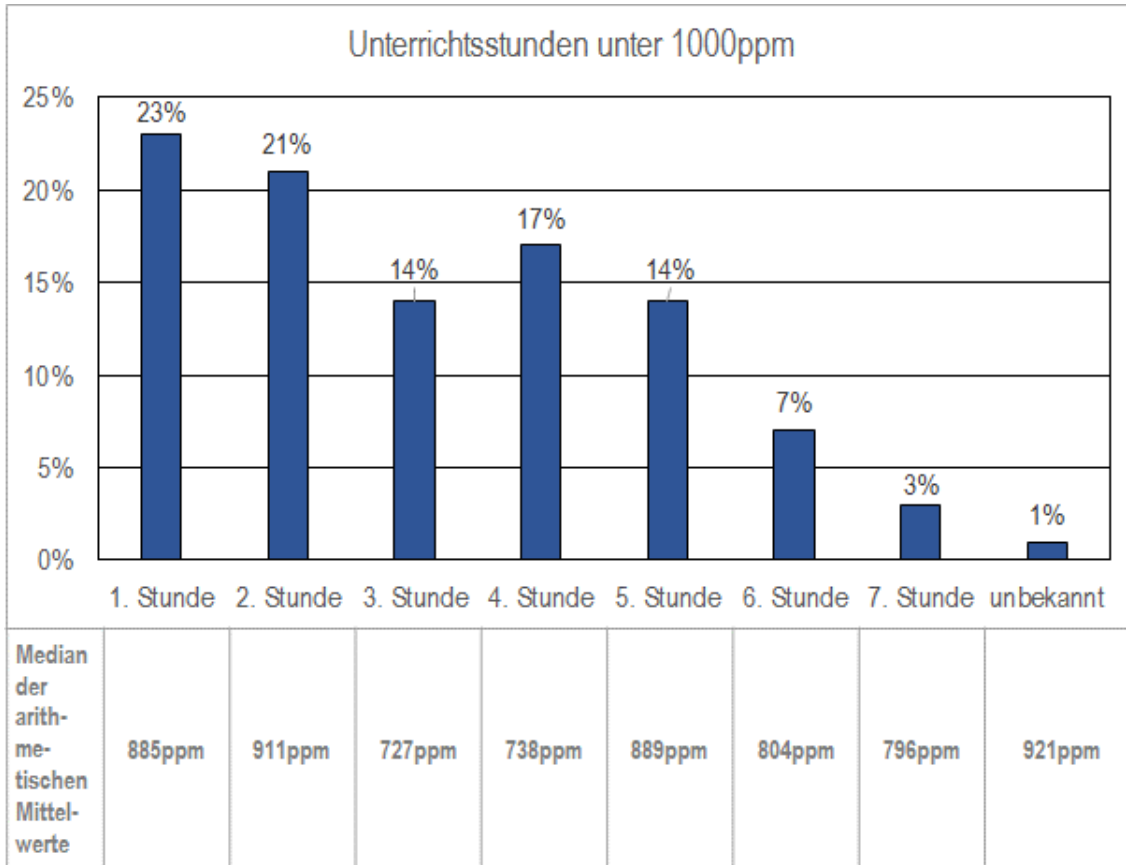


Abbildung 29: Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem arithmetischem Mittelwert unter 1000 ppm (insgesamt: 87 Unterrichtseinheiten, Studien: Birmili, Bischof und Lahrz)

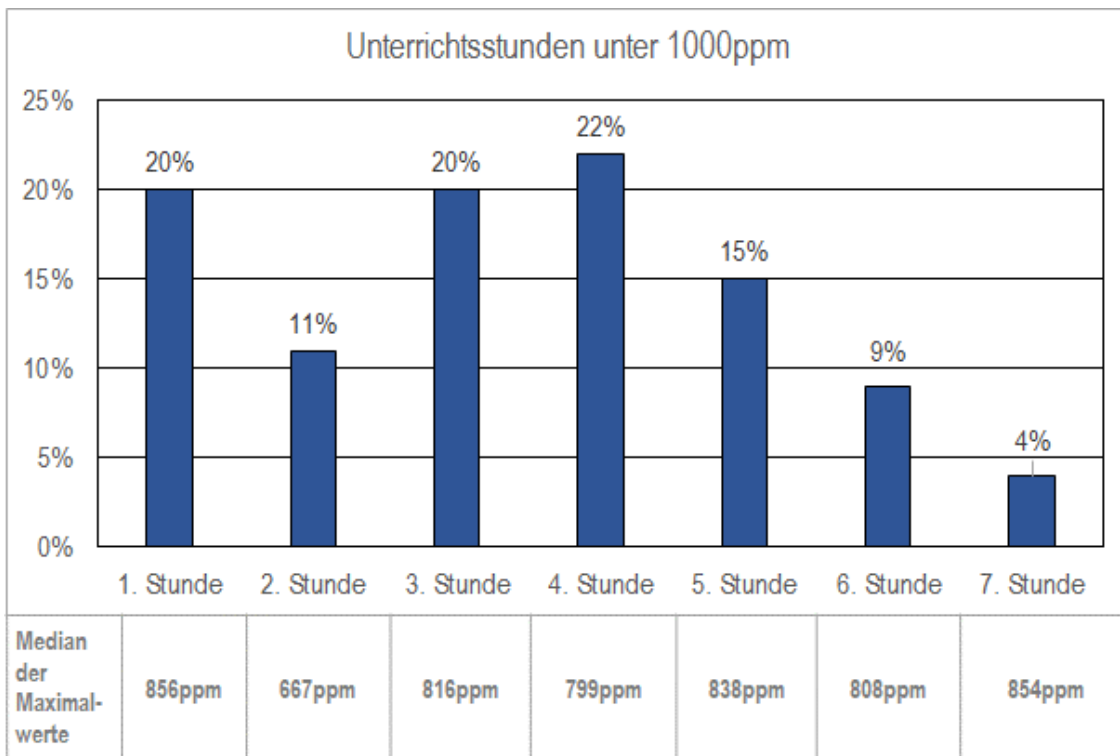


Abbildung 30: Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem Maximalwert unter 1000 ppm (insgesamt:46 Unterrichtseinheiten, Studien: Birmili, Bischof und Lahrz)

Abbildung 31 zeigt die Verteilung der Unterrichtsstunden unter Berücksichtigung der Fensterstellung mit einem arithmetischen Mittelwert unter 1000 ppm. Auffällig ist der recht hohe Anteil für die Fensterstellung „zu“ mit 35 Prozent. Die Grundlage für diese Darstellung sind Lüftungsprotokolle (Beispiel und Prinzip des Multiple-Choice-Fragebogens siehe Abbildung 32), die von LehrerInnen während des Schultages ausgefüllt worden sind. Da keine genauen Angaben zur Lüftungsdauer erfragt worden sind, sind auch die Angaben zur Fensterstellung sehr subjektiv. Z.B. könnte in einer Unterrichtseinheit mit einer Stoßlüftung von 2 x 5 Minuten und 35 Minuten geschlossenen Fenstern im Lüftungsprotokoll die Antwort „zu“ angeführt sein. Eine weitere Erklärung für das gute Abschneiden der Fensterstellung „zu“ könnte auch sein, dass geringe CO₂-Konzentrationen bei (überwiegend) geschlossenen Fenstern auch erreicht werden können, wenn es sich um die ersten beiden Stunden am Schultag handelt bzw. die Stunden nach großen Pausen, wenn die Klassenräume gut gelüftet worden sind.

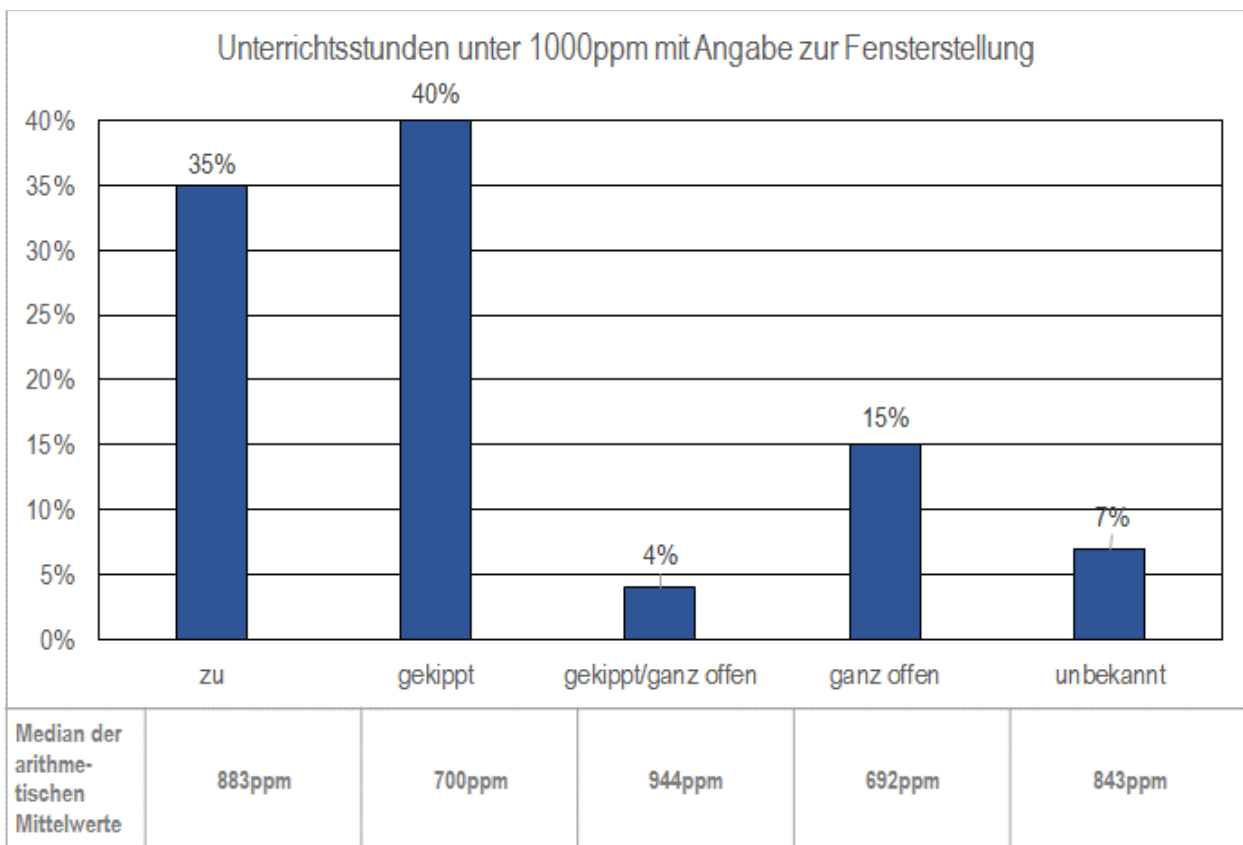


Abbildung 31: Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem arithmetischen Mittelwert unter 1000 ppm und Angabe der Fensterstellung (insgesamt: 55 Unterrichtseinheiten, Studien: Birmili und Bischof)

Anzahl der anwesenden Kinder: 24

Unterrichtszeit:	Kinder im Raum (bitte ankreuzen):	Fenster (bitte ankreuzen):
Unterrichtsbeginn: 08:00 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Pause: 08:45 Uhr	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Unterricht: 08:50 Uhr	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> zu <input checked="" type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Pause: 09:35 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Unterricht: 09:55 Uhr	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Pause: 10:40 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Unterricht: 10:45 Uhr	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Pause: 11:30 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Unterricht: 11:50 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Pause: 12:35 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Unterricht: 12:40 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen
Unterrichtsende: 13:25 Uhr	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein	<input checked="" type="checkbox"/> zu <input type="checkbox"/> gekippt <input type="checkbox"/> ganz offen

Wurde der Raum gereinigt? ja nein

Wichtig: Falls ja, bitte beigefügtes Protokoll ausfüllen (Seite 7-10)

Besonderheiten (z. B.: Stromausfall, Unterbrechung der Messung an den Geräten, Aktivitäten während des Unterrichts (z.B. malen/zeichnen), usw.):

Zeit (wann?):

Was ist passiert? (bitte kurz beschreiben)

.....

Abbildung 32: Beispiel für ein ausgefülltes Lüftungsprotokoll aus der Studie „Birmili“

Ergänzend visualisiert Abbildung 33 die Verteilung der Unterrichtsstunden unter Berücksichtigung der Fensterstellung mit einem Maximalwert unter 1000 ppm. Im Vergleich der Abbildung 31 (arithmetischer Mittelwert) mit Abbildung 33 (Maximalwert) fällt auf, dass der Median des Maximums unerwarteter Weise häufig niedriger ist als der des arithmetischen Mittelwertes. Ursache ist wiederum die unterschiedliche Stichprobengröße (55 Unterrichtseinheiten bei arithmetischem Mittelwert vs. 36 Unterrichtseinheiten bei Maximalwert).

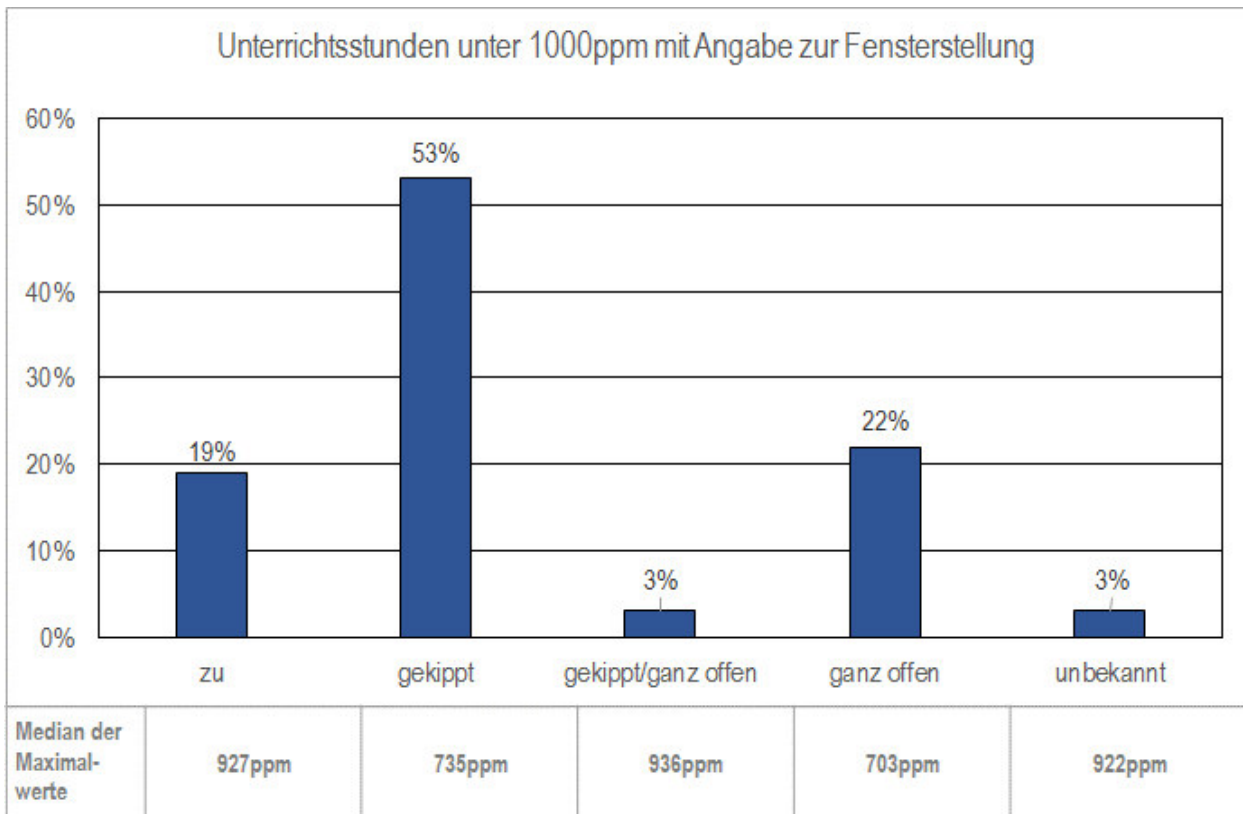


Abbildung 33: Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem Maximalwert unter 1000 ppm und Angabe der Fensterstellung (insgesamt: 36 Unterrichtseinheiten, Studie: Birmili und Bischof)

6.2.2 Klassenraum

Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf Klassenräume und nicht wie in Abschnitt 6.2.1 auf die Unterrichtseinheiten. Ist für einen Klassenraum nur eine Schulstunde gemessen worden, wird der arithmetische Mittelwert bzw. Maximalwert der CO₂-Konzentration wie bei der Darstellung für Unterrichtseinheiten als Punkt im Diagramm gezeigt. Sind für Klassenräume mehrere Unterrichtseinheiten messtechnisch untersucht worden, lässt sich pro Klassenraum in Zusammenfassung der Unterrichtseinheiten der Median, das 10. und 90. Perzentil des arithmetischen Mittelwertes (Abbildung 34 – unsortiert, Abbildung 35 – sortiert und Tabelle 6 – Statistik) bzw. des Maximalwertes (Abbildung 36 – unsortiert, Abbildung 37 – sortiert und Tabelle 7 - Statistik) darstellen, siehe hierzu auch Abbildung 16 in Abschnitt 5.3.

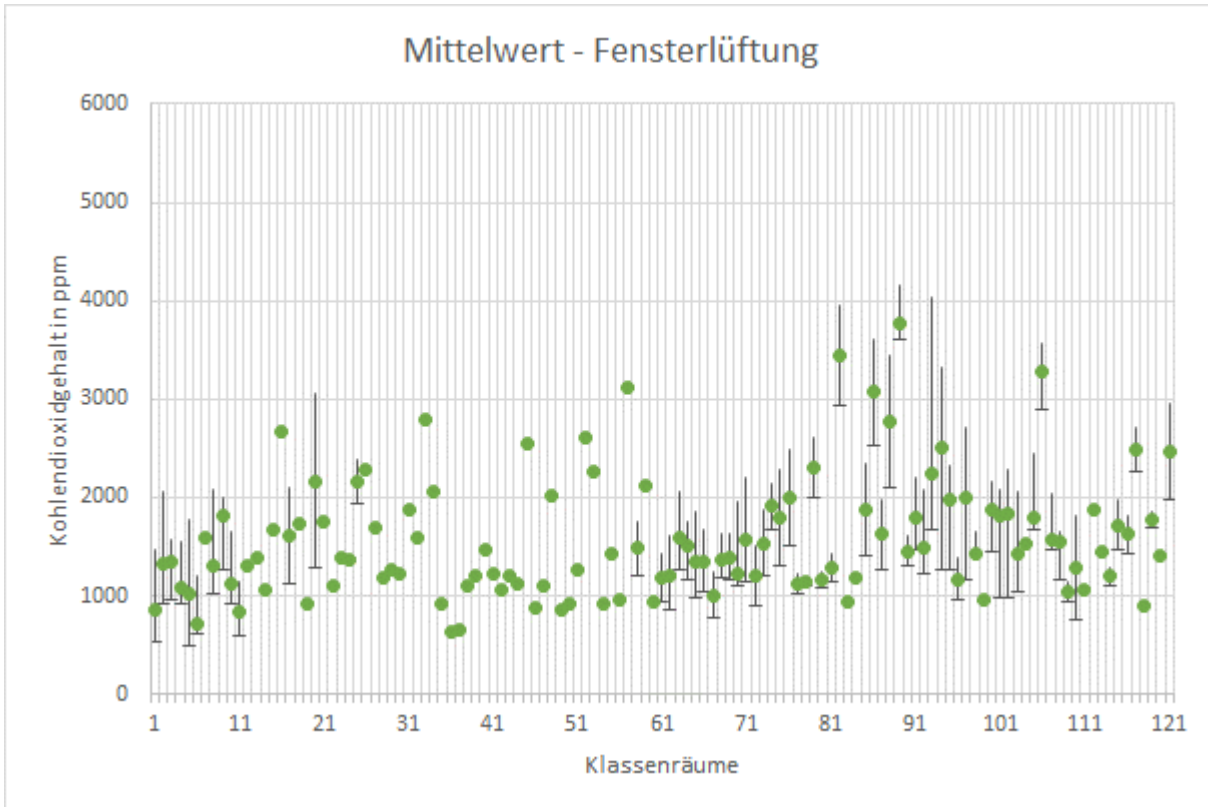


Abbildung 34: Streudiagramm des Mittelwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Klassenraum)

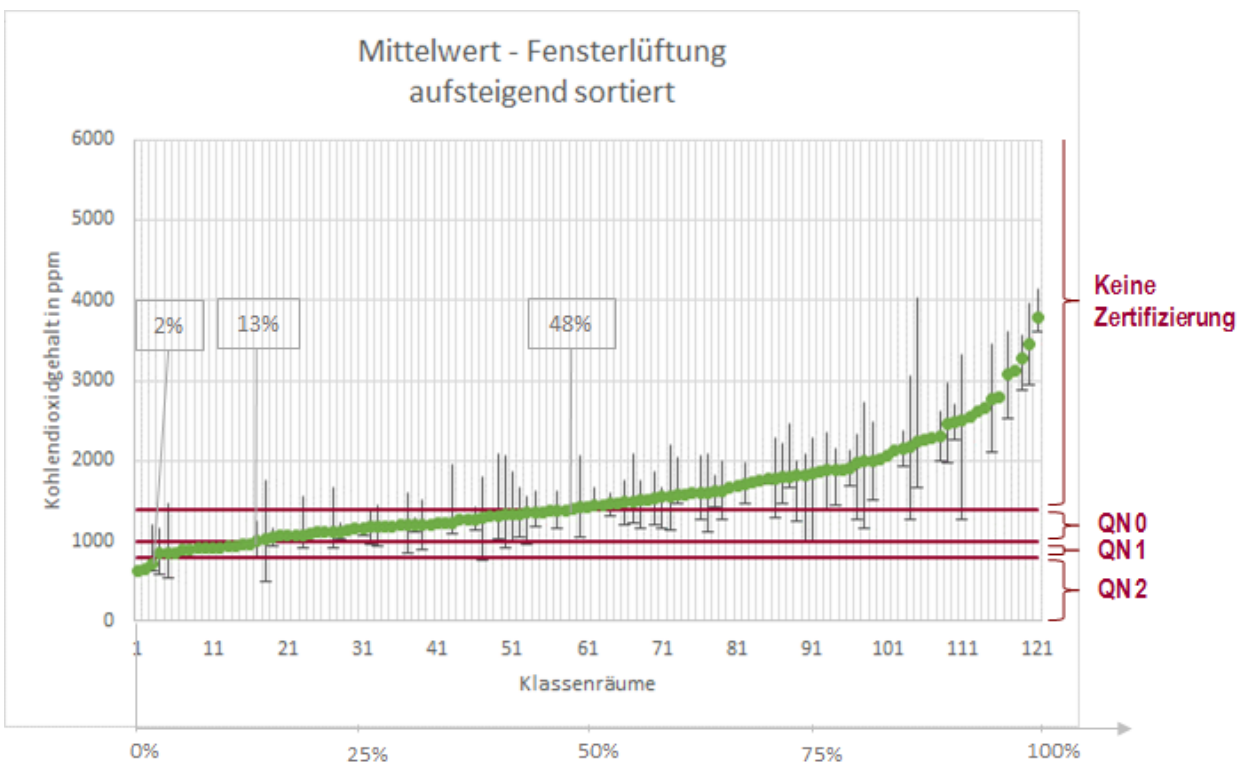


Abbildung 35: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Klassenraum)

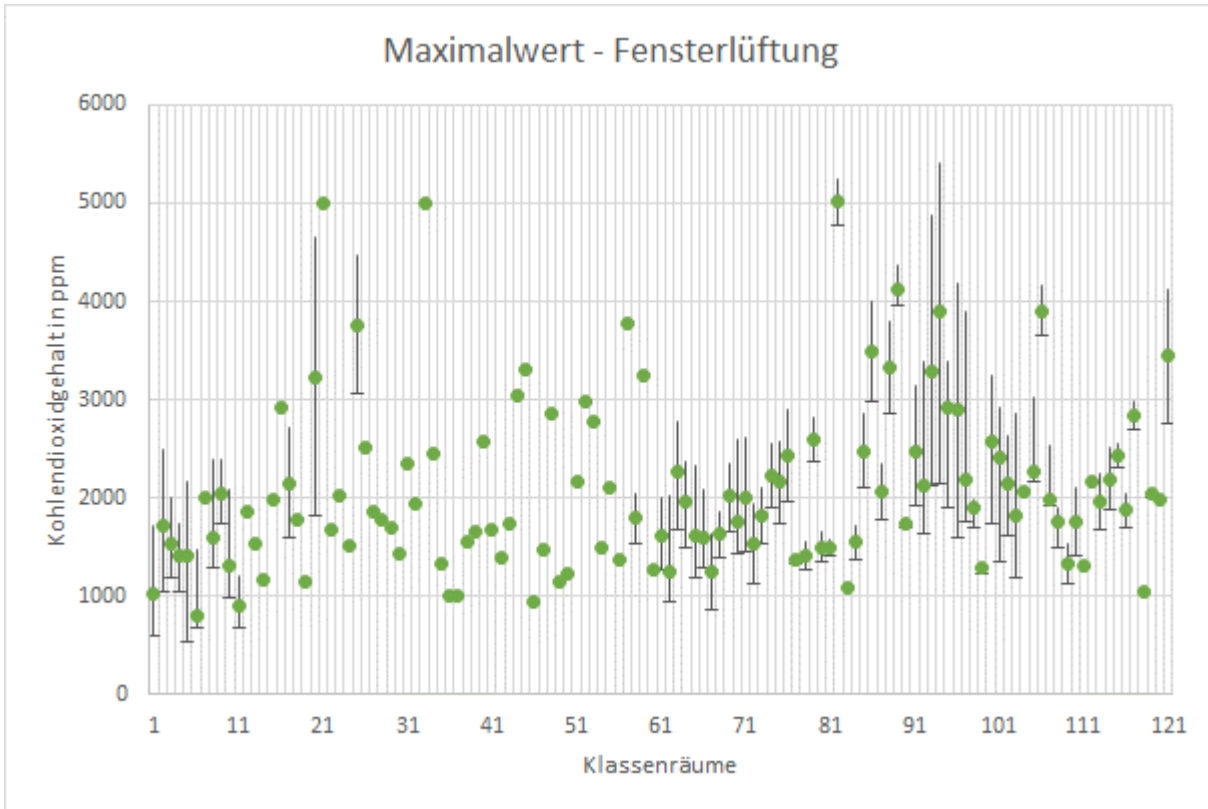


Abbildung 36: Streudiagramm des Maximalwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Klassenraum)

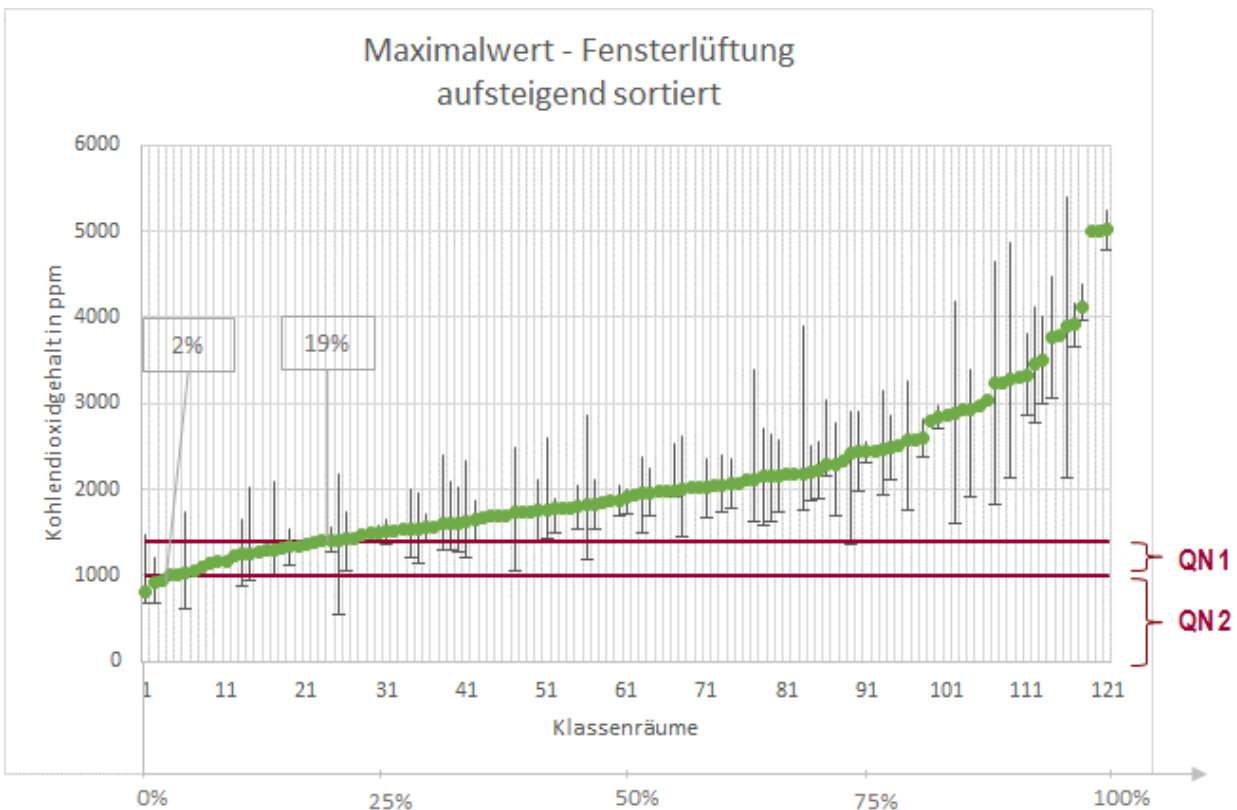


Abbildung 37: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes für Fensterlüftung der betrachteten Studien (Klassenraum)

Tabelle 6: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Mittelwertes für Fensterlüftung (Klassenraum)

Mittelwert				
insgesamt	121	100%	davon Klassenräume mit einer Unterrichtseinheit	davon Klassenräume mit mehreren Unterrichtseinheiten
c _{CO2} ≤ 800 ppm	3	2%	2	1
800 ppm < c _{CO2} ≤ 1000 ppm	13	11%	10	3
1000 ppm < c _{CO2} ≤ 1400 ppm	42	35%	18	24
c _{CO2} > 1400ppm	63	52%	22	41

Tabelle 7: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Maximalwertes für Fensterlüftung (Klassenraum)

Maximalwert				
insgesamt	121	100%	davon Klassenräume mit einer Unterrichtseinheit	davon Klassenräume mit mehreren Unterrichtseinheiten
c _{CO2} ≤ 1000 ppm	1	2%	1	2
1000 ppm < c _{CO2} ≤ 1400 ppm	20	17%	13	7
c _{CO2} > 1400ppm	98	81%	38	60

6.2.3 Bewertung

Unter Auswertung von 5 Studien zur Fensterlüftung in Schulgebäuden lassen sich im Rahmen dieser Studie folgende Ergebnisse ableiten:

- Es lagen Messungen der CO₂-Konzentration für 652 Unterrichtseinheiten in 121 Klassenräumen in mindestens 16 Schulen vor.
- Für die Unterrichtseinheiten wurden arithmetische Mittelwerte (Wertebereich ca. 500 bis ca. 4800 ppm) und Maximalwerte (Wertebereich ca. 500 bis ca. 6500 ppm) der gemessenen CO₂-Konzentrationen bestimmt.
- In ca. 16% der Unterrichtseinheiten erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2 und entspricht somit einer positiven BNB-Bewertung des Gebäudes und damit den Maßgaben der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm = 0 Punkte nach BNB / Nichteinhaltung der ASR) wird in 35% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 10% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 6% erreicht.
- Der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration hängt deutlich von der Tageszeit ab. In späteren Stunden sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass arithmetische Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können (1. und 2. Schulstunde mit 23% und 21% < 1000 ppm vs. 6. und 7. Schulstunde mit 7% bzw. 3% < 1000 ppm).

- Eine klare Korrelation zwischen der CO₂-Konzentration und den in den Studien gemachten Angaben zum Lüftungsverhalten kann nicht nachgewiesen werden. So werden bei der Angabe „gekippte und geschlossene Fenster“ ähnliche Häufigkeiten von mittleren CO₂-Konzentrationen unter 1000 ppm (35% bzw. 40%) erreicht, während sich bei der Angabe „ganz geöffnete Fenster“ die Raumluftqualität im Mittel deutlich schlechter darstellt (nur 15% der Unterrichtseinheiten im arithmetischen Mittel < 1000 ppm). Ursächlich für die unklare Korrelation dürfte sein, dass in den Fragebögen die Dauer der Lüftungsvorgänge nicht erfasst worden ist, so dass der effektive Luftaustausch nicht mit den Angaben zum Lüftungsverhalten korreliert.
- Für Klassenräumen wurden auf Basis der arithmetischen Mittelwerte und der Maximalwerte der gemessenen CO₂-Konzentrationen statistische Kenngrößen (Median sowie 10. und 90. Perzentil) abgeleitet, wenn für mehrere Unterrichtseinheiten pro Klassenraum Messwerte vorlagen.
- In ca. 13% der Klassenräume erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm) wird in 35% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 11% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 2% erreicht.

6.3 Hybride Lüftung

6.3.1 Unterrichtseinheit

Im Rahmen dieser Studie wird unter hybrider Lüftung die Kombination aus ventilatorgestützter Lüftung, die für eine Grundlüftung ausgelegt wird, mit einer nutzerunabhängigen, automatischen Fensterlüftung, z.B. mit Stellmotoren an den Fenstern, verstanden. Auf Basis dieser Definition kann lediglich die Studie „Sick/Dietz“ mit der Untersuchung von 2 Klassenräumen in einer Schule als hybride Lüftung berücksichtigt werden.

Abbildung 38 zeigt die arithmetischen Mittelwerte aller Unterrichtseinheiten als Streudiagramm. Das in Abbildung 39 gezeigte sortierte Streudiagramm sowie die Darstellung in Tabelle 8 machen deutlich, welchen Anteile der Unterrichtsstunden die einzelnen Anforderungsstufen des BNB erfüllt werden.

Analog erfolgen die Darstellungen für den Maximalwert bei hybrider Lüftung mit Abbildung 40 (unsortiertes Streudiagramm) und Abbildung 41 (Sortiertes Streudiagramm) sowie in Tabelle 9.

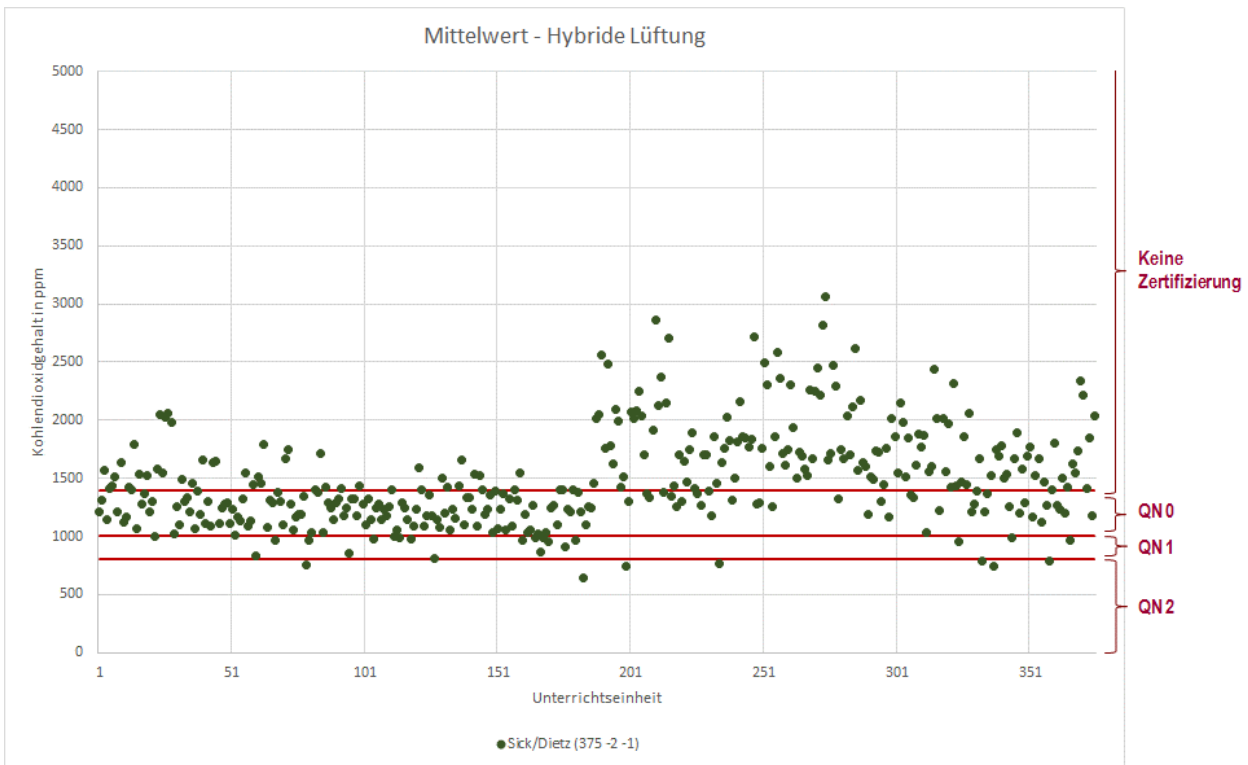


Abbildung 38: Streudiagramm des Mittelwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

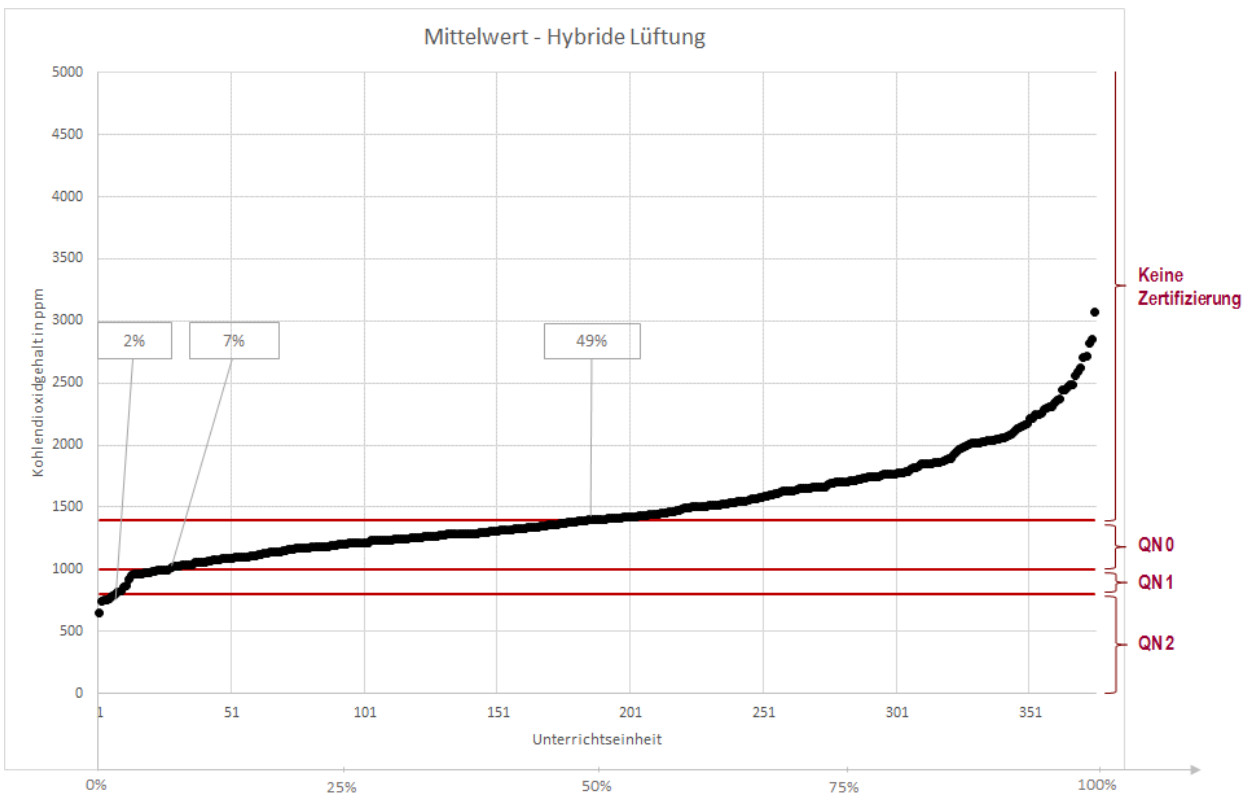


Abbildung 39: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

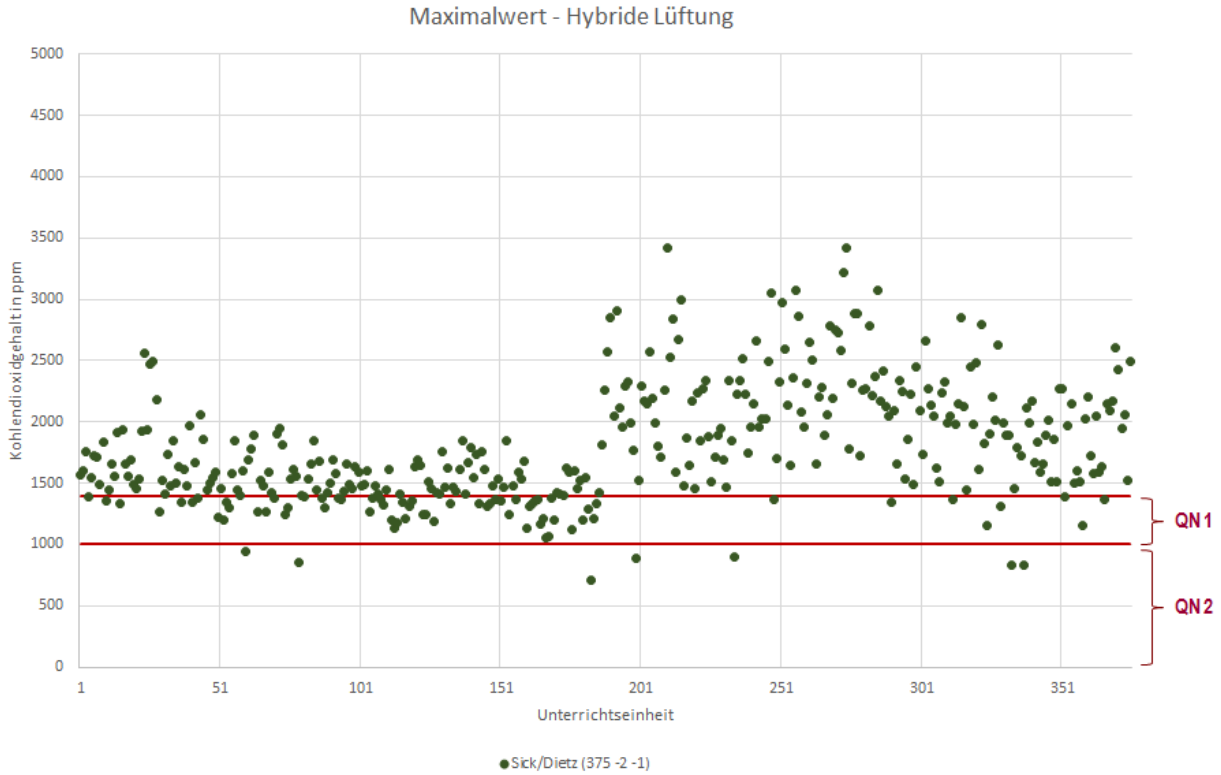


Abbildung 40: Streudiagramm des Maximalwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

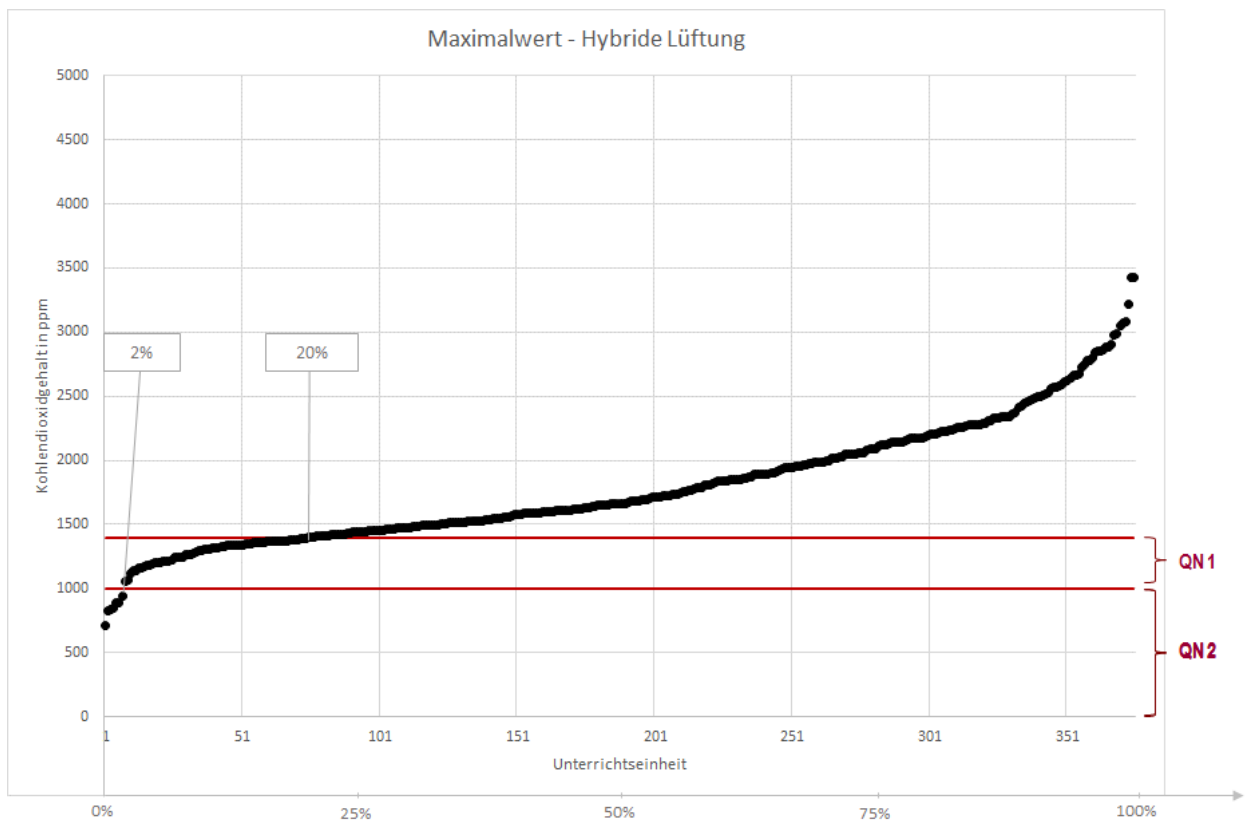


Abbildung 41: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

Tabelle 8: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Mittelwertes für hybride Lüftung (Unterrichtseinheit)

Mittelwert		
insgesamt	375	100%
$c_{CO_2} \leq 800$ ppm	7	2%
$800 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1000$ ppm	20	5%
$1000 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1400$ ppm	159	42%
$c_{CO_2} > 1400$ ppm	189	50%

Tabelle 9: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Maximalwertes für hybride Lüftung (Unterrichtseinheit)

Maximalwert		
insgesamt	375	100%
$c_{CO_2} \leq 1000$ ppm	7	2%
$1000 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1400$ ppm	68	18%
$c_{CO_2} > 1400$ ppm	300	80%

Abbildung 42 zeigt die Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem arithmetischen Mittelwert unter 1000 ppm in Abhängigkeit von der Unterrichtszeit. Ebenfalls aufgezeigt ist der Median der arithmetischen Mittelwerte. Abbildung 43 zeigt die gleiche Darstellung für Unterrichtsstunden mit einem Maximalwert der Kohlendioxidkonzentration unter 1000 ppm. Zu beachten ist die unterschiedliche Größe der Stichprobe, da 27 Unterrichtseinheiten einen arithmetischen Mittelwert unter 1000 ppm CO₂ aufweisen, aber nur 7 Unterrichtseinheiten einen Maximalwert unter 1000 ppm – ein unmittelbarer Vergleich der Diagramme ist so nicht möglich.

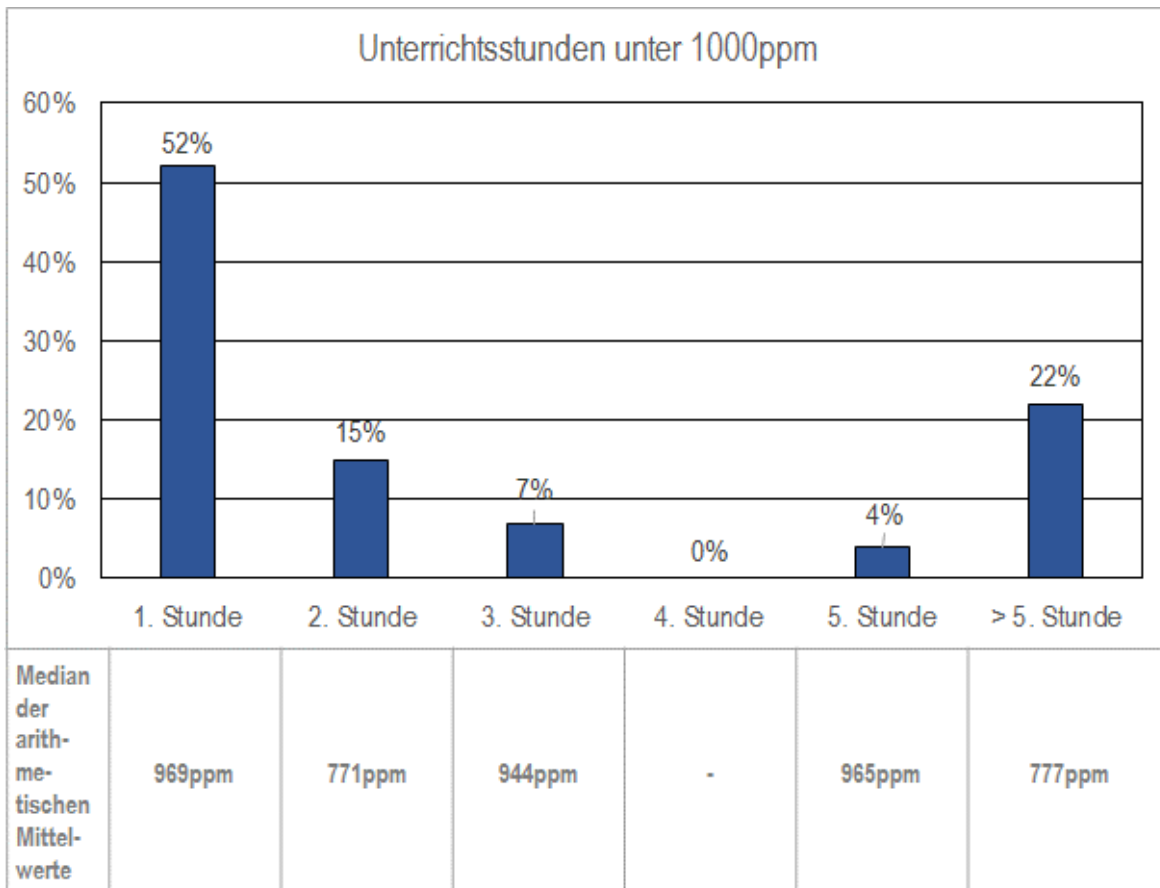


Abbildung 42: Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem arithmetischem Mittelwert unter 1000 ppm (insgesamt: 27 Unterrichtseinheiten)

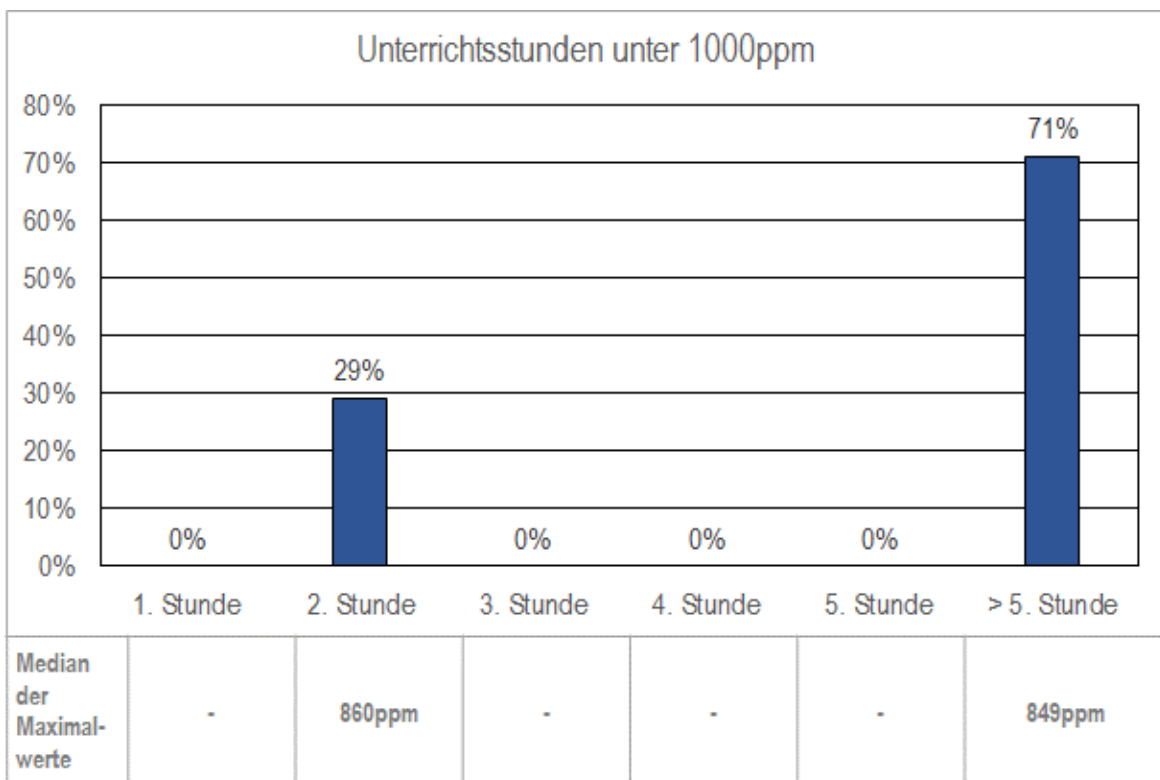


Abbildung 43: Verteilung der Unterrichtsstunden mit einem Maximalwert unter 1000 ppm (insgesamt: 7 Unterrichtseinheiten)

6.3.2 Klassenraum

Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf Klassenräume und nicht wie in Abschnitt 6.3.1 auf die Unterrichtseinheiten. Da für beide untersuchten Klassenräume mit hybrider Lüftung mehrere Unterrichtseinheiten messtechnisch untersucht worden sind, lässt sich pro Klassenraum in Zusammenfassung der Unterrichtseinheiten der Median, das 10. und 90. Perzentil des arithmetischen Mittelwertes (Abbildung 44 – unsortiert und Abbildung 45 – sortiert) bzw. des Maximalwertes (Abbildung 46 – unsortiert und Abbildung 47 – sortiert) darstellen, siehe hierzu auch Abbildung 16 in Abschnitt 5.3.

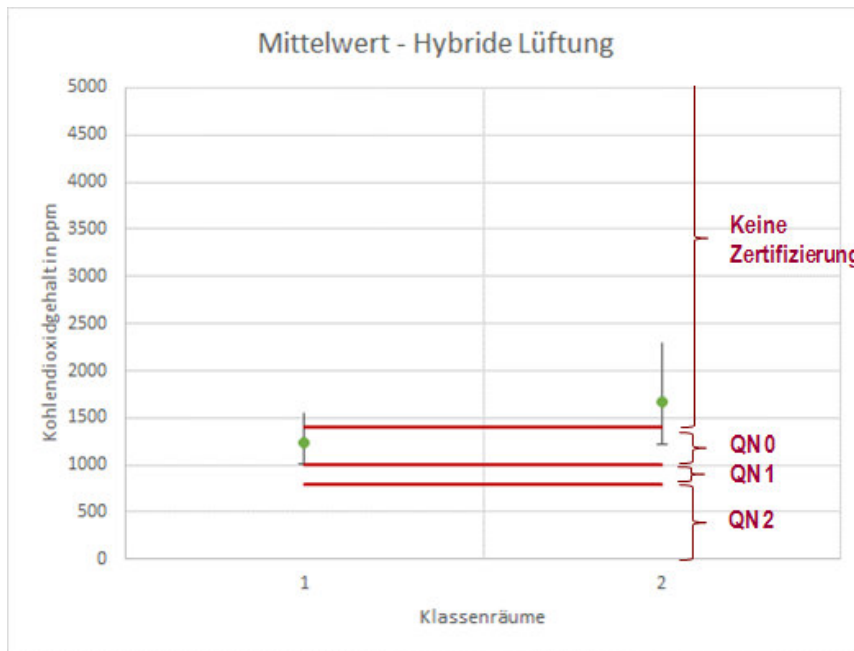


Abbildung 44: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Klassenraum)

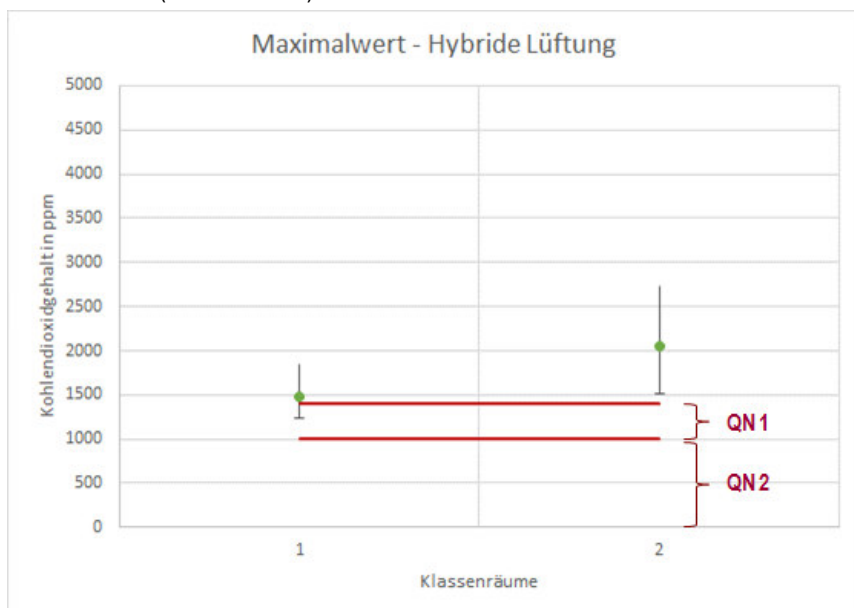


Abbildung 45: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes für hybride Lüftung der betrachteten Studien (Klassenraum)

6.3.3 Bewertung

Unter Auswertung von einer Studie zur hybriden Lüftung in Schulgebäuden lassen sich im Rahmen dieser Studie folgende Ergebnisse ableiten:

- Es lagen Messungen der CO₂-Konzentration für 375 Unterrichtseinheiten in 2 Klassenräumen in einer Schule vor.
- Für die Unterrichtseinheiten wurden arithmetische Mittelwerte (Wertebereich ca. 500 bis ca. 3100 ppm) und Maximalwerte (Wertebereich ca. 500 bis ca. 3500 ppm) der gemessenen CO₂-Konzentrationen bestimmt.
- In ca. 7% der Unterrichtseinheiten erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2 und entspricht somit einer positiven BNB-Bewertung des Gebäudes und damit den Maßgaben der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm = 0 Punkte nach BNB / Nichteinhaltung der ASR) wird in 42% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 5% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 2 % erreicht.
- Der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration hängt deutlich von der Tageszeit ab. In späteren Stunden sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass arithmetische Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können (1. Schulstunde mit 52% < 1000 ppm vs. 5. Schulstunde mit 4% < 1000 ppm). Der beobachtete Anstieg guter Raumluftqualität nach der 5. Unterrichtsstunde lässt sich wahrscheinlich auf die nachmittags geänderte Nutzung zurückführen. Typisch für Grundschulen (um eine solche handelt es sich in der Studie „Sick/Dietz“) sind dann auch bei Ganztagsangeboten kleinere Gruppen z.B. für AGs oder Hausaufgabenbetreuung.
- Für Klassenräume wurden auf Basis der arithmetischen Mittelwerte und der Maximalwerte der gemessenen CO₂-Konzentrationen statistische Kenngrößen (Median sowie 10. und 90. Perzentil) abgeleitet, da pro Klassenraum für mehrere Unterrichtseinheiten Messwerte vorlagen.

6.4 Lüftungsanlage

6.4.1 Unterrichtseinheit

Die Nutzung von Lüftungsanlagen in Klassenräumen wurde in 5 Studien näher untersucht. Auf die Auswertung der Studie „Lambertz“ ist nachfolgend verzichtet worden, da die gemessene CO₂-Konzentration nahezu konstant sind und deshalb keine Unterrichtseinheiten dedektiert werden konnten, siehe auch Anhang E.

Abbildung 46 zeigt zunächst als Streudiagramm die arithmetischen Mittelwerte aller Unterrichtseinheiten. Das in Abbildung 47 gezeigte sortierte Streudiagramm sowie die Darstellung in Tabelle 10 verdeutlichen,

welche Anteile der Unterrichtsstunden die einzelnen Anforderungsstufen des BNB erfüllt werden. Die in Tabelle 11 sowie in Abbildung 48 (unsortiertes Streudiagramm) und Abbildung 49 (Sortiertes Streudiagramm) zeigen analog die Verhältnisse für den Maximalwert für Unterrichtseinheiten mit Lüftungsanlage.

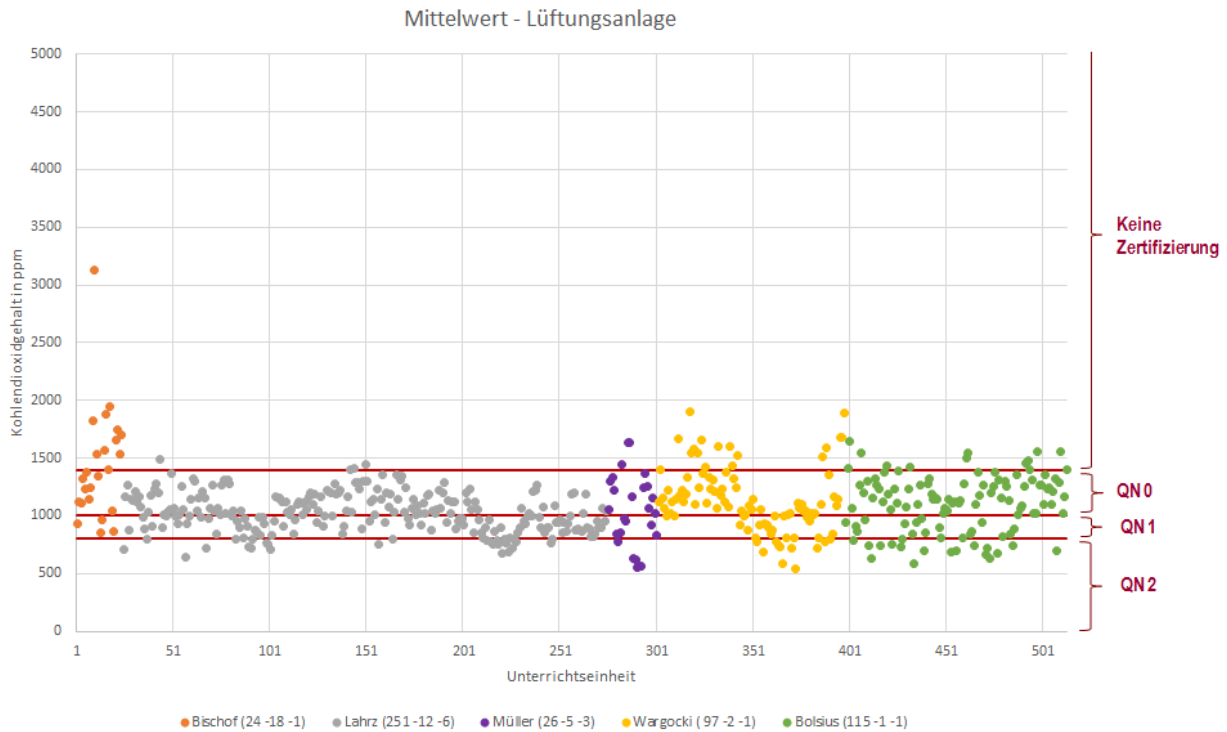


Abbildung 46: Streudiagramm des Mittelwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

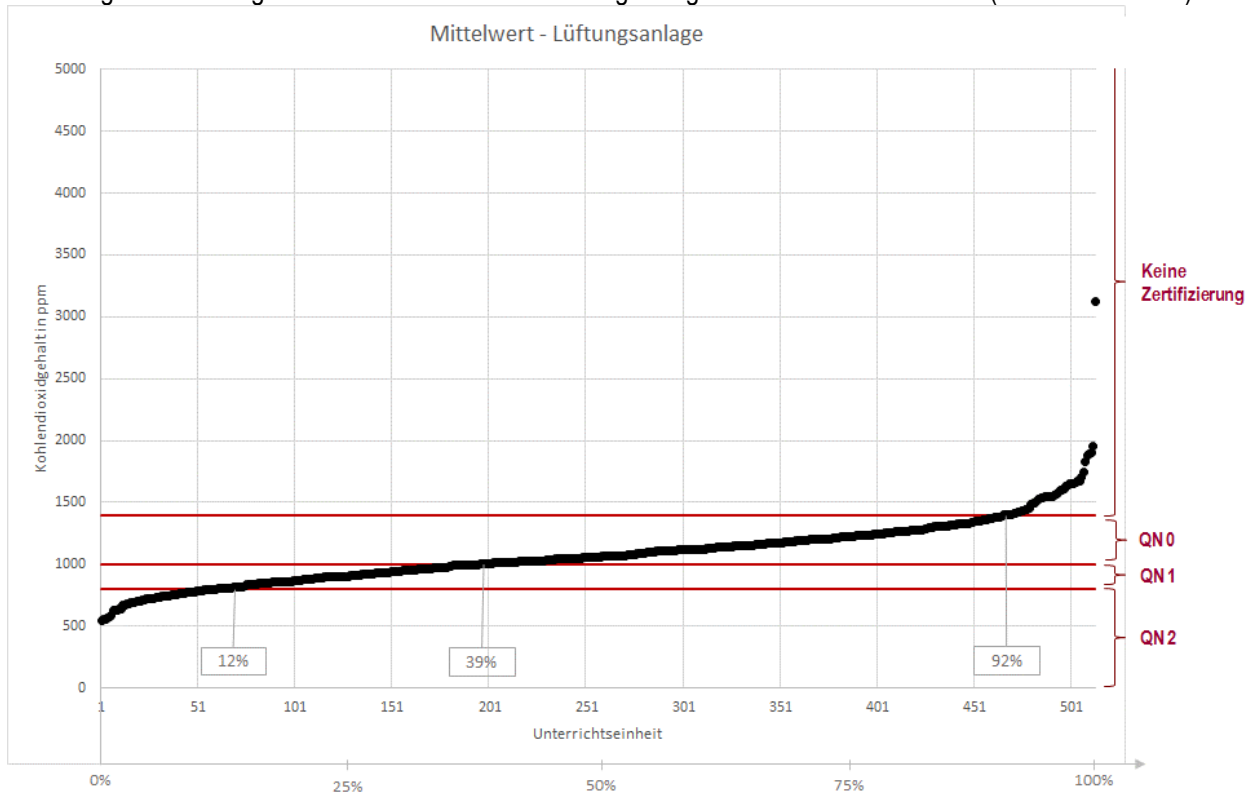


Abbildung 47: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

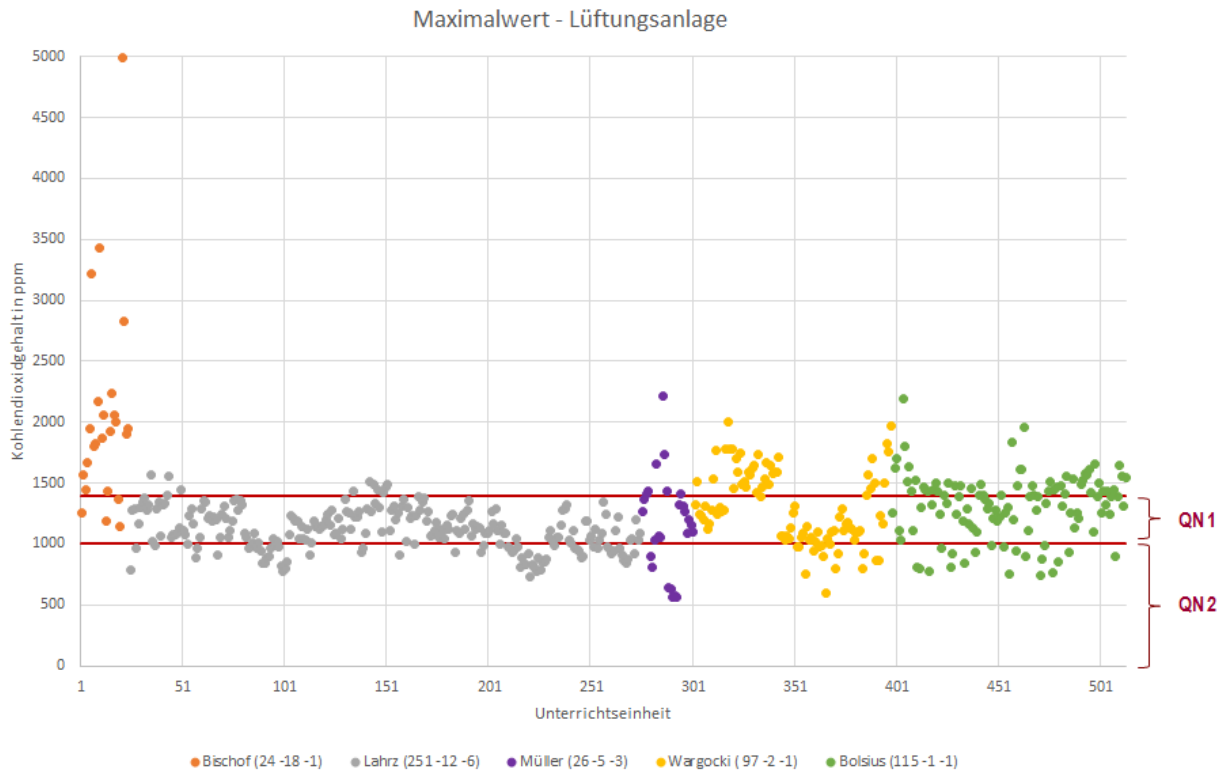


Abbildung 48: Streudiagramm des Maximalwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

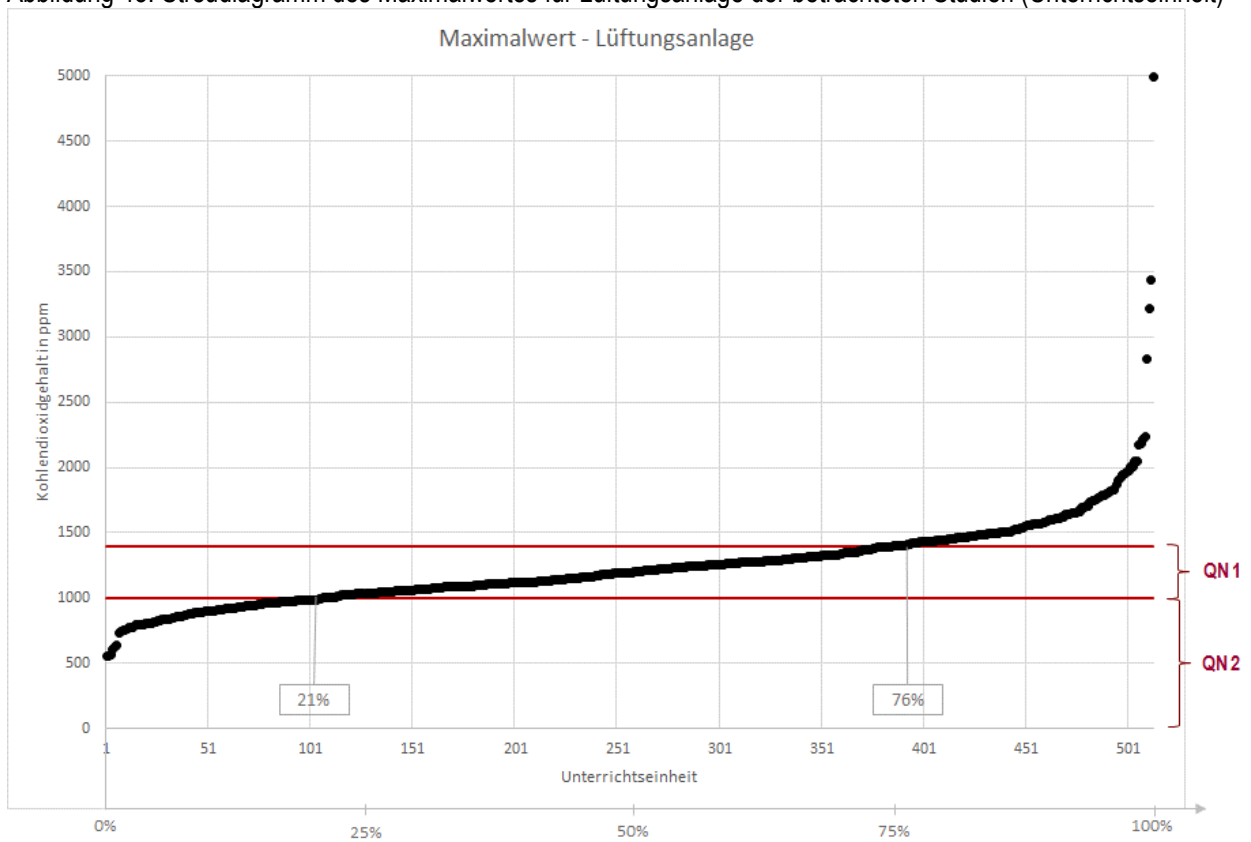


Abbildung 49: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Unterrichtseinheit)

Tabelle 10: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Mittelwertes für Lüftungsanlage (Unterrichtseinheit)

Mittelwert		
insgesamt	513	100%
$c_{CO_2} \leq 800$ ppm	60	12%
$800 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1000$ ppm	136	27%
$1000 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1400$ ppm	271	53%
$c_{CO_2} > 1400$ ppm	46	9%

Tabelle 11: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Maximalwertes für Lüftungsanlage (Unterrichtseinheit)

Maximalwert		
insgesamt	513	100%
$c_{CO_2} \leq 1000$ ppm	107	21%
$1000 \text{ ppm} < c_{CO_2} \leq 1400$ ppm	282	55%
$c_{CO_2} > 1400$ ppm	124	24%

6.4.2 Klassenraum

Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf Klassenräume und nicht wie in Abschnitt 6.4.1 auf die Unterrichtseinheiten. Ist für einen Klassenraum nur eine Schulstunde gemessen worden, wird der arithmetische Mittelwert bzw. Maximalwert der CO₂-Konzentration wie bei der Darstellung für Unterrichtseinheiten als Punkt im Diagramm gezeigt. Sind für Klassenräume mehrere Unterrichtseinheiten messtechnisch untersucht worden, lässt sich pro Klassenraum in Zusammenfassung der Unterrichtseinheiten der Median, das 10. und 90. Perzentil des arithmetischen Mittelwertes (Abbildung 50 – unsortiert, Abbildung 51 – sortiert und Tabelle 12 – Statistik) bzw. des Maximalwertes (Abbildung 52 – unsortiert, Abbildung 53 – sortiert und Tabelle 13 – Statistik) darstellen, siehe hierzu auch Abbildung 16 in Abschnitt 5.3.

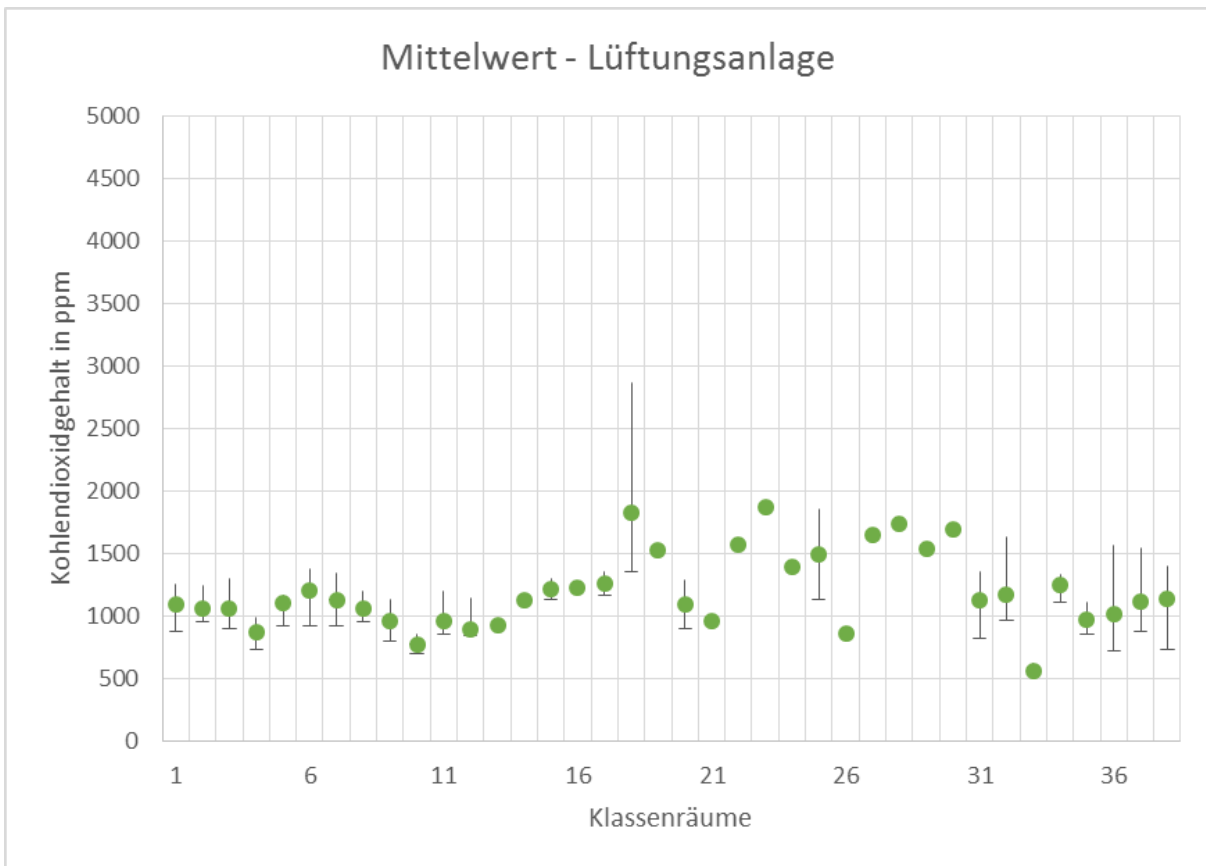


Abbildung 50: Streudiagramm des arithmetischen Mittelwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Klassenraum)

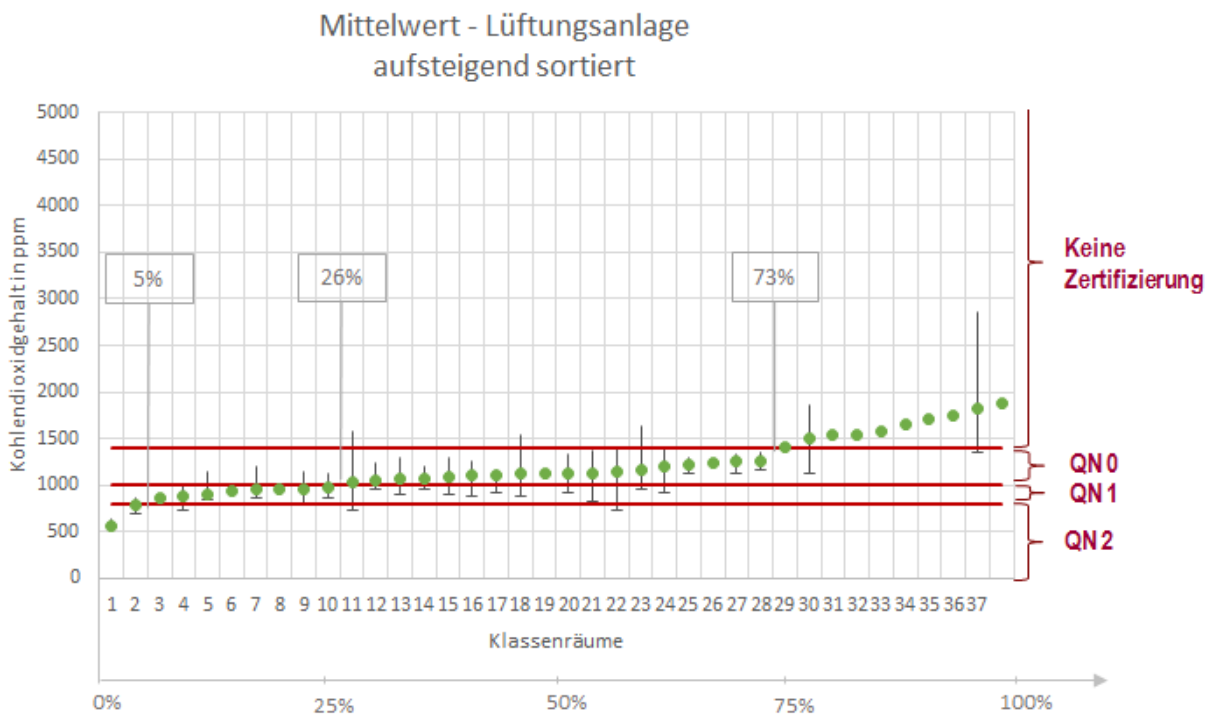


Abbildung 51: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des arithmetischen Mittelwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Klassenraum)

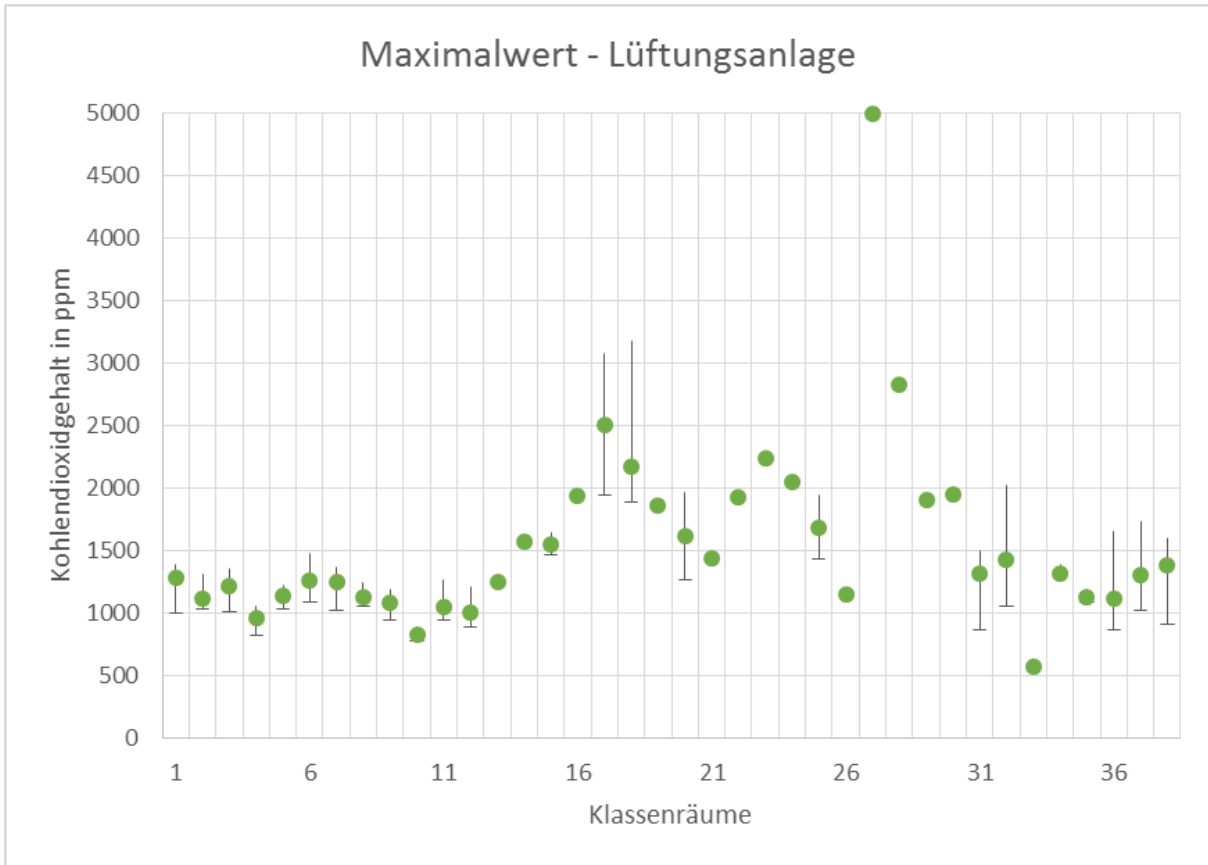


Abbildung 52: Streudiagramm des Maximalwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Klassenraum)

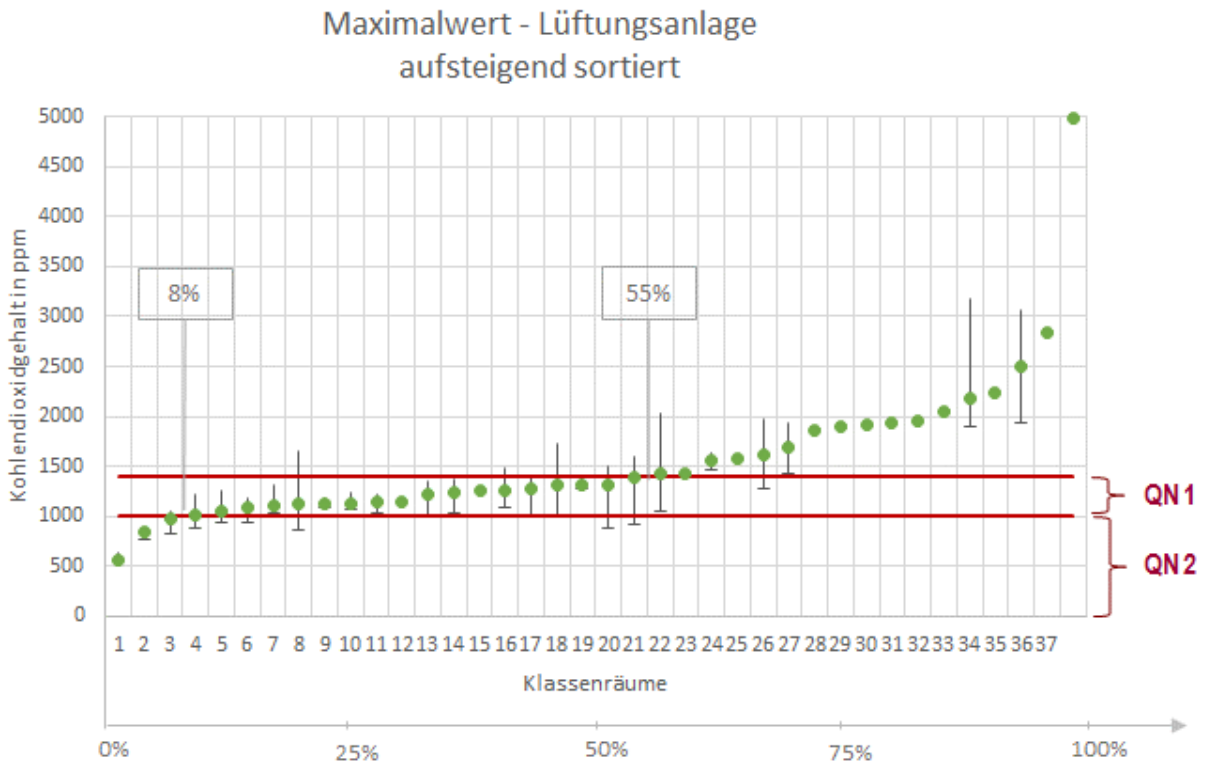


Abbildung 53: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes für Lüftungsanlage der betrachteten Studien (Klassenraum)

Tabelle 12: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Mittelwertes für Lüftungsanlage (Klassenraum)

Arithmetischer Mittelwert				
insgesamt	38	100%	davon Klassenräume mit einer Unterrichtseinheit	davon Klassenräume mit mehreren Unterrichtseinheiten
c _{CO2} ≤ 800 ppm	2	5%	0	2
800 ppm < c _{CO2} ≤ 1000 ppm	8	21%	3	5
1000 ppm < c _{CO2} ≤ 1400 ppm	18	47%	2	16
c _{CO2} > 1400ppm	10	26%	8	2

Tabelle 13: Verteilung des CO₂-Unterrichtsstunden-Maximalwertes für Lüftungsanlage (Klassenraum)

Maximalwert				
insgesamt	38	100%	davon Klassenräume mit einer Unterrichtseinheit	davon Klassenräume mit mehreren Unterrichtseinheiten
c _{CO2} ≤ 1000 ppm	3	8%	0	3
1000 ppm < c _{CO2} ≤ 1400 ppm	18	47%	2	16
c _{CO2} > 1400ppm	17	45%	11	6

6.4.3 Bewertung

Unter Auswertung von 5 Studien zur ventilatorgestützten Lüftung in Schulgebäuden lassen sich im Rahmen dieser Studie folgende Ergebnisse ableiten:

- Es lagen Messungen der CO₂-Konzentration für 513 Unterrichtseinheiten in 38 Klassenräumen in 12 Schulen vor.
- Für die Unterrichtseinheiten wurden arithmetische Mittelwerte (Wertebereich ca. 500 bis ca. 3150 ppm) und Maximalwerte (Wertebereich ca. 500 bis ca. 5000 ppm) der gemessenen CO₂-Konzentrationen bestimmt.
- In ca. 39% der Unterrichtseinheiten erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2 und lässt somit eine BNB-Zertifizierung des Gebäudes zu. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm = Ausschluss aus der Gebäudezertifizierung / Nichteinhaltung der ASR) wird in 53% der Unterrichtseinheiten, das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 27% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 12% erreicht.
- Für Klassenräumen wurden auf Basis der arithmetische Mittelwerte und der Maximalwerte der gemessenen CO₂-Konzentrationen statistische Kenngrößen (Median sowie 10. und 90. Perzentil) abgeleitet, wenn für mehrere Unterrichtseinheiten pro Klassenraum Messwerte vorlagen.
- In ca. 26% der Klassenräume erfüllt der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration die BNB-Qualitätsstufe 1 oder 2. Das Qualitätsniveau QN 0 (1000 bis 1400 ppm) wird in 52% der Unterrichtseinheiten,

das Qualitätsniveau QN 1 (800 bis 1000 ppm) in 21% und das Qualitätsniveau QN 2 (< 800 ppm) in 5% erreicht.

- Der arithmetische Mittelwert der CO₂-Konzentration hängt deutlich von der Tageszeit ab. In späteren Stunden sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass arithmetische Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können (1. und 2. Schulstunde mit 23% und 21% < 1000 ppm vs. 6. und 7. Schulstunde mit 7% bzw. 3% < 1000 ppm).
- Trotz vorhandener Lüftungsanlage wird bei weitem nicht in allen Konstellationen im arithmetischen Mittel einer Unterrichtseinheit die CO₂-Konzentration unter 1000 ppm gehalten. Aus den Studien lassen sich als Ursachen die Auslegung (häufig Außenluftvolumenströme nach DIN EN 13779 IDA 3 → 1400 ppm „mäßige Raumluftqualität“) und der Betrieb (Schaltzeitpunkt bei > 1250 ppm zur Vermeidung von Schallemissionen) Lüftungsanlagen als mögliche Ursachen vermuten. Auch Schwankungen der CO₂-Konzentration aufgrund unterschiedlicher Belegungsdichte und/oder zusätzlicher Fensterlüftung sind als Ursache denkbar.

6.5 Vergleich der Lüftungskonzepte

Eine vergleichende Übersicht der CO₂-Konzentrationen der im Rahmen dieser Studie ausgewerteten detektierten Unterrichtseinheiten ist in Tabelle 14 enthalten. In Abhängigkeit vom Lüftungskonzept ist die Verteilung des arithmetischen Mittelwerts der Kohlendioxidkonzentration einer Unterrichtseinheit für Über- und Unterschreitungen bestimmter CO₂-Werte sowie die maximal gemessene CO₂-Konzentration aufgetragen. Es zeigt sich, dass mit einer Lüftungsanlage in 38% der insgesamt 513 betrachteten Unterrichtsstunden ein Unterrichtsstundenmittelwert von unter 1000 ppm eingehalten werden kann, unter 1500 ppm liegen 94%. Im Vergleich dazu liegt der arithmetische Mittelwert der Kohlendioxidkonzentration einer Unterrichtsstunde bei Fensterlüftung in 16% der insgesamt 652 betrachteten Unterrichtsstunden unter 1000 ppm und in 58% der Fälle unter 1500 ppm. Auf eine Aussage zu der hybriden Lüftung wird an dieser Stelle verzichtet, da diese Ergebnisse auf nur einer Studie beruhen und aus der Veröffentlichung ersichtlich ist, dass es häufig zu mechanischen und automationstechnischen Problemen im Betrieb der motorisierten Lüftungsflügel kam.

Tabelle 14: Übersicht der Ergebnisse (UE = Unterrichtseinheit)

Lüftungssystem	CO ₂ -Konzentration						5 Min.-gl. Mittelwert für den Maximalwert
	C _{CO2} ≤ 1000 ppm	1000 ppm < C _{CO2} ≤ 1500 ppm	1500 ppm < C _{CO2} ≤ 2000 ppm	2000 ppm < C _{CO2} ≤ 3000 ppm	C _{CO2} > 3000 ppm	Max. Konzentration	
Fensterlüftung (652 UE)	16%	42%	26%	13%	3%	6467ppm	5330ppm
Hybride Lüftung (375 UE)	7%	52%	28%	13%	0,3%	3423 ppm	3360 ppm
Lüftungsanlage (513 UE)	38%	56%	6%	0%	0,2%	4994 ppm	2434 ppm

6.6 Einfluss der Belegungsdichte

Unabhängig vom Lüftungskonzept kann auch eine Verringerung der Schülerzahlen bzw. eine Vergrößerung der Klassenräume, letztendlich also eine erhöhte Fläche pro Person, zu einer Verbesserung der Kohlendioxidkonzentration in den Klassenräumen führen, wie Abbildung 55 bis Abbildung 54 für die Studien „Lahrz“ und „Bischof“ tendenziell zeigen.

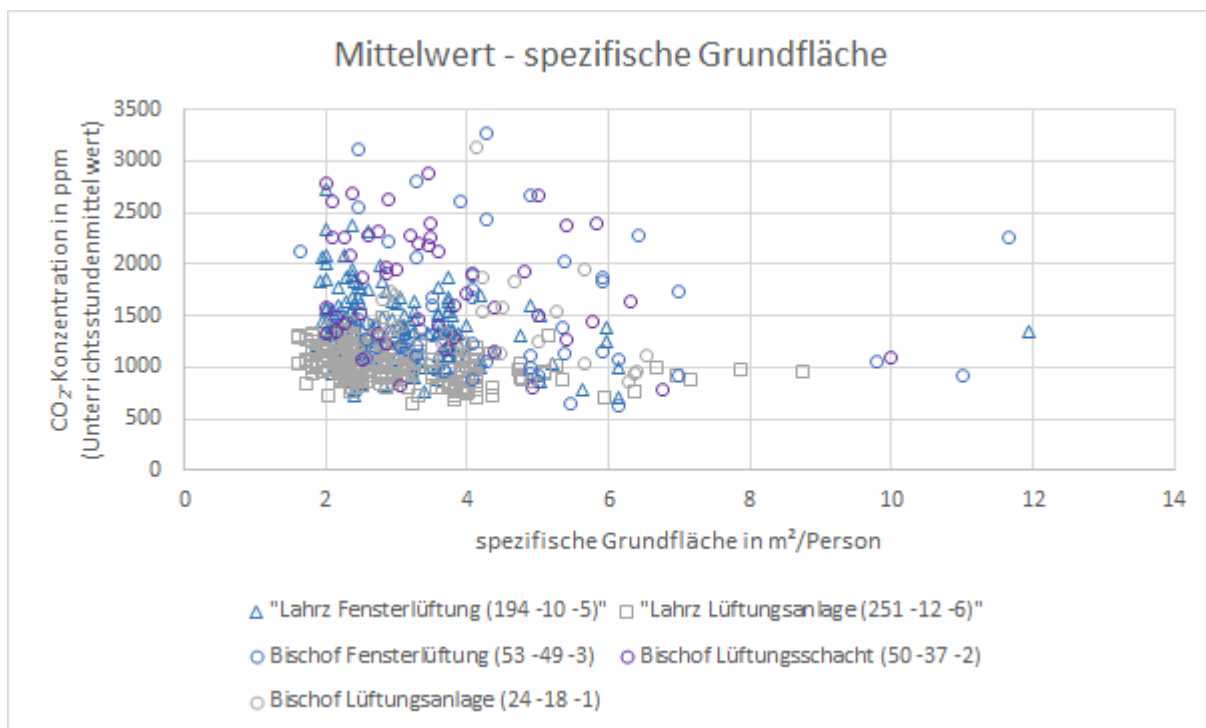


Abbildung 54: CO₂-Konzentration (arithmetischer Mittelwert) in Abhängigkeit der spezifischen Grundfläche in m²/Person für die Studien „Bischof“ und „Lahrz“

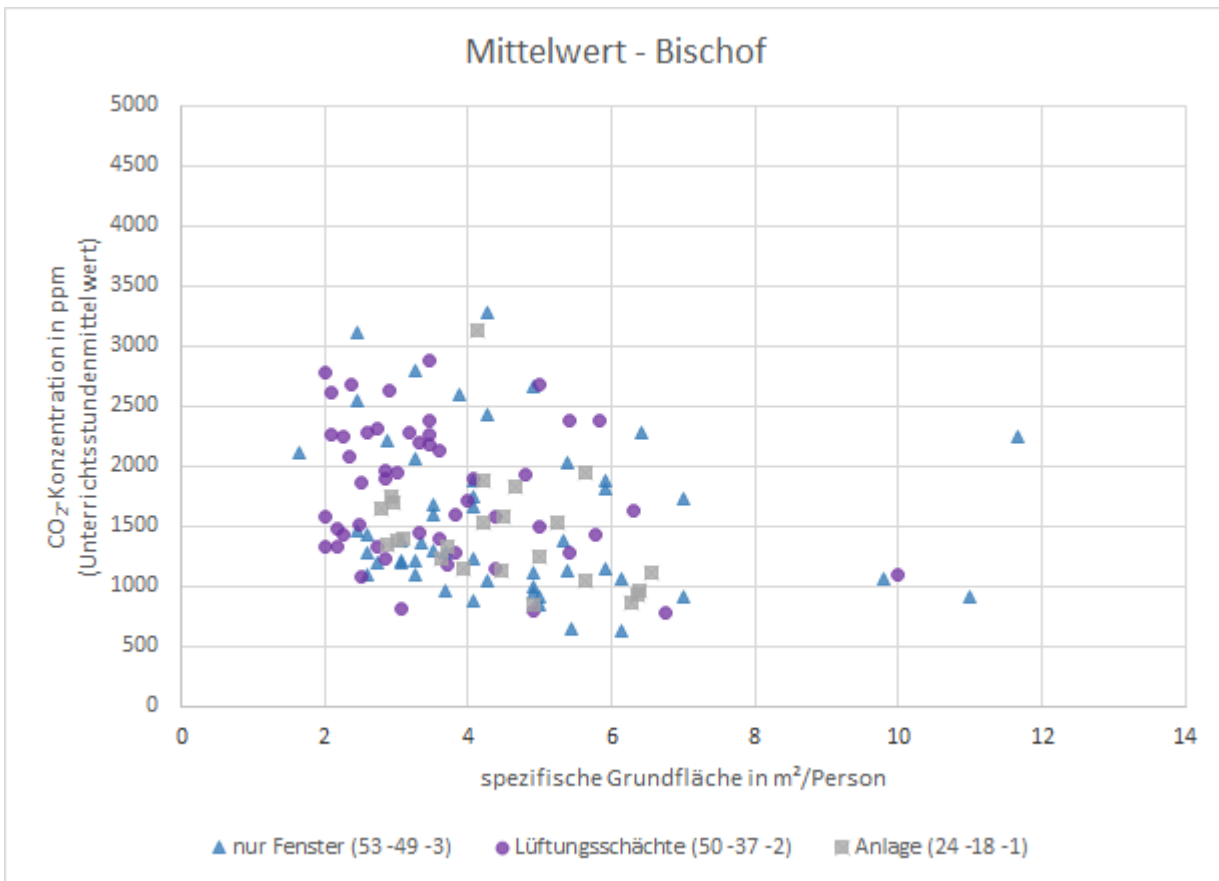


Abbildung 55: CO₂-Konzentration (arithmetischer Mittelwert) in Abhängigkeit der spezifischen Grundfläche in m²/Person für die Studie „Bischof“

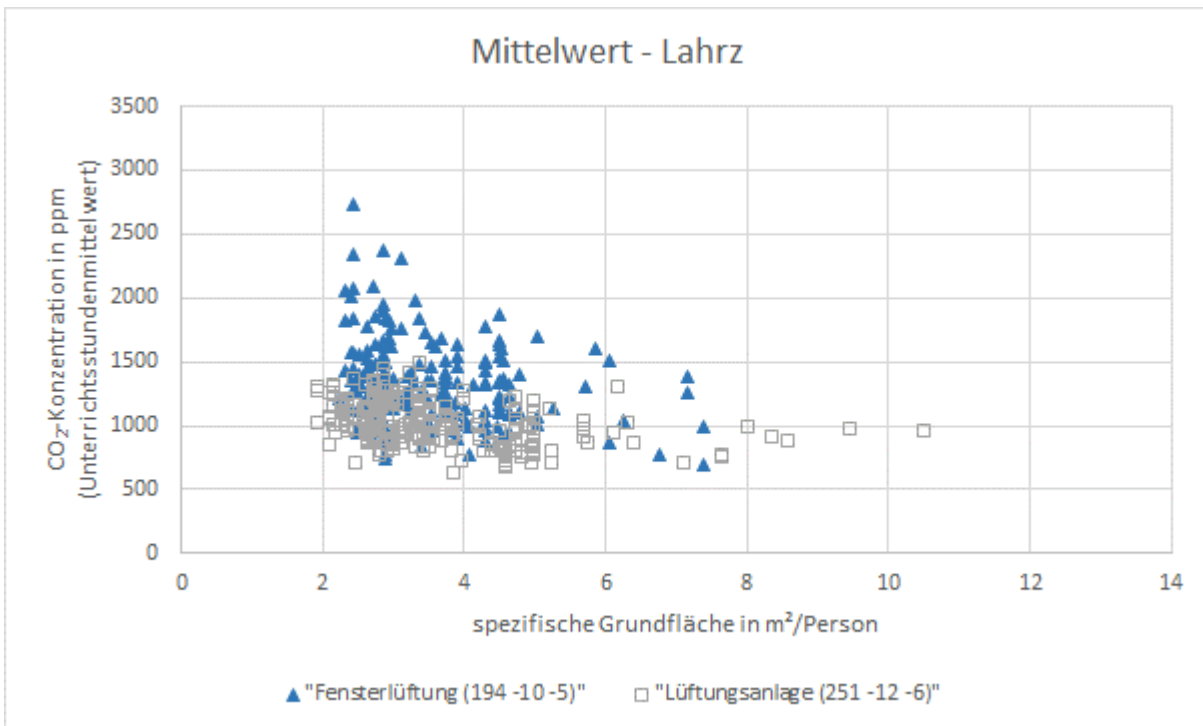


Abbildung 56: CO₂-Konzentration (arithmetischer Mittelwert) in Abhängigkeit der spezifischen Grundfläche in m²/Person für die Studie „Lahrz“

7 Fazit und Ausblick

Wesentliche Erkenntnisse zur systematischen Auswertung von Messdaten

Insgesamt hat sich das Zusammentragen von Daten aus verschiedenen vorliegenden Studien und die Auswertung der zu betrachtenden Unterrichtseinheiten als schwierig erwiesen: in den einzelnen vorliegenden Studien ist der Projektansatz und -fokus häufig unterschiedlich, jede Studie hat die für sich wichtigen Parameter dokumentiert, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit von Studien nicht gegeben ist. Diese Tatsache macht eine einheitliche und genaue Auswertung und Ursachenanalyse, flankiert durch ungenaue oder fehlende Angaben zu Anwesenheitszeiten, Belegungsdichten während der Unterrichtseinheiten, Lüftungsintervallen, etc. kaum möglich. Dies führte dazu, dass für die Untersuchung einzelner Aspekte (z.B. Fensterlüftung) häufig nur Daten aus einigen der Studien und nicht aus allen betrachteten Studien herangezogen werden konnten.

Im Rahmen dieser Studie ist ein Excel-Tool erstellt worden, das aus den aufgezeichneten CO₂-Messdaten die Ermittlung von Anfang und Ende der Schulstunden mit eindeutig festgelegten Kriterien ermöglicht. Damit gelingt eine deutliche Erhöhung der Objektivität der Bewertung durch eine Abgrenzung zur händischen Auswahl. Grenzen sind dem Excel-Tool gesetzt, wenn der CO₂-Verlauf über einen längeren Zeitraum nahezu konstant ist, da dann die verwendeten Kriterien nicht mehr greifen und daher auch keine Schulstunden detektiert werden können.

Für den systematischen Vergleich von Messergebnissen wurde eine Reihe von Möglichkeiten zur graphischen Aufbereitung untersucht. Während Carpet-Plots gut geeignet sind, um den Verlauf der CO₂-Konzentration in festgelegten Zeiträumen farblich zu visualisieren, sind Boxplots prädestiniert für statistische Auswertungen. In der vorliegenden Studie selbst erfolgten die Auswertungen hauptsächlich mit (unsortierten und sortierten) Streudiagrammen, die anhand von Mittel- und Maximalwerten pro Unterrichtseinheit einen guten Überblick über die Messergebnisse unter Angabe erster statistischer Bewertungen erlauben. Auch die Darstellung der Ergebnisse für Klassenräume hat sich als praktikabel erwiesen und relativiert unterschiedliche Messkonzepte (z.B. 1 Klassenraum mit 100 gemessenen Unterrichtseinheiten im Vergleich mit 10 Klassenräumen á 10 gemessenen Unterrichtseinheiten).

Beschreibung der Stichprobe und Ergebnisse

Insgesamt lagen Messungen der CO₂-Konzentration wie folgt vor:

- Freie Lüftung (5 Studien): 652 Unterrichtseinheiten in 121 Klassenräumen in mindestens 16 Schulen
- Hybride Lüftung (1 Studie): 375 Unterrichtseinheiten in 2 Klassenräumen in einer Schule
- Ventilatorgestützte Lüftung (5 Studien): 513 Unterrichtseinheiten in 38 Klassenräumen in 12 Schulen

Während mit einer Lüftungsanlage in 38% der insgesamt 513 betrachteten Unterrichtsstunden ein Unterrichtsstundenmittelwert von unter 1000 ppm eingehalten wird, liegt der arithmetische Mittelwert der Kohlendioxidkonzentration einer Unterrichtsstunde bei Fensterlüftung nur in 16% der insgesamt 652 betrachteten Unterrichtsstunden unter 1000 ppm. Auch bei der Erfüllung der BNB-Qualitätsstufe 1 bzw. Erfüllung der Maßgabe der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6 weisen Lüftungsanlagen gegenüber freier Lüftung deutliche Vorteile auf (ca. 12% vs. ca. 6% der Unterrichtseinheiten). Die Aussagen zur Einhaltung der entsprechenden CO₂-Konzentration gelten unter Vorbehalt von Unsicherheitsfaktoren (wie z.B. dem Fehlen der genauen Kenntnis der tatsächlichen Unterrichtsstunden und der tatsächlichen Schüleranzahl in den gemessenen Intervallen).

Empfehlungen für funktionierende Lüftungskonzepte

Bei Fensterlüftung und bei hybrider Lüftung können arithmetische Mittelwerte der CO₂-Konzentration unter 1000 ppm am leichtesten in den frühen Unterrichtsstunden erreicht werden. In späteren Schulstunden ist eine niedrige CO₂-Konzentration zwingend an die Einhaltung bestimmter Randbedingungen, wie beispielsweise große Pause mit intensiver Querlüftung, ein längerer Zeitraum ohne Unterricht oder kleinere Klassenteiler gebunden.

Hybride Lüftungskonzepte sind trotz Weiterentwicklung der Mechanik und Regelungstechnik und der Koppelung beider Gebiete in den letzten Jahren immer noch selten in der Praxis. Hybride Lüftungskonzepte kombinieren mechanische Lüftungsanlagen mit nutzerunabhängiger automatisierter Fensterlüftung (z.B. motorisierte Fensterflügel). Die mechanischen Lüftungsanlagen können kosten- und schalloptimiert für eine Grundlüftung sorgen und die automatisierte Fensterlüftung unterstützt diese Grundlüftung bei Lastspitzen. Mit hybriden Lüftungskonzepten ist eine Nachtlüftung im Sommer oder eine Vorlüftung vor Unterrichtsbeginn möglich. Daher sollte dieses Lüftungskonzept mit in die Überlegungen für die Schullüftung einbezogen werden. Lüftungsanlagen sollten z.B. durch Auslegung nach DIN EN 13779 IDA 2 so konzipiert sein, dass kein Zusatzlüften während der Schulstunde erforderlich ist. Damit können organisatorische Einschränkungen des Unterrichts, Beeinträchtigungen der Behaglichkeit (Temperatur, Zugluftrisiko) und Schallbelästigungen durch Fensterlüftung vermeiden werden. Durch die Optimierung der Regelung der ventilatorgestützten Lüftung (z.B. CO₂-Sensor zur Steuerung, Schwellwerte für Lüftungsstufen optimieren, Möglichkeiten für Vorspülen der Klassenräume, etc.) kann eine Verbesserung der Innenraumluftqualität und eine Erhöhung der Akzeptanz erreicht werden.

Mit den genauen Randbedingungen des jeweiligen Objekts sollten in jedem Fall die jeweiligen Vor- und Nachteile des jeweiligen technisch möglichen Lüftungskonzepts bedacht werden und eine dezidierte Lüftungsplanung vorgenommen werden.

Mögliche Anpassung/Erweiterung des BNB-Bewertungsmaßstabes

Im aktuellen Bewertungssystem BNB für Schulgebäude erfolgt die Bewertung für den Kohlendioxidgehalt anhand von Anforderungen an den (arithmetischen) Mittelwert und an den Maximalwert einer Unterrichtseinheit über 45 Minuten. Da eine eindeutige Zuordnung von Maximalwerten zu Mittelwerten während einer Unterrichtseinheit kaum bzw. nicht möglich ist, können für den BNB-Bewertungsmaßstab zukünftig folgende Erweiterungsmöglichkeiten erwogen werden:

1. Festlegung von Maximalwerten anhand des gleitenden Mittelwerts über 5 Minuten anstelle des Momentanwertes, um mögliche Messungenauigkeiten (Messfehler, Messstandort) oder Messmanipulation in der Bewertung zu minimieren.
2. Festlegung von Mittelwerten anhand der zulässigen Häufigkeit der Kohlendioxidwerte pro Unterrichtseinheit über einen Grenzwert (mathematisch: Perzentil) anstelle des arithmetischen Mittelwertes, um die resultierende Luftqualität verständlicher zu machen. Würde beispielsweise gefordert, dass das 50. Perzentil (der so genannte Median-Wert) nicht über 1000 ppm liegen darf, ist dem Anwender vergleichsweise leicht zu vermitteln, dass die Hälfte der Zeit einer Unterrichtseinheit eine CO₂-Konzentration von 1000 ppm einzuhalten ist. Eine ähnliche Aussage zum zeitlichen Verlauf kann aus dem arithmetischen Mittelwert nicht abgeleitet werden. Der Median-Wert ist geplante Grundlage für die Anforderungen in Österreich (Ö-Norm 5703 E).
3. Festlegung einer kumulierten Grenzwertüberschreitung der CO₂-Konzentration in ppmh (ppm mal Stunde; angegeben pro Unterrichtseinheit, Unterrichtstag, Unterrichtswoche), um Summeneffekte zu erfassen (siehe beispielhaft Abbildung 57 für einen Unterrichtstag). Eine solche Vorgehensweise wird bereits in andere europäischen Staaten für Wohngebäude praktiziert:
 - Frankreich: $E_{2000} < 400.000$ ppmh über die Heizperiode pro Raum
 - Niederlande: $LKI_{1200} < 30.000$ ppmh über die Heizperiode pro Person
 - Spanien: $E_{1600} < 500.000$ ppmh über das gesamte Jahr pro Raum.
4. Für die praktische Umsetzung der unter den Punkten 2 und 3 vorgeschlagenen Änderungen (aber auch für die heute praktizierte Vorgehensweise mit dem arithmetischen Mittelwert) kann die Erstellung und ggf. BNB-Zertifizierung eines (evtl. excelbasierten) Tools empfohlen werden. Unter Vorgabe der Schulstunden, der Schülerzahl, der Raumgröße und des Luftvolumenstroms sowie ggf. weiterer Parameter (z.B. Schüleralter und Außenklima) könnte der Planer die genannten Kennwerte vorab bestimmen und eine Klassifizierung nach BNB-Bewertungssystem vornehmen.

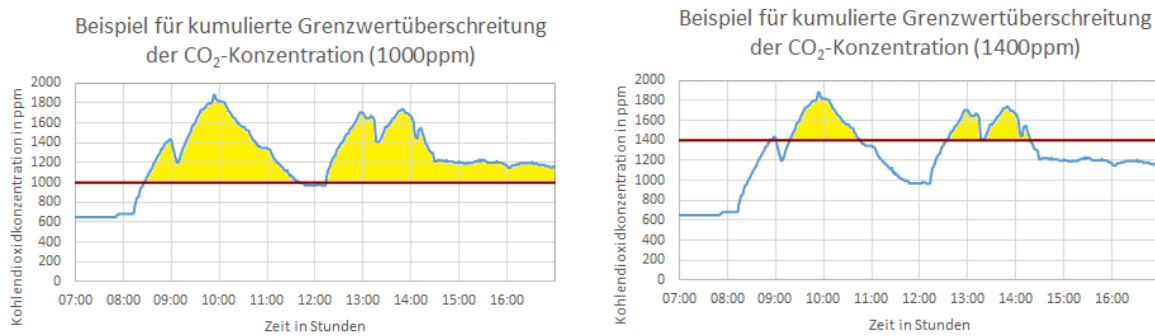


Abbildung 57: Beispiel für die Bewertung mit einer kumulierten Grenzwertüberschreitung
(links: $E_{1000} = 3032$ ppmh, rechts: $E_{1400} = 707$ ppmh)

Anforderungen an eine „Idealstudie“ für BNB

Die Auswertungen im Rahmen dieser Metastudie haben gezeigt, dass ein direkter Vergleich verschiedener Studien durch deren oft unterschiedliche Zielsetzung kaum möglich ist. Für zukünftige Studien, insbesondere im Kontext zur Bewertung und Verbesserung des BNB, können Anforderungen an die Parameter einer „Idealstudie“ abgeleitet werden.

Tabelle 15 zeigt den Entwurf einer Idealstudie mit den zu berücksichtigenden Parameter. Die in Tabelle 15 aufgezeigten Parameter verfolgen primär das Ziel die Kohlendioxidsituation in Klassenräumen zu messen und zu dokumentieren. Aus den daraus gesammelten Daten können Rückschlüsse für Empfehlungen von Lüftungskonzepten und Bewertungsansätze gefunden werden.

Tabelle 16 zeigt den Vergleich zwischen den betrachteten Studien mit den formulierten Parametern der Idealstudie. Es ist ersichtlich, dass keine Studie alle Parameter der Idealstudie für BNB erfüllt, jedoch der größte Teil der Parameter durch die einzelnen Studien abgedeckt wird.

Tabelle 15: Nach Lüftungssystem gegliederte Übersicht zu erforderlichen Parameter im Sinne einer „Idealstudie“

Allgemeine Parameter	
<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungssystem (Fensterlüftung, Lüftungsanlage, Hybride Lüftung) - Anzahl der Schulen - Schultyp (Grundschule, weiterführende Schulen) - Anzahl der Klassenräume (gleiche Anzahl pro Lüftungssystem) - Anzahl der Unterrichtseinheiten (gleiche Anzahl von Unterrichtseinheiten pro Klassenraum) - Raumbelugung (Protokoll) - Alter der Schüler (Klassenstufe) - Raumfläche und Raumvolumen - Unterrichtszeiten und Pausenzeiten - Messzeiträume (z.B. eine Woche im Sommer, Winter, Übergangszeit) Mindestvorgaben definieren - Messung der Außenluftverhältnisse am Standort (Wind, Temperatur, CO₂ usw.) - Kohlendioxidmessung im Klassenraum (im Minutentakt) - Protokollierung der Pausensituation - Unsicherheit Messtechnik, Automatisierung → Auswertung nicht unmittelbar nach Inbetriebnahme, erst wenn Fehler beseitigt sind, stabil laufende Systeme - Kalibrierungsgüte der Messtechnik - Messtechnik (Anordnung, Typ, Genauigkeit) - Komfortbetrachtung (Thermische Behaglichkeit, Schall usw.) als Messung und/oder Umfrage 	
zusätzlich bei Fensterlüftung	zusätzlich bei Lüftungsanlage
<ul style="list-style-type: none"> - Fensterquerschnitt (Fenstermaße, Flügelanzahl, Öffnungsmöglichkeit (Kipp, Dreh usw.)) - Lüftungsprotokolle mit Angabe zur Fensterstellung und Lüftungsdauer für die Unterrichtsstunden und die Pausen inkl. Angaben welche Fenster wie geöffnet werden - Art der Lüftung (einseitige oder Querlüftung) - Lüftungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungssysteminformationen (Betriebszeiten, Betriebsmodi, Kontaktschalter am Fenster, CO₂-Steuerung, Kombination mit automatischen Fensterflügeln usw.) - Luftvolumenstrom (Planung, Ist-Zustand) - Planungsgröße (CO₂, Temperatur, Volumenstrom usw.)
zusätzlich bei hybrider Lüftung	
Kombination aus aufgeführten Parametern in Fensterlüftung und Lüftungsanlage - geplante Luftvolumenströme (Anteile ventilatorgestützt und frei)	
Ergänzende (optionale) Empfehlungen	
<ul style="list-style-type: none"> - Schadstoffmessung im Klassenraum (Formaldehyd, Radon, Feinstaub usw.) (Feinstaub wird als Partikel Matter PM nach dem aerodynamischen Durchmesser 10 µm, 2,5 µm bzw. 1 µm mit PM10, PM2,5 und PM1 klassifiziert) - Durchführung von Leistungstests 	

Tabelle 16: Tabellarischer Vergleich der Parameter der „Idealstudie“ mit den betrachteten Studien

Allgemeine Parameter	Birmili	Bischof	Bolsius	Fromme	Lahrz	Lambertz	Müller	Sick/Dietz	Wargocki
Lüftungssystem (Fensterlüftung, Lüftungsanlage, Hybride Lüftung)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anzahl der Schulen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Schultyp (Grundschule, weiterführende Schulen)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anzahl der Klassenräume (gleiche Anzahl pro Lüftungssystem)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Anzahl der Unterrichtseinheiten (gleiche Anzahl von Unterrichtseinheiten pro Klassenraum)	✓	✓	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
Raumbelastung (Protokoll)	✓	✓	x	k.A.	✓	x	✓	x	x
Alter der Schüler (Klassenstufe)	✓	✓	x	k.A.	x	x	x	x	✓
Raumfläche und/oder Raumvolumen	x	✓	✓	k.A.	✓	x	x	x	✓
Unterrichtszeiten und Pausenzeiten	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
Messezeiträume (z.B. eine Woche im Sommer, Winter, Übergangszeit) Mindestvorgaben definieren	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Messung der Außenluftverhältnisse am Standort (Wind, Temperatur, CO ₂ usw.)	x	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
Kohlendioxidmessung im Klassenraum (im Minutentakt)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Protokollierung der Pausensituation	✓	✓	x	✓	x	k.A.	x	x	x
Unsicherheit Messtechnik, Automatisierung → Auswertung nicht unmittelbar nach Inbetriebnahme, erst wenn Fehler beseitigt sind, stabil laufende Systeme									
Kalibrierungsgüte der Messtechnik									
Messtechnik (Anordnung Typ, Genauigkeit)									
Komfortbetrachtung (Thermische Behaglichkeit, Schall usw.) als Messung und/oder Umfrage									
Fensterlüftung									
Fensterquerschnitt (Fenstermaße, Flügelanzahl, Öffnungsmöglichkeit (Kipp, Dreh,...))	k.A.	✓	✓	x	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Lüftungsprotokolle mit Angabe zur Fensterstellung und Lüftungsdauer für die Unterrichtsstunden und die Pausen inkl. Angaben welche Fenster wie geöffnet werden	✓	x	x	✓	k.A.	✓	k.A.	k.A.	k.A.
Art der Lüftung (einseitige oder Querlüftung)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Lüftungskonzept	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Lüftungsanlage									
Lüftungssysteminformationen (Betriebszeiten, Betriebsmodi, Kontaktschalter am Fenster, CO ₂ -Steuerung, Kombination mit automatischen Fensterflügeln usw.)	-	x	✓	-	k.A.	k.A.	✓	✓	✓
Luftvolumenstrom (Planung, Ist-Zustand)	-	x	✓	-	k.A.	✓	✓	✓	✓
Planungsgröße (CO ₂ , Temperatur, Volumenstrom usw.)	-	x	✓	-	k.A.		✓	✓	✓
Ergänzende (optionale) Empfehlungen									
Schadstoffmessung im Klassenraum (VOC, Formaldehyd, Radon, Feinstaub usw.)	x	x	x	✓	✓	✓	x	x	✓
Durchführung von Leistungstests	x	x	x	x	x	x	x	x	✓

Legende: erfasst, nicht erfasst, nicht Teil der Studie (Schulen mit ausschließlich Fensterlüftung), keine Angaben

Empfehlungen zu weiterführenden Untersuchungen

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass trotz der vielen bereits durchgeführten Untersuchungen noch viele Fragen offen bleiben bzw. nicht abschließend geklärt werden konnten. Diese offenen Fragestellungen sollten in Zukunft durch weitere Untersuchungen beantwortet werden. Solche zukünftige Untersuchungen zu diesem Thema sollten sich an der hier definierten "Idealstudie" für BNB unter Beachtung der Mindestanforderungen an die zu dokumentierenden Angaben/Größen orientieren.

Unabhängig vom Lüftungskonzept sollte zukünftig der Ansatz zur Bewertung der Güte von Lüftungssystemen durch Bewertung mit Median-Werten oder mit einer kumulierten Grenzwertüberschreitung der CO₂-Konzentration in ppmh (ppm mal Stunde; angegeben pro Unterrichtseinheit, Unterrichtstag, Unterrichtswoche) weiterverfolgt und untersucht werden. Dabei sind sowohl Festlegungen zum Grenzwert als auch zum Wert der kumulierten Grenzwertüberschreitung zu treffen und durch wissenschaftliche Untersuchungen zu belegen.

Bei freier und hybrider Lüftung sind insbesondere weitere Betrachtungen zum Zusammenhang von CO₂-Konzentration und Außentemperatur (bzw. Außenklima) interessant. Auch Vorgaben von Lüftungsinterventionen in realen Klassenzimmern bzw. Testräumen (Beachtung von Störgrößen) und deren Konsequenzen auf die CO₂-Konzentration sind denkbar.

Auch die Erstellung eines (excelbasierten) Tools zum rechnerischen Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an die Raumluftqualität könnte Gegenstand der zukünftigen Weiterentwicklung des BNB-Bewertungssystems sein.

Abschließend soll noch kurz angemerkt werden, dass bei allen In-Situ-Untersuchungen von den Projektleitern nicht aus dem Auge verloren werden darf, was den SchülerInnen (z.B. durch Messaufbauten) und insbesondere den LehrerInnen (z.B. durch möglichst präzise Angaben in Lüftungsprotokollen) zugemutet werden kann. Die Untersuchung sollte die Realität in Schulgebäuden in jeden Fall widerspiegeln.

Literaturverzeichnis

- [Bebersdorf] Bebersdorf J. (2010): *Untersuchungen zur Raumlufthqualität an Erfurter Schulen*. (Dissertation) Jena: Universität Jena.
- [Bischof1] Lahrz T.; Bischof W.; Sagunski H. et al. (2008): *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumlufth*. (Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden, Artikel aus Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, Heft 11).
- [Bischof2] Bischof W. (2010): *Kurzbericht über die 2. Messwoche in 2 Klassenräumen der Jenaplanschule*. (unveröffentlicht) Jena.
- [Bolsius] Bolsius J.; Grötzschel J.; Hennig A. et al. (2014): *Vorbildhafte Energetische Sanierung des Schulkomplexes Olbersdorf*. (Schlussbericht) Zittau.
- [Dietz] Sick F. und Dietz S. (2015): *Monitoring Plusenergie-Grundschule Hohen Neuendorf und IEA Task 41 (Solar Energy and Architecture)*. (Schlussbericht) Berlin.
- [Fromme1] Fromme H.; Dietrich S.; Kiranoglu M. et al. (2006): *Frische Luft an bayrischen Schulen - Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität*. (Vorläufige Zusammenfassung).
- [Fromme2] Fromme H.; Heitmann D.; Dietrich S. et al. (2008): *Raumlufthqualität in Schulen - Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen*. (Artikel aus Gesundheitswesen, Heft 70).
- [Grams1] Grams H.; Hehl O. und Dreesman J. (2004): *Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumlufthqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen*.
- [Grams2] Grams H.; Hehl O. und Dressman J. (2003): *"Aufatmen in Schulen" - Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumlufthqualität in Schulen*. (Artikel aus Gesundheitswesen, Heft 64).
- [GremI] GremI A.; Blümel E.; Gössler A. et al. (2008): *Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens*. Kufstein.
- [HartmannA] Hartmann A. (2015): *The effect of different ventilation solutions on noise, exposures and concentration performance of pupils in classrooms in elementary schools located in moderate climate*. (Diplomarbeit) Dresden: TU Dresden.
- [Heinss] Heinss U. (2005): *Vergleichende Luftqualitätsmessungen in Schulhäusern im Kanton Aargau*. Zürich.

- [Hellwig1] Hellwig R.T.; Antretter F.; Holm A. et al. (2009): *Untersuchungen zum Raumklima und Fensterlüftung in Schulen*. (Artikel aus Bauphysik 31, Heft 2).
- [Hellwig2] Hellwig R.T.; Kersken M. und Schmidt S. (2009): *Ausstattung von Klassenräumen mit Einrichtungen zum Temperieren, Lüften und Belichten*. (Sonderdruck aus Bauphysik 31, Heft 3).
- [Lahrz] Lahrz T.; Burghardt R.; Pfeiler P. et al. (2016): *Luftqualität in Schulklassenräumen im Anschluss an energetischen Sanierungen*. (Kurzfassung).
- [Lambertz] Lambertz M.; Klima M.; Bähr R. et al. (2006): *Energetische Sanierung der Käthe Kollwitz Schule in Aachen - Förderung Energetische Verbesserung der Bausubstanz*. (Schlussbericht) Aachen.
- [Müller] Müller B.; Geier M. und Krimmel P. (2014): *Raumluftkonditionierung in Schulen bei Neubau und Sanierung unter Beachtung ökonomischer, ökologischer und soziokultureller Aspekte*. (Projektbericht) Berlin.
- [Recknagel] Recknagel H.; Sprenger E. und Albers K.-J. (2017/2018): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. 78. Auflage. Aufl. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, ISBN 978-3-8356-7284-0.
- [Sinphonie] Stylianos Kephelopoulos (Europäische Kommission G.F.É.C.(.U..Y.B.d.B.(.N.E.d.O.F.(.-F.P. (2014): *Leitlinien für eine gesunde Umgebung in europäischen Schulen*. (Abschlussbericht) Luxemburg: Europäische Kommission.
- [Steiger1] Steiger S.; Nöske F.; Kersken M. et al. (2008): *Untersuchungen zur Belüftung von Schulen*. Ulm.
- [Steiger2] Steiger S. und Hellwig R.T. (2011): *Hybride Lüftungssysteme für Schulen*. (Abschlussbericht zum Teilprojekt A des Verbundprojektes) Valley.
- [Tappler] Hohenblum P.; Kundi M.; Hutter H.-P. et al. (2008): *LUKI - LUft und KInder - Einfluss der Innenraumluft auf die Gesundheit von Kindern in Ganztagschulen*. (Endbericht - Langfassung) Wien.
- [Wargocki] Wargocki P. und Wyon D.P. (2007): *Indoor Environmental Effects On The Performance Of School Work By Children (1257-TRP)*. (Final Report).

Anhang A: Fragebogen (gekürzter Entwurf)

Sehr geehrte Damen und Herren,

vielen Dank für die Teilnahme an der Studie „Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten“. Versuchen Sie bitte möglichst alle Fragen nach bestem Wissen und Gewissen zu beantworten.

Der Fragebogen wurde bereits durch Informationen aus Veröffentlichungen vorausgefüllt. Bitte prüfen Sie diese Angaben bzw. korrigieren oder ergänzen Sie diese. Sie können dies entweder direkt digital durch Bearbeitung im Dokument vornehmen oder aber schriftlich mit anschließendem Einscannen des Dokuments. Alle Fragen beziehen sich auf den Zeitraum während der Durchführung der Studie.

Die im Fragebogen gewonnenen Daten werden vertraulich behandelt. Die aus der Befragung gewonnenen Daten, werden nur in statistisch zusammengefasster Form und anonymisiert dargestellt und es werden keine Rückschlüsse auf einzelne Studien bzw. Schulen möglich sein.

Für Angaben, die aufgrund der Struktur des Fragebogens nicht erfasst werden, steht ein separates Blatt zur Verfügung (letzte Seite).

Beim digitalen Ausfüllen: Bitte löschen Sie für eine Korrektur das alte Häkchen und setzen Sie das neu an die entsprechende Stelle. Der Fließtext in den Antworten z.B. bei der Antwort „Sonstige“ kann einfach gelöscht werden bzw. überschrieben werden.

Beim schriftlichen Ausfüllen: Bitte markieren Sie eindeutig und gut leserlich das neu gesetzte Häkchen zur Korrektur der Angabe. Der Fließtext in den Antworten z.B. bei der Antwort „Sonstige“ kann durchgestrichen werden und daneben kann die Korrektur erfolgen. Siehe hierzu Beispiel 1 und 2.

Beispiel 1: Liegen die Messdaten in Excel vor?

ja nein, im Format MDF

Beispiel 2: Liegen die Messdaten in Excel vor?

ja nein, im Format ~~MDF~~

Für die Erarbeitung eines Bewertungssystems bezüglich des Teilkriteriums „Kohlendioxidgehalt“ werden zusätzlich die gemessenen Rohdaten, die über die Studie insbesondere bezüglich des CO₂-Konzentrationsverlaufs erhoben worden sind, benötigt.

Wer kann als Ansprechpartner für die Freigabe und Übermittlung der gemessenen Rohdaten bezüglich des CO₂-Konzentrationsverlaufs kontaktiert werden?

Name:	
Telefonnummer:	
Mailadresse:	

Liegen die Messdaten in Excel vor?

ja nein, im Format _____

Modul 1 - Studie

Angaben zur durchgeführten Studie:

1. Wer kann als Ansprechpartner/Projektleiter der Studie kontaktiert werden?

Studie:	
Ansprechpartner/Projektleiter:	
Telefonnummer:	
Mailadresse:	

2. An wie vielen Schulen wurde die Studie durchgeführt? Bitte tragen Sie die genaue Anzahl der untersuchten Schulen hier ein: _____
3. In wie vielen Klassenräumen wurde die Studie durchgeführt? Bitte tragen Sie die genaue Anzahl der untersuchten Klassenräume hier ein: _____
4. Welche Parameter wurden während des Unterrichts in den Klassenräumen gemessen?

Bitte tragen Sie hinter die entsprechende Größe das Messintervall (z.B. alle 1 min.) ein!

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Lufttemperatur _____ | <input type="checkbox"/> Luftdruck _____ |
| <input type="checkbox"/> Operative Temperatur _____ | <input type="checkbox"/> Schalldruck _____ |
| <input type="checkbox"/> Oberflächentemperatur _____ | <input type="checkbox"/> VOC-Gehalt _____ |
| <input type="checkbox"/> relative Luftfeuchtigkeit _____ | <input type="checkbox"/> CO ₂ -Konzentration _____ |
| <input type="checkbox"/> Luftgeschwindigkeit _____ | <input type="checkbox"/> Feinstaubkonzentration _____ |
| <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ | |

Anmerkung (z.B. Lufttemperaturmessung nur in den Räumen 1 und 4): _____

5. Welche Parameter wurden während der Messungen im Klassenraum parallel für das Außenklima dokumentiert?

Bitte tragen Sie hinter die entsprechende Größe das Messintervall (z.B. alle 5 min.) ein!

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Lufttemperatur _____ | <input type="checkbox"/> Windrichtung _____ |
| <input type="checkbox"/> relative Luftfeuchte _____ | <input type="checkbox"/> Luftdruck _____ |
| <input type="checkbox"/> Windgeschwindigkeit _____ | |
| <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ | |

Anmerkung (z.B. Lufttemperaturmessung nur im Zeitraum von...): _____

6. Welche Messungen liegen vor?

nur Sommermessung nur Wintermessung Sommer- und Wintermessung

Bitte tragen Sie die genauen Zeiträume der Messung hier ein (z.B. 07.04.2014 - 11.04.2014):

Sommermessung: _____ Wintermessung: _____

Modul 2a – 1 bis 2 Schulen

Hinweis: Bitte pro Schule ausfüllen, falls nötig kopieren!

Angabe zu der untersuchten Schule:

Name der Schule:	
Schulform:	
Straße und Hausnummer:	
PLZ:	
Ort:	
Land:	
Kontaktperson der Schule:	
Telefonnummer:	
Mailadresse:	

11. Wann wurde das untersuchte Schulgebäude errichtet?

12. Welchem Gebäudetyp entsprach das untersuchte Objekt bei Durchführung der Studie?

Neubau Bestand Sanierter Bestand

Zeitpunkt der Sanierung: _____

13. In welchem Areal liegt das Gebäude?

Ländl. Bereich Städt. Bereich

Stadtzentrum

Vorstadt

14. Ist der Energiestandard des Schulgebäudes zum Zeitpunkt der Studie bekannt (z.B. Passivhaus, Neubau nach EnEV 2009 oder KfW-Effizienzhaus 55)?

ja, mit _____ nein

15. Wurden lüftungsrelevante Sanierungen vor der Durchführung der Studie in den untersuchten Klassenzimmern vorgenommen?

ja nein

Fenstertausch

Einbau Lüftungsanlage

Sonstiges: _____

Bitte weiter mit Modul 3!

Modul 3: Klassenräume

Hinweis: bei mehr als 6 Klassenräumen bitte Seite 15 und 16 kopieren!

Angaben zu den untersuchten Klassenräumen:

Lfd. Nr.	1	Name des Klassenraums (z.B. E101)	
16.	Lage des Klassenraums im Gebäude?	<input type="checkbox"/> Erdgeschoss <input type="checkbox"/> Obergeschoss mit Geschosnummer:____ <input type="checkbox"/> Dachgeschoss <input type="checkbox"/> Sonstige:_____	
17.	Wie groß ist das Raumvolumen der betrachteten Unterrichtsräume? (Raumvolumen in m ³)		
18.	Personenanzahl während der Messung?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> Klassenteiler <input type="checkbox"/> tatsächlich gezählt <input type="checkbox"/> nein	
19.	Wie war die Bebauungslage während der Studiendurchführung? (Lage der Fenster)	<input type="checkbox"/> Straßenseite <input type="checkbox"/> Hofseite <input type="checkbox"/> im Grünen (z.B. Wiese, Park, Wald) <input type="checkbox"/> Sonstiges:_____	
20.	Wie viele Fenster sind im Klassenraum?		
21.	Wie konnten die Fenster im Raum geöffnet werden?	<input type="checkbox"/> ganz <input type="checkbox"/> gar nicht <input type="checkbox"/> nur Kippstellung <input type="checkbox"/> nur mit Schlüssel <input type="checkbox"/> nur ein Fluchtfenster im Raum <input type="checkbox"/> Sonstiges:_____	
22.	Welches Lüftungssystem wurde untersucht?	<input type="checkbox"/> Fensterlüftung Öffenbare Fenster-anzahl:_____ Fenstermaße (HxB) _____m x _____m Fenstermaße (HxB) _____m x _____m <input type="checkbox"/> Lüftungsanlage <input type="checkbox"/> Hybride Lüftung (Hinweis: siehe Fußnote) <input type="checkbox"/> Sonstiges:_____	

Lfd. Nr.	1	
23. Wie erfolgt in der Regel die (zusätzliche) Lüftung im Raum?	<input type="checkbox"/> regelmäßiges Lüften durch Stoßlüftung <input type="checkbox"/> nur in den Pausen <input type="checkbox"/> in den Pausen und während der Unterrichtsstunde <input type="checkbox"/> genaue Dauer der Fensteröffnung bekannt <input type="checkbox"/> Lüftung durch angekippte Fenster (Dauerzustand oder fast Dauerzustand) <input type="checkbox"/> automatische Fensterlüftung <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____	
24. Gab es während der Durchführung der Studie Nutzerbeschwerden über die Luftqualität?	<input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> wenn ja, welche... <input type="checkbox"/> schlechte Luftqualität <input type="checkbox"/> Außenlärm <input type="checkbox"/> Geräuschpegel der Lüftungsanlage <input type="checkbox"/> thermische Unbehaglichkeit <input type="checkbox"/> zu warm <input type="checkbox"/> zu kalt <input type="checkbox"/> Zugluft <input type="checkbox"/> Sonstiges _____ <input type="checkbox"/> wenn ja, Angaben über Häufigkeit und Intensität vorhanden	

Falls eine Lüftungsanlage/Hybridlüftung untersucht wurde, bitte weiter mit Modul 4!

Modul 4 – Lüftungsgerät/Hybridlüftung

Hinweis: Bei mehr als 3 Lüftungsgeräten bitte Seite 20 kopieren!

Angaben zum untersuchten Lüftungsgerät/zur hybriden Lüftung

25. Falls ein Klassenraum mit Lüftungsanlage untersucht wurde. Werden weitere Angaben zur Lüftungsanlage benötigt. Bitte kreuzen Sie entsprechend an:

Schule: _____

Klassenzimmer (z.B. E101): _____

zentrale Lüftungsanlage dezentrale Lüftungsanlage

Abluftsystem Zuluftsystem Zu-/Abluftsystem

mit Wärmerückgewinnung ohne Wärmerückgewinnung

bedarfsgeregelt nicht bedarfsgeregelt

Nach...(bitte geben Sie hinter der Größe den Grenzwert bzw. oberer/unterer Sollwert für das Eingreifen der Automatik an)

relativer Feuchte mit dem Grenzwert _____

CO₂-Konzentration _____

VOC-Konzentration _____

Mischgas-Konzentration _____

Sonstiges: _____

26. Nach welchem Betriebsprotokoll wurde das Lüftungsgerät betrieben?

Betriebszeit von _____ bis _____ (z.B. 1. Januar bis 31. Dezember)

Betriebszeit tagsüber von _____ Uhr bis _____ Uhr

mit einem Luftvolumenstrom von _____ m³/h

nachts abgeschaltet nachts reduziert auf einen Luftvolumenstrom von _____ m³/h

Betrieb auch am WE nur an Schultagen

Sonstiges: _____

27. Aus welchen Komponenten setzt sich die untersuchte Hybridlüftung zusammen?

- automatisierte Fensterlüftung + Lüftungsanlage
- Lüftungssampel für manuelles Fensteröffnen + Lüftungsanlage
- Sonstiges: _____

<p>Lage der Fenster?</p>	<input type="checkbox"/> Straßenseite <input type="checkbox"/> Hofseite <input type="checkbox"/> im Grünen (z.B. Wiese, Park, Wald) <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ _____	<input type="checkbox"/> Straßenseite <input type="checkbox"/> Hofseite <input type="checkbox"/> im Grünen (z.B. Wiese, Park, Wald) <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ _____	<input type="checkbox"/> Straßenseite <input type="checkbox"/> Hofseite <input type="checkbox"/> im Grünen (z.B. Wiese, Park, Wald) <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ _____	<input type="checkbox"/> Straßenseite <input type="checkbox"/> Hofseite <input type="checkbox"/> im Grünen (z.B. Wiese, Park, Wald) <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ _____
<p>Gab es während der Durchführung der Studien Nutzerbeschwerden?</p>	<input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> wenn ja, welche <input type="checkbox"/> schlechte Luftqualität <input type="checkbox"/> Außenlärm <input type="checkbox"/> Geräuschpegel der Lüftungsanlage <input type="checkbox"/> thermische Unbehaglichkeit <input type="checkbox"/> zu warm <input type="checkbox"/> zu kalt <input type="checkbox"/> Zugluft <input type="checkbox"/> Sonstiges _____ _____ <input type="checkbox"/> wenn ja, Angaben über Häufigkeit und Intensität vorhanden	<input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> wenn ja, welche <input type="checkbox"/> schlechte Luftqualität <input type="checkbox"/> Außenlärm <input type="checkbox"/> Geräuschpegel der Lüftungsanlage <input type="checkbox"/> thermische Unbehaglichkeit <input type="checkbox"/> zu warm <input type="checkbox"/> zu kalt <input type="checkbox"/> Zugluft <input type="checkbox"/> Sonstiges _____ _____ <input type="checkbox"/> wenn ja, Angaben über Häufigkeit und Intensität vorhanden	<input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> wenn ja, welche <input type="checkbox"/> schlechte Luftqualität <input type="checkbox"/> Außenlärm <input type="checkbox"/> Geräuschpegel der Lüftungsanlage <input type="checkbox"/> thermische Unbehaglichkeit <input type="checkbox"/> zu warm <input type="checkbox"/> zu kalt <input type="checkbox"/> Zugluft <input type="checkbox"/> Sonstiges _____ _____ <input type="checkbox"/> wenn ja, Angaben über Häufigkeit und Intensität vorhanden	<input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> wenn ja, welche <input type="checkbox"/> schlechte Luftqualität <input type="checkbox"/> Außenlärm <input type="checkbox"/> Geräuschpegel der Lüftungsanlage <input type="checkbox"/> thermische Unbehaglichkeit <input type="checkbox"/> zu warm <input type="checkbox"/> zu kalt <input type="checkbox"/> Zugluft <input type="checkbox"/> Sonstiges _____ _____ <input type="checkbox"/> wenn ja, Angaben über Häufigkeit und Intensität vorhanden
<p>Wie konnten die Fenster im Raum geöffnet werden?</p>	<input type="checkbox"/> ganz <input type="checkbox"/> gar nicht <input type="checkbox"/> nur Kippstellung <input type="checkbox"/> nur mit Schlüssel <input type="checkbox"/> nur ein Fluchtfenster <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____	<input type="checkbox"/> ganz <input type="checkbox"/> gar nicht <input type="checkbox"/> nur Kippstellung <input type="checkbox"/> nur mit Schlüssel <input type="checkbox"/> nur ein Fluchtfenster <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____	<input type="checkbox"/> ganz <input type="checkbox"/> gar nicht <input type="checkbox"/> nur Kippstellung <input type="checkbox"/> nur mit Schlüssel <input type="checkbox"/> nur ein Fluchtfenster <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____	<input type="checkbox"/> ganz <input type="checkbox"/> gar nicht <input type="checkbox"/> nur Kippstellung <input type="checkbox"/> nur mit Schlüssel <input type="checkbox"/> nur ein Fluchtfenster <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____

<p>Wie erfolgt in der Regel die (zusätzliche) Lüftung im Raum?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> regelm. Lüften durch Stoßlüftung <input type="checkbox"/> nur in den Pausen <input type="checkbox"/> in den Pausen und während der Unterrichtsstunde <input type="checkbox"/> genaue Dauer der Fensteröffnung bekannt <input type="checkbox"/> Lüftung durch angekippte Fenster (Dauerzustand (DZ) oder fast DZ) <input type="checkbox"/> autom. Fensterlüftung <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____ 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> regelm. Lüften durch Stoßlüftung <input type="checkbox"/> nur in den Pausen <input type="checkbox"/> in den Pausen und während der Unterrichtsstunde <input type="checkbox"/> genaue Dauer der Fensteröffnung bekannt <input type="checkbox"/> Lüftung durch angekippte Fenster (Dauerzustand (DZ) oder fast DZ) <input type="checkbox"/> autom. Fensterlüftung <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____ 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> regelm. Lüften durch Stoßlüftung <input type="checkbox"/> nur in den Pausen <input type="checkbox"/> in den Pausen und während der Unterrichtsstunde <input type="checkbox"/> genaue Dauer der Fensteröffnung bekannt <input type="checkbox"/> Lüftung durch angekippte Fenster (Dauerzustand (DZ) oder fast DZ) <input type="checkbox"/> autom. Fensterlüftung <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____ 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> regelm. Lüften durch Stoßlüftung <input type="checkbox"/> nur in den Pausen <input type="checkbox"/> in den Pausen und während der Unterrichtsstunde <input type="checkbox"/> genaue Dauer der Fensteröffnung bekannt <input type="checkbox"/> Lüftung durch angekippte Fenster (Dauerzustand (DZ) oder fast DZ) <input type="checkbox"/> autom. Fensterlüftung <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____
--	--	--	--	--

Falls eine Lüftungsanlage/Hybridlüftung untersucht wurde, bitte weiter mit Modul 4!

Anhang B: Zusammenstellung der Studienparameter

Tabelle B. 1 bis Tabelle B. 3 fassen die Randbedingungen zusammen, unter denen die einzelnen Studien durchgeführt wurden (z.B. Schultyp, Lüftungssystem, gemessene Kennwerte, Messergebnisse).

Tabelle B. 1: Zusammenstellung der Randbedingungen für die betrachteten Studien nach [HartmannA] (Teil 1 von 2)

	1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
Schultyp	Grundschule (Neubau)	Schulkomplex Olbersdorf (energetisch saniert)	„elementary school“ (6 bis 16 Jahre) ≈ Gesamtschule (Dänemark) (1950)	Überwiegend Grundschulen (energetisch saniert)	Grundschulen
Anzahl	1 Schule, 2 Klassenräume	1 Schule	2 Klassenräume, (Schüleralter: 10 bis 12 Jahre)	22 Klassenräumen 445 Unterrichtsstunden ausgewertet	6 Schulen, 14 Klassenräume
Lüftungssystem	Hybrides Lüftungskonzept (Kombination mechanische Grundlüftung und natürliche (freie) Stoßlüftung), Fenster können motorisch wie manuell geöffnet werden, CO ₂ -Ampel installiert	Fensterlüftung und Ventilatorgestützte Lüftung: Abluftanlage (CO ₂ -gesteuert) mit Zuluftführung über Zuluft-Kastenfenster	Ventilatorgestützte Lüftung (zentrales für die beiden betrachteten Klassenräume)	Fensterlüftung in 10 Klassenräumen, Ventilatorgestützte Lüftung in 12 Klassenräumen	Fensterlüftung
Messzeitraum	Mai 2010 bis Juli 2014	Mai 2011 bis September 2013	Winter- und –Sommermessung (nicht näher spezifiziert)	Dezember 2013 bis April 2015	März bis Juni 2010, August bis Dezember 2010

		1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
Intervention				„Blind crossover design“ (je eine Woche) Filter (F7-Taschenfilter) gebraucht (12 Monate alt) oder neu Luftvolumenstrom hoch (8,5 l/s pro Person = 30,6 m³/h pro Person) oder niedrig (3,0 l/s pro Person = 10,8 m³/h pro Person) Studiendesign nicht ausbalanciert Keine Einschränkungen bezüglich Lüftungsgewohnheit	Ventilatorgestützte Lüftung ohne zusätzliche Lüftungsmaßnahmen über Fenster Fensterlüftung mit Festlegung von Mindestlüftung vor dem Unterricht, in jeder Pause und nach dem Unterricht + Lüftung nach Bedarf	
Messmethode	CO₂	Ja, Messung in Raumhöhe von 2,3 m	Jede Minute	Alle 1 bis 5 Minuten, in einer Höhe von 2,2 m	ja	Jede Minute
	Feuchte	Ja, Messung in Raumhöhe von 2,3 m	-	Ja, Messung in 2,2 m Höhe	ja	Jede Minute
	Temperatur	Temperatur der Raumluft, Strahlungstemperatur, Messung in Raumhöhe von 2,3 m	Jede Minute	Ja, Messung in 2,2 m Höhe	ja	Jede Minute
	VOCs	-	-	Staubablagerungen in 2,2 m Höhe, Messungen zu Schwebstaub	Staubfraktionen Für einen Tag: Flüchtige organische Verbindungen, flüchtige Carbonylverbindungen, Feinstaubfraktion und Endotoxine, Schimmelpilze und Bakterien	-

		1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
	Außenbedingungen	Wetterstation an östlicher Giebelwand des Technikdaches auf dem mittleren Gebäudeflügel (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Lufttemperatur, CO ₂ -Konzentration der Außenluft, Globalstrahlung horizontal, in Ebene der Photovoltaikanlage und vertikal, Luftdruck, Niederschlag, Beleuchtungsstärke)	Außenlufttemperatur, solare Einstrahlung und Windgeschwindigkeit	Nicht spezifiziert	-	-
	Fragebögen, Protokolle, Tests	-	Erfassung der Präsenzzeiten	Unterschiedliche Tests (numerische und sprachliche) je 10/12 Minuten, Fragebogen zur Befindlichkeit, Raumgegebenheiten, Messungen im Zu- und Abluftleitungen, Fenster- und Türkontakte, Messungen zu Luftgeschwindigkeit, Schalldruckpegel, operative Temperatur, Lehrerprotokolle über Schülerverhalten im Unterricht, Notizbuch für Eltern und Lehrer zum Notieren von Auffälligkeiten (Krankheiten, Verhalten,...), Kontrollgruppe von Erwachsenen, die die Luftqualität bewerten (einmal die Woche nachmittags, alle 2 bis 3 Minuten)	Fragebogen Schule (Angaben zum Gebäude, Angaben zum Klassenraum, Lüftungsprotokoll) Raumbelegung, Raumvolumen	Lüftungsprotokolle, Raumbelegung

		1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
Ergebnisse	CO ₂	<p>Während Unterrichtszeiten Anstieg der CO₂-Konzentration, jedoch deutlich unterhalb von 1900 ppm In den Pausenzeiten Stoßlüftung über motorisierte Lüftungsflügel, CO₂-Konzentration sinkt auf unter 1000 ppm</p> <p>Hybrides Lüftungssystem: - weniger als 1 % der Nutzungszeit über 1900 ppm, ca. 8 % über 1500 ppm. - ca. 12 % der Nutzungszeit > 1900 ppm, ca. 30 % der Nutzungszeit > 1500 ppm - ca. 8 % über 1900 ppm und ca. 19 % über 1500 ppm (unterschiedliche Schuljahre)</p>	<p>Ventilatorgestützten Lüftung: Werte meist zwischen c_{CO2,min} = 1200 ppm und c_{CO2,max} = 1600 ppm, Nie über c_{CO2} = 2000 ppm (ca. t_{CO2} = 130 h pro Jahr über c_{CO2} = 1500 ppm) Fensterlüftung: Teilweise Werte über c_{CO2} = 2500 ppm (ca. t_{CO2} = 300 h pro Jahr über c_{CO2} = 1500 ppm)</p>	<p>Winter: Höhere CO₂-Konzentrationen bei niedrigerem Luftvolumenstrom c_{CO2,mittel,hoch} = 923 ppm, c_{CO2,mittel,niedrig} = 1280 ppm, c_{CO2,hoch,max} = 1169 ppm c_{CO2,niedrig,max} = 1694 ppm Sommer: Höhere CO₂-Konzentrationen bei niedrigerem Luftvolumenstrom c_{CO2,mittel,hoch} = 904 ppm, c_{CO2,mittel,niedrig} = 1128 ppm, c_{CO2,hoch,max} = 1194 ppm c_{CO2,niedrig,max} = 1758 ppm</p>	<p>Fensterlüftung: c_{CO2,median} ≈ 1300 ppm, c_{CO2,max} = 2730 ppm 82 % der Unterrichtszeit > 1000 ppm, 30 % der Zeit > 1500 ppm, 7 % der Zeit > 2000 ppm Ventilatorgestützte Lüftung: c_{CO2,median} ≈ 1000 ppm, c_{CO2,max} = 1490 ppm, nie über 1500 ppm</p>	
	Feuchte	-	-	<p>Winter: φ_{mittel} = 39 % Sommer: φ_{mittel} = 53 %</p>	φ _{median} = 33 %	

		1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
	Temperatur	<p>Nachtabenkung, Solltemperatur 20 °C wird erst gegen 10:30 Uhr erreicht, daher Absenkbetrieb deaktiviert</p> <p>Nachtlüftung: Raumlufttemperatur unter 15 °C, dann Beendigung des Lüftungsvorgangs</p> <p>Steuerlogik: Bei Temperaturen unter 5 °C effektive Öffnungszeit 5 Minuten; im Temperaturbereich von 5 °C bis 20 °C wird zwischen 5 und 15 Minuten linear interpoliert; von 20 °C bis 25 °C erfolgt keine zeitliche Begrenzung.</p>	<p>Mindesttemperatur von $\vartheta_{min} = 21^{\circ}C$ wird immer erreicht, mittlere Raumtemperaturen während der Anwesenheit zwischen $\vartheta_{min,mittel} = 21^{\circ}C$ und $\vartheta_{max,mittel} = 23^{\circ}C$, selten über $\vartheta_{max} = 26^{\circ}C$ und in manchen Räumen nie über $\vartheta_{max} = 28^{\circ}C$</p>	<p>Winter: $\vartheta_{mittel} = 19^{\circ}C$</p> <p>Sommer: $\vartheta_{mittel} = 24^{\circ}C$</p>	<p>Fensterlüftung: $\vartheta_{min} \approx 18^{\circ}C$ $\vartheta_{mittel} = 22^{\circ}C$</p> <p>Ventilatorgestützte Lüftung: $\vartheta_{min} \approx 21$ bis $22^{\circ}C$ $\vartheta_{mittel} = 24^{\circ}C$</p>	
	VOCs	-	-	Mit höheren Luftvolumenströmen geringere Konzentrationen	<p>Signifikante Korrelationen von Kohlendioxid- und PM10-Konzentrationen</p> <p>Staubfraktionen: ca. 20 % geringere Konzentrationen mit ventilatorgestützter Lüftung</p> <p>PM10-Konzentrationen mit Fensterlüftung ca. 30 % über ventilatorgestützten Lüftung</p>	

		1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
	Außenbedin- gungen	Winter: 05.12.12 bis 15.12.12 $\vartheta_{e,m} = -3,5\text{ °C}$ $\vartheta_{e,max} = 2,7\text{ °C}$ $\vartheta_{e,min} = -11,9\text{ °C}$ Sommer: 15.08.12 bis 25.08.12 $\vartheta_{e,m} = 19,8\text{ °C}$ $\vartheta_{e,max} = 35,3\text{ °C}$ $\vartheta_{e,min} = 9,5\text{ °C}$	$\vartheta_{min,e} = -5,2\text{ °C}$ $\vartheta_{max,e} = 22,3\text{ °C}$ $E_{sol,min} = 17,8\text{ kWh/m}^2$ $E_{sol,max} = 191,8\text{ kWh/m}^2$	Winter: $\vartheta_{e,mittel} = 4,1\text{ °C}$, $\varphi_{e,mit-tel} = 87\%$, $c_{CO2} = 400\text{ ppm}$ Sommer: $\vartheta_{e,mittel} = 15,7\text{ °C}$, $\varphi_{e,mit-tel} = 68\%$, $c_{CO2} = 378\text{ ppm}$	-	
	Fragebögen, Protokolle, Tests	-	-	Mittlere Schüleranzahl pro Klasse 23, Raumfläche 50 m ² , Raumhöhe 3 bis 3,65 m, Raumvolumen 187,5 m ³ (Winter: Luftvolumenstrom 4 l/s = 14,4 m ³ /h oder 8,5 l/s = 30,6 m ³ /h pro Per- son, Luftgeschwindigkeit < 0,13 m/s Sommer: Luftvolumenstrom 3 l/s = 10,8 m ³ /h oder 6,5 l/s = 23,4 m ³ /h pro Per- son, Luftgeschwindigkeit < 0,12 m/s)	Während Unterrichtsstunden im Mittel 21 Schüler anwe- send Raumvolumen im Mittel ca. 180 m ³ (ca. 8,5 m ³ /Person)	

	1 Dietz/Sick	2 Bolsius	3 Wargocki	4 Lahrz	5 Birmili
Zusammenfassung/ Schlussfolgerungen	<ul style="list-style-type: none"> - hybride Lüftungskonzept bei fehlerfreiem Betrieb sorgt für eine gute Raumluftqualität - Lüftungsflügel jedoch sehr stör anfällig und häufig außer Betrieb - Verbesserungsmöglichkeiten: Wetterschutzregelung und im Zusammenspiel mit dem Heizungssystem - in der kalten Jahreszeit hohe Nutzerakzeptanz für automatisierte natürliche Lüftungsvorgänge durch Berücksichtigung von tatsächlichen Nutzungszeiten in der Lüftungsstrategie und manuelle Anpassungen (z.B. bei Nutzungsänderung) - Nachtkühlung und Nachtlüftung durch automatisierte Fenster möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - alternatives Regelungskonzept in Abhängigkeit der Präsenz - Vorspülung der Klassenräume vor Unterrichtsbeginn - gute und sehr gute Raumluftqualität ist mittels zusätzlicher Fensterlüftung vor Unterrichtsbeginn und in den Pausen zu erreichen 	<ul style="list-style-type: none"> - signifikanter Effekt der Lüftungsrate in 70 % der Fälle auf statistische Test für die Leistungsfähigkeit der Schüler - höhere Luftvolumenströme führen zur schnelleren Bearbeitung der Tests - höhere Luftvolumenströme: Luft wird als frischer von den Schülern bewertet und von der Erwachsenen-Kontrollgruppe bestätigt - Reduzierung des mittleren CO₂-Levels von 1300 ppm auf 900 ppm - Einfluss des Filters konnte durch gewähltes Studiendesign nicht geklärt werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Unterschied zwischen den Lüftungsarten am Hauptmesstag etwas geringer als im Mittel über die gesamte Unterrichtswoche - Tendenz zu niedrigeren Konzentrationen von Schimmelpilzen und Endotoxinen bei geringeren PM10-Werten - bessere Innenraumqualität durch mechanischer Belüftungen der Klassenräume - Vorteile ventilatorgestützte Lüftung: Wärmerückgewinnung, Nachtlüftung, ganzjährige Gewährleistung guter Innenraumluftqualität - deutlich höhere Kohlendioxid – und Feinstaubkonzentrationen bei Fensterlüftung, obwohl regelmäßig vor dem Unterricht und in den Pausen und darüber hinaus gelüftet wird - Verbesserung der Innenraumluftqualität durch Reduzierung der Schüleranzahl in den Klassenräumen - Prüfung der Möglichkeit der hybriden Lüftung (maschinelle Grundlüftung in Kombination mit Fensterlüftung) 	

Tabelle B. 2: Zusammenstellung der Randbedingungen für die betrachteten Studien nach [HartmannA] (Teil 2 von 2)

		6 Müller	7 Bischof/Bebersdorf	8 Fromme	9 Lambert
Schultyp		6 Grundschulen, 1 Gymnasium, 1 integrierte Sekundarschule, 1 Oberstufenzentrum (Neubau, Bestandsgebäude, Bestandsgebäude mit Denkmalschutz, Typenschulbauten)	Regelschulen und Gymnasien (saniert, unsaniert, komplett saniert)	Grundschulen und weiterführende Schulen (17 Schulen: 1950 bis 1975, 10 Schulen: 1975 bis 1990, 5 Schulen: 1990 bis 2005, 14 Schulen vor 1930, 1 Schule in ehemaligem Klostergebäude (1120))	Berufskolleg (saniert)
Anzahl		9 Schulen	10 Schulen (251 Unterrichtsstunden)	Winter: 92 Klassenräume in 46 Schulen Sommer: 76 Klassenräume in 38 Schulen	1 Schule
Lüftungssystem		Fensterlüftung, Zentrale RLT, dezentrale RLT (Standgeräte, Deckengeräte, Brüstungsgeräte)	Fensterlüftung	Nicht spezifiziert	Dezentrale Abluftanlage (Gerät im Dachgeschoss), dezentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) (Gerät im Dachgeschoss oder Flur), dezentrale Lüftungsanlage mit WRG (Fassadengerät), zentrale Lüftungsanlage mit WRG (Gerät im Dachgeschoss)
Messzeitraum		Februar und März 2013, April bis Juni 2013 Ein Unterrichtstag bzw. eine Woche (11.02.2013 von 07:45 bis 13:30 Uhr)	Jeweils zwei Tage im Februar und März 2006	02.12.2004 bis 16.03.2005 (Winter) 02.05.2005 bis 28.07.2005 (Sommer) Ein Unterrichtstag	2004 bis 2006
Intervention		keine	Fensterlüftung ausschließlich in den Pausen, nicht während der 45-minütigen Schulstunden nach Unterrichtsstunde Wechsel der Klassenräume	keine	Vorgaben zur Fensterlüftung (freigesellt, geschlossen, instruierte Kipp- oder Stoßlüftung in den Pausen)
Messmethode	CO₂	Nicht spezifiziert	Alle 10 Sekunden	Jede Minute, $h = 0,9 m$, $d_{wand} = 0,5 m$	Alle 5 min
	Feuchte	Nicht spezifiziert	Alle 5 Minuten	Jede Minute, $h = 0,9 m$, $d_{wand} = 0,5 m$	Alle 5 min
	Temperatur	Raumlufttemperatur	Operative Temperatur Lufttemperatur: alle 5 Minuten	Jede Minute, $h = 0,9 m$, $d_{wand} = 0,5 m$	Alle 5 min

		6 Müller	7 Bischof/Bebersdorf	8 Fromme	9 Lambert
	VOCs	-	Pilotmessung in einem Klassenzimmer (7 Unterrichtsstunden) – $h = 1,2 \text{ m}$ und 100 l/min	Flüchtige organische Verbindungen, Carbonylverbindungen, gravimetrische Bestimmung der Partikelmasse, aerosolspektrometrische kontinuierliche Bestimmung der Partikelmasse, Partikelanzahlkonzentration, Partikeloberflächenkonzentration und Partikelvolumenkonzentration, Katzenallergene, Endotoxine	Alle 5 min
	Außenbedingungen	Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, CO ₂ -Konzentration	-	Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO ₂ -Konzentration	CO ₂ -Konzentration der Außenluft
	Fragebögen, Protokolle, Tests		Bauliche und nutzungsbedingte Aspekte, Charakteristika der Schulumgebung, Fehlzeiten,... (Gebäudefragebogen, Raumprotokoll, Lehrerfragebogen, Übersicht der Schülerfehltage, Protokoll der exemplarischen Keimzahlbestimmung, Nährboden, Studienteilnehmer)	Erfassungsbogen (Kenngrößen der Raumarchitektur, Meteorologie, Einfluss- und Störfaktoren), Erhebungsbogen (Personenanzahl, Lüftungsbedingungen während des Unterrichts und in der Pause)	Mittlere Personenbelegung, Volumenstrom der mechanischen Lüftung, Angaben zur Fensterlüftung

		6 Müller	7 Bischof/Bebersdorf	8 Fromme	9 Lambert
Ergebnisse	CO ₂	<p>Fensterlüftung: Winter: >50% > 2000 ppm Sommer: selten über 1000 ppm Ventilatorgestützte Lüftung: Winter: $c_{CO_2,max} = 1130$ ppm</p>	<p>Mittelwert <math>c_{CO_2,mit- tel} = 1751</math> ppm $c_{CO_2,m,min} = 1401$ ppm $c_{CO_2,m,max} = 2292$ ppm $c_{CO_2,max} = 4996$ ppm 9,2 % der untersuchten Stunden unter $c_{CO_2} = 1000$ ppm 33 % der untersuchten Stunden über $c_{CO_2} = 2000$ ppm 4,8 % der untersuchten Stunden über $c_{CO_2} = 3000$ ppm</p>	<p>Medianwerte: Sommer: 480 bis 1875 ppm $c_{CO_2,m} = 890$ ppm, 28% über 1000 ppm, 9% über 1500 ppm, Winter: 598 bis 4172 ppm $c_{CO_2,m} = 1759$ ppm, 92% über 1000 ppm, 60% über 1500 ppm</p>	<p>Fensterlüftung: Kipplüftung in den Pausen $c_{CO_2,max} = 5000$ ppm Fensterlüftung ohne Vorgaben $c_{CO_2,max} = 3200$ ppm Mechanische Lüftung mit unterschiedlichen Volumenströme der Lüftungsanlage und Stoßlüftung in der Pause: $c_{CO_2,max} = 1500$ ppm ($\approx 16,4$ m³/h pro Person) Mechanische Lüftung mit unterschiedlichen Volumenströme der Lüftungsanlage und geschlossenen Fenstern: $c_{CO_2,max} = 2100$ ppm ($\approx 10,7$ m³/h pro Person), $c_{CO_2,max} = 1400$ ppm ($\approx 16,2$ m³/h pro Person) Mechanische Lüftung mit unterschiedlichen Volumenströme der Lüftungsanlage und keinen Vorgaben zur Fensterlüftung: $c_{CO_2,max} = 2200$ ppm ($\approx 11,2$ m³/h pro Person), $c_{CO_2,max} = 1200$ ppm ($\approx 24,5$ m³/h pro Person)</p>
	Feuchte	<p>Relative Luftfeuchte im Behaglichkeitsbereich</p>	<p>$\varphi_{min} = 35$ % $\varphi_{max} = 45$ % $\varphi_m = 36,5$ %</p>	<p>Winter: $\varphi_{m,min,Wi} = 22$ % $\varphi_{m,max,Wi} = 60$ % Sommer: $\varphi_{m,min,So} = 32$ % $\varphi_{m,max,So} = 70$ %</p>	<p>Mittelwert der Messungen: $\varphi_{mittel} \approx 42$%, $\varphi_{mittel,min} \approx 36$%, $\varphi_{mittel,max} \approx 46$% Bei kalten Außentemperaturen und großen Außenluftvolumenströmen $\varphi_{min} = 16,4$%</p>

	6 Müller	7 Bischof/Bebersdorf	8 Fromme	9 Lambert
Temperatur	Raumlufttemperatur im Behaglichkeitsbereich	$\vartheta_{\min} = 21 \text{ °C}$ $\vartheta_{\max} = 23,5 \text{ °C}$ $\vartheta_m = 22,4 \text{ °C}$	Winter: $\vartheta_{m,\min,Wi} = 18 \text{ °C}$ $\vartheta_{m,\max,Wi} = 25 \text{ °C}$ Sommer: $\vartheta_{m,\min,So} = 21 \text{ °C}$ $\vartheta_{m,\max,So} = 29 \text{ °C}$	Mittelwert der Messungen: $\vartheta_{\text{mittel}} \approx 22 \text{ °C}$, $\vartheta_{\text{mittel,min}} \approx 20 \text{ °C}$, $\vartheta_{\text{mittel,max}} \approx 24 \text{ °C}$
VOCs		Pilzsporen nur in sehr geringer Konzentration, Konzentrationen von Kohlendioxid und Bakterien verlaufen über den Tag tendenziell parallel	Geringe Konzentrationen von VOCs,...	VOC-Verlauf folgt dem CO ₂ -Verlauf
Außenbedingungen	Mittlere Außentemperatur - Mittlere Windgeschwindigkeit Mittlere Windrichtung CO ₂ -Konzentration zu Beginn (außen) Für die jeweilige Messung	-	Winter: $\vartheta_{m,\min,Wi} = -8 \text{ °C}$ $\vartheta_{m,\max,Wi} = 12 \text{ °C}$ $\varphi_{m,\min,Wi} = 42 \%$ $\varphi_{m,\max,Wi} = 82 \%$ $c_{CO_2,m,\min,Wi} = 381 \text{ ppm}$, $c_{CO_2,m,\max,Wi} = 490 \text{ ppm}$ Sommer: $\vartheta_{m,\min,So} = 10 \text{ °C}$ $\vartheta_{m,\max,So} = 26 \text{ °C}$ $\varphi_{m,\min,So} = 49 \%$ $\varphi_{m,\max,So} = 94 \%$ $c_{CO_2,m,\min,So} = 338 \text{ ppm}$, $c_{CO_2,m,\max,So} = 509 \text{ ppm}$	$c_{CO_2,\text{mittel}} > 400 \text{ ppm}$
Fragebögen, Protokolle, Tests	Anzahl der Schüler, Anzahl der Lehrer, geöffnetes Fenster (Uhrzeit), Fensteranzahl, Bemerkungen zur Raumtür (geöffnet, geschlossen,...)	Lüftungsverhalten der Lehrer: Während des Unterrichts: 13,6 % im Winter gar nicht lüften und im Sommer 2 %, zeitweise weit geöffnet im Winter 31,4 % und im Sommer 43,5 %, gekippt ganze Stunde im Winter 5,6 % und im Sommer 29,3 %; In der Pause: im Winter eher zeitweise weit geöffnet (46,7 %) im Sommer weit geöffnet ganze Pause (53 %) Saisonale Unterschiede in der Dauer der Öffnung	Anzahl anwesender Personen: Median 23 (Winter) bzw. 24 (Sommer), Raumfläche: Median 68 m ² , Raumvolumen je Klassenzimmer: Median 222 m ³	-

	6 Müller	7 Bischof/Bebersdorf	8 Fromme	9 Lambert
Zusammenfassung/ Schlussfolgerungen	<ul style="list-style-type: none"> - Fensterlüftung allein reicht in der Heizperiode nicht aus um gesundheitlich zuträgliche Atemluft in Klassenräumen ($\text{CO}_2 \leq 1000$ ppm) sicherzustellen. CO_2-Konzentrationen weit über 2000 ppm - Mit maschineller Lüftung kann die CO_2-Konzentration im Bereich von 1000 ppm gehalten werden. 	<p>Wichtige Einflussfaktoren auf die CO_2-Konzentrationsentwicklung: Raumvolumen, Raumbelegung, Unterrichtsstunde, Dichtheitsgrad der Fenster und Fensteranzahl</p> <p>Signifikante Zusammenhänge der Temperatur mit Schüleranzahl, Form einer Temperaturerhöhung bei größerer Schüleranzahl,..</p> <p>Signifikante Zusammenhänge der relative Luftfeuchtigkeit mit Raumgröße, Fensteranzahl,..</p> <ul style="list-style-type: none"> - ausreichende Lüftung vor und nach den Unterrichtsstunden, Pausenlüftung, zur Stundenmitte ebenfalls lüften - immer Stoßlüftung anzustreben, wenn möglich Querlüftung. - Lüftungsprotokolle und Lüftungsdienste 	<p>Hohe Personenbelegung in Kombination mit kleiner Raumgröße bzw. Raumvolumen führt signifikant zur Verschlechterung der Luftqualität (Anstieg von CO_2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - geforderter Außenluftvolumenstrom von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Schüler aus der DIN 1946-2 eher zu hoch angesetzt - gute Raumluftqualität erreichbar bei Außenluftvolumenstrom von $17 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Schüler in Kombination mit Pausenlüftung über Fenster - dadurch kleiner dimensionierte Lüftungsgeräte mit germinerem Stromverbrauch und Vermeidung von zu trockener Raumluft im Winter

Tabelle B. 3: Zusammenstellung der Randbedingungen für die nicht betrachteten Studien nach [HartmannA]

	10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
Schultyp	Testraum	4 Kindergärten, 3 Volksschulen, 6 Hauptschulen, 1 Landeslandwirtschaftsschule, 1 Bundesgymnasium / Bundesrealgymnasium, 1 Wirtschaftsschule (Österreich) (Neubau und Sanierung)	6 Schulen (Schweiz) (1995 bis 2004)	A: 1 Gesamtschule B: 1 Gymnasium	2 Grundschulen, 3 Gymnasien, 1 Schulzentrum, 1 Gesamtschule	7 Ganztagsvolksschulen, 2 Schulen mit ganztägiger Betreuung (Grundschulalter) (Österreich)
Anzahl	24 Personenlastsimulatoren (für interne Wärmelasten und Kohlendioxidemittierung)	16 Schulen	6 Schulen, 6 Klassenräume mit Fensterlüftung, 5 Klassenräume mit ventilatorgestützter Lüftung	2 Schulen A: 5 Klassenräume B: 4 Klassenräume	7 Schulen, 58 Messtage (2 Schultage/Raum über den Zeitraum von ca. 8 Tagen/Schule)	9 Schulen (18 Klassen, 596 Schüler) (436 Schüler mit auswertbaren Fragebögen)
Lüftungssystem	Fensterlüftung	Ventilatorgestützte Lüftung	3 Fensterlüftung, 3 ventilatorgestützte Lüftung	Fensterlüftung	Fensterlüftung	Fensterlüftung
Messzeitraum	Nicht spezifiziert, Sommer und Winter	Heizperiode 2006/2007	Heizperiode	A: Mai 2006 bis Juni 2007 B: Juli 2006 und Januar 2007 (je eine Woche)	Nicht spezifiziert (22 im Sommer und 36 im Winter)	2006: Oktober, November 2007: Februar, März, April September

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
Intervention		5 Fensterachsen mit Kippflügel und Schwingflügel, unterschiedliche Öffnungskonstellationen werden untersucht, Eignung für Automatisierung der Fensterlüftung?	Keine	keine	keine	Erste Unterrichtsstunden keine, in den letzten beiden Unterrichtsstunden geschlossene Fenster und Türen mit zügigem Verlassen des Raumes nach Unterrichtsende	Lüftungsanweisung: - Vor dem Verschließen der Räume gut und ausgiebig lüften. - Räume mindestens 5 Stunden vor der Messung gut verschließen. - Fenster sollen nicht geöffnet oder gekippt und Türen nach dem Betreten stets wieder geschlossen werden. - Die Raumtemperatur sollte zwischen 20 und 23 °C betragen. - Sollte die Temperatur zu hoch steigen, nicht lüften! - Vor der Messung nicht rauchen, keine lösungsmittelhaltigen Produkte verwenden und keine Kleidung aus Chemisch-Reinigungsbetrieben im zu untersuchenden Raum lagern.
Messmethode	CO₂	Atemhöhe und unter der Decke	Den ganzen Morgen	Alle 2 min, Bereich des Lehrertisches	A:1,7 m und 2 m B:1,7 m	Nicht spezifiziert	Zweimal je eine Woche, kontinuierliche Datenerfassung mit CO ₂ -Ampel
	Relative Feuchte	-	Den ganzen Morgen	Alle 2 min	-	Nicht spezifiziert	Zweimal je eine Woche

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
	Temperatur	Lufttemperatur in einer Höhe von 0,1; 0,6 und 1,1 m (sowie in 1,7 m und 3,2 m in der Raummitte)	Den ganzen Morgen	Alle 2 min	A: Raumlufttemperatur in 1,7 m und 2 m B: Raumlufttemperatur in 0,1 m; 0,6 m; 1,1 m und 1,7 m	Raumtemperatur	Zweimal je eine Woche
	VOCs	-	Adsorptionshöhe zwischen $H_{\min} = 1,2$ m und $H_{\max} = 1,5$ m	Feinstaubkonzentration und Gesamtkeimzahl	-	-	252 Parameter bzw. Schadstoffe in Luft, Fein- und Hausstaub
	Außenbedingungen	An der Fassade	-	Partikelerfassung von $d > 0,75 \mu\text{m}$ und $d > 2,0 \mu\text{m}$, Gesamtkeimzahl	A:FH Osnabrück B:IBP Holzkirchen	Windgeschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchtigkeit	-
	Fragebögen, Protokolle, Tests	Strömungsgeschwindigkeit	Akzeptanz	Raumnutzung, Personenbelegung, Fensterlüftung und spezielle Raumnutzungen während der Messung	Schüleranzahl, Fensteröffnungsverhalten, Benutzung des Sonnenschutzes A: Erfassung der Fensterstellung über Fensterkontakte (jede Minute)	Personenanzahl, mittleres Schüleralter	Lungenfunktionstest, Messung der kognitiven Funktion (SPM), Elternfragebogen (Gesundheitliche Beschwerden und Krankheiten des Kindes bzw. in der Familie, Lebensstil, Ernährung, Haushalt, Wohnung und Freizeit) Lüftungsprotokoll mit (Zeitangaben Unterricht und Pause, Personenbelegung, Fensteranzahl (geschlossen, gekippt, ganz geöffnet)

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
Ergebnisse	CO ₂	Beste Bedingungen durch Lüftung mit zwei Kippflügeln übereinander	$c_{CO_2,min} = 1000 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,max} = 2990 \text{ ppm}$	Fensterlüftung: Klassen mit 20 bis 27 Schülern meist $c_{CO_2} > 1900 \text{ ppm}$, $c_{CO_2,max} > 3000 \text{ ppm}$ Klassen mit 12 bis 15 Schülern befriedigende Raumlufqualität $c_{CO_2} \approx 1000 \text{ ppm}$, $c_{CO_2,max} > 1500 \text{ ppm}$ Ventilatorgestützte Lüftung: hauptsächlich gute Raumlufqualität $c_{CO_2} \approx 1000 \text{ ppm}$, $c_{CO_2,max} \approx 1500 \text{ ppm}$, in einigen Klassenräumen sogar ausgezeichnete Raumlufqualität $c_{CO_2} < 800 \text{ ppm}$	A: Winter: $c_{CO_2,median} = 1200 \text{ bis } 1560 \text{ ppm}$ Sommer: $c_{CO_2,median} < 1000 \text{ ppm}$ B: Winter: in 69 bis 91 % der Zeit $c_{CO_2} > 1000 \text{ ppm}$, in 28 bis 68 % der Zeit $c_{CO_2} > 1500 \text{ ppm}$ Sommer: in 1 bis 17 % der Zeit $c_{CO_2} > 1000 \text{ ppm}$, in 0 bis 3 % der Zeit $c_{CO_2} > 1500 \text{ ppm}$	Winter: 89 % der Werte $c_{CO_2} > 1500 \text{ ppm}$ Sommer: 32 % der Werte $c_{CO_2} > 1500 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,m} = 1316 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,m,So} = 766 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,m,Wi} = 1652 \text{ ppm}$	$c_{CO_2,min} = 300 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,max} = 3700 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,min,m} = 500 \text{ ppm}$ $c_{CO_2,max,m} = 1400 \text{ ppm}$
	Relative Feuchte	-	$\varphi_{min} = 20\%$ $\varphi_{max} = 63\%$	$\varphi_{min,Fenster} = 15\%$ $\varphi_{max,Fenster} = 45\%$ $\varphi_{min,LA} = 10\%$ $\varphi_{max,LA} = 30\%$	-	$\varphi_m = 50,7 \%$ $\varphi_{m,So} = 54,3 \%$ $\varphi_{m,Wi} = 48,5 \%$	-

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
Temperatur		Bei Außenlufttemperaturen ab etwa 5 °C bis 10 °C wird durch die hohen internen Lasten keine Heizung benötigt um behagliche Temperaturen zu erreichen (Voraussetzung richtige Öffnungsweite der Fenster und Dauer der Lüftung)	$\vartheta_{min} = 18^{\circ}C$ $\vartheta_{max} = 27,6^{\circ}C$	$\vartheta_{min,Fenster} = 20^{\circ}C$ $\vartheta_{max,Fenster} = 25^{\circ}C$ $\vartheta_{min,LA} = 21^{\circ}C$ $\vartheta_{max,LA} = 25^{\circ}C$	A: Winter: $\vartheta_{median} < 18,8^{\circ}C$, fast alle Schulstunden unter 20 °C Nachtabenkung bis auf 12 °C Sommer: $\vartheta_{median} = 23,1^{\circ}C$, B: Winter: 75 % der Werte liegen zwischen 19 bis 25 °C, 10 bis 48 % der Werte $\vartheta < 20^{\circ}C$, 0 bis 21 % der Werte $\vartheta < 19^{\circ}C$, Sommer: in 40 bis 86 % der Zeit $\vartheta > 26^{\circ}C$, 66 % der Werte $\vartheta > 27^{\circ}C$, 50 % der Werte $\vartheta > 28^{\circ}C$ (Süd-West-Orientierung), 9 % der Werte $\vartheta > 27^{\circ}C$ (Nord-West-Orientierung)	$\vartheta_m = 21,7^{\circ}C$ $\vartheta_{m,So} = 22,9^{\circ}C$ $\vartheta_{m,Wi} = 20,9^{\circ}C$	-

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
	VOCs	-	VOC _{mean} = 170 µg/m ³ VOC _{median} = 65 µg/m ³ VOC _{min} = 40 µg/m ³ VOC _{max} = 560 µg/m ³	Partikel > 2,0 µm werden zu etwa 90 bis 100 % zurückgehalten Partikel > 0,75 µm werden zu 31 bis 67 % zurückgehalten	-	-	Nahezu alle Komponentenkonzentrationen liegen über der Nachweisgrenze, aber selten über den Richtwerten, PM10/PM2,5 liegen unter den europäischen Tagesmittelwertgrenzen, aber meist über den Außenbedingungen Korrelation zwischen einzelnen Schadstoffen und Lungenfunktion

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
	Außenbedin- gungen	Winter: $\vartheta_{min,e} = -6^{\circ}C$ $\vartheta_{max,e} = 4^{\circ}C$ $v_{min} = 0m/s$ $v_{max} = 4m/s$ $I_{sol,min} = 0W/m^2$ $I_{sol,max} = \frac{200W}{m^2}$ Sommer (am häufigsten): $\vartheta_{min,e} = 15^{\circ}C$ (24°C) $\vartheta_{max,e} = 31^{\circ}C$ (28°C) $v_{min} = 0m/s$ (0m/s) $v_{max} = 6m/s$ (4m/s) $I_{sol,min} = 200W/m^2$ (500 W/m ²) $I_{sol,max} = 800W/m^2$ (700 W/m ²) Nachtlüftung (am häufigsten): $\vartheta_{min,e} = 10^{\circ}C$ (12 °C) $\vartheta_{max,e} = 22^{\circ}C$ (18 °C) $v_{min} = 0m/s$ (0 m/s) $v_{max} = 4m/s$ (2 m/s) $I_{sol} < 200W/m^2$	-	$\vartheta_{min,e} = -9^{\circ}C$ $\vartheta_{max,e} = 9^{\circ}C$ $\varphi_{min,e} = 50\%$ $\varphi_{max,e} = 80\%$	B: Winter: $\vartheta_{m,e} = 7,8^{\circ}C$ Sommer: $\vartheta_{min,e} = 7,7^{\circ}C$ $\vartheta_{max,e} = 32,8^{\circ}C$ $\vartheta_{m,e} = 21,1^{\circ}C$	-	-

		10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
	Fragebögen, Protokolle, Tests		<p>LehrerInnen: Zufriedenheitsmarke: bei 42 % bei Anlageninstallation und 56 % bei Befragung; Zuverlässigkeit: 58 % für Anlage sehr oder eher zuverlässig; Bedienerfreundlichkeit: 50 % bei gut oder eher gut; Probleme der Lüftungsanlage: 50 % bei Überhitzung, 44 % bei Luftqualität, 34 % bei zu geringe Wärmeversorgung, 24 % bei Geruchsbelästigung, 21 % bei Zugluft; Problembehebung: 63 % bei Probleme konnten ganz oder zumindest teilweise behoben werden</p> <p>Lüften in der kalten Jahreszeit: in knapp mehr als der Hälfte der Schulen Lüftung über geöffnete Fenster in den Pausen oder im Unterricht trotz Lüftungsanlage Ca. 40 % dieser geöffneten Fenster sind ganz geöffnet, ca. 45 % gemischt (ganz geöffnet und gekippt) und ca. 15 % nur gekippt (Schätzungen).</p>	-	<p>A: 65 % aller Schulstunden Fenster während der gesamten Schulstunde geschlossen, höchste Median der Fensteröffnungszeit mit 0,25</p>		<p>Abnahme der kognitiven Leistungsfähigkeit durch TCEP</p>

	10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
			<p>SchülerInnen: auftretende Probleme: schlechte Luft 52,2 %, zu warm in der Klasse 41,5 %, stinkt in der Klasse 34,3 %, zu kalt in der Klasse 31,6 %, Lärm in der Klasse 31,6 %, es zieht in der Klasse 29,1 %, Schimmel in der Klasse 6,4 %</p> <p>Lüften in der kalten Jahreszeit: in fast 60 % der Schulen wird zusätzlich zur Lüftungsanlage in den Pausen gelüftet, in fast 50 % der Schulen auch während der Unterrichtsstunden. > 50 % die Fenster ganz geöffnet, zu ca. 40 % teils geöffnet und teils gekippt und fast nie nur gekippt.</p>			

	10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
Zusammenfassung/ Schlussfolgerungen	<ul style="list-style-type: none"> - mit Stoßlüftung am morgen wird eine geringere Kühlung im Raum erreicht. - Automatisierung einer Fensterlüftung über eine Regelung für zwei Raumparameter (Luftqualität und Temperatur unter Einbeziehung der Witterung als Störgröße) - ständiges Öffnung und Schließen der Fenster wegen Geräuschbelästigung vermeiden - Kippflügel für die Automatisierung - Möglichkeit der Übersteuerung durch den Nutzer ist - Fensteröffnungs-dauer im Winter deutlich reduziert 	<ul style="list-style-type: none"> - nicht mehr zeitgemäß sind Schulneubauten bzw. Schulsanierungen ohne mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung - Mit Fensterlüftung keine ausreichende Luftqualität erreichbar - schlechte Anlagenqualität durch sehr geringe Erfahrungen der PlanerInnen und unzureichende Vorgaben der AuftraggeberInnen - zufriedenstellende Klassenzimmerlüftung ohne großen Aufwand und mit moderaten Kosten möglich - Ausarbeitung von 61 Qualitätskriterien für Klassenzimmerlüftungen zur Verbesserung der Anlagenqualität - Ausarbeitung Planungsleitfaden mit allen erforderlichen Informationen und konzeptionelle Überlegungen einer qualitätsorientierten Planung 	<p>Fensterlüftung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - bei dichten Gebäuden und stark belegten Räumen reicht regelmäßige Pausenlüftung nicht aus für eine befriedigende Raumluftqualität (>2000ppm über längeren Zeitraum) - Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität: Vergrößerung der öffnbaren Fensterfläche (Drehfenster), Gegenlüften statt einseitigem Lüften, Lüften während des Unterrichts. <p>Ventilatorgestützte Lüftung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Raumluftqualität besser als bei Fensterlüftung - Vorgaben für zulässige CO₂-Konzentrationen lassen sich gut einhalten - bei hoher Raumbelegung und knapp bemessenem Zuluftvolumenstrom sollte zusätzlich in der Pause über Fenster gelüftet werden - bei korrekter Zuluftvolumenstrombemessung kann die Fensterlüftung 	<ul style="list-style-type: none"> - Empfehlung zur Installation von Lüftungsampeln und Lernpaket A: - signifikant schwache bis moderate Korrelation zwischen Fensteröffnungszeit und Innentemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> - Empfehlung Einführung Lüftungsdienst - Raumplanung unter Berücksichtigung von Personenbelegung und Schüleralter 	<ul style="list-style-type: none"> -- CO₂-Konzentrationen deutlich über Orientierungswerten - Empfehlung Schule Lüftungsregime überarbeiten: z. B. häufiger Lüften, Lüftungsampel installieren, Bewusstseinsbildung bei Lehrern/Lehrerinnen - Empfehlung Gemeinde Schulbehörde: Vorgabe Lüftungsregulativ - Empfehlung Bund/EU Verpflichtung von mechanischen Lüftungsanlagen in Schulen/ Klassenzimmern; Nachrüstung bestehender Schulen mit mechanischen Lüftungsanlagen

	10 Steiger	11 Gremi	12 Sigrist/Heinss	13 Hellwig	14 Grams	15 Tappler
			im Winter reduziert werden und die relative Luftfeuchtigkeit im Raum dadurch erhöht werden			

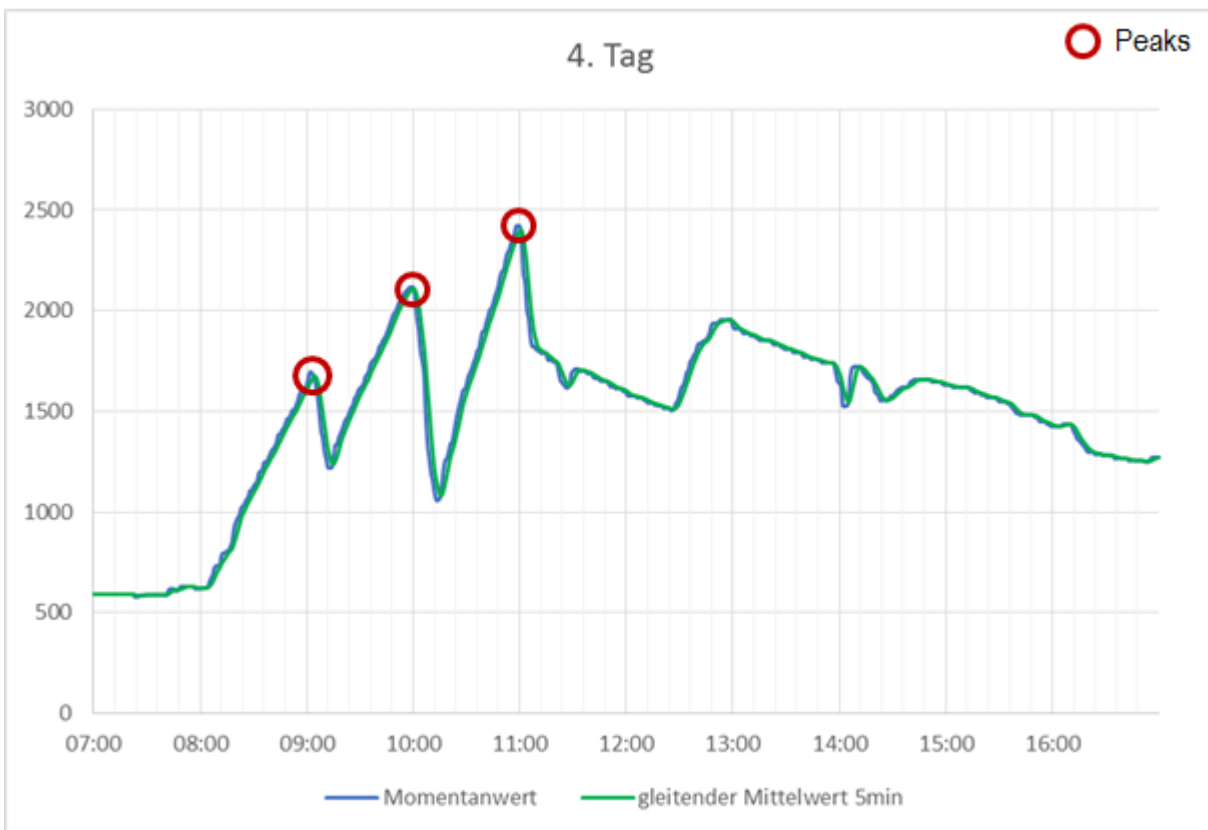
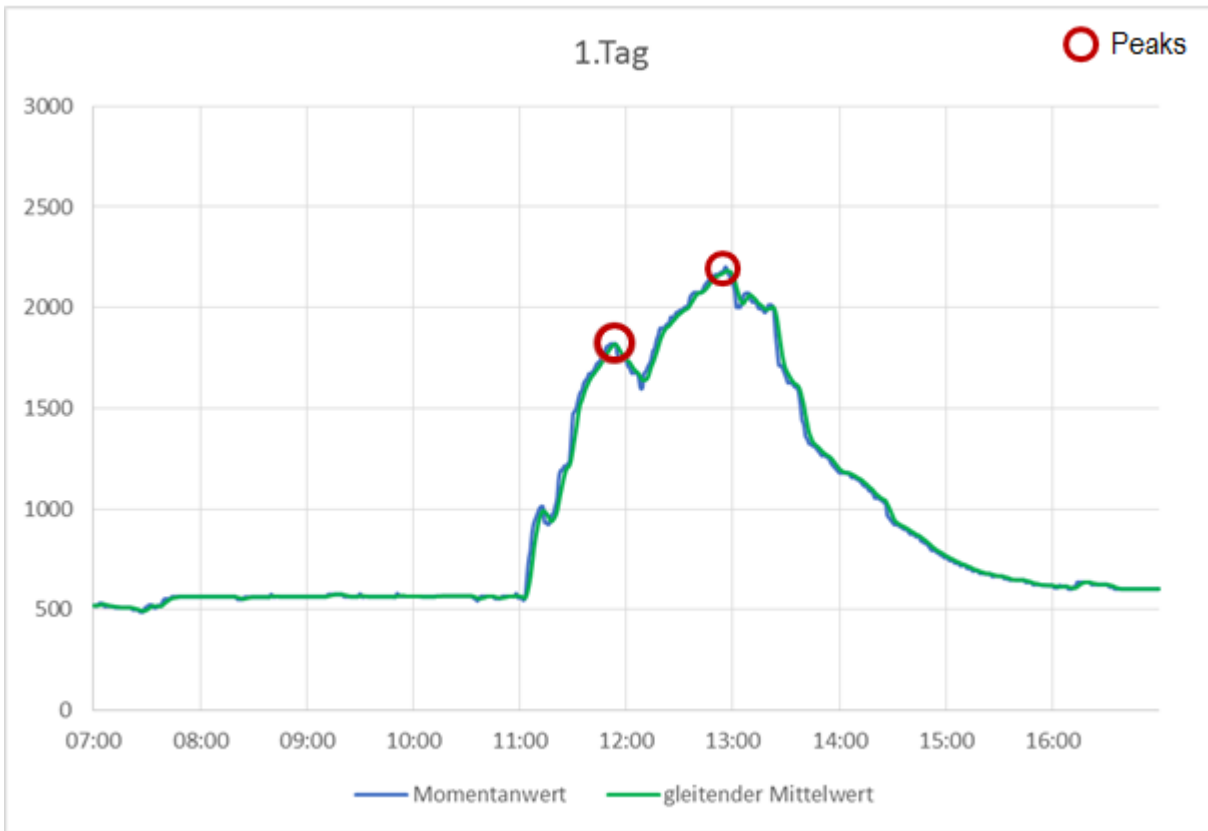
Eine Übersicht über die Ergebnisse bezüglich der CO₂-Messungen ist in Tabelle A. 1 enthalten. Diese Tabelle enthält nicht die Ergebnisse der im Forschungsprojekt selbst ausgewerteten Unterrichtseinheiten, sondern stellt die aus den Veröffentlichungen von den Autoren beschriebenen Ergebnisse dar. Je nach Verfügbarkeit sind in Abhängigkeit des Lüftungssystems die prozentuale Nutzungszeit für Über- und Unterschreitungen bestimmter CO₂-Werte sowie die maximal gemessene CO₂-Konzentration aufgetragen. Aus den bisher ausgewerteten Messdaten lässt sich klar ableiten, dass die maximalen CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen mit ventilatorgestützter Lüftung kleiner sind als in Klassenräumen mit Fensterlüftung. Außerdem sind die Zeiten der Überschreitung im Sommer kleiner als im Winter.

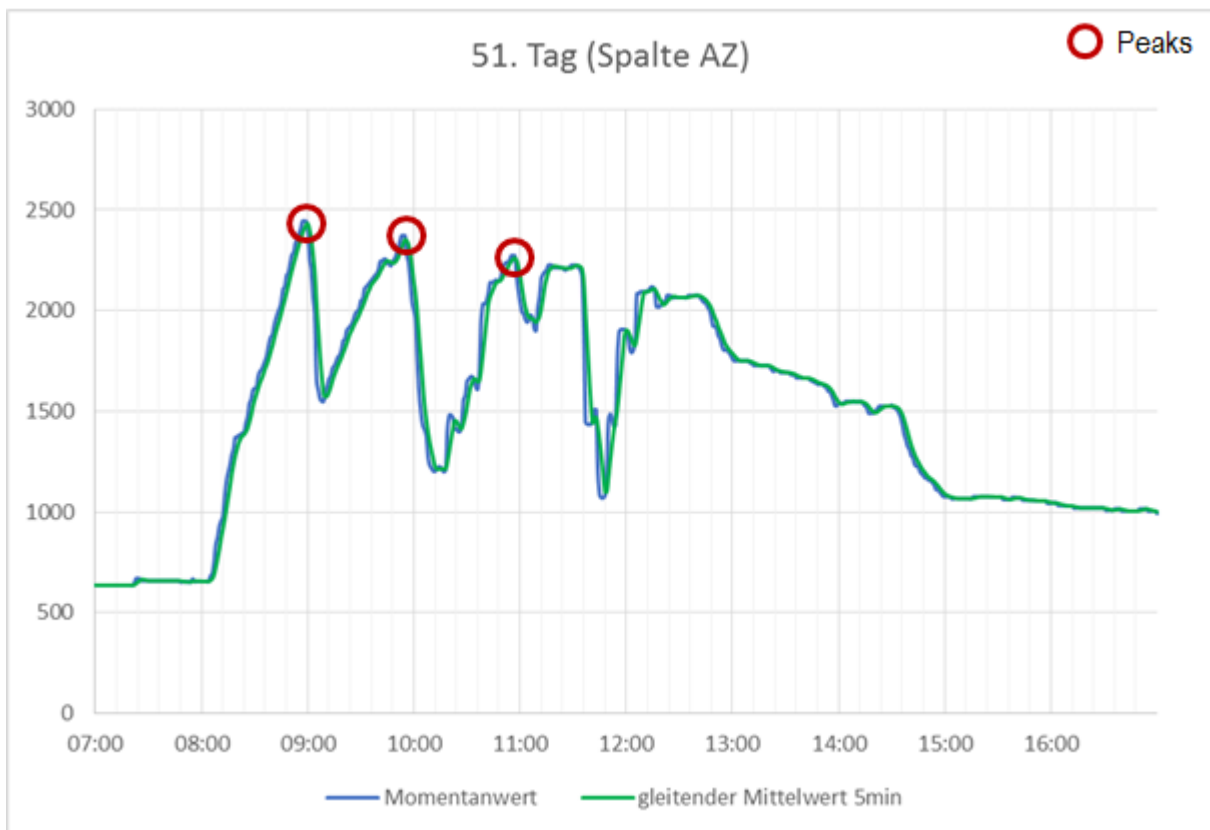
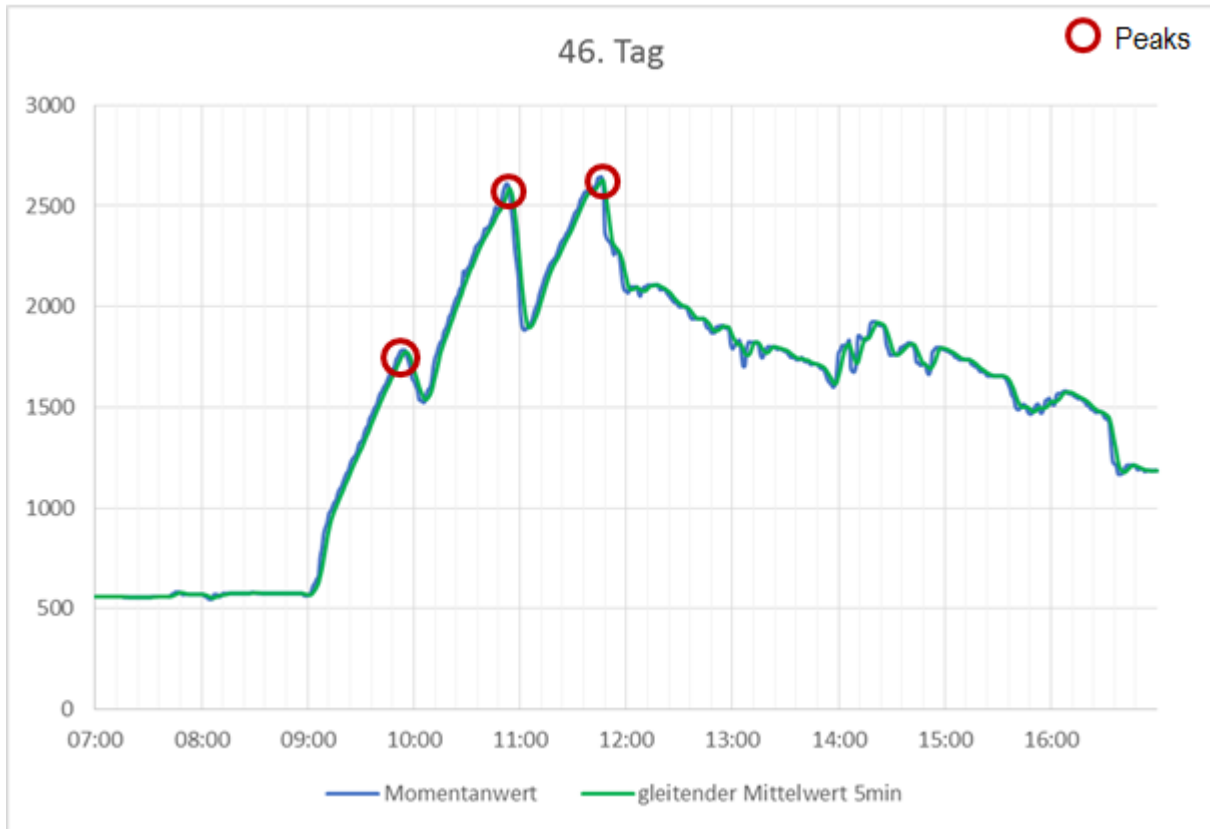
Tabelle A. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich CO₂ der ausgewählten Studien nach [HartmannA] (Autorenaussagen aus den Veröffentlichungen)

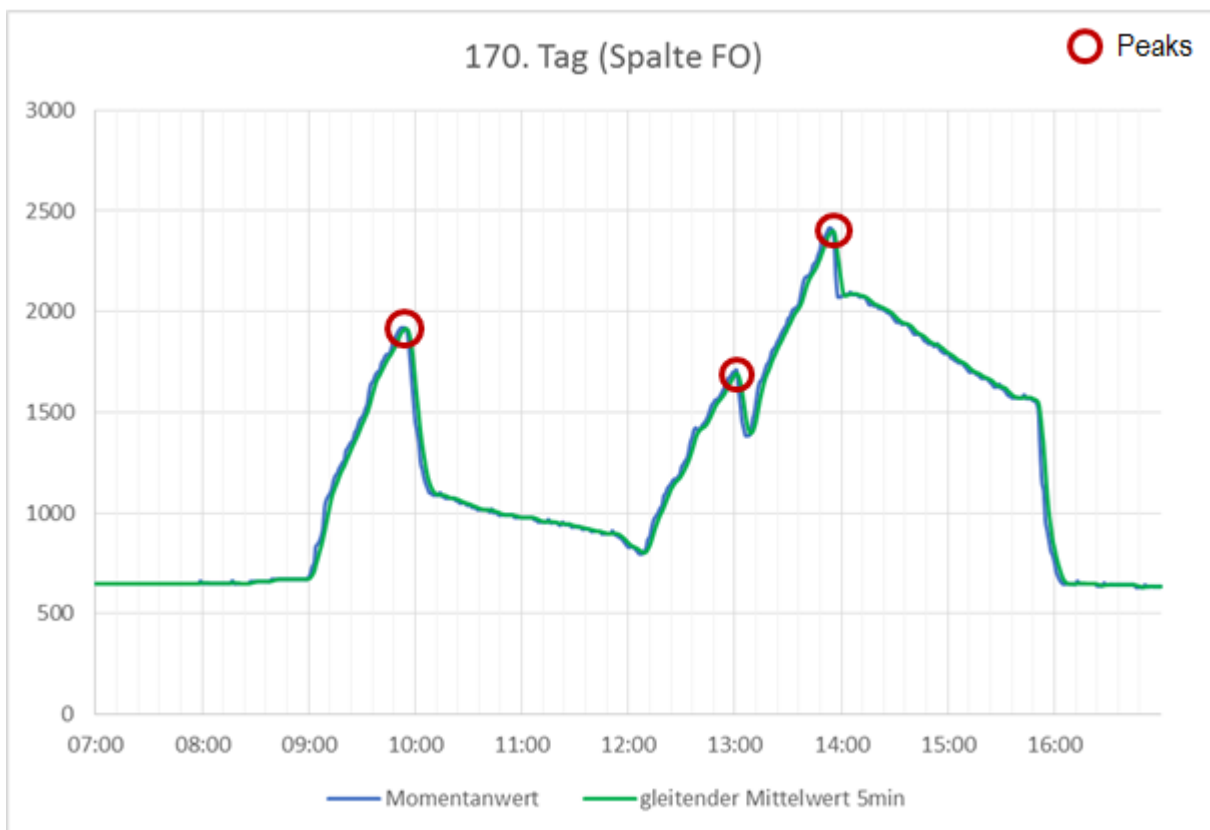
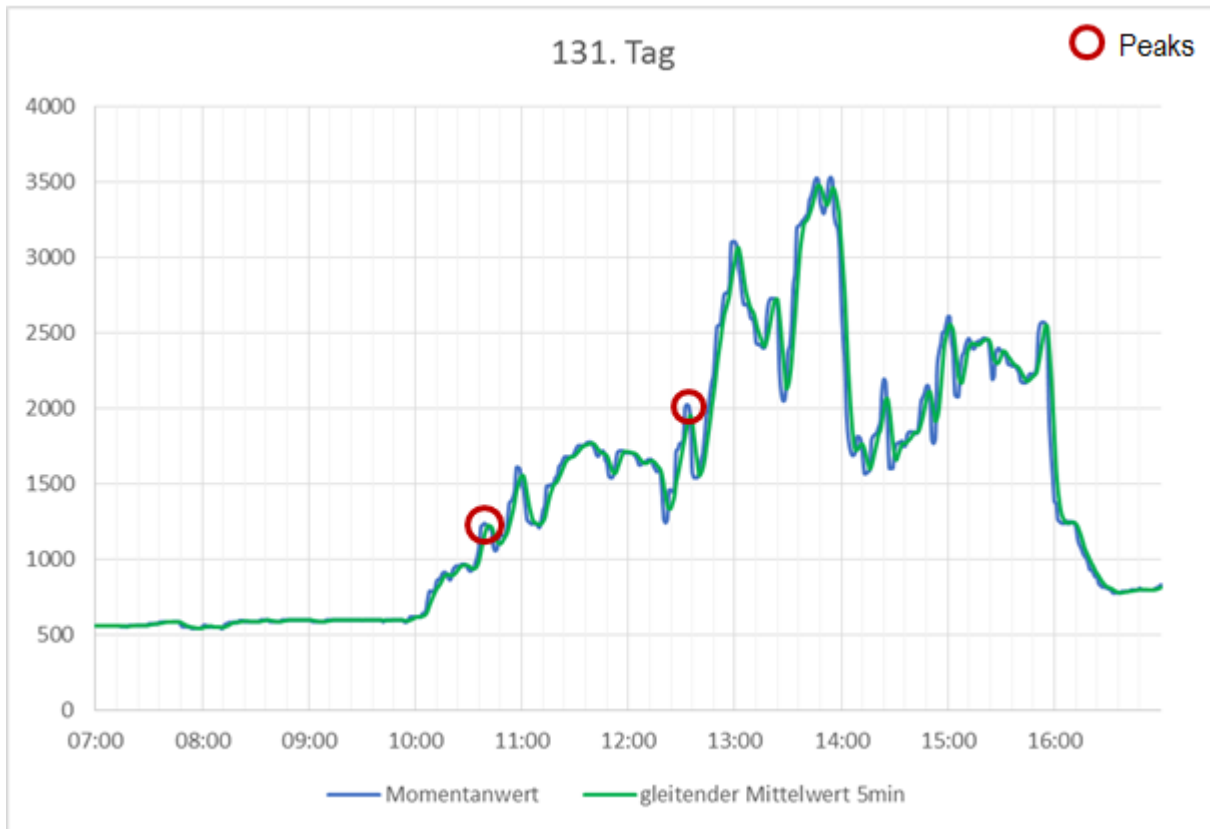
Lüftungssystem	CO ₂ -Konzentration					Max. Konzentration
	< 1000 ppm	> 1000 ppm	> 1500 ppm	> 2000 ppm	> 3000 ppm	
Fensterlüftung	<ul style="list-style-type: none"> • 9,2 % (Bebersdorf) 	<ul style="list-style-type: none"> • Selten im Sommer (Müller) • Winter 69-91 % (Hellwig) • Sommer 1-17 % (Hellwig) • 82 % (Lahrz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Winter 28-68 % (Hellwig) • Sommer 0-3 % (Hellwig) • Winter 89 % (Grams) • Sommer 32 % (Grams) • 300 h ≈ 20 % (Bolsius) • 30 % (Lahrz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Winter > 50 % (Müller) • 33 % (Bebersdorf) • Meist > 1900 ppm (20-27 SchülerInnen) (Heinss) • 7 % (Lahrz) 	<ul style="list-style-type: none"> • 4,8% (Bebersdorf) 	<ul style="list-style-type: none"> • 4496 ppm (Bebersdorf) • > 3000 ppm (20-27 SchülerInnen) (Heinss) • > 1500 ppm (12-15 SchülerInnen) (Heinss) • Kipplüftung in der Pause 5000 ppm (Lambertz) • Ohne Vorgabe 3200 ppm (Lambertz) • > 2500ppm (Bolsius) • 2730 ppm (Lahrz)
Hybride Lüftung			<ul style="list-style-type: none"> • 8 % (Dietz) • 30 % (Dietz) • 19 % (Dietz) 	<ul style="list-style-type: none"> • < 1% > 1900 ppm (Dietz) • 12 % > 1900 ppm (Dietz) • 8 % > 1900 ppm (Dietz) 		
Mechanische Lüftung		<ul style="list-style-type: none"> • In einigen Klassenzimmern < 800 ppm (Heinss) 	<ul style="list-style-type: none"> • 130 ≈ 9 % (Bolsius) • 0 % (Lahrz) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0 % (Bolsius) 		<ul style="list-style-type: none"> • Winter 1130 ppm (Müller) • 2990 ppm (Grenl) • ≈ 1500 ppm (Heinss) • +Stoßlüften in der Pause 1500 ppm (Lambertz) • +geschlossene Fenster 1400/2100 ppm (Lambertz) • Ohne Vorgabe 1200/2200 ppm (Lambertz) • 1600 ppm (Bolsius) • Winter 1169/1694 ppm (Wargocki) • Sommer 1194/1758 ppm (Wargocki) • 1490 ppm (Lahrz)
Nicht näher spezifiziert		<ul style="list-style-type: none"> • Winter 92 % (Fromme) • Sommer 28 % (Fromme) 	<ul style="list-style-type: none"> • Winter 60 % (Fromme) • Sommer 9 % (Fromme) 			<ul style="list-style-type: none"> • 3700 ppm (mittel 1400 ppm) (Tappler)

Anhang C: Beispielhafte Grafiken zur Bestimmung von Schulstunden

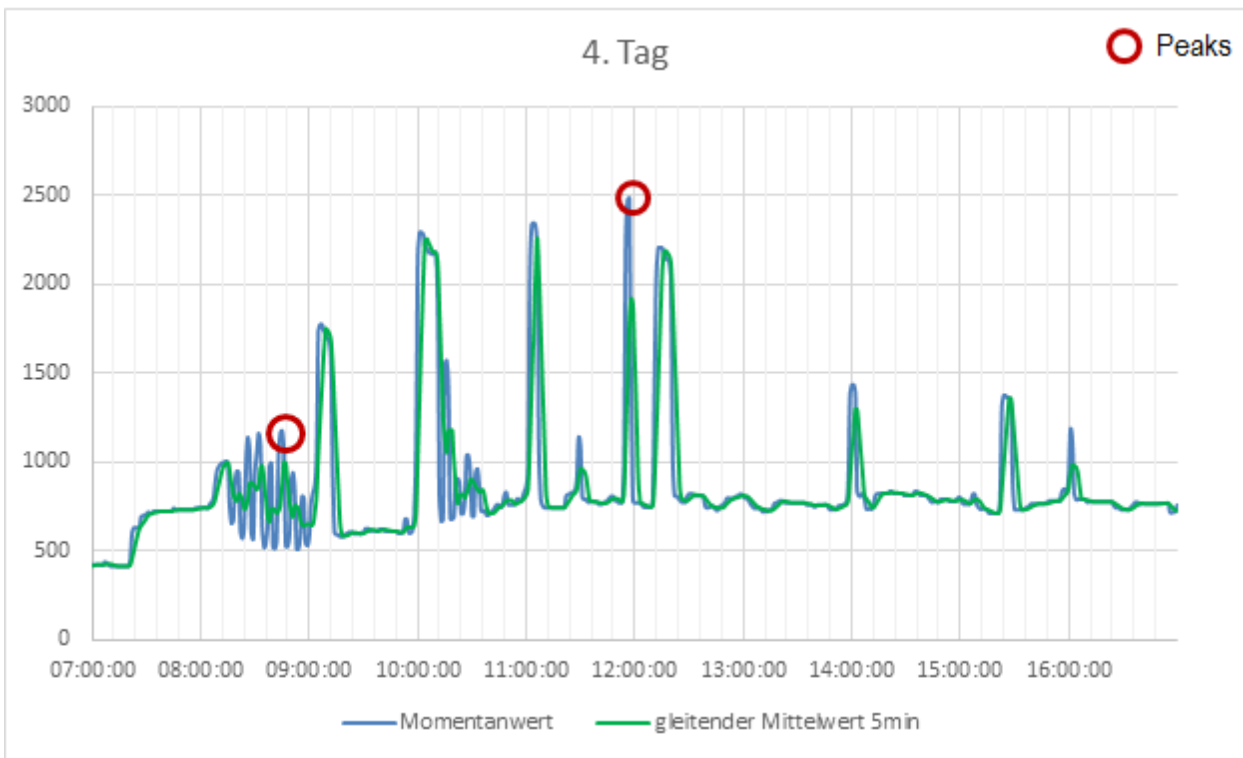
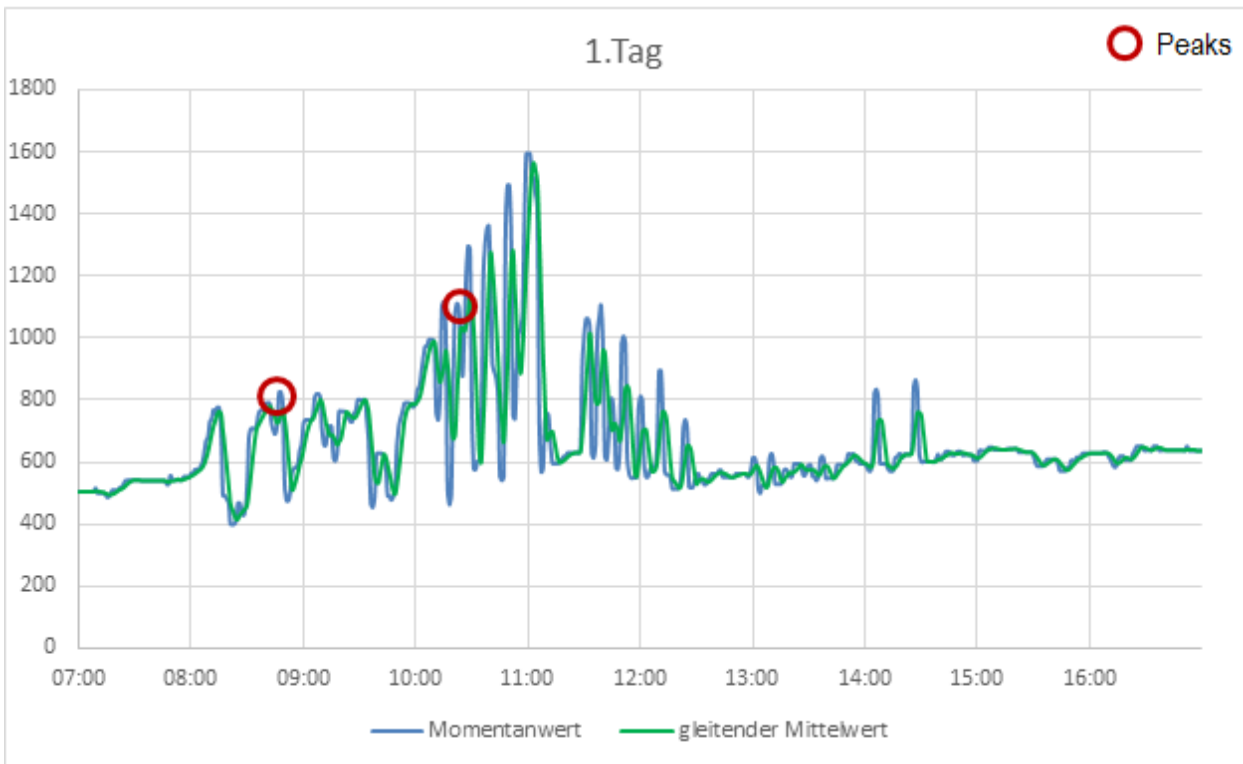
Weitere beispielhafte Tagesverläufe für Fensterlüftung mit den detektierten Peaks, die alle Kriterien erfüllen:

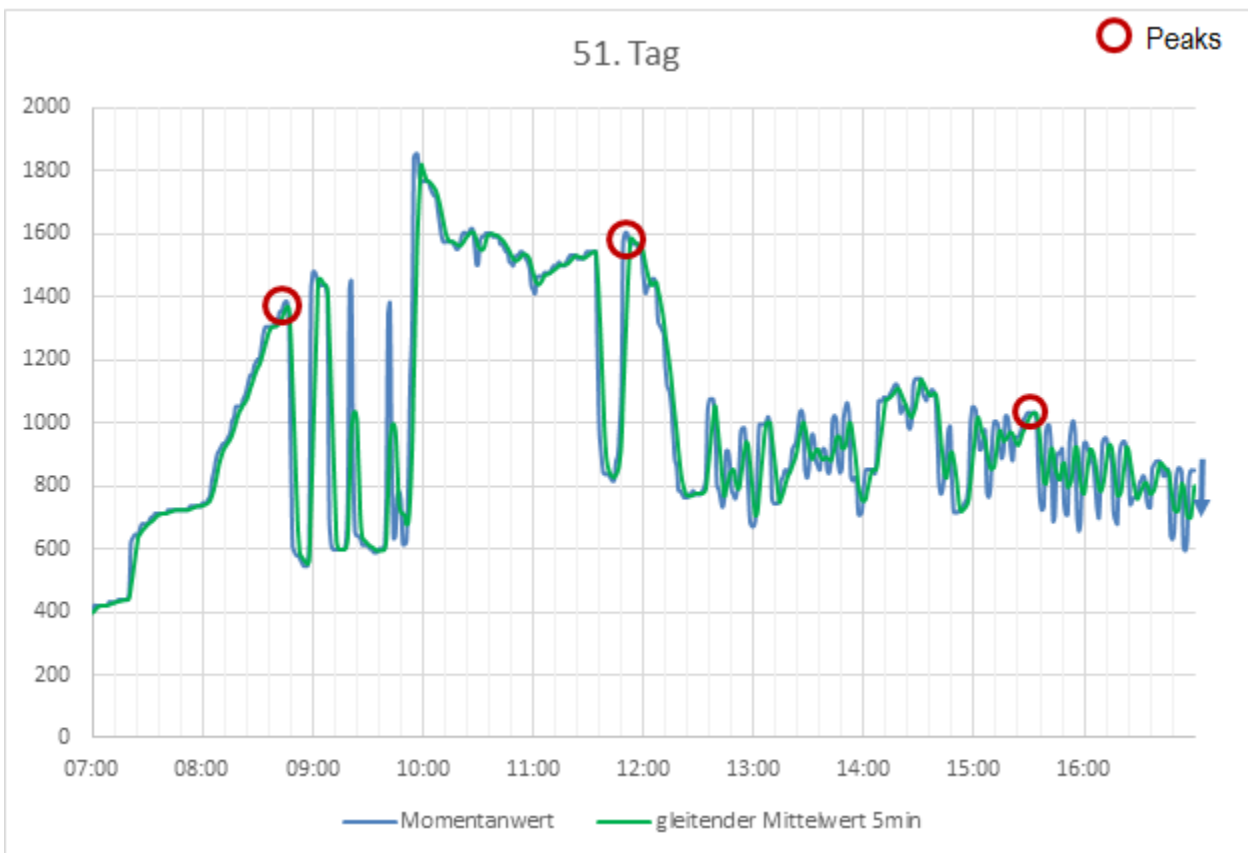


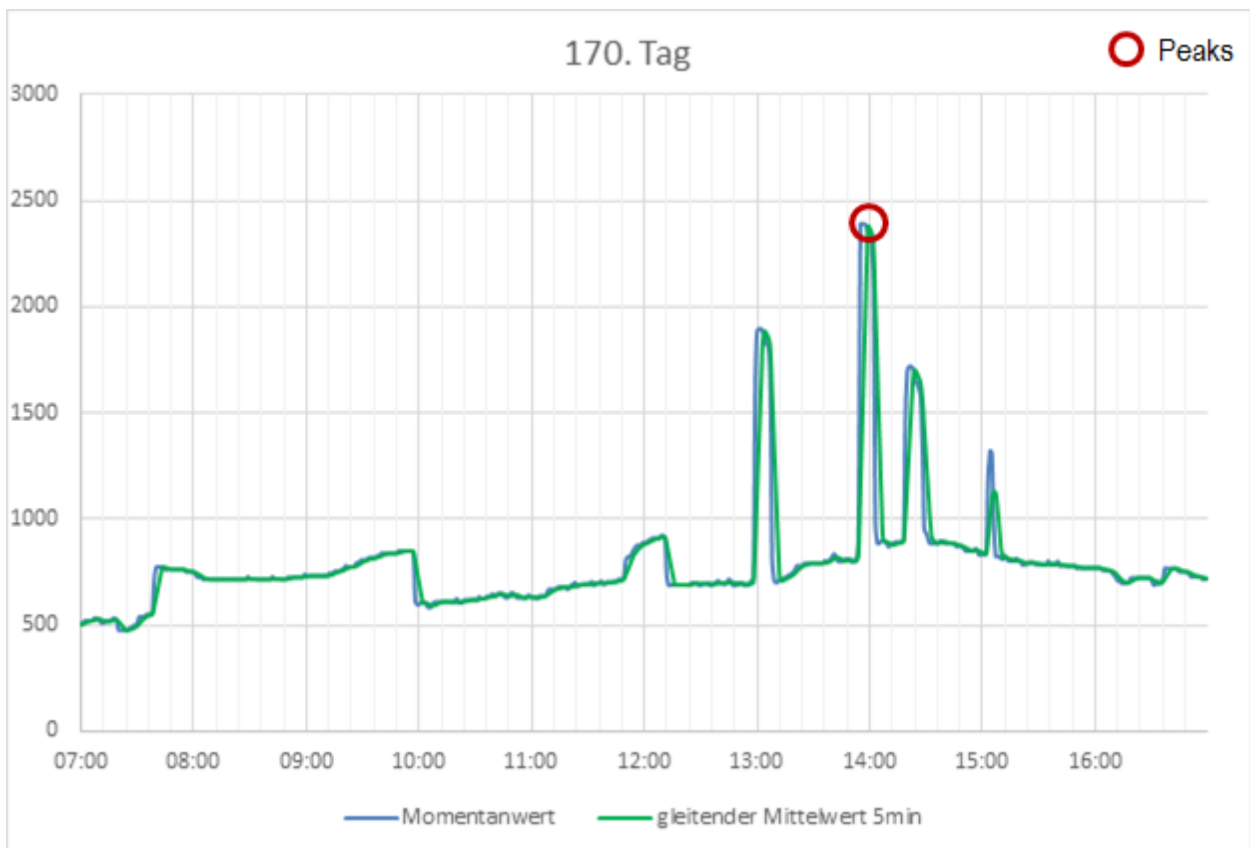
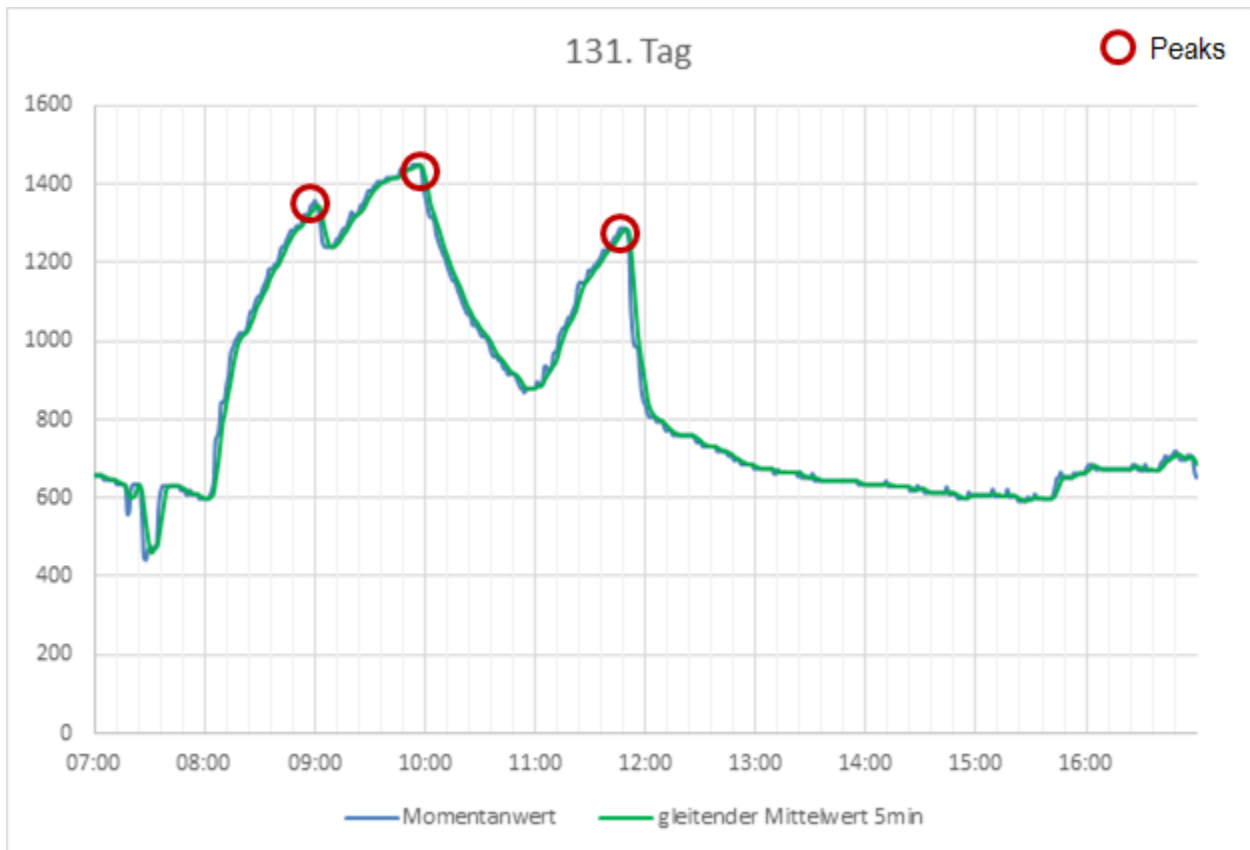




Beispielhafte Tagesverläufe für Zuluft-Fensterkasten mit Abluftanlage:







Anhang D: Darstellungen mit Carpet-Plots

Abbildung D.1 zeigt den Carpet-Plot beispielhaft des Kohlendioxidgehalts der Raumluft im Klassenzimmer mit Luftführung Zuluft-Kastenfenster / CO₂-geregelte Abluftanlage für den Monat Dezember 2014 der Studie „Bolsius“.

Abbildung D.2 zeigt den gemessenen Kohlendioxidverlauf über den gesamten Messzeitraum (15 Tage) und Abbildung D.3 für eine Schulwoche in einem Klassenraum der Käthe-Kollwitz-Schule [Lambertz] mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (30m³/h pro Person bzw. 600m³/h). Messwerte, die fehlen oder unterhalb von 400 ppm liegen sind im Carpet-Plot grau dargestellt.

Studien, die nur einen Tag oder eine Schulstunde näher betrachtet und gemessen haben, könnten mit der gleichen Herangehensweise ausgewertet werden, das heißt z.B. die Darstellung erfolgt im Carpet-Plot, wobei nur ein Tag bzw. eine Schulstunde mit Werten hinterlegt ist, siehe beispielhaft Abbildung D.4.

Für die Auswertung bzw. Darstellung von Carpet-Plots ist die Wahl der Bewertungsskala zu beachten. Je nach Wahl der Bewertungsskala können Situationen der Kohlendioxidkonzentrationen verharmlost bzw. überschätzt werden.

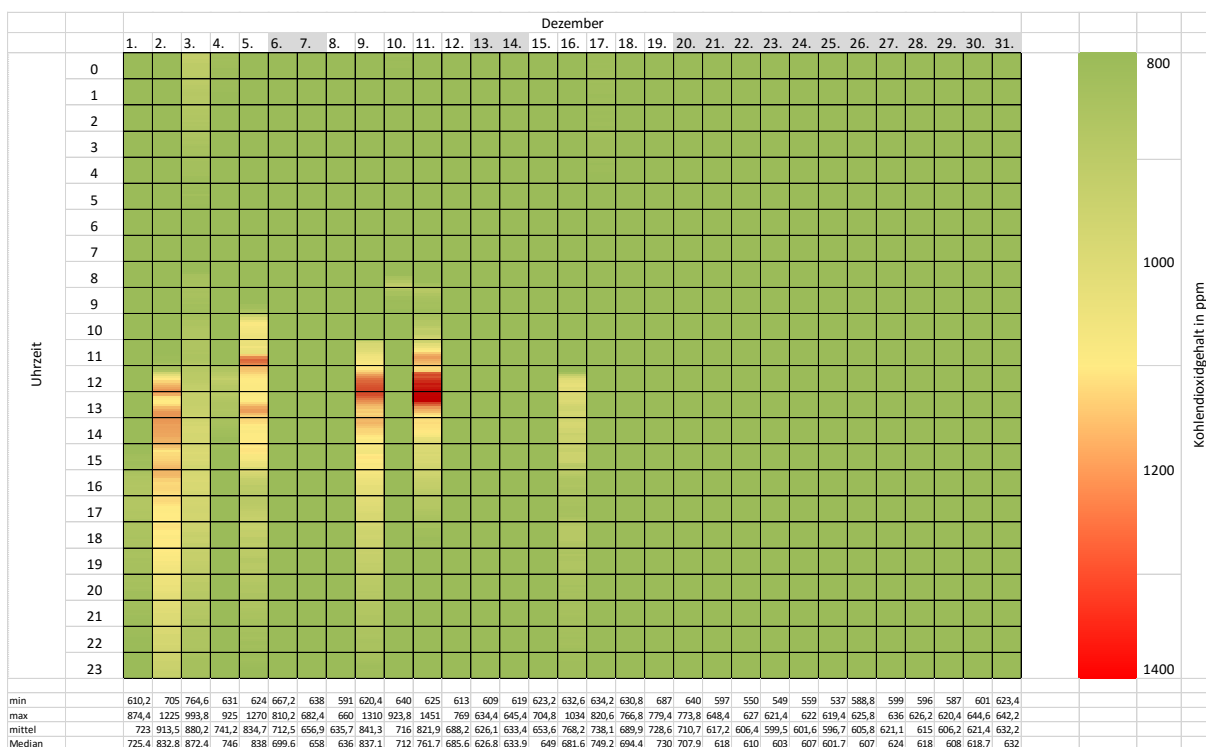


Abbildung D.1: Kohlendioxidgehalt der Raumluft im Klassenzimmer mit Luftführung Zuluft-Kastenfenster / CO₂-geregelte Abluft (Dezember 2014) (Datenquelle: [Bolsius])

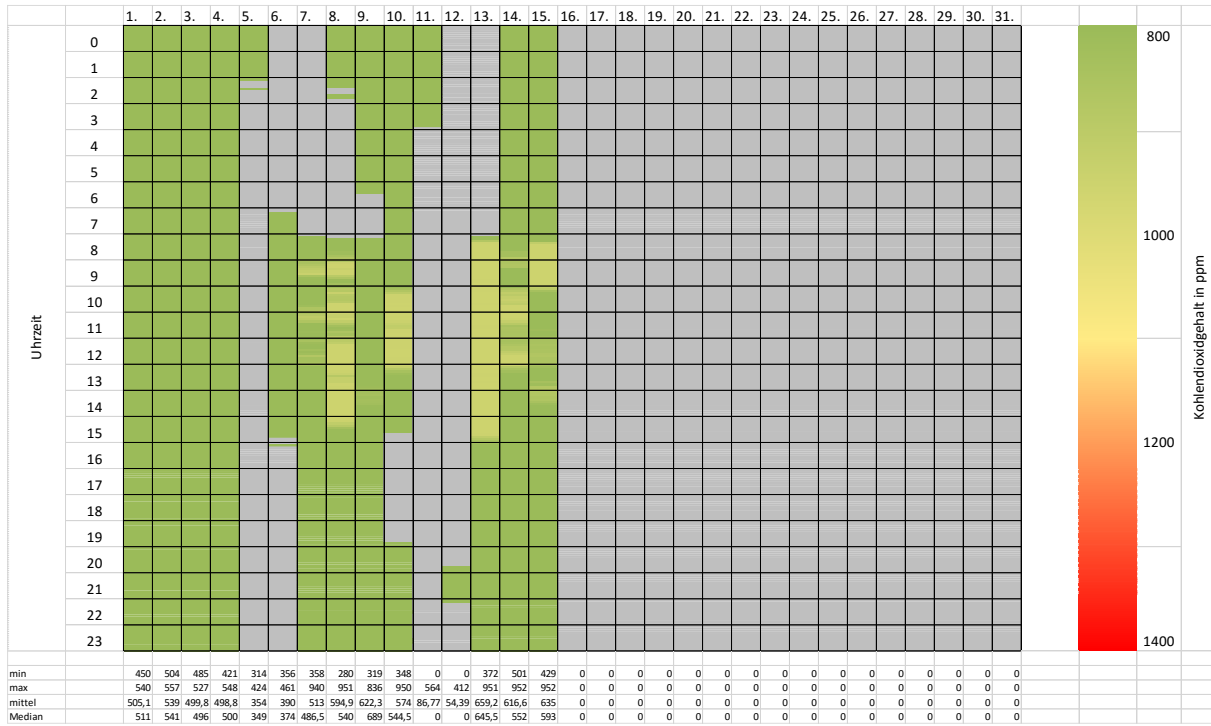


Abbildung D.2: Kohlendioxidgehalt der Raumluft im Klassenzimmer mit ventilatorgestützter Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (30m³/h pro Person bzw. 600m³/h) (Messzeitraum 15 Tage) (Datenquelle: [Lambertz])

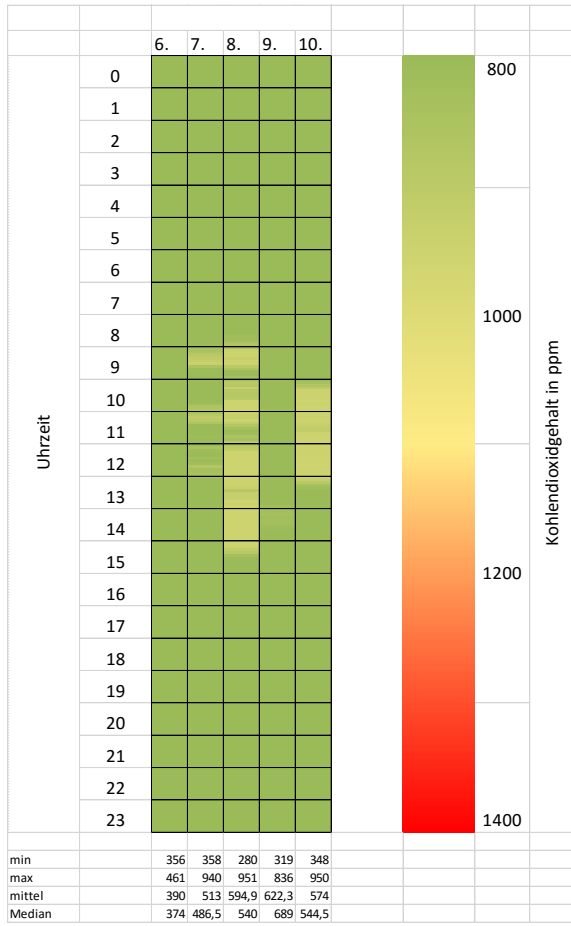


Abbildung D.3: Schulwoche - Ventilatorgestützte Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (30m³/h pro Person bzw. 600m³/h) (Datenquelle: [Lambertz])

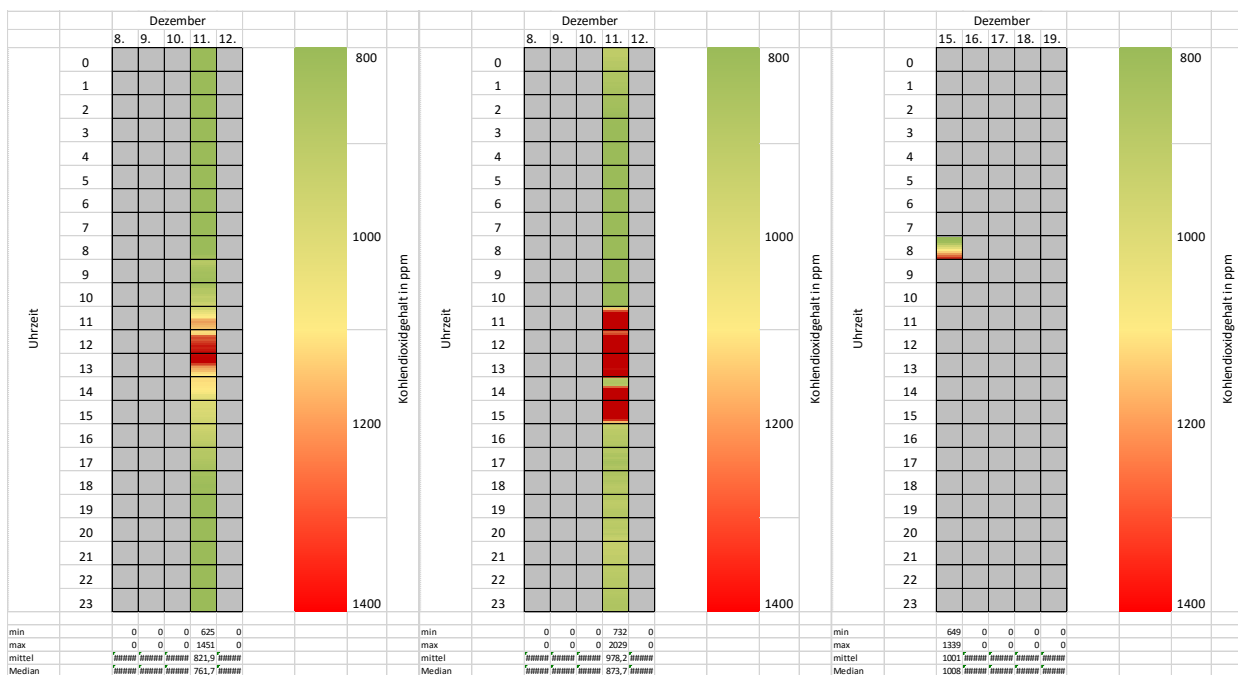


Abbildung D.4: Schultag - Abluftanlage mit Zuluft-Kastenfenster (links) und Fensterlüftung mit Zuluft-Kastenfenster (mittig); Schulstunde – Fensterlüftung mit Zuluft-Kastenfenster (rechts) (Datenquelle: : [Bolsius])

Anhang E: Detaillierte Ergebnisse

Studie „Birmili“

Abbildung E.1 und Abbildung E.2 zeigen ergänzend zu den Abbildungen in Abschnitt 5.3 die Boxplots der Mittel- und Maximalwerte in der Sommermessperiode.

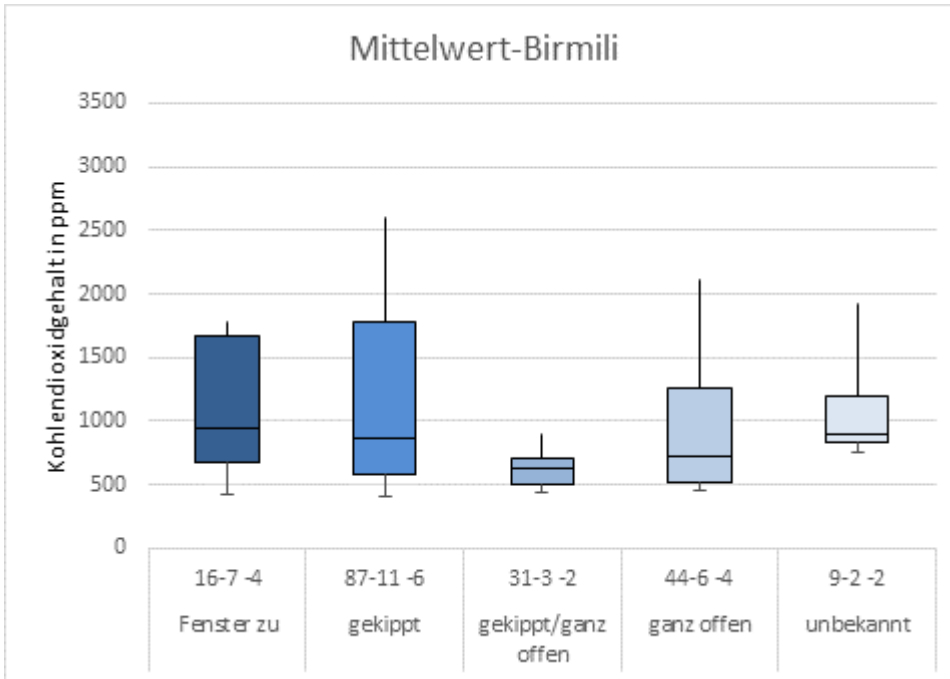


Abbildung E.1: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Birmili" in der Sommermessperiode

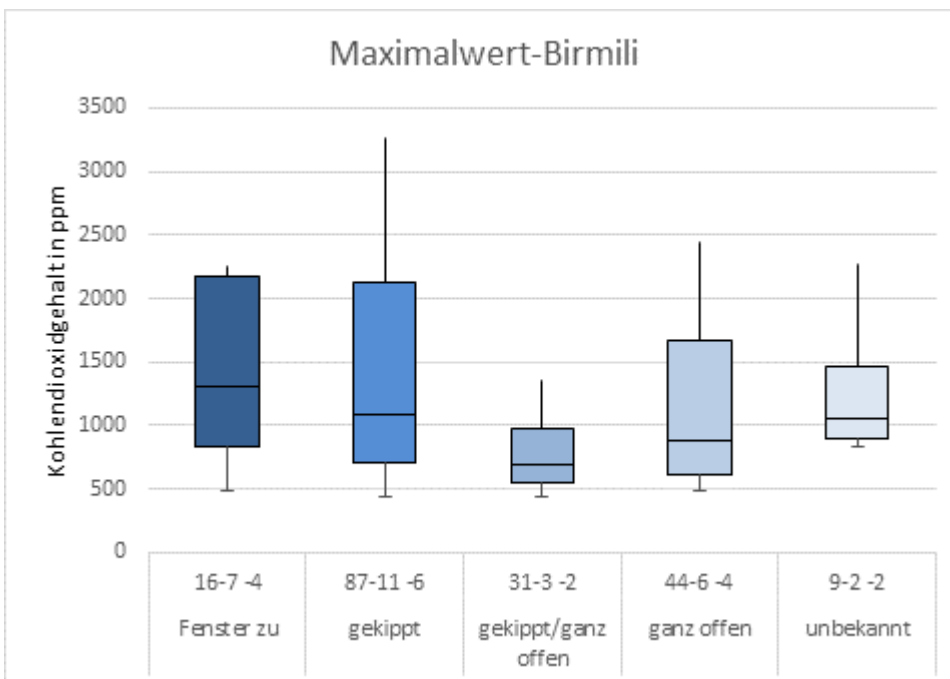


Abbildung E.2: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Birmili" in der Sommermessperiode

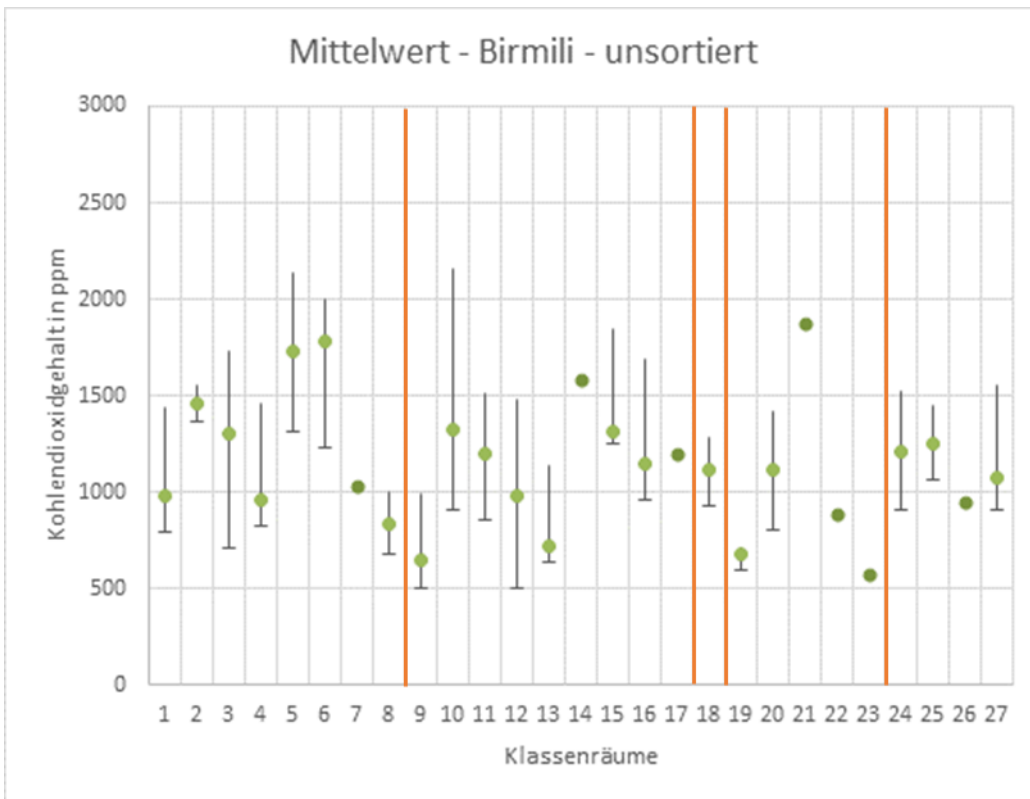


Abbildung E.3: Sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode (von links nach rechts: Fenster zu, Fenster gekippt, Fenster gekippt/ganz offen, Fenster ganz offen, unbekannt)

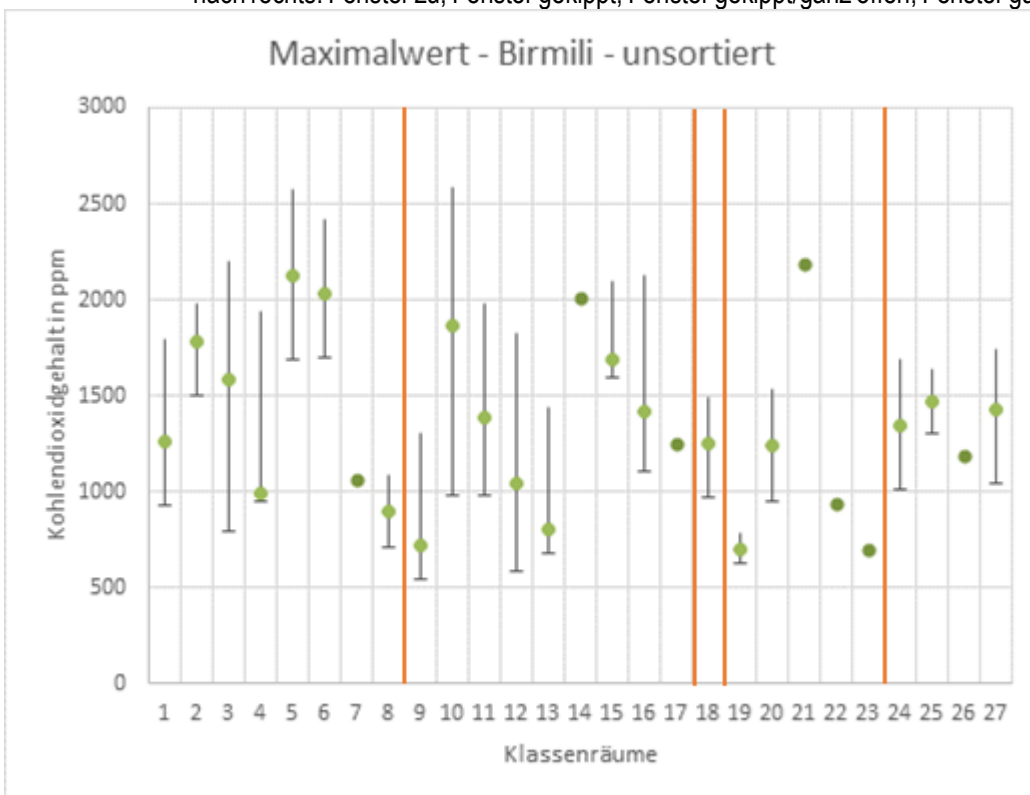


Abbildung E.4: Sortiertes Streudiagramm des Maximalwertes der Studie "Birmili" in der Wintermessperiode (von links nach rechts: Fenster zu, Fenster gekippt, Fenster gekippt/ganz offen, Fenster ganz offen, unbekannt)

Studie „Bischof“

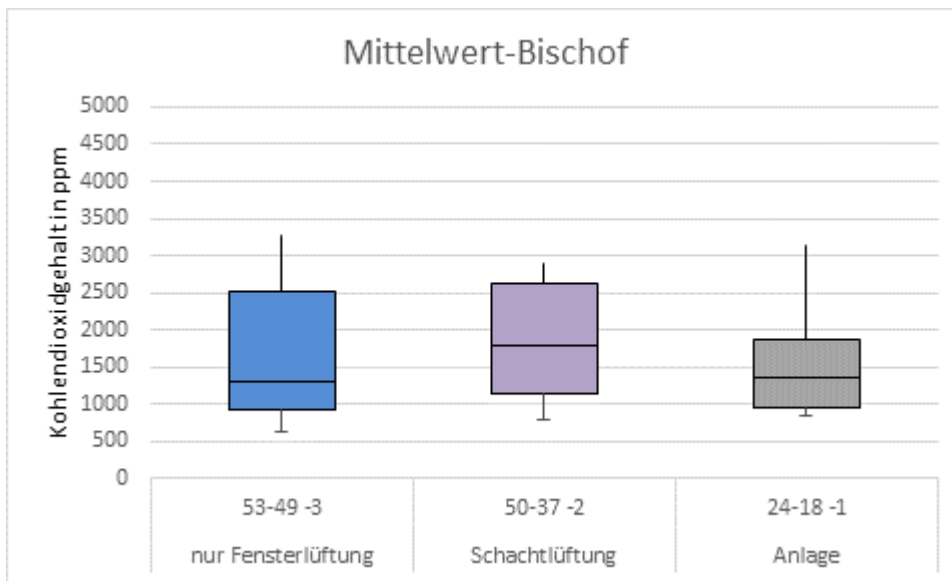


Abbildung E.5: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Bischof" in der Wintermessperiode

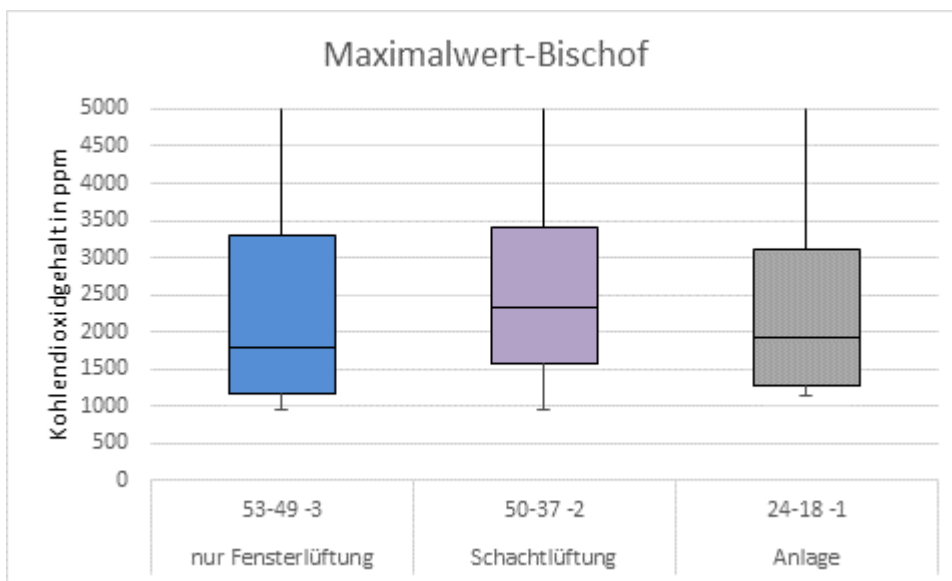


Abbildung E.6: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Bischof" in der Wintermessperiode

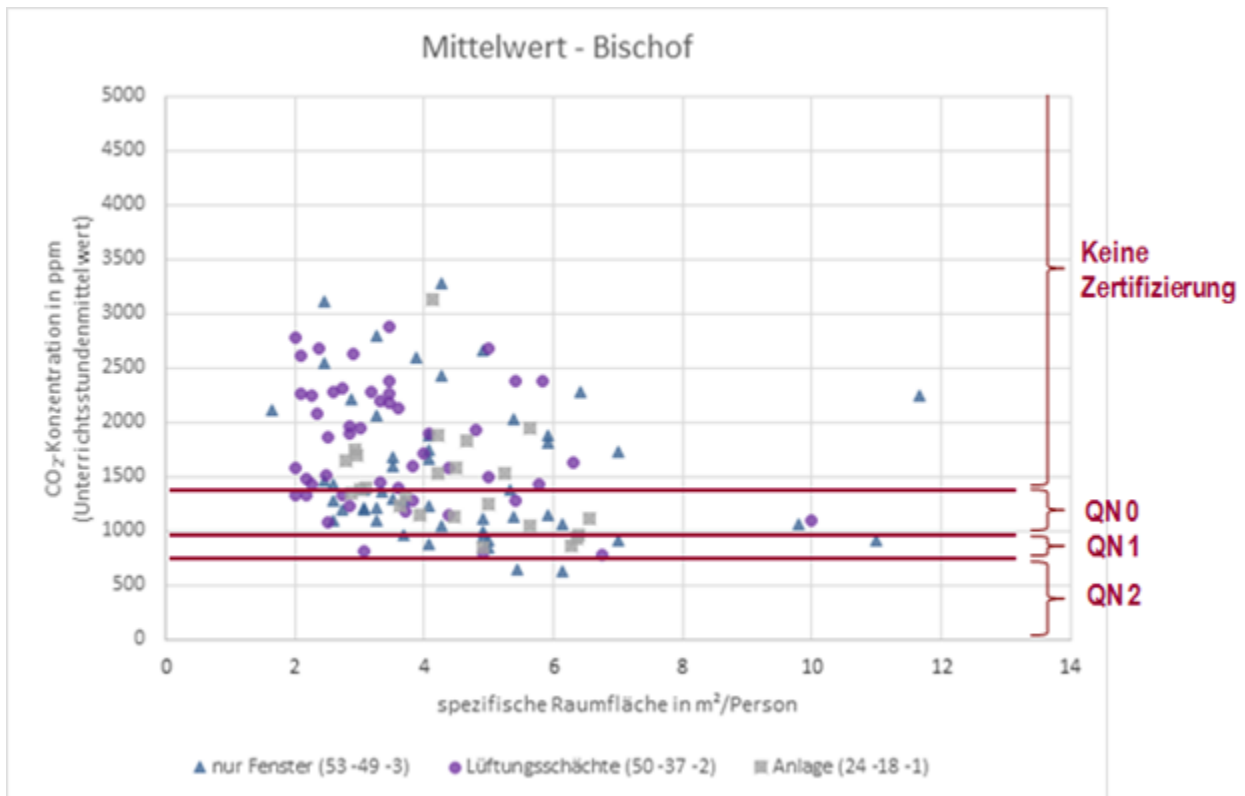


Abbildung E.7: CO₂-Konzentration (Mittelwert) in Abhängigkeit der spezifischen Raumfläche in m²/Person für die Studie „Bischof“

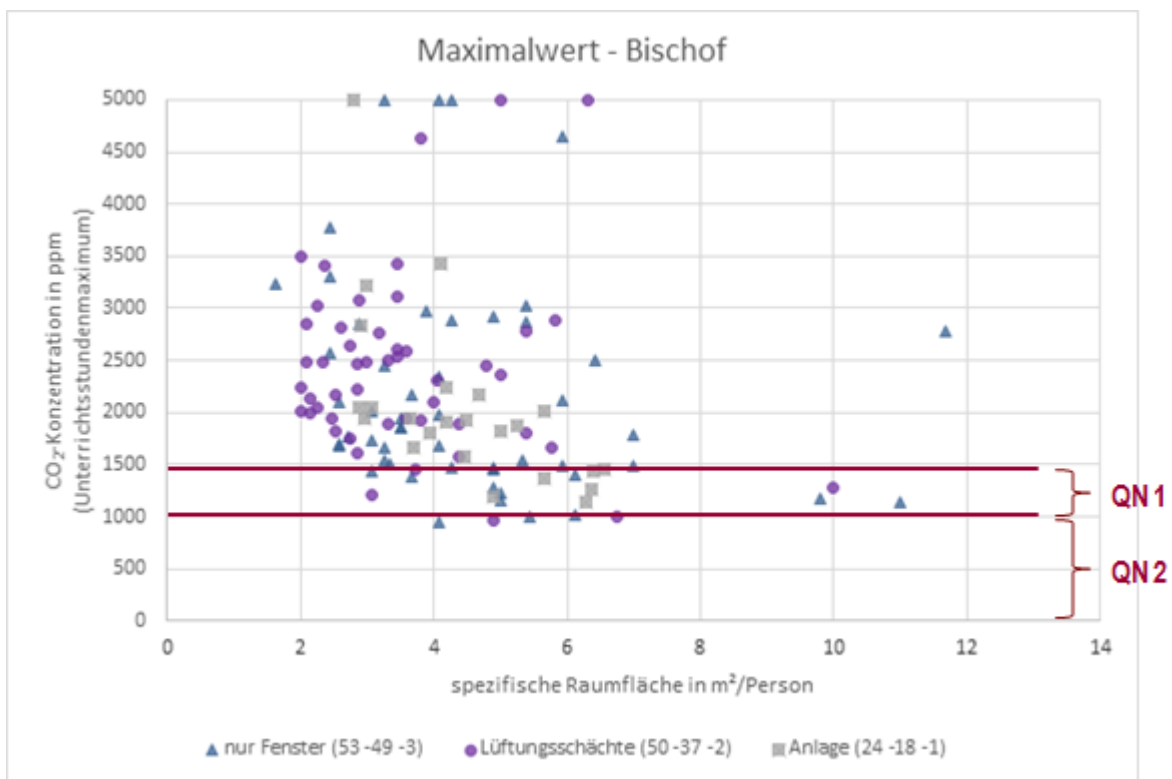


Abbildung E.8: CO₂-Konzentration (Maximalwert) in Abhängigkeit der spezifischen Raumfläche in m²/Person für die Studie „Bischof“

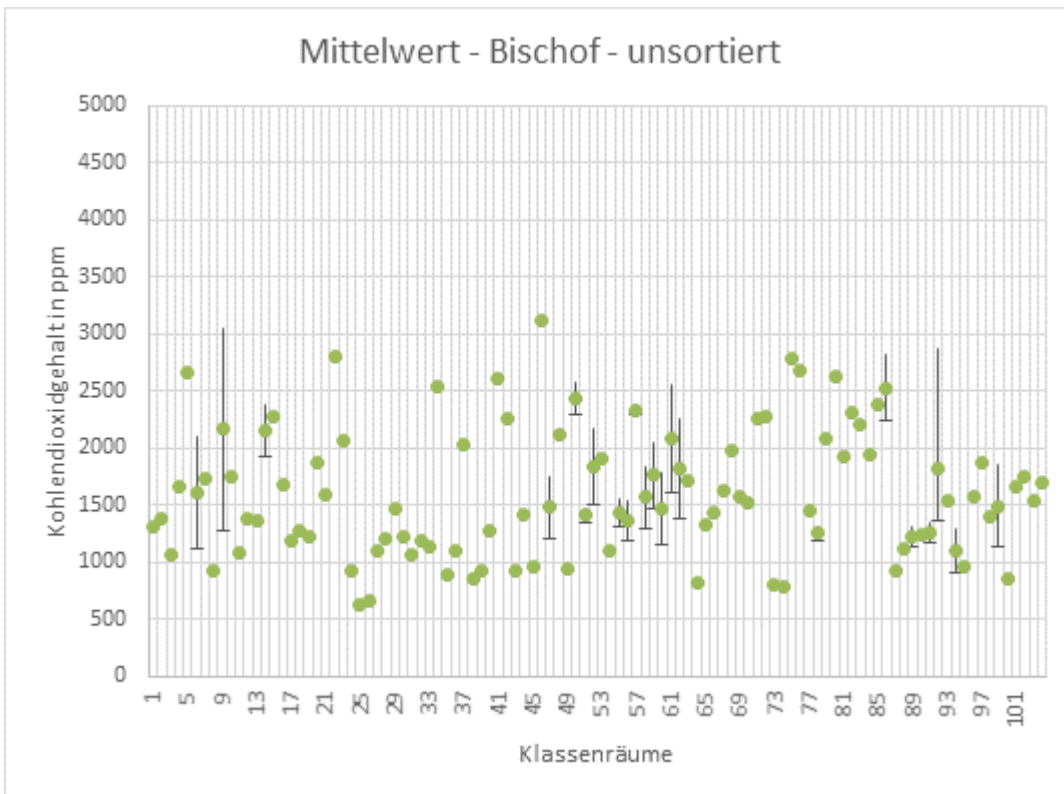


Abbildung E.9: Sortiertes Streudiagramm nach Lüftungssystem des Mittelwertes der Studie "Bischof"

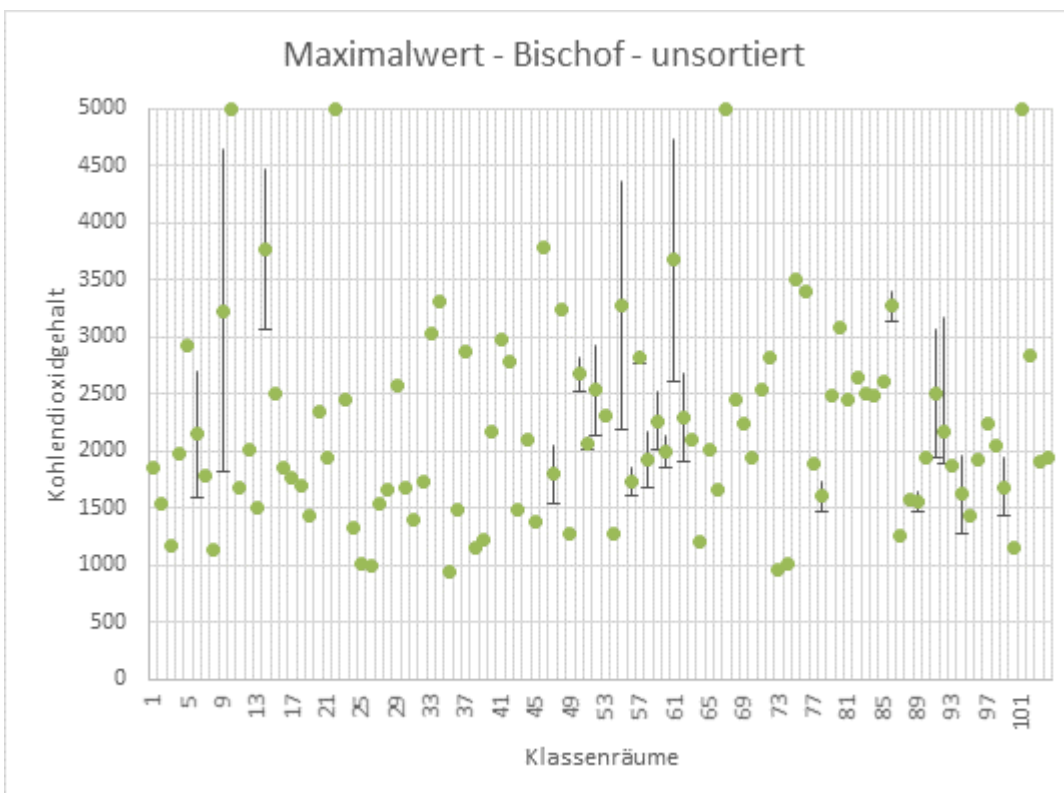


Abbildung E.10: Sortiertes Streudiagramm nach Lüftungssystem des Maximalwertes der Studie "Bischof"

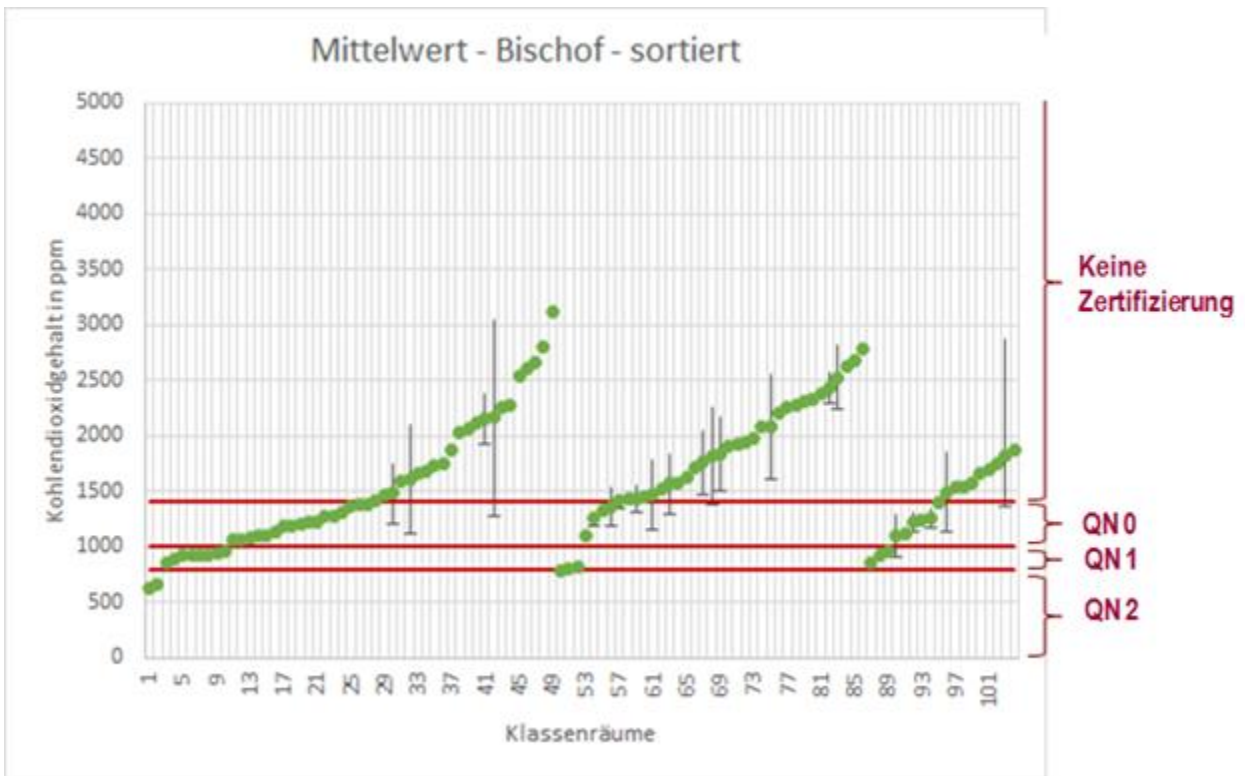


Abbildung E.11: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Bischof" mit den Qualitätsniveaus nach BNB (vorderer Teil – Fensterlüftung, mittlerer Teil – Lüftungsschächte, hinterer Teil – Anlage)

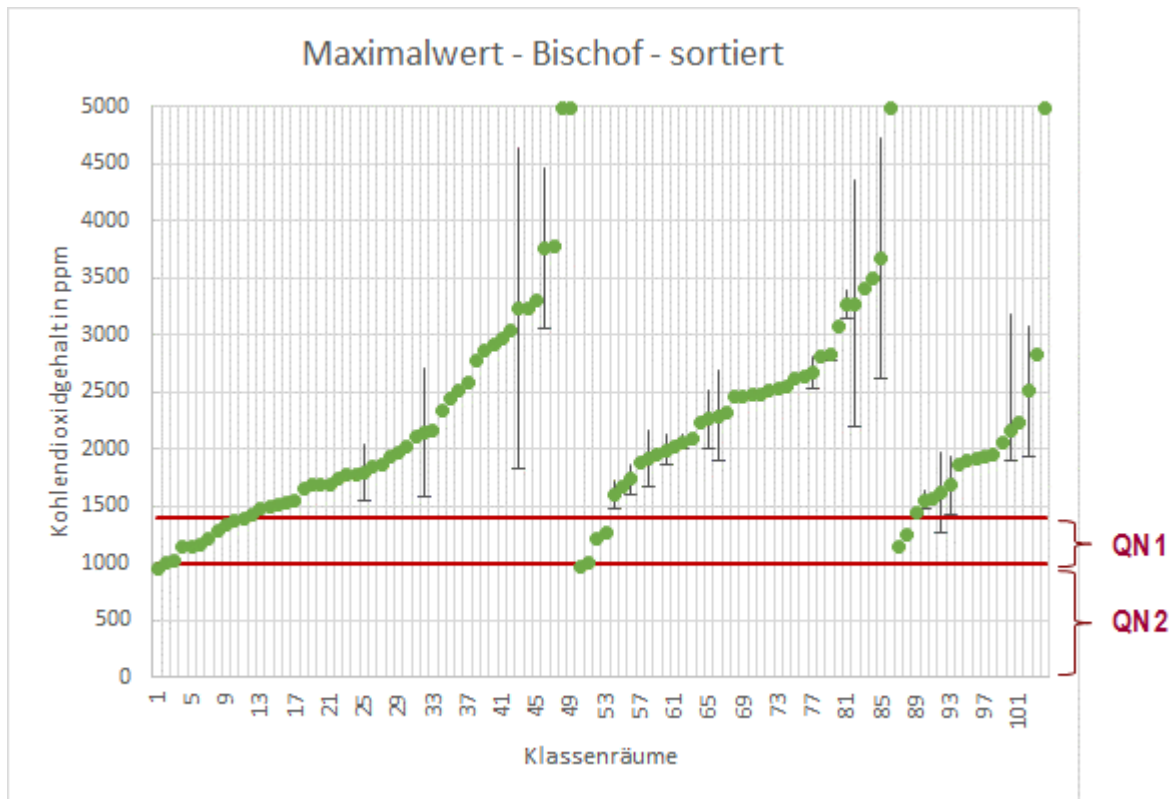


Abbildung E.12: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Bischof" mit den Qualitätsniveaus nach BNB (vorderer Teil – Fensterlüftung, mittlerer Teil – Lüftungsschächte, hinterer Teil – Anlage)

Studie „Lahrz“

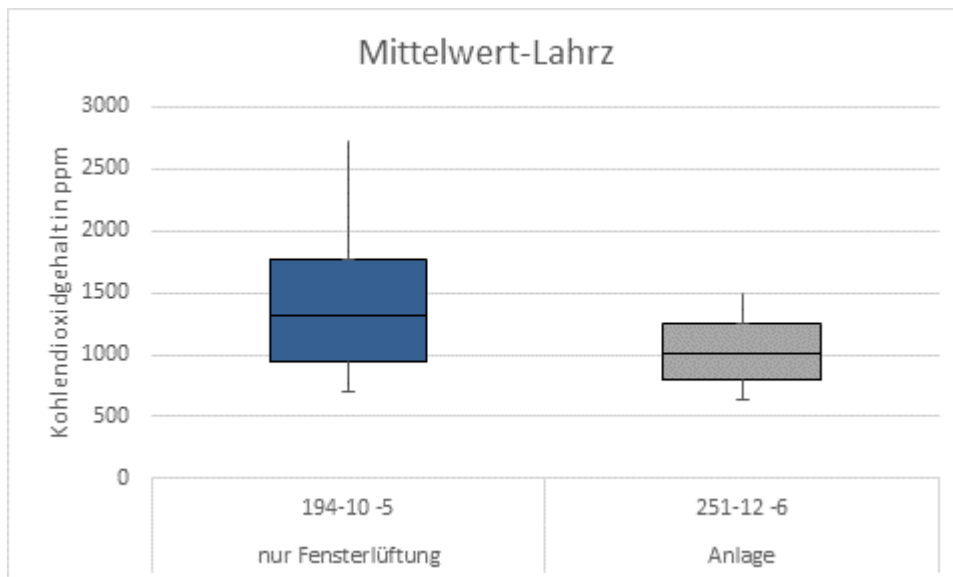


Abbildung E.13: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Lahrz"

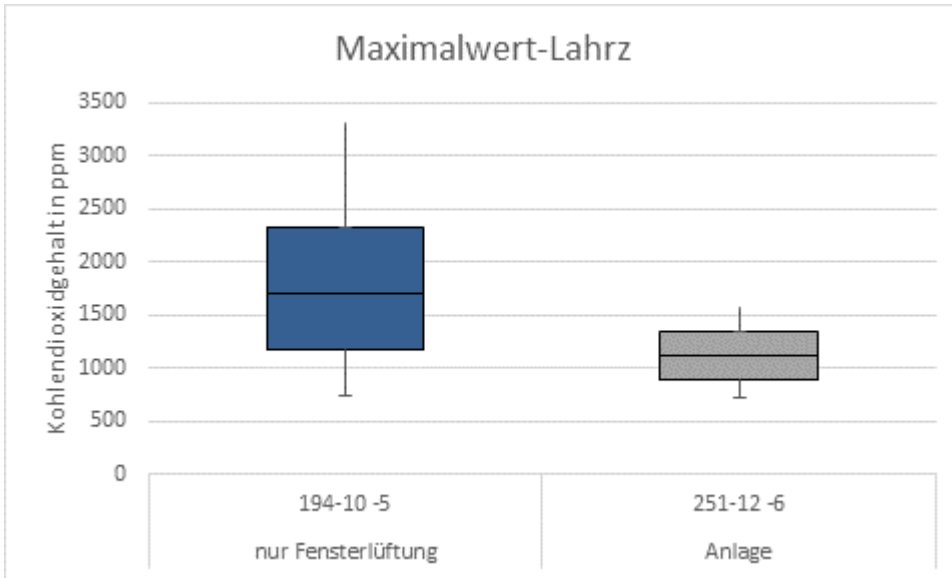


Abbildung E.14: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Lahrz"

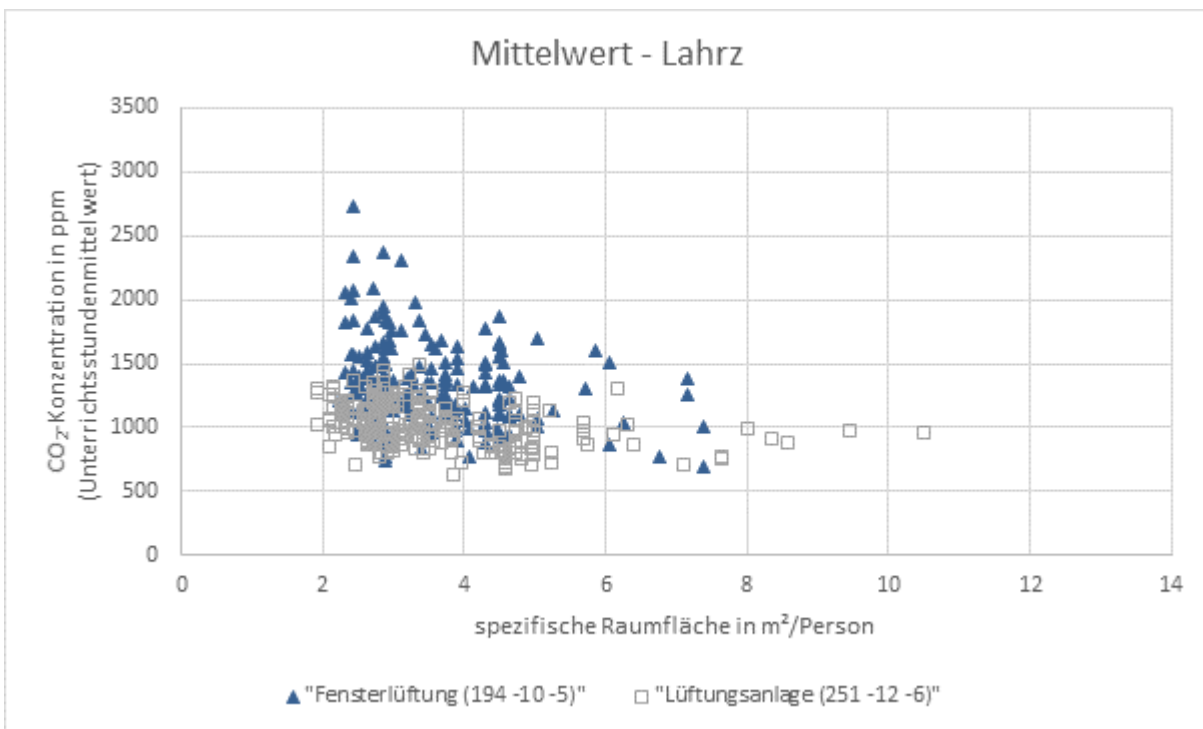


Abbildung E.15: CO₂-Konzentration (Mittelwert) in Abhängigkeit der spezifischen Raumfläche in m²/Person für die Studie „Lahrz“

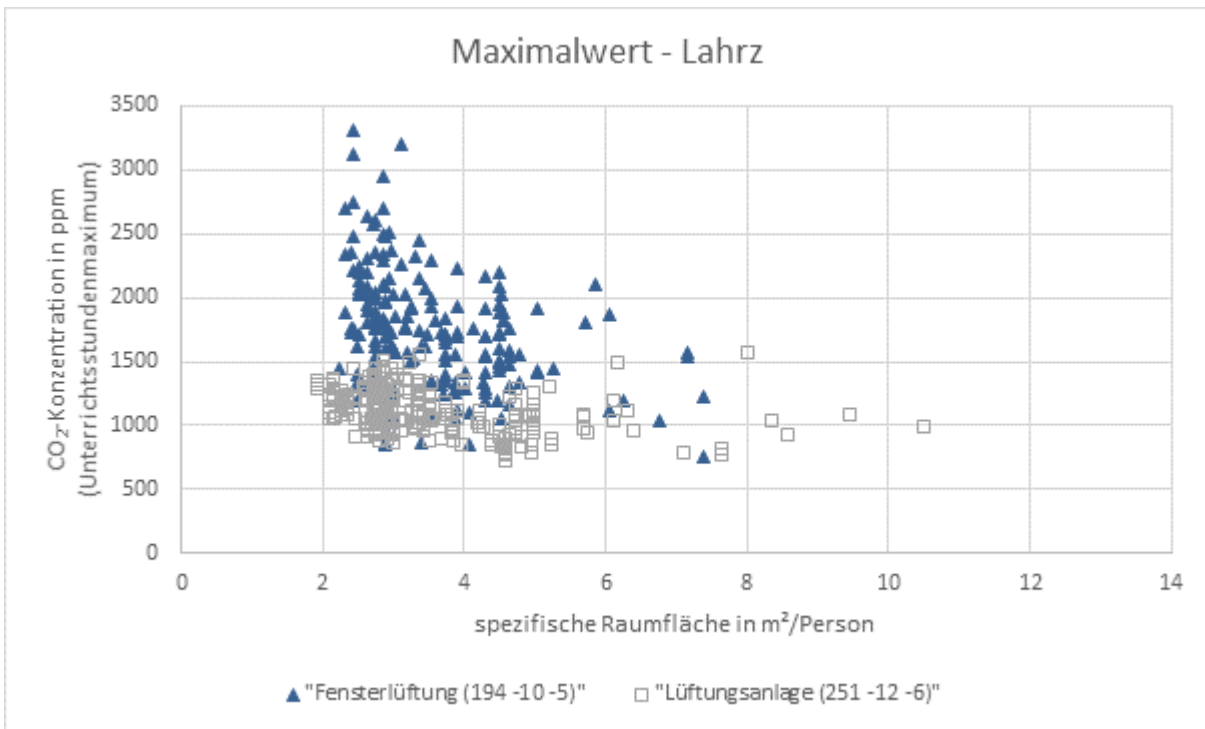


Abbildung E.16: CO₂-Konzentration (Maximalwert) in Abhängigkeit der spezifischen Raumfläche in m²/Person für die Studie „Lahrz“

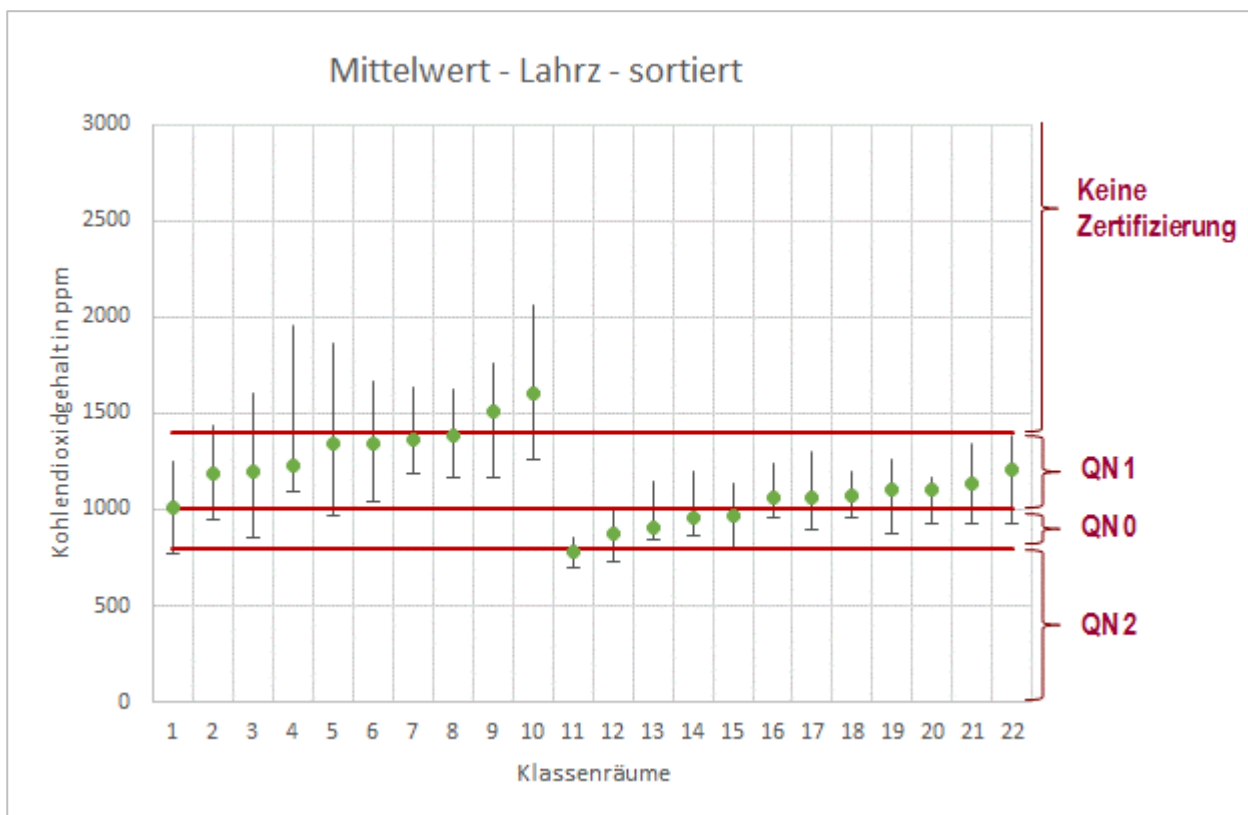


Abbildung E.17: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Lahrz" mit den Qualitätsniveaus nach BNB (linker Teil – Fensterlüftung, rechter Teil –RLT)

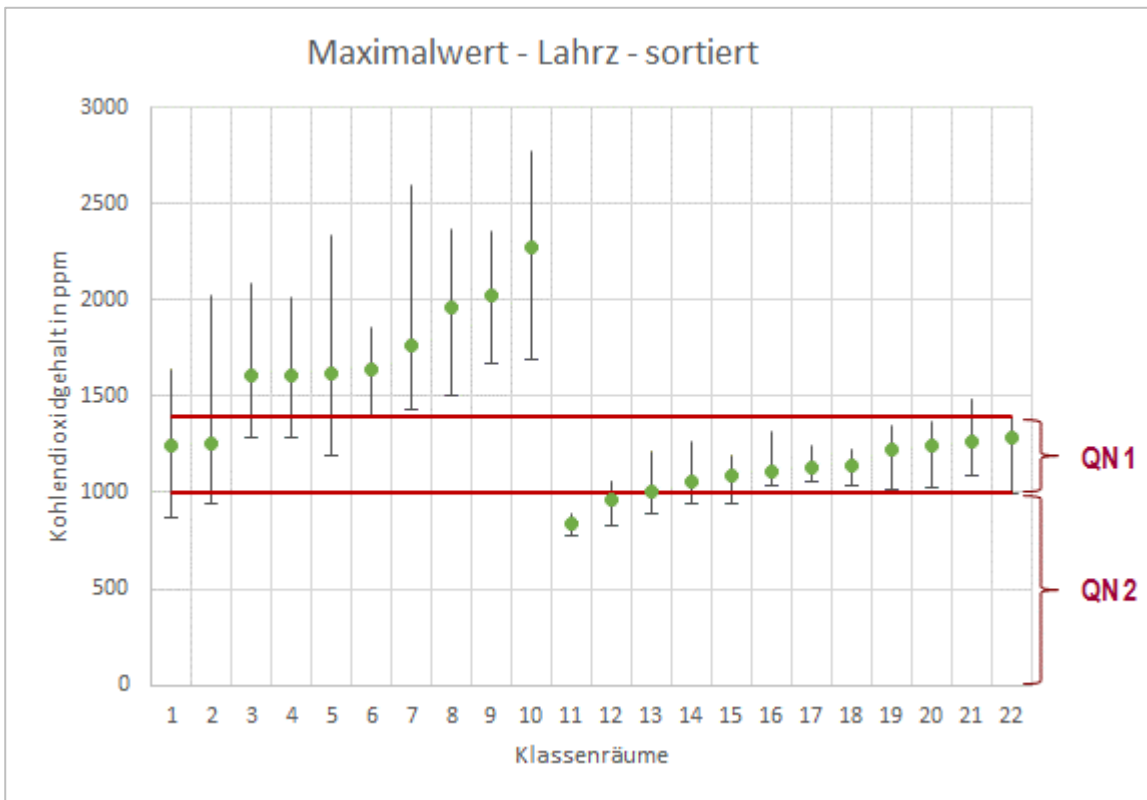


Abbildung E.18: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Lahrz" mit den Qualitätsniveaus nach BNB (linker Teil – Fensterlüftung, rechter Teil –RLT)

Studie „Müller“

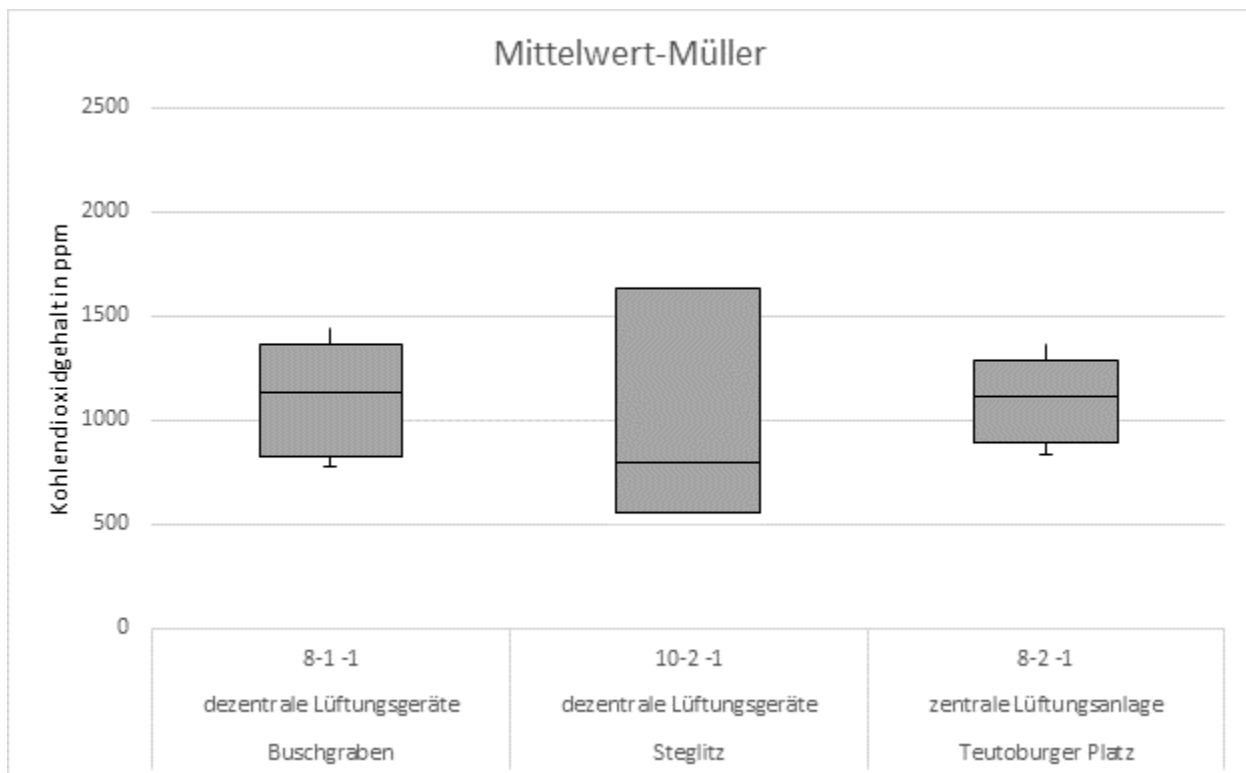


Abbildung E.19: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Müller"

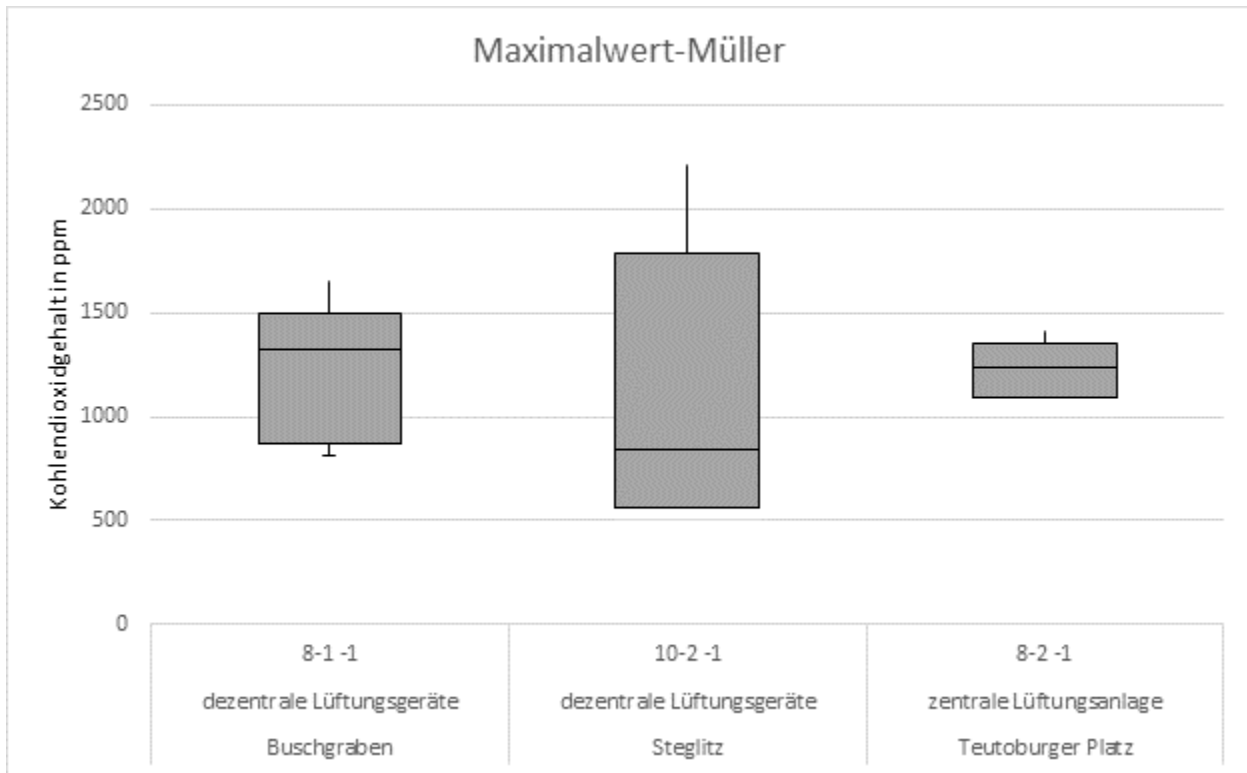


Abbildung E.20: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Müller"

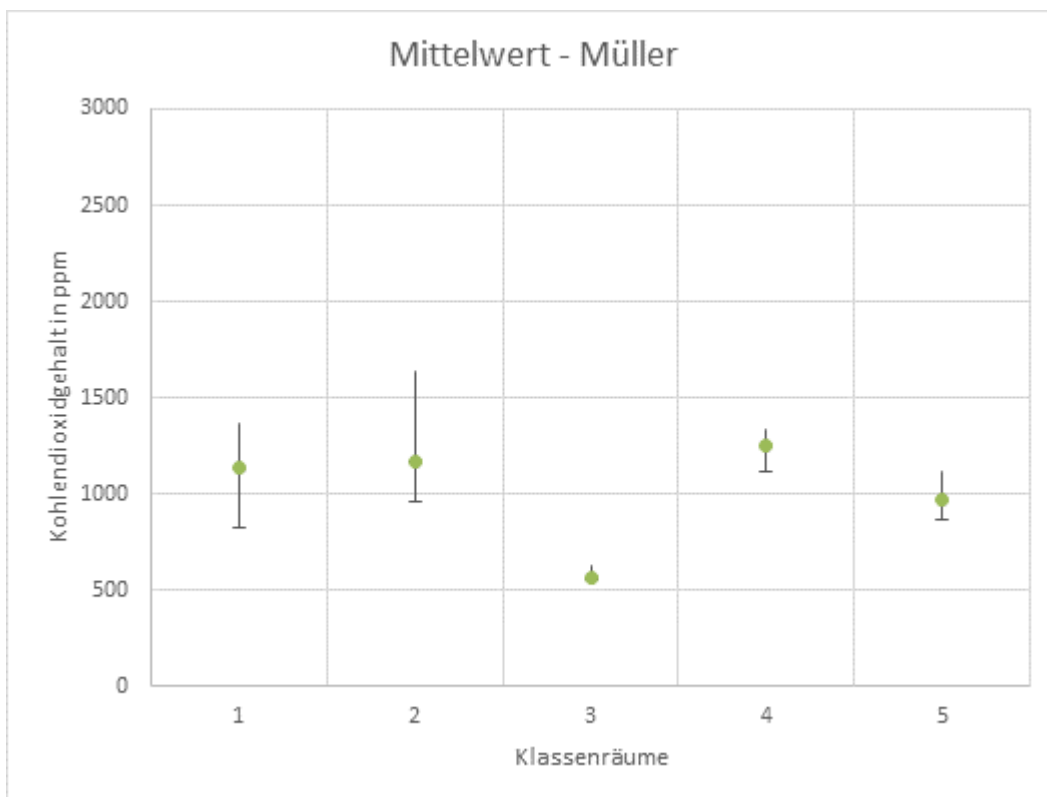


Abbildung E. 21: Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Müller"

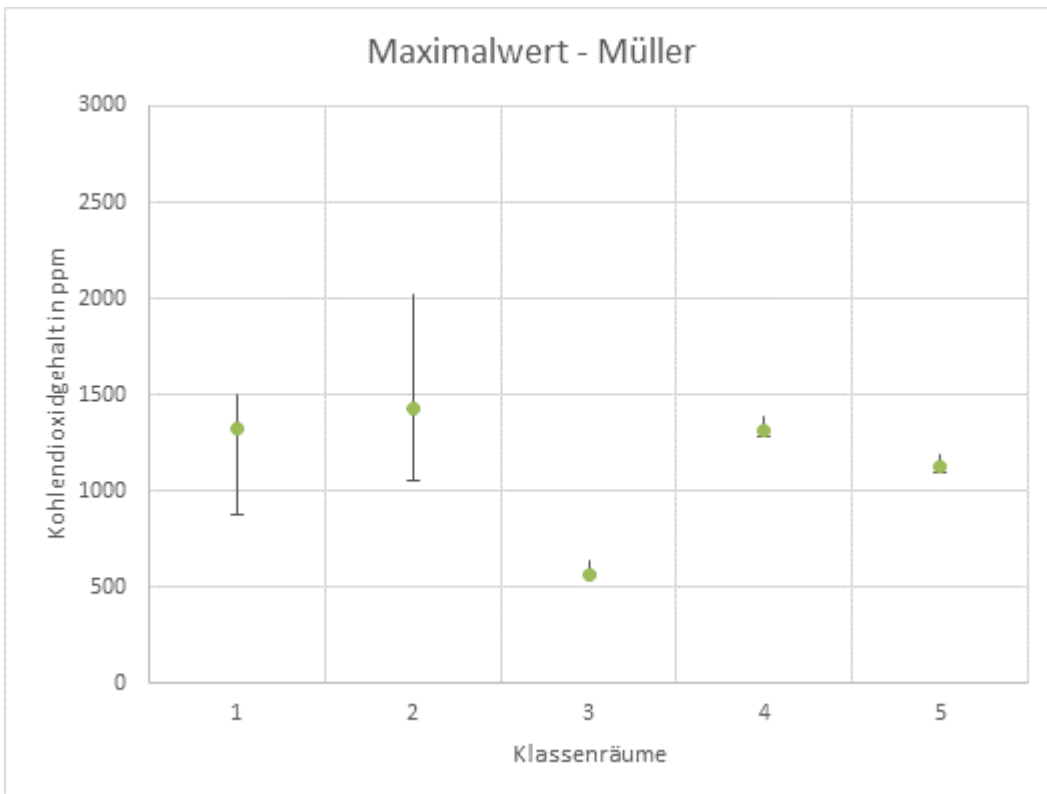


Abbildung E.22: Streudiagramm des Maximalwertes der Studie "Müller"

Studie „Wargocki“

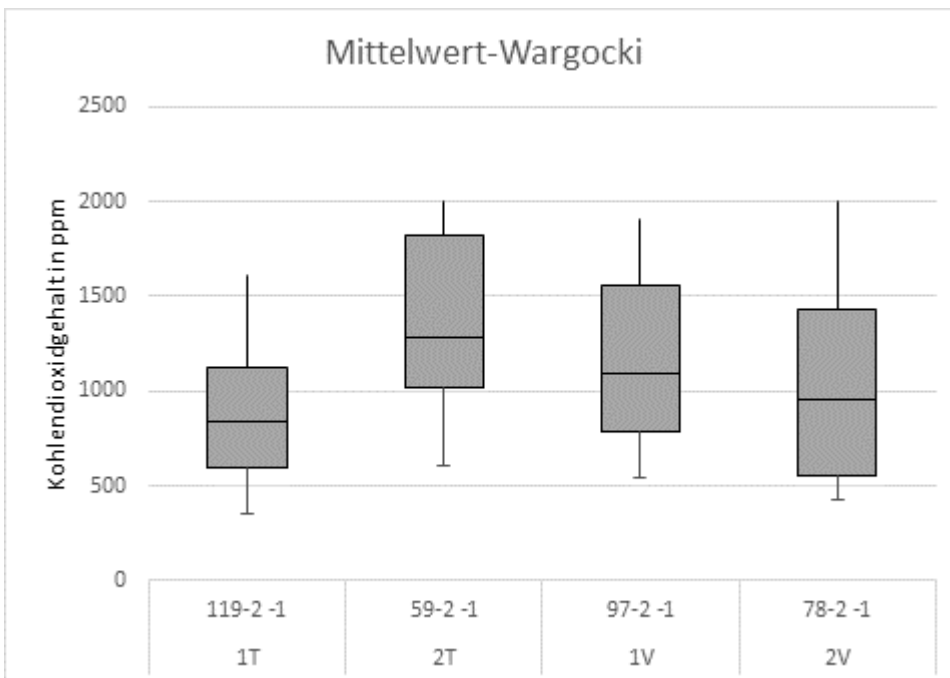


Abbildung E.23: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Wargocki"

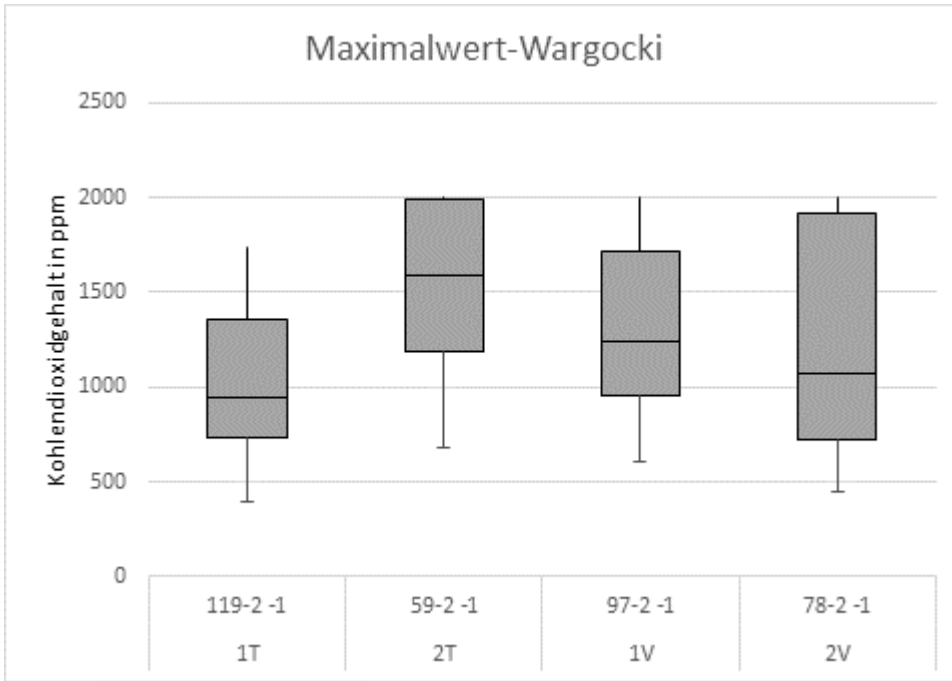


Abbildung E.24: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Wargocki"

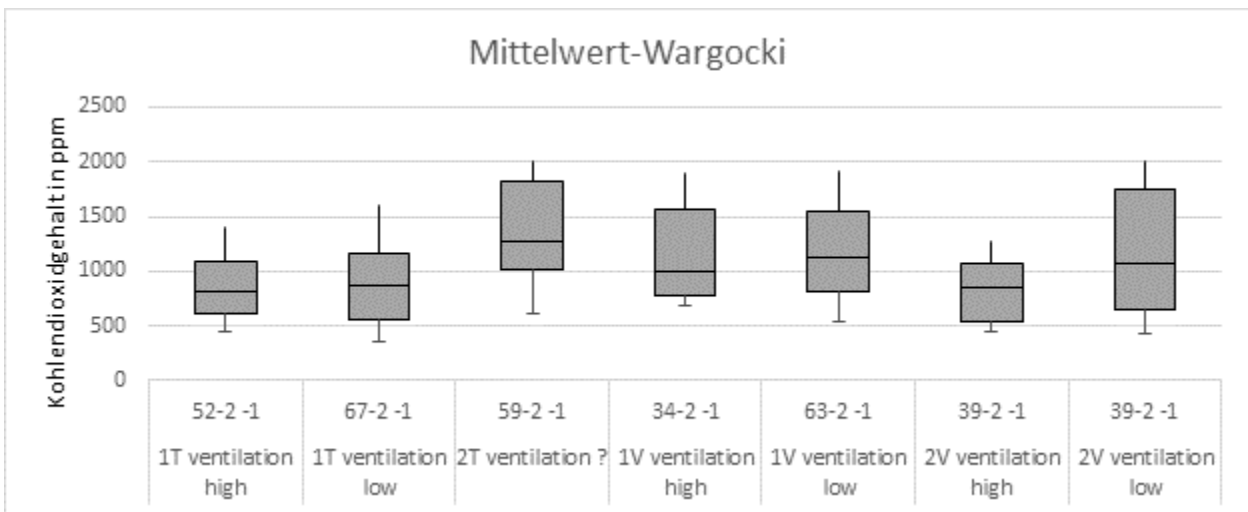


Abbildung E.25: Boxplot (detailliert) für den Mittelwert der Studie "Wargocki"

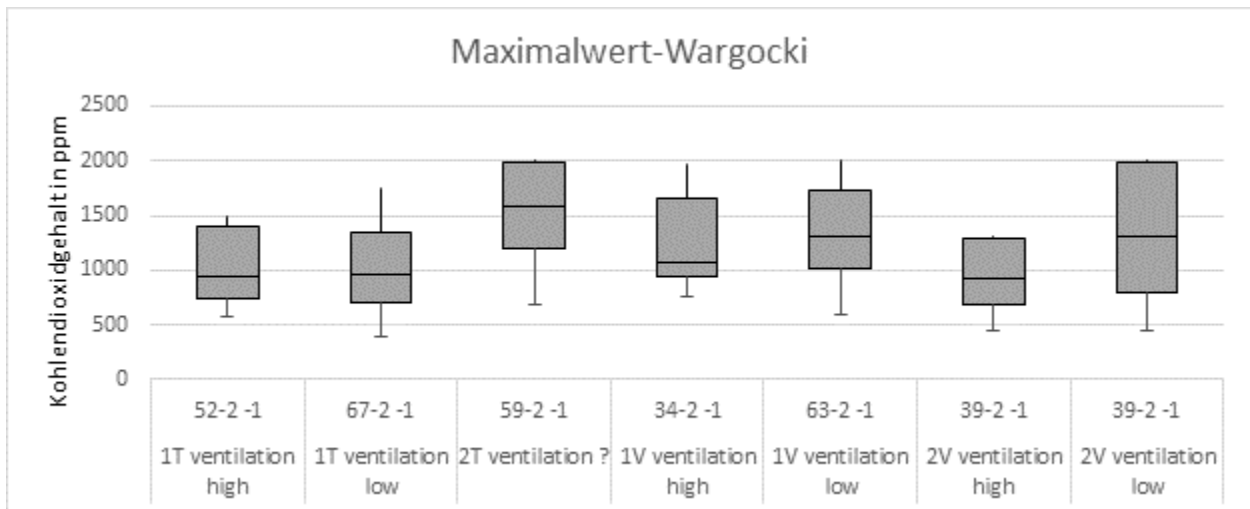


Abbildung E.26: Boxplot (detailliert) für den Maximalwert der Studie "Wargocki"

Studie „Bolsius“

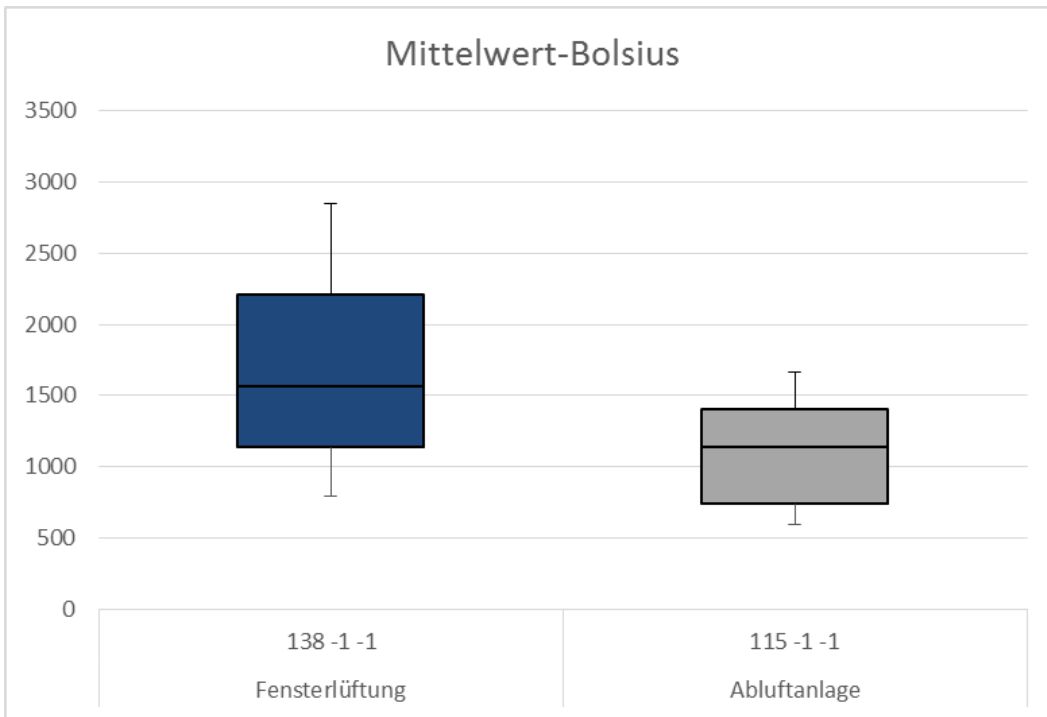


Abbildung E.27: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Bolsius"

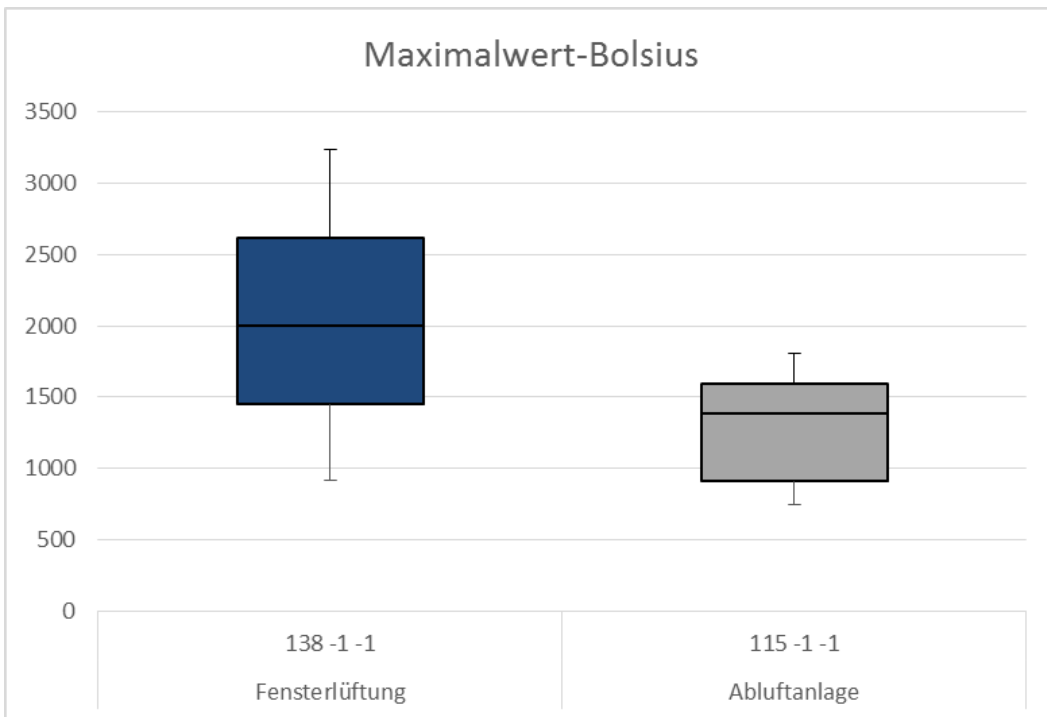


Abbildung E. 28: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Bolsius"

Studie „Sick/Dietz“

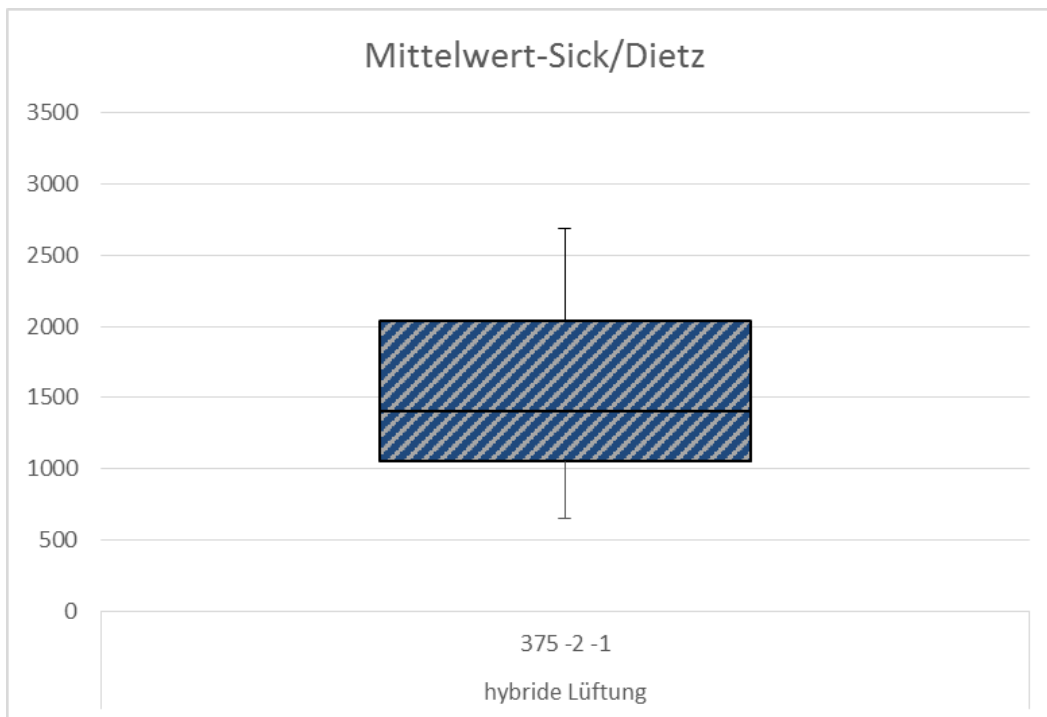


Abbildung E.29: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Sick/Dietz"

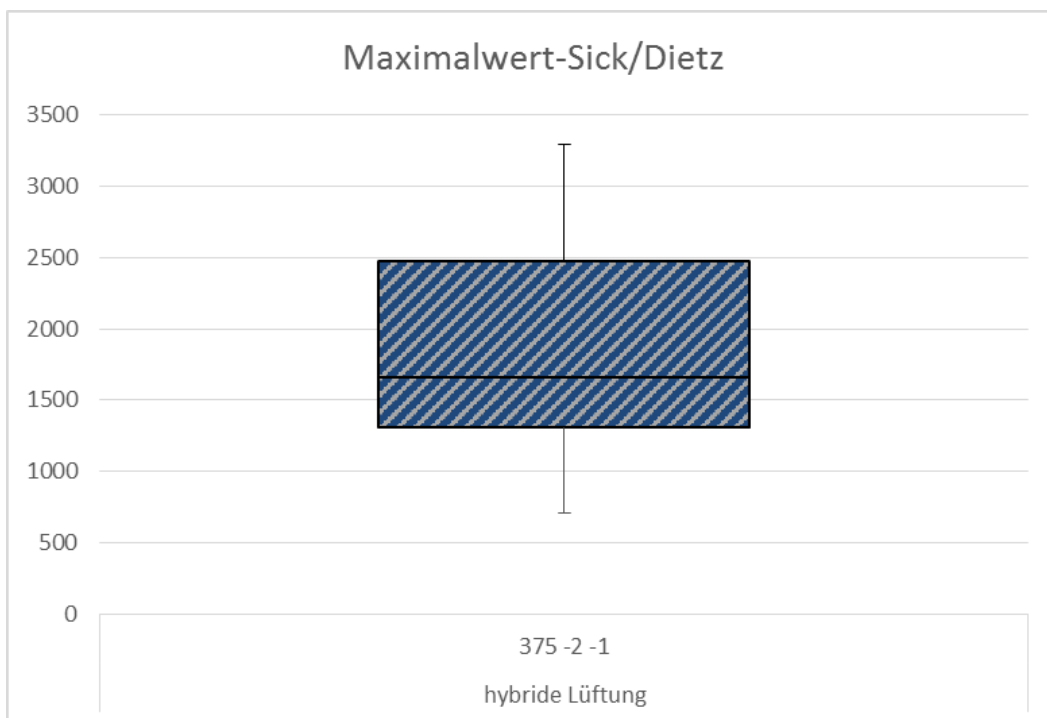


Abbildung E.30: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Sick/Dietz"

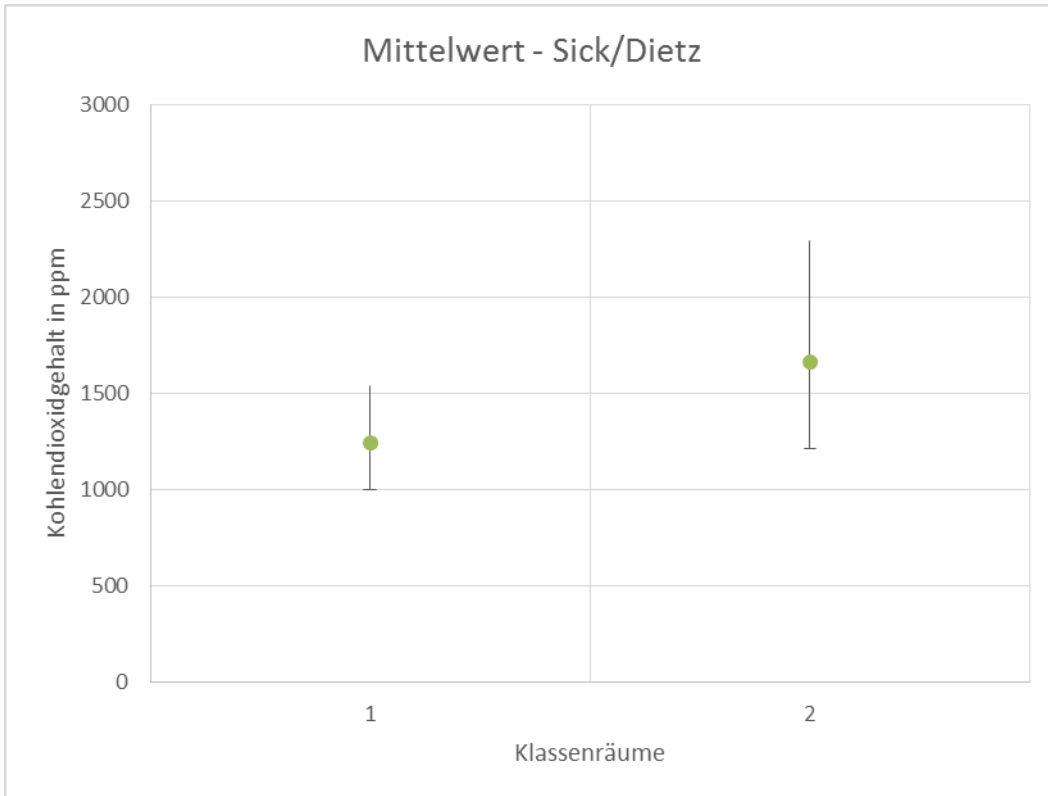


Abbildung E.31: Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Sick/Dietz"

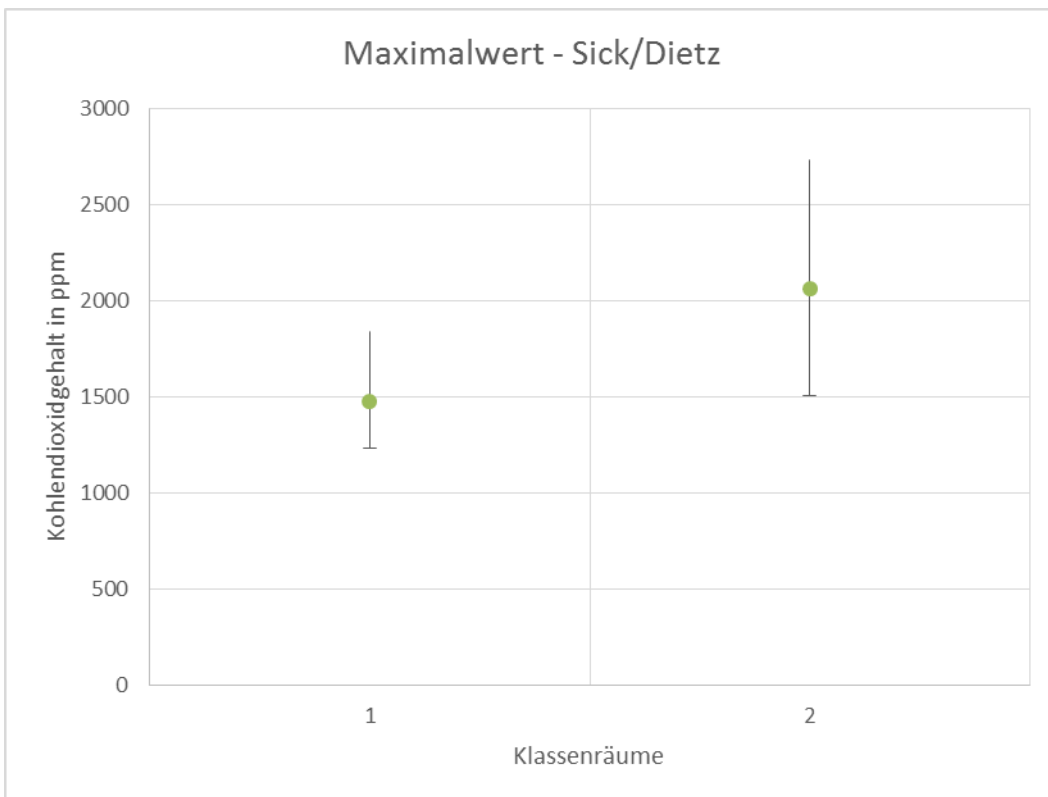


Abbildung E.32: Streudiagramm des Maximalwertes der Studie "Sick/Dietz"

Studie „Fromme“

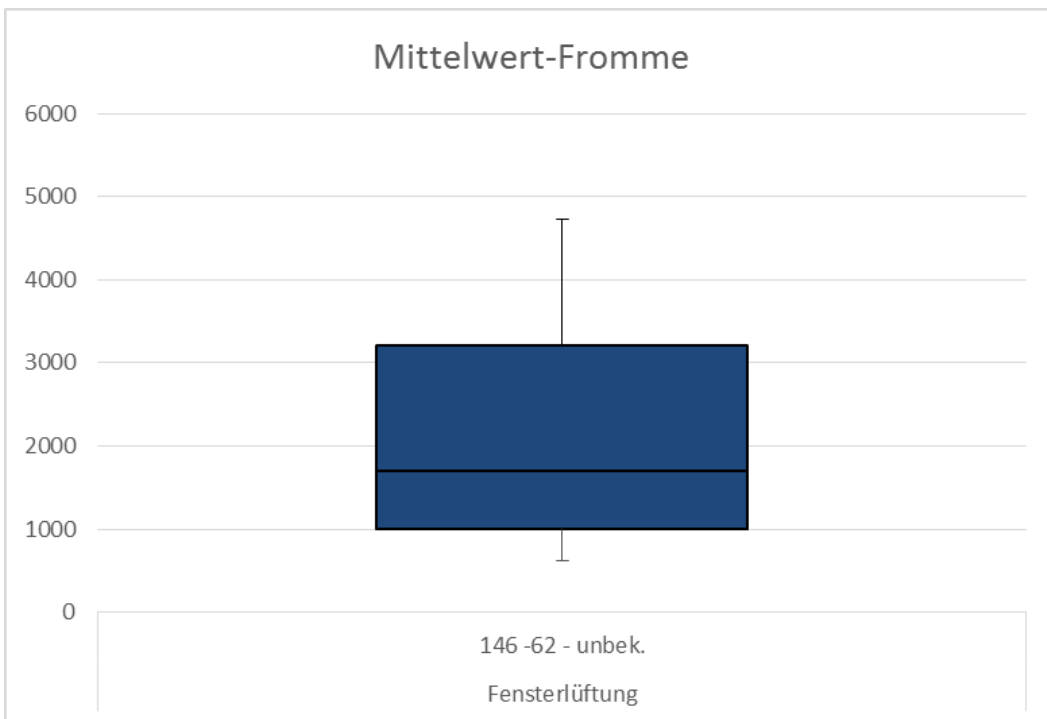


Abbildung E.33: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Fromme" in der Wintermessperiode (45 Minuten)

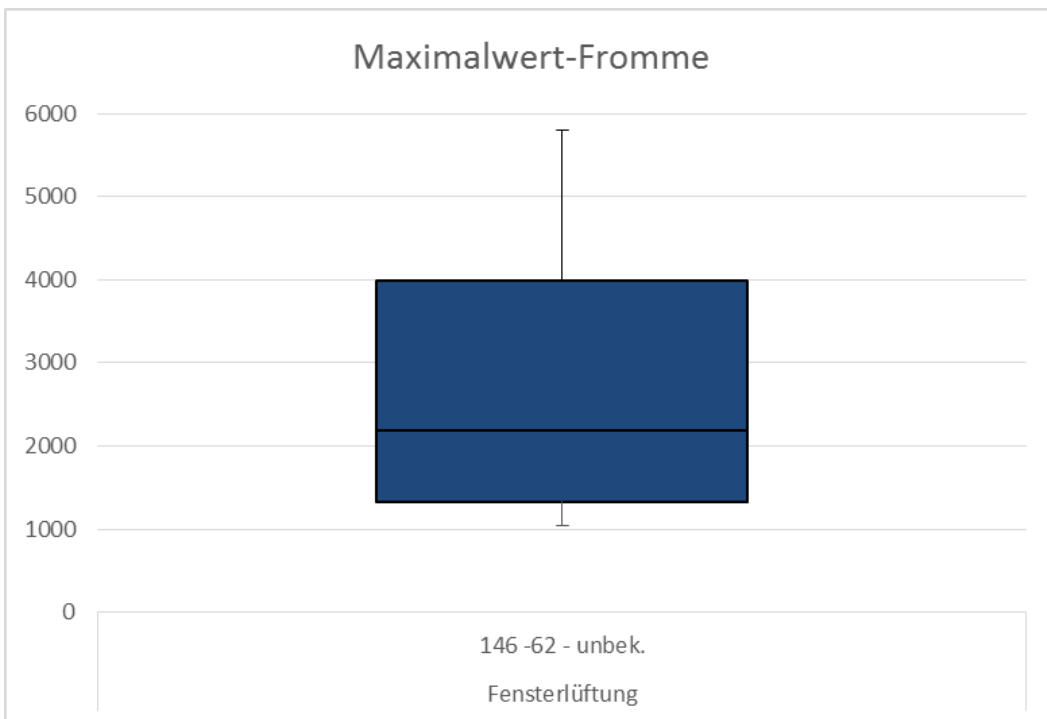


Abbildung E.34: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Fromme" in der Wintermessperiode (45 Minuten)

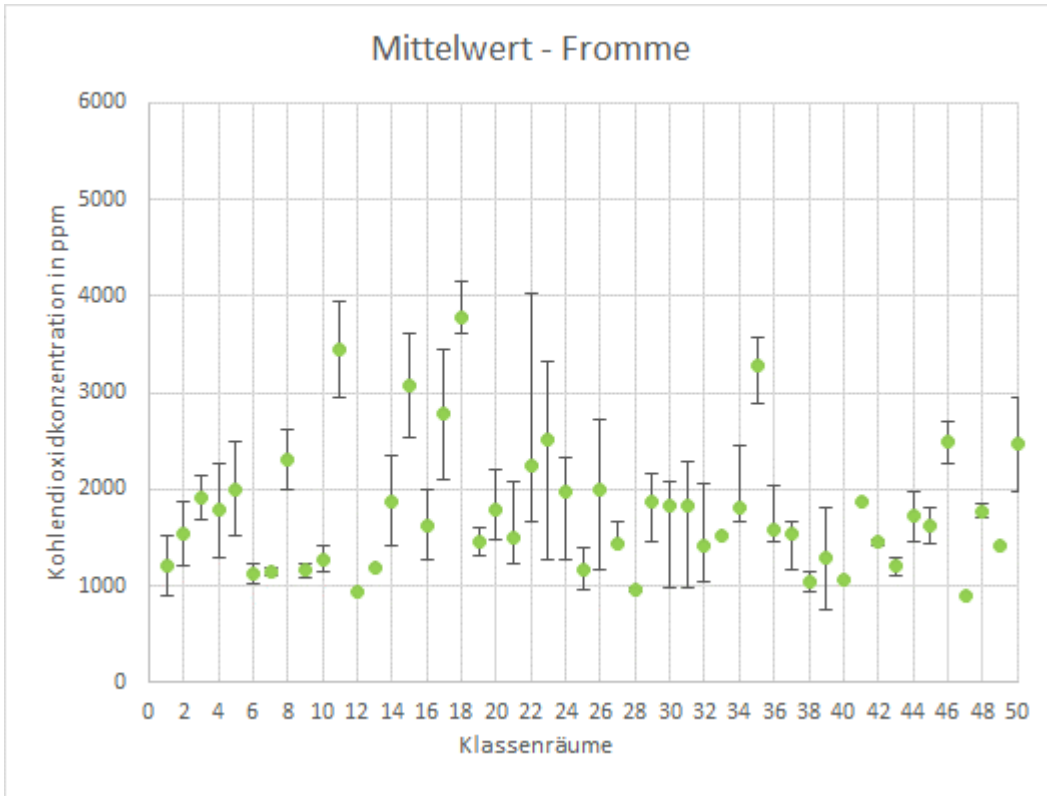


Abbildung E.35: Streudiagramm des Mittelwertes der Studie "Fromme" in der Wintermessperiode (45 Minuten)

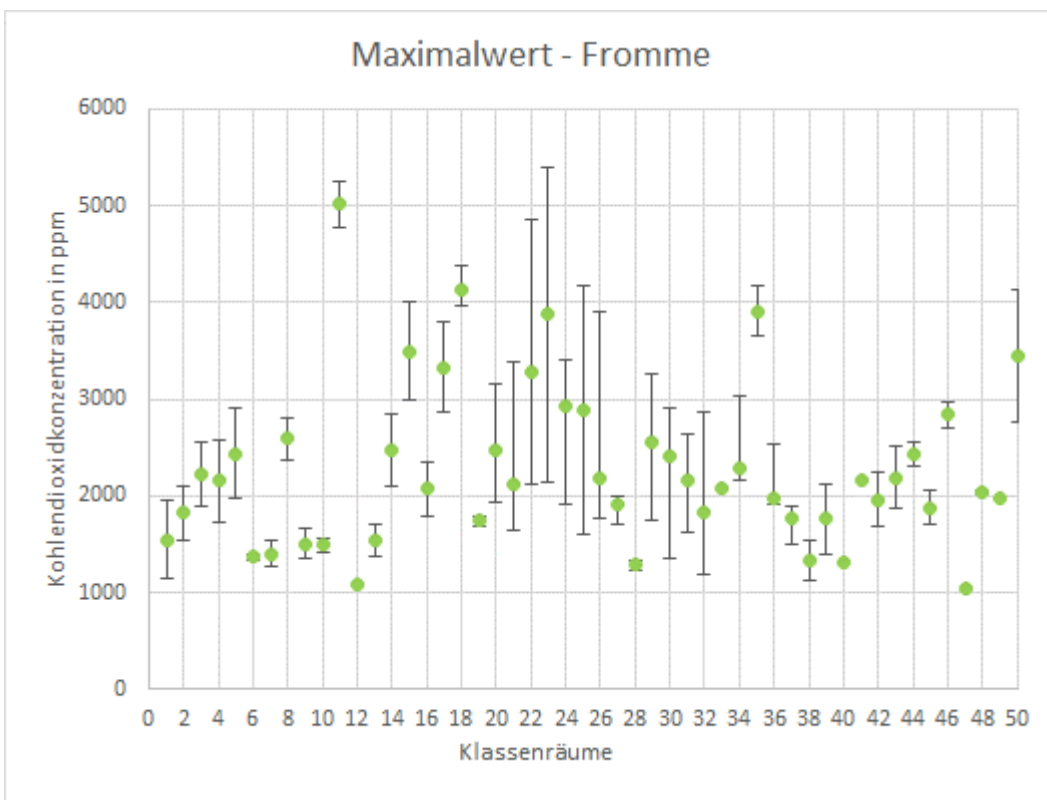


Abbildung E.36: Streudiagramm des Maximalwertes der Studie "Fromme" in der Wintermessperiode (45 Minuten)

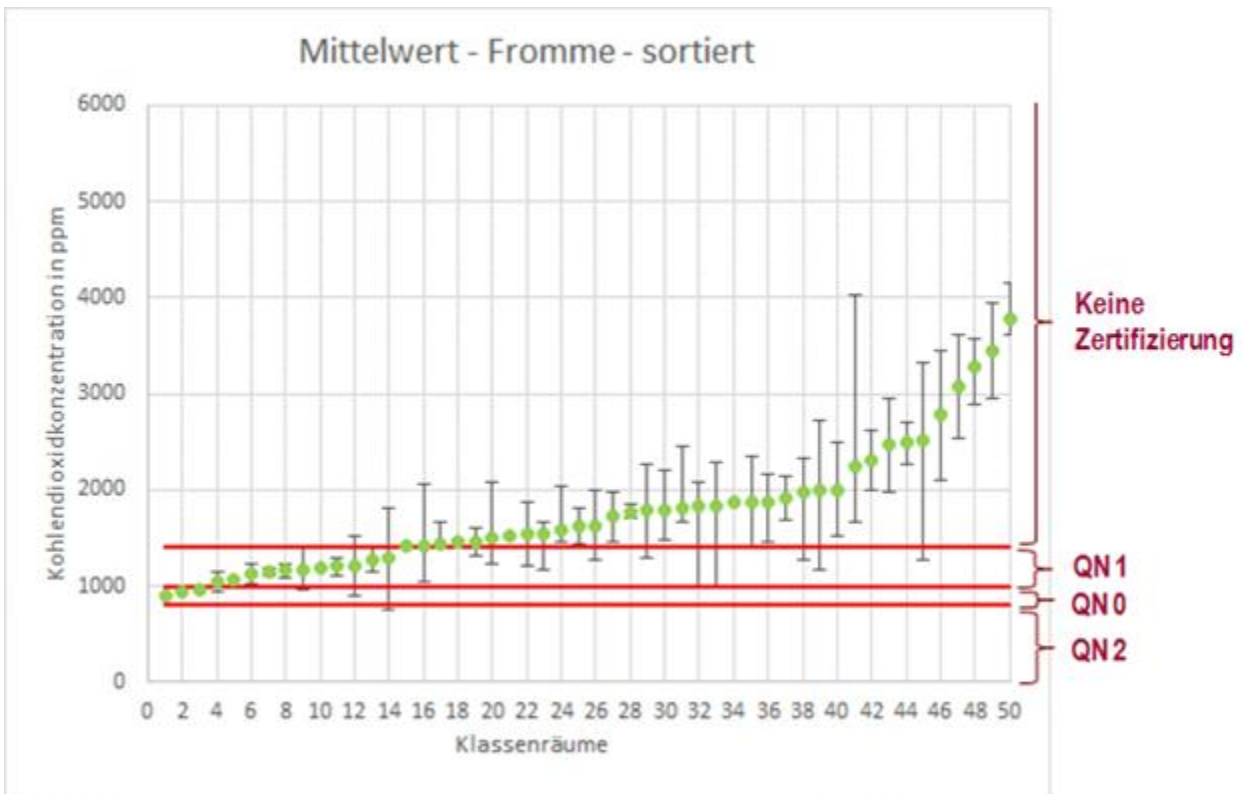


Abbildung E.37: Sortiertes Streudiagramm der Mittelwerte je Klassenraum der Studie "Fromme" (nur Fensterlüftung) mit den Qualitätsniveaus nach BNB (rote Linien QN 2, QN 1 und QN 0, von unten nach oben)

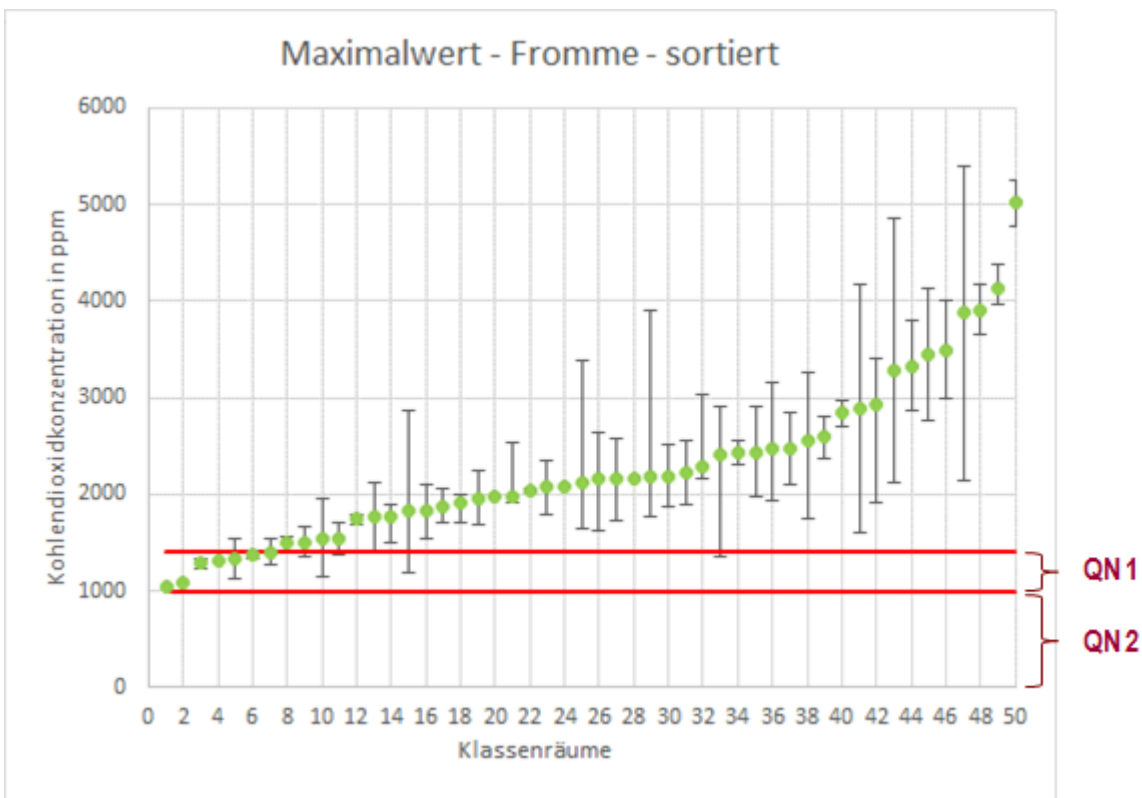


Abbildung E.38: Sortiertes Streudiagramm der Mittelwerte je Klassenraum der Studie "Fromme" (nur Fensterlüftung) mit den Qualitätsniveaus QN 2 (untere rote Linie) und QN 1 (obere rote Linie) nach BNB

Aus den zeitlichen Verläufen der CO₂- und Luftfeuchtekonzentrationen in der Studie „Fromme“ ist erkennbar, dass etwa ein Viertel der Schulstunden kürzer als 45 Minuten ist (ca. 35 bis 42 Minuten); in einigen Klassenräumen (oder in einigen speziellen Klassen? Über die Art der Klassen, z.B. inklusive Klassen etc., liegen keine Informationen vor) ist ein Großteil der Schulstunden dergestalt verkürzt. Um konsistent zu bleiben, wurden diese verkürzten Schulstunden nicht mit ausgewertet. Zur Information sind im Folgenden die Mittelwerte und Maximalwerte aller Schulstunden der Studie "Fromme" dargestellt, wenn die Schulstundenlänge auf 35 statt 45 Minuten gesetzt wird. Die Anzahl der auswertbaren Schulstunden sinkt dadurch von knapp 200 auf 150.

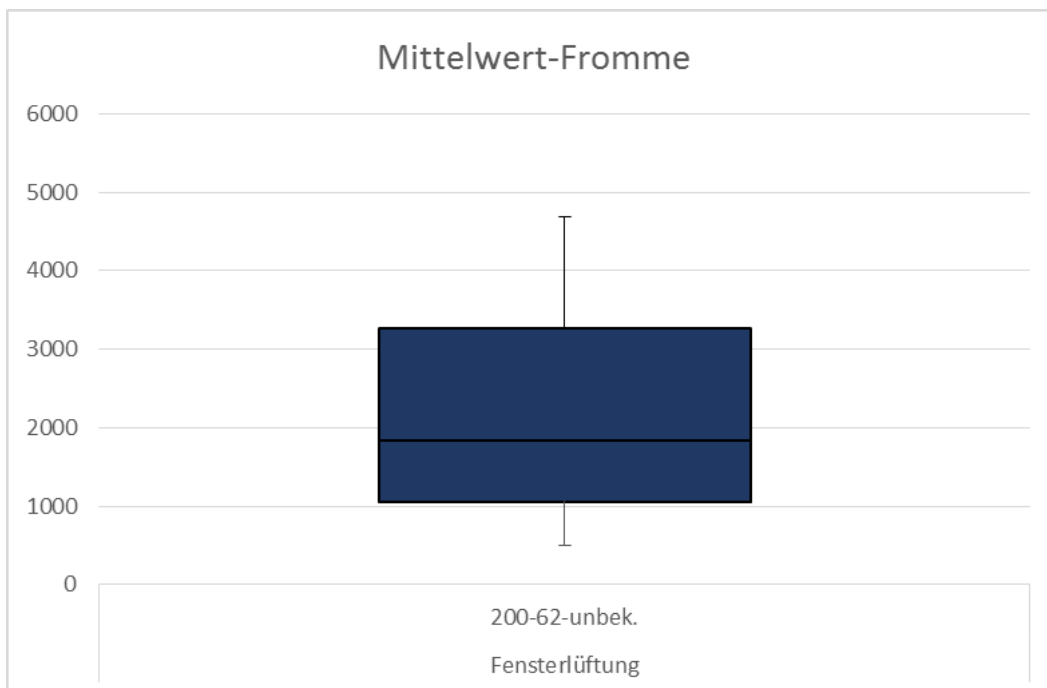


Abbildung E.39: Boxplot für den Mittelwert der Studie "Fromme" in der Wintermessperiode (35 Minuten)

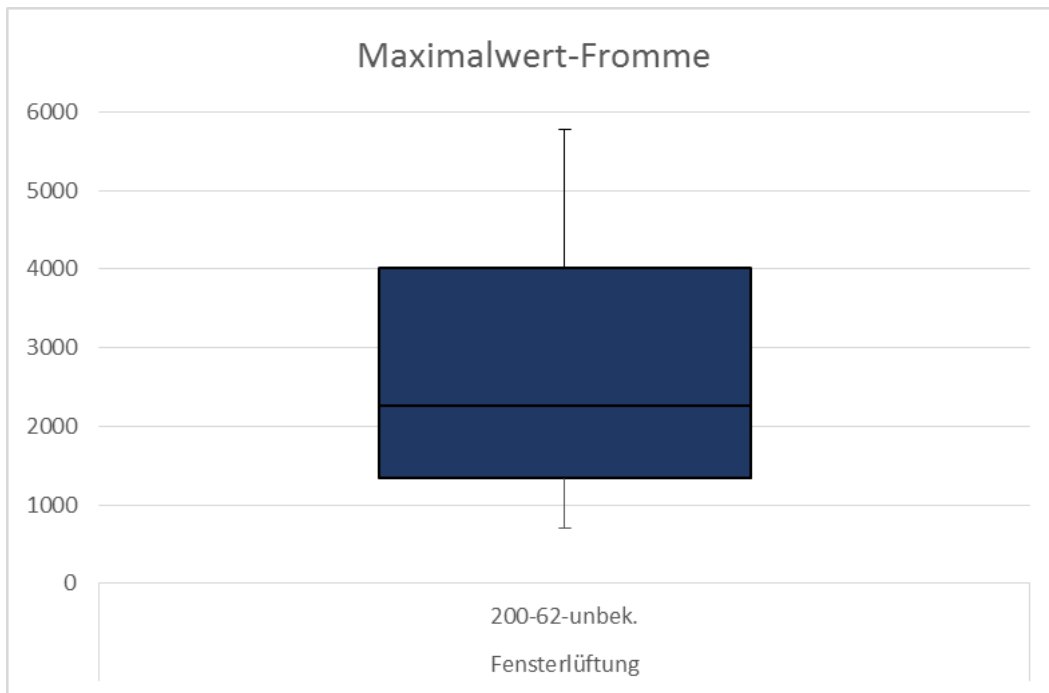


Abbildung E.40: Boxplot für den Maximalwert der Studie "Fromme" in der Wintermessperiode (35 Minuten)

Studie „Lambertz“ (Teil 1)

Die Studie Lambertz erfasst verschiedene Klassenzimmer mit unterschiedlichen Lüftungssystemen in einer Berufsschule in Aachen. Es liegen Messdaten aus 15 Klassenzimmern über jeweils die ersten 16 Tage des Januar 2003 vor. Acht dieser Klassenzimmer werden natürlich belüftet, zwei mit Abluftanlage, und 5 mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Für die Klassenzimmer mit Fensterlüftung liegen zwar gemessene Raumtemperaturverläufe vor, jedoch keine Angaben zum Verlauf der CO₂-Konzentration, weil nur die Räume mit Lüftungsanlage (Abluft und WRG) mit CO₂-Sensoren ausgestattet waren. Von daher können hier nur die Räume mit Lüftungsanlage weiter betrachtet werden.

Abbildung E.41 und Abbildung E.42 zeigen die Boxplots der Mittel- und Maximalwerte (Klassenräume mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) in der Wintermessperiode.

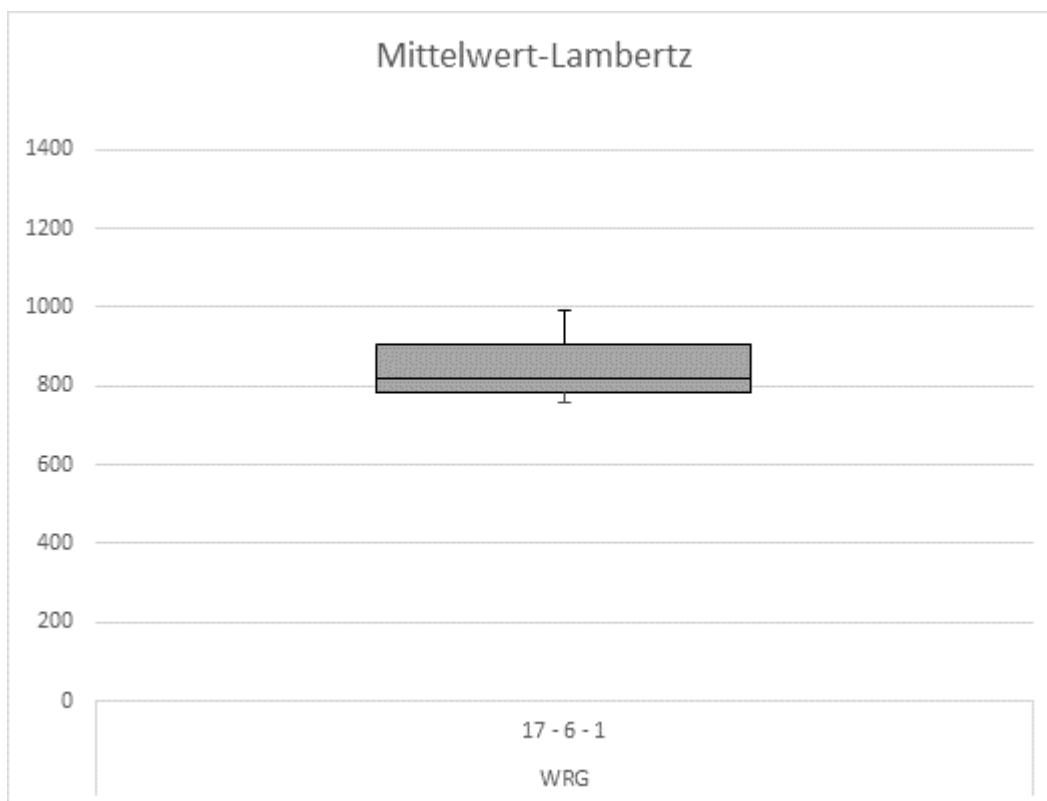


Abbildung E.41: Boxplot für die Mittelwerte (Klassenräume mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) der Studie "Lambertz" in der Wintermessperiode

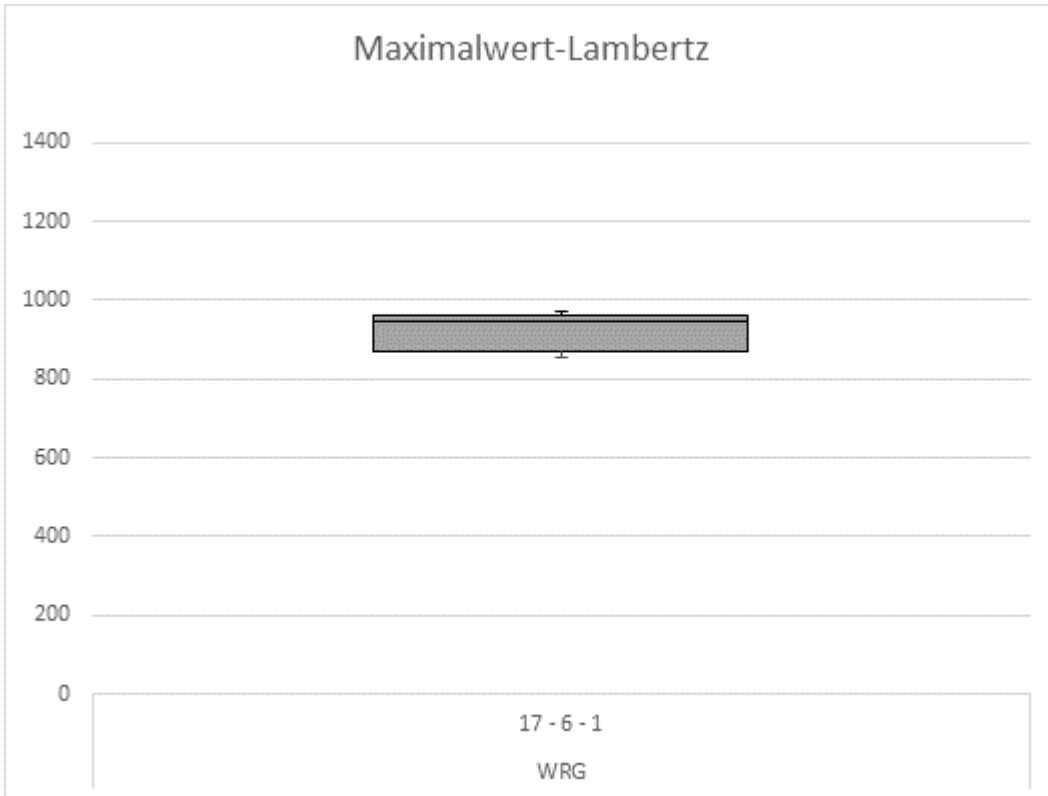


Abbildung E.42: Boxplot für die Maximalwerte (Klassenräume mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) der Studie "Lambertz" in der Wintermessperiode

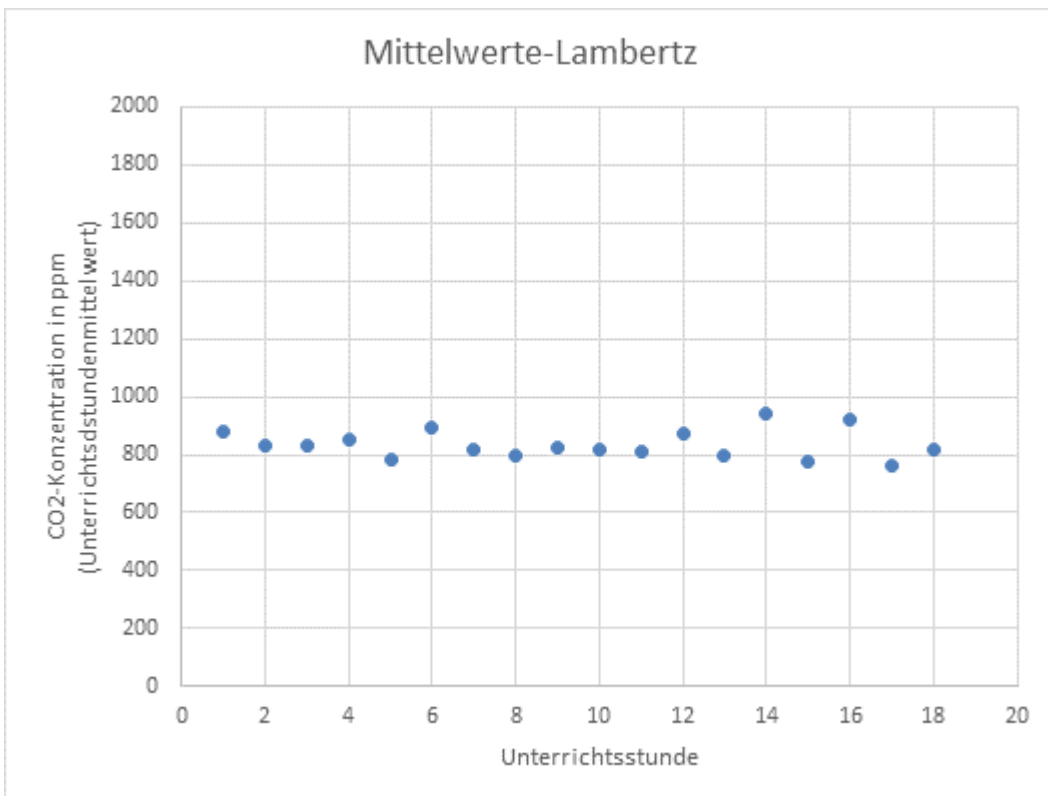


Abbildung E.43: CO₂-Konzentration (Mittelwerte) für die Studie „Lambertz“ (1x Klassenraum mit Abluftanlage, 17x mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung)

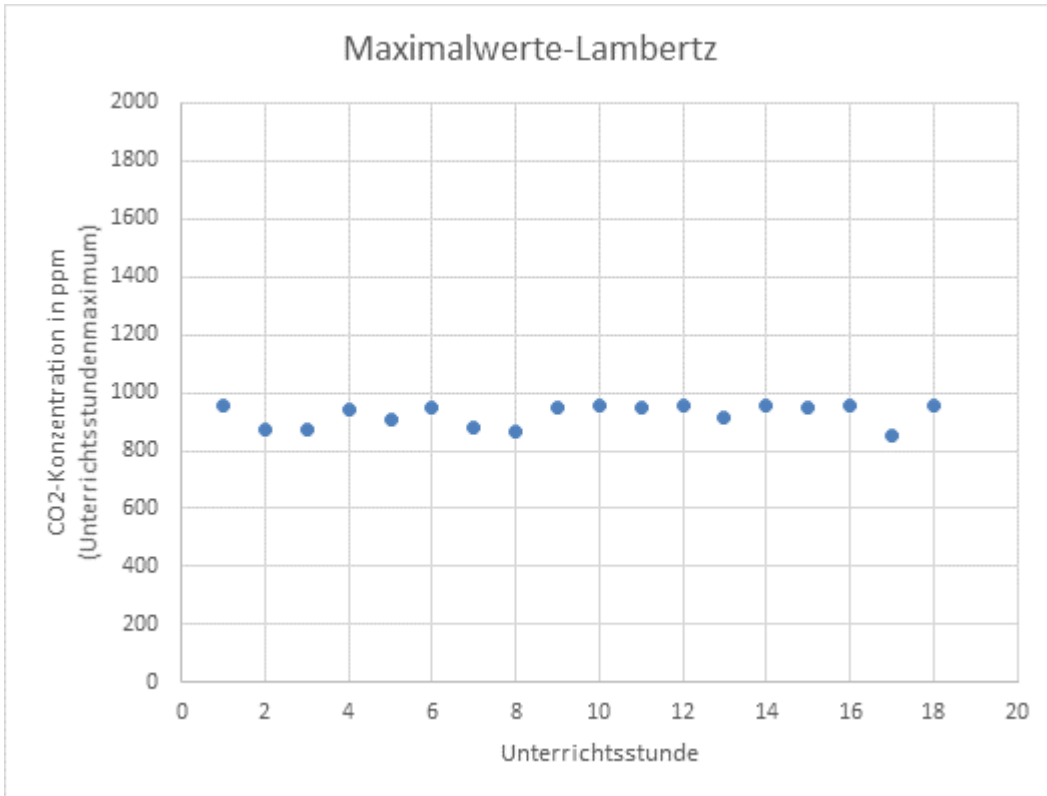


Abbildung E.44: CO₂-Konzentration (Maximalwerte) für die Studie „Lambertz“ (1x Klassenraum mit Abluftanlage, 17x mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung)

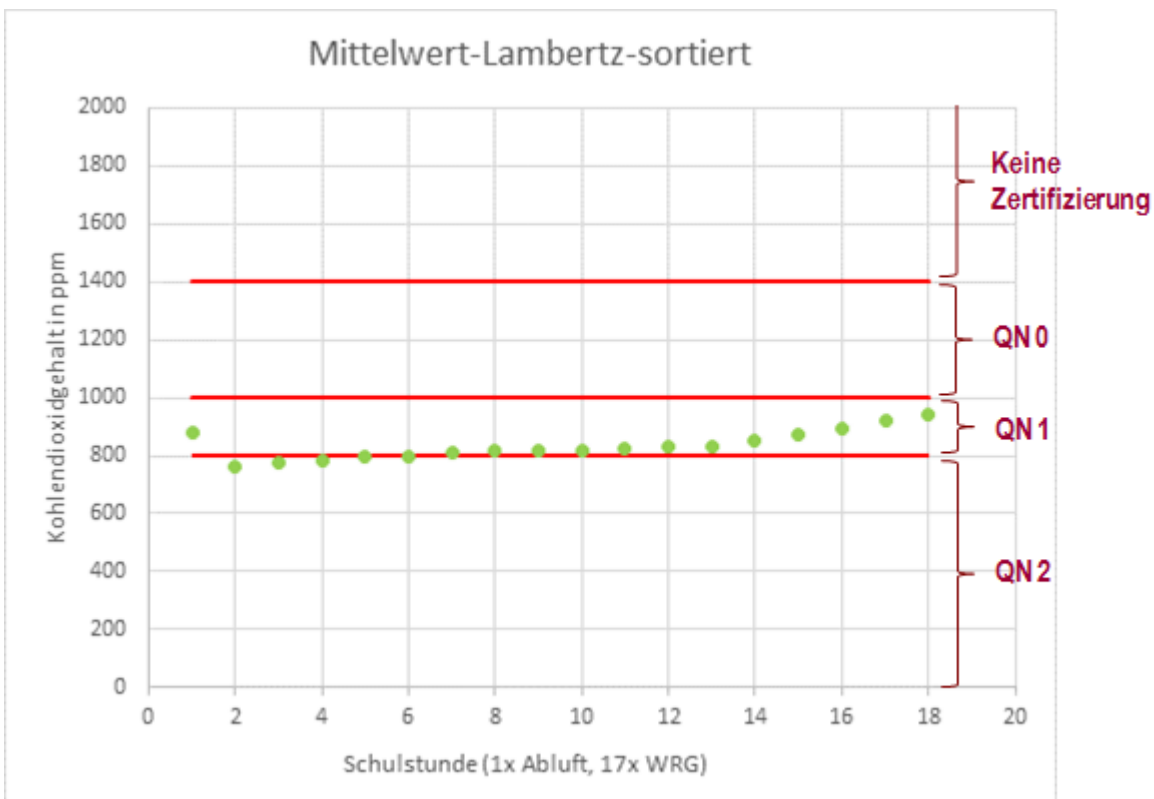


Abbildung E.45: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm der Mittelwerte der Studie "Lambertz" (1x Abluftanlage, 17x Lüftungsanlage mit WRG) mit den Qualitätsniveaus nach BNB (rote Linien QN 2, QN 1 und QN 0, von unten nach oben)

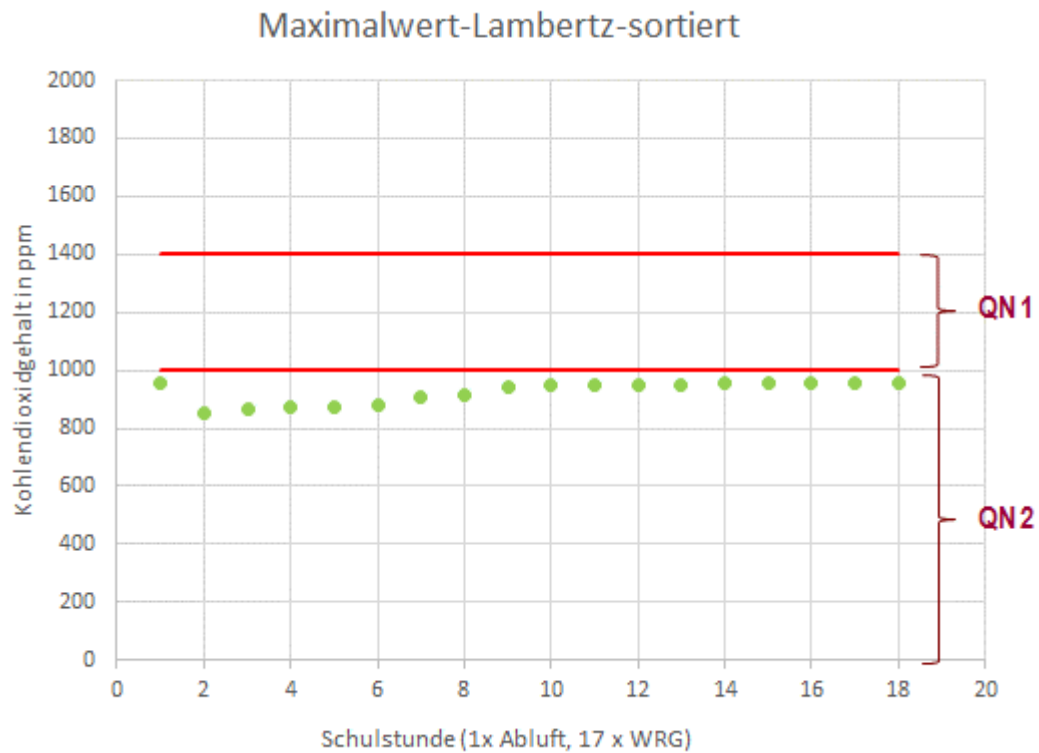


Abbildung E.46: Aufsteigend sortiertes Streudiagramm der Maximalwerte der Studie "Lambertz" (1x Abluftanlage, 17x Lüftungsanlage mit WRG) mit den Qualitätsniveaus QN 2 (untere rote Linie) und QN 1 (obere rote Linie) nach BNB

Studie „Lambertz“ (Teil 2)

Das folgende Diagramm zeigt beispielhaft den Verlauf der Raumtemperatur und der CO₂-Konzentration im Raum 111 von Montag bis Freitag der zweiten Januarwoche (06.- bis 10.01.). Deutlich erkennbar ist die Begrenzung des CO₂-Konzentration nach oben, vermutlich durch das Eingreifen der Lüftungsanlage, sowie die Gleichzeitigkeit von Temperatur- und CO₂-Anstieg durch die Raumnutzung. Unklar bleibt die Raumnutzung am 06.01.; in den anderen erfassten Klassenzimmern dieser Schule findet am 06.01. kein Unterricht statt.

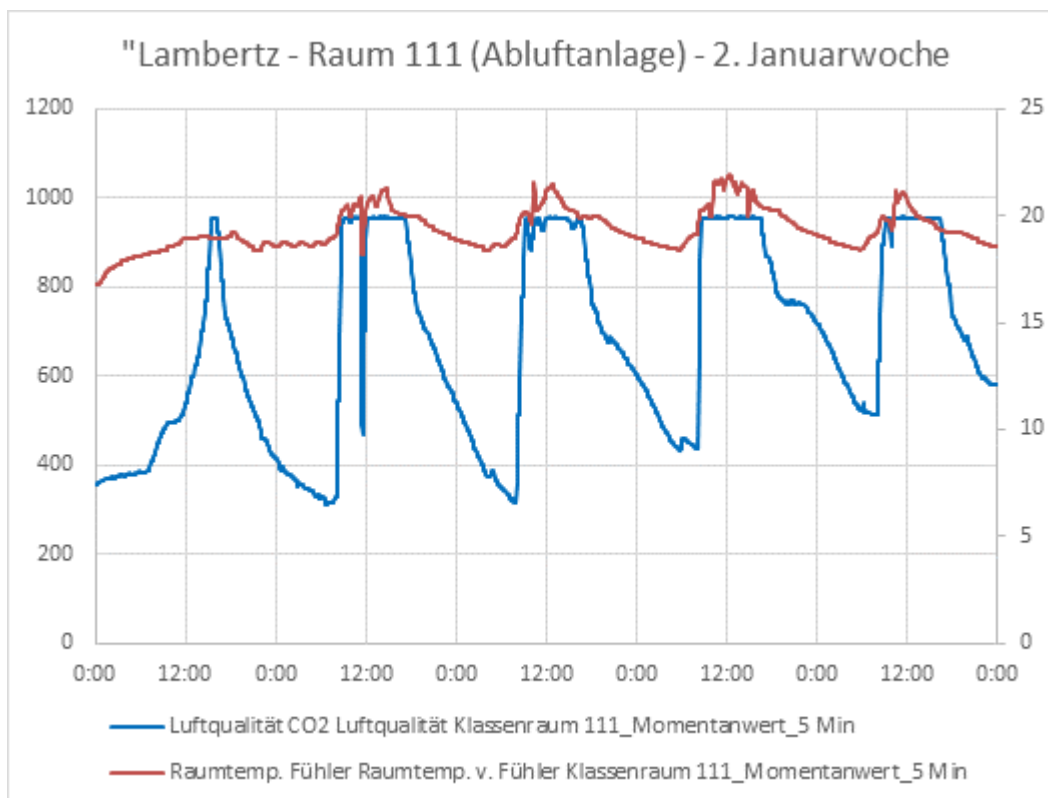


Abbildung E.47: Studie Lambertz, Raum 111: Verlauf der Raumtemperatur und der CO₂-Konzentration von Montag bis Freitag der zweiten Januarwoche (06.- bis 10.01.).

Deutlich erkennbar ist die Begrenzung des CO₂-Konzentration nach oben, vermutlich durch das Eingreifen der Lüftungsanlage, sowie die Gleichzeitigkeit von Temperatur- und CO₂-Anstieg durch die Raumnutzung. Die Raumnutzung am 06.01. ist unklar.

Bei den oben genannten 7 Räumen mit Lüftungsanlage handelt es sich um 2 normale Klassenzimmer mit Abluftanlage, 3 normale Klassenzimmer mit WRG, sowie den Computerraum (Rm123, mit WRG) und die Aula (Rm CO₂, ebenfalls mit WRG). In den normalen Klassenzimmern ergeben sich während der erfassten Schulzeit (8:00 bis 16:00 Uhr) an den erfassten ersten 7 Schultagen (07. bis 15.01.) im untersuchten Januar 2003 folgende Verläufe der CO₂-Konzentration:

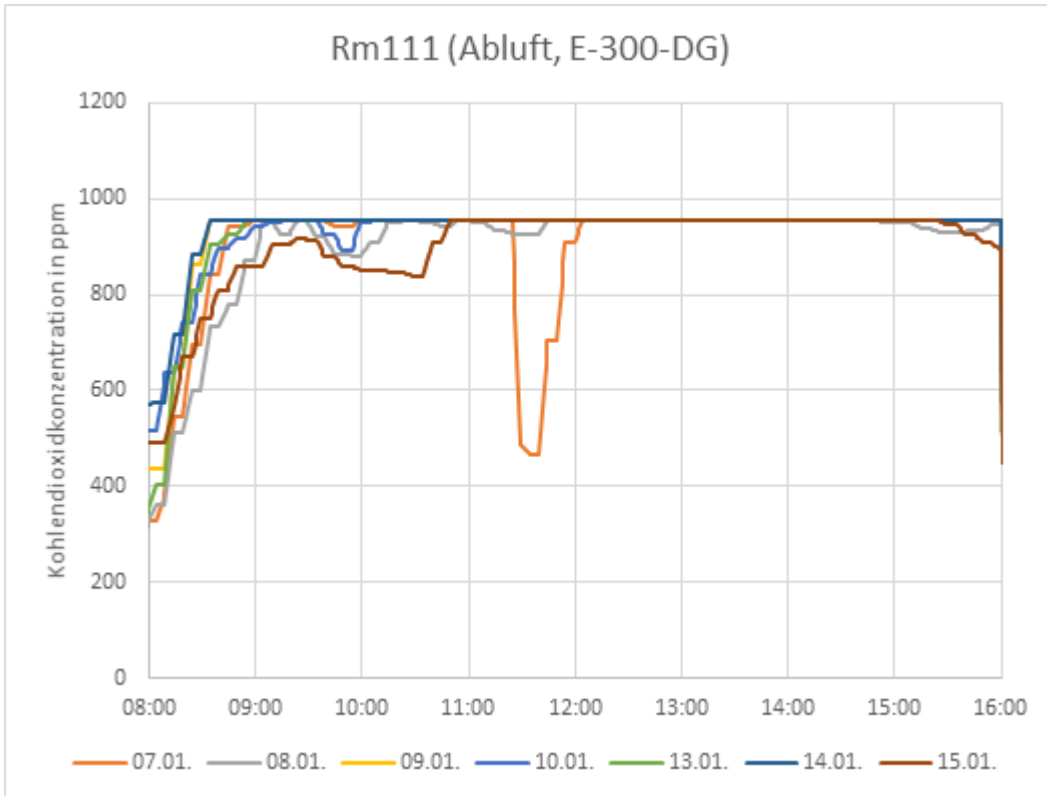


Abbildung E.48: Studie Lambertz, Raum 111: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultage 2003.

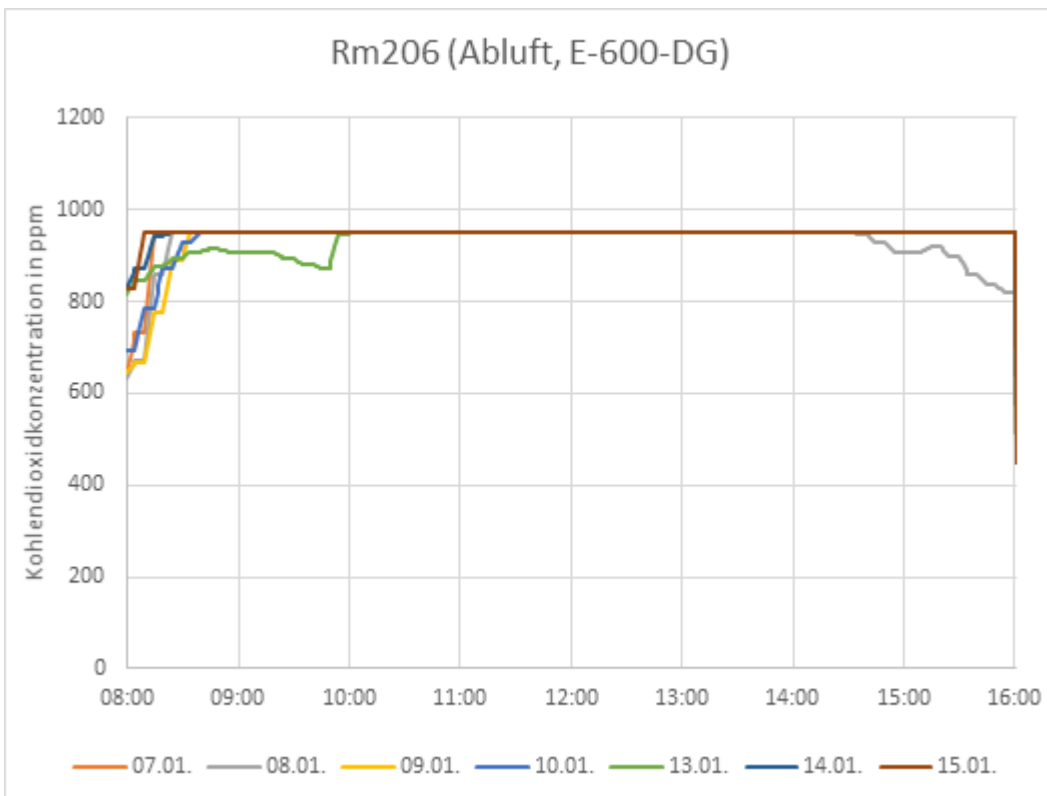


Abbildung E.49: Studie Lambertz, Raum 206: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultage 2003.

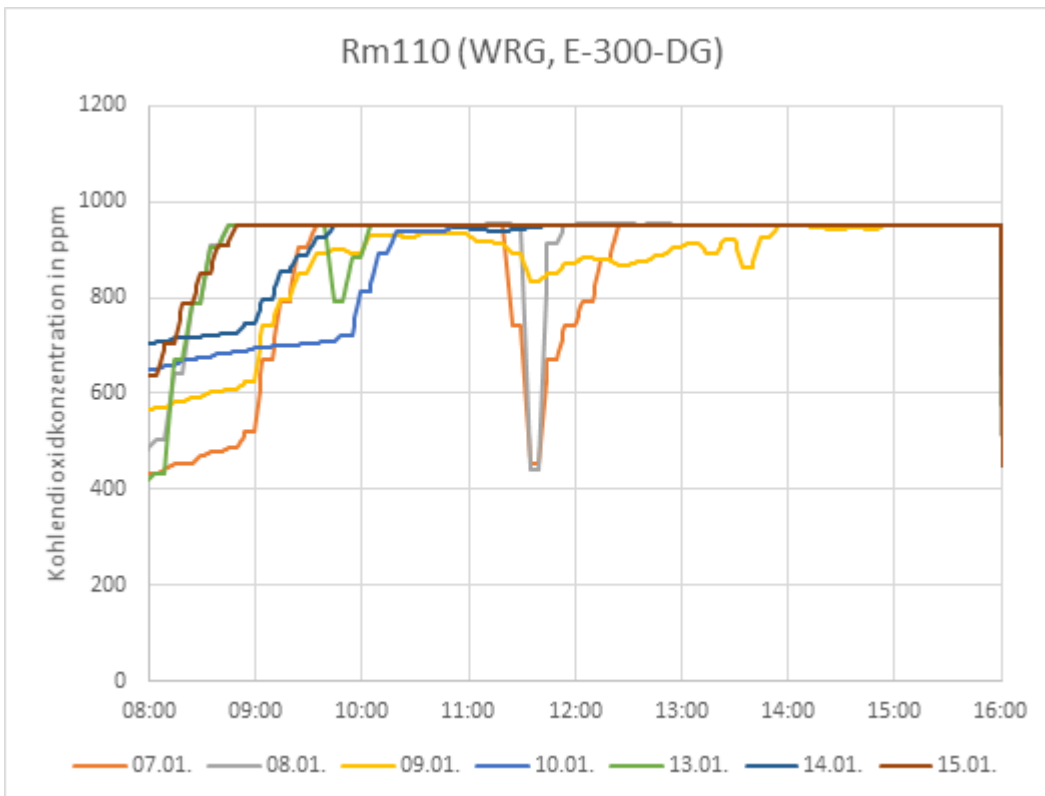


Abbildung E.50: Studie Lambertz, Raum 110: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultage 2003.



Abbildung E.51: Studie Lambertz, Raum 23-2: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultage 2003.

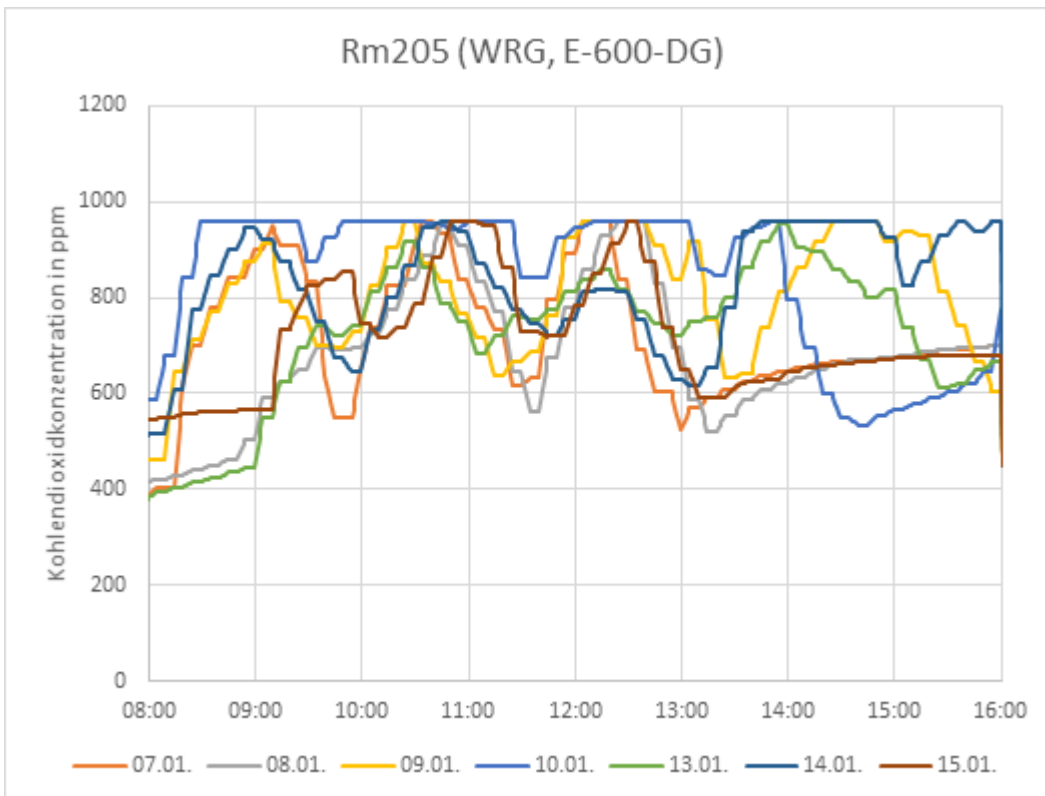


Abbildung E.52: Studie Lambertz, Raum 205: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003.

Weil sich die Nutzung des Computerraums und der Aula deutlich von der eines normalen Klassenzimmers unterscheidet, werden auch der Computerraum (Rm123) und die Aula CO₂ hier nicht weiter berücksichtigt:

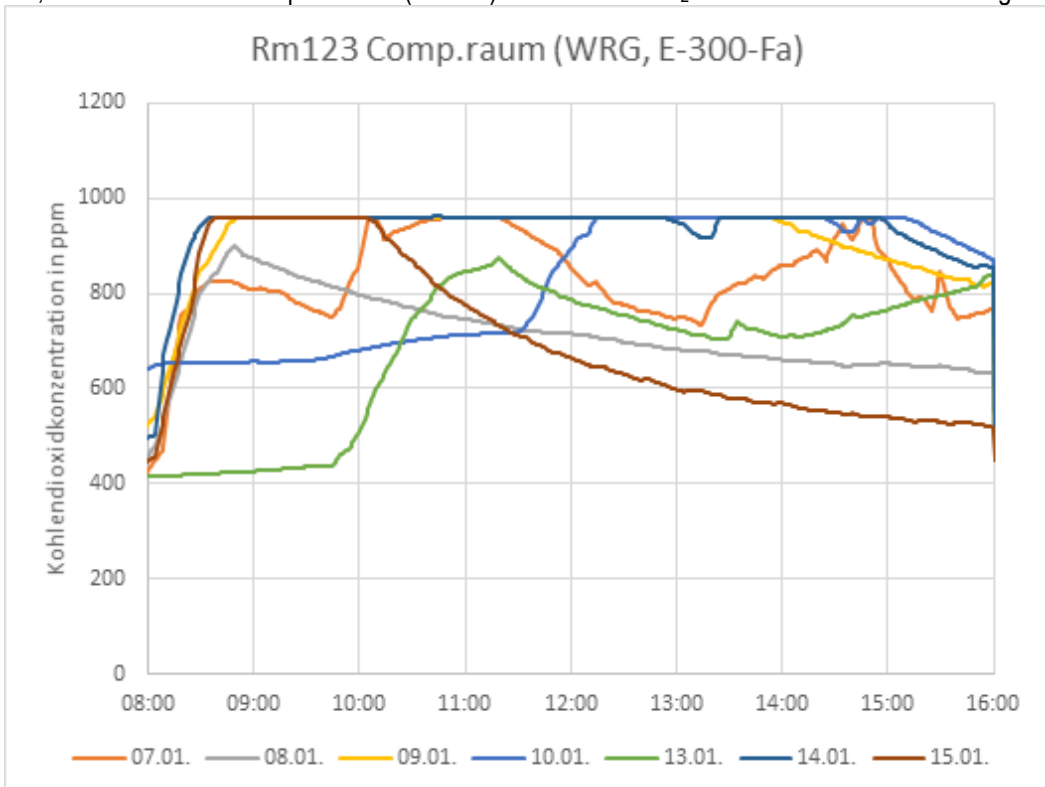


Abbildung E.53: Studie Lambertz, Raum 123 = Computerraum: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Dieser Raum wurde hier nicht weiter berücksichtigt.

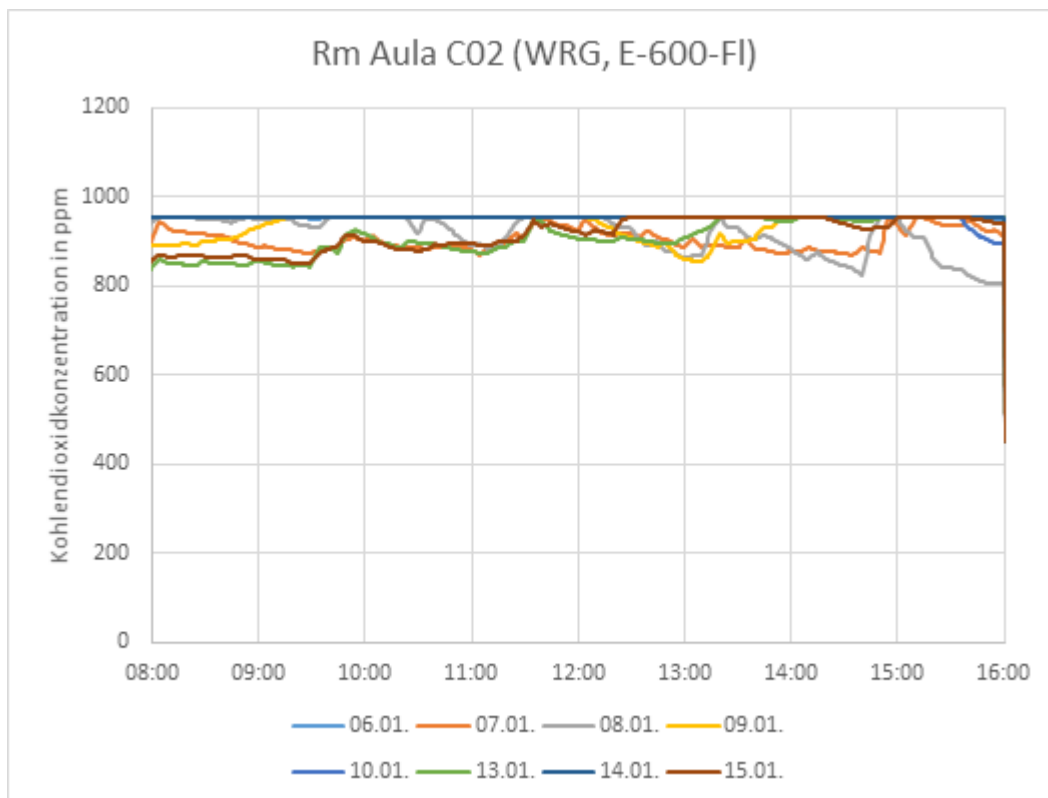


Abbildung E.54: Studie Lambertz, Aula = Raum C02: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Dieser Raum wurde hier nicht weiter berücksichtigt.

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Makros zur Detektion der Schulstunden, der CO₂-Peaks in diesen Schulstunden und zur Selektion derjenigen Peaks, welchen den formulierten Zusatzbedingungen genügen, führen bei diesen überwiegend waagrecht verlaufenden Kurvenverläufen, die vermutlich am eingestellten CO₂-Grenzwert der Lüftungsanlagen verharren (oder am Messbereichsende des CO₂-Sensors??) dazu, dass nur wenige Unterrichtsstunden bzw. Peaks erkannt und ausgewertet werden (konkret: 18 für alle Räume und Tage zusammen). Deshalb wird alternativ zur oben dargestellten Auswertung und damit auch abweichend von der Vorgehensweise bei den anderen Studien eine „händische“ Auswertung der CO₂-Verläufe vorgenommen. Und zwar durchgehend über die gesamte Schulzeit von 8:00 bis 16:00 Uhr, d.h. ohne Unterteilung der Tage in einzelne in Schulstunden, allerdings werden jene Kurvenbereiche in der Auswertung nicht berücksichtigt, bei denen die Betrachtung der Kurvenverläufe vermuten lässt, dass keine Schulstunde stattfand, z.B. morgens vor der ersten Nutzung des Klassenzimmers an diesem Tag, in Pausen, nachmittags nach der letzten Stunde etc. Die so „gestrichenen“ Kurvenbereiche sind in den folgenden Abbildungen ausgekreuzt, und in der darauffolgenden Mittelwertbildung nicht mitefassen.

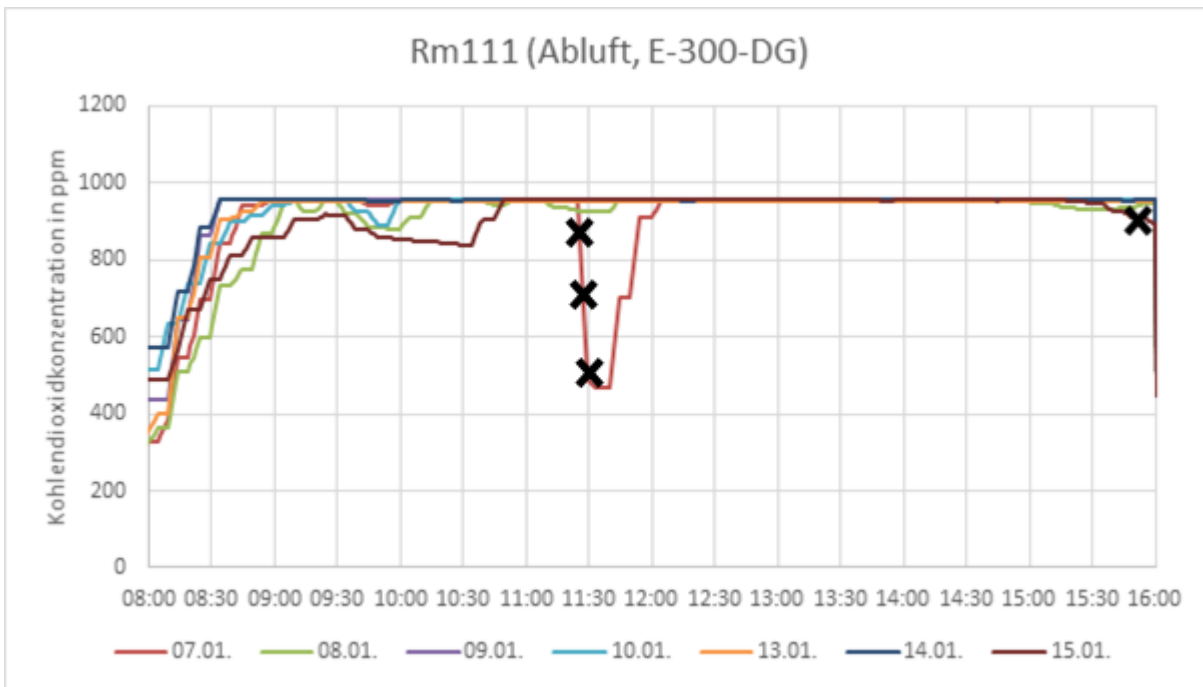


Abbildung E.55: Studie Lambertz, Raum 111: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Jene Kurvenbereiche, bei denen keine Unterrichtsnutzung des Raumes vermutet wird (z.B. Pausen oder Freistunden), sind ausgekreuzt und werden im Folgenden nicht mit ausgewertet.

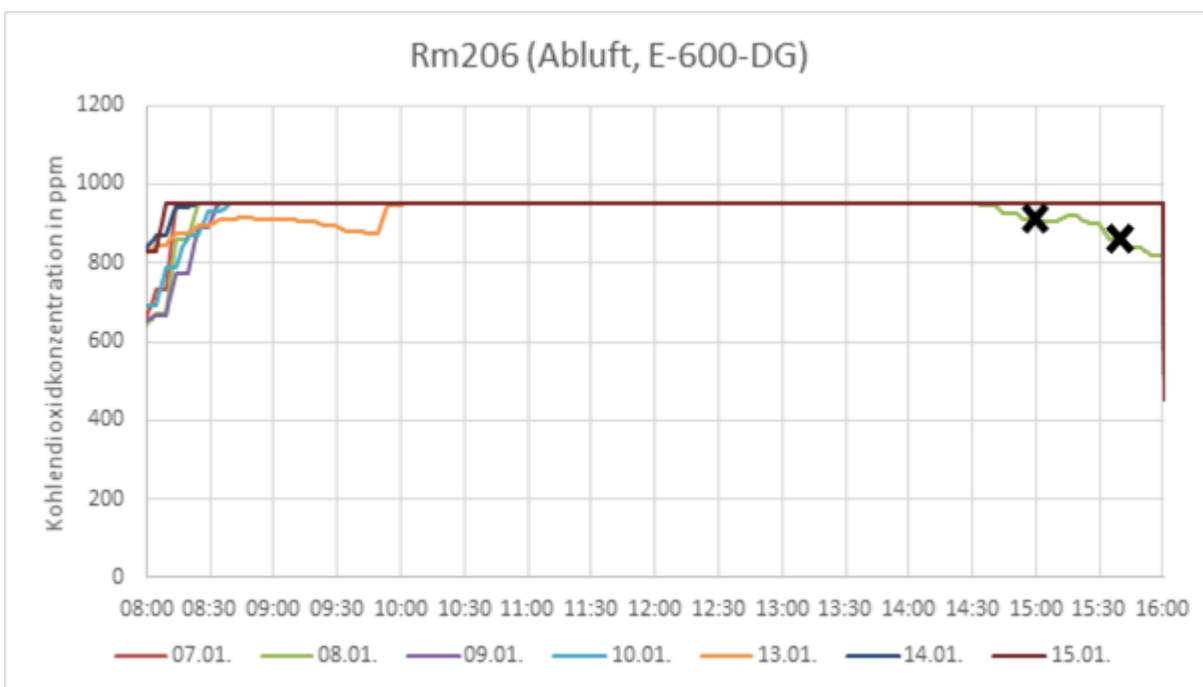


Abbildung E.56: Studie Lambertz, Raum 206: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Jene Kurvenbereiche, bei denen keine Unterrichtsnutzung des Raumes vermutet wird (z.B. Pausen oder Freistunden), sind ausgekreuzt und werden im Folgenden nicht mit ausgewertet.

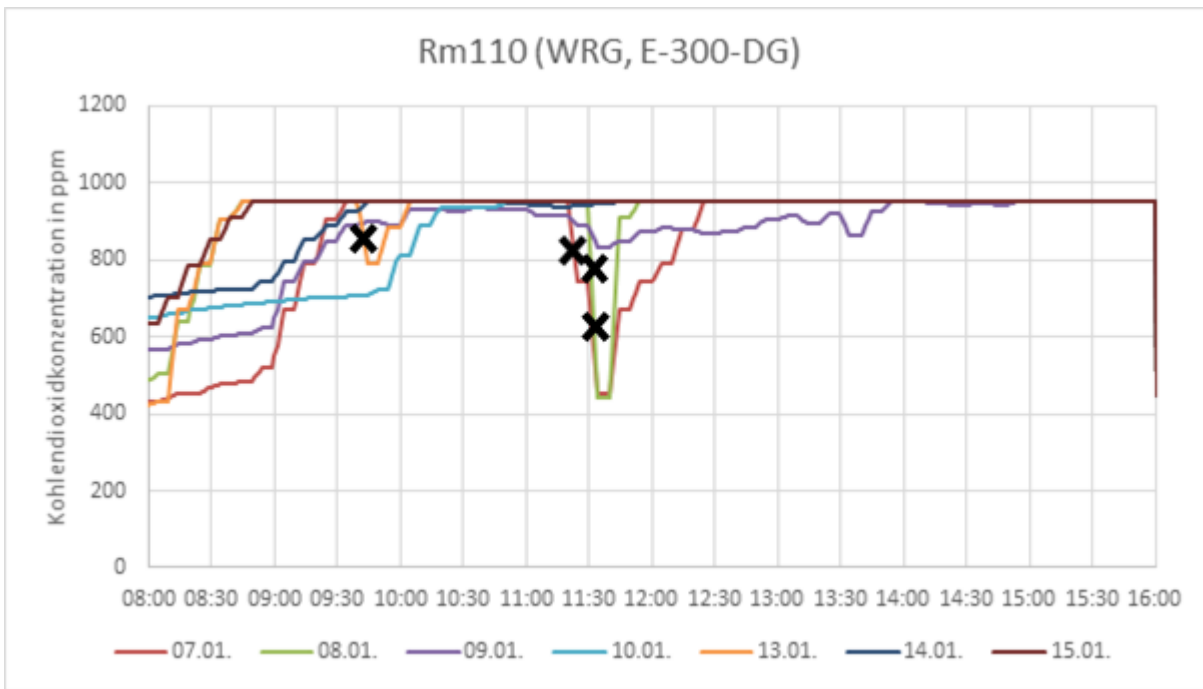


Abbildung E.57: Studie Lambertz, Raum 110: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Jene Kurvenbereiche, bei denen keine Unterrichtsnutzung des Raumes vermutet wird (z.B. Pausen oder Freistunden), sind ausgekreuzt und werden im Folgenden nicht mit ausgewertet.

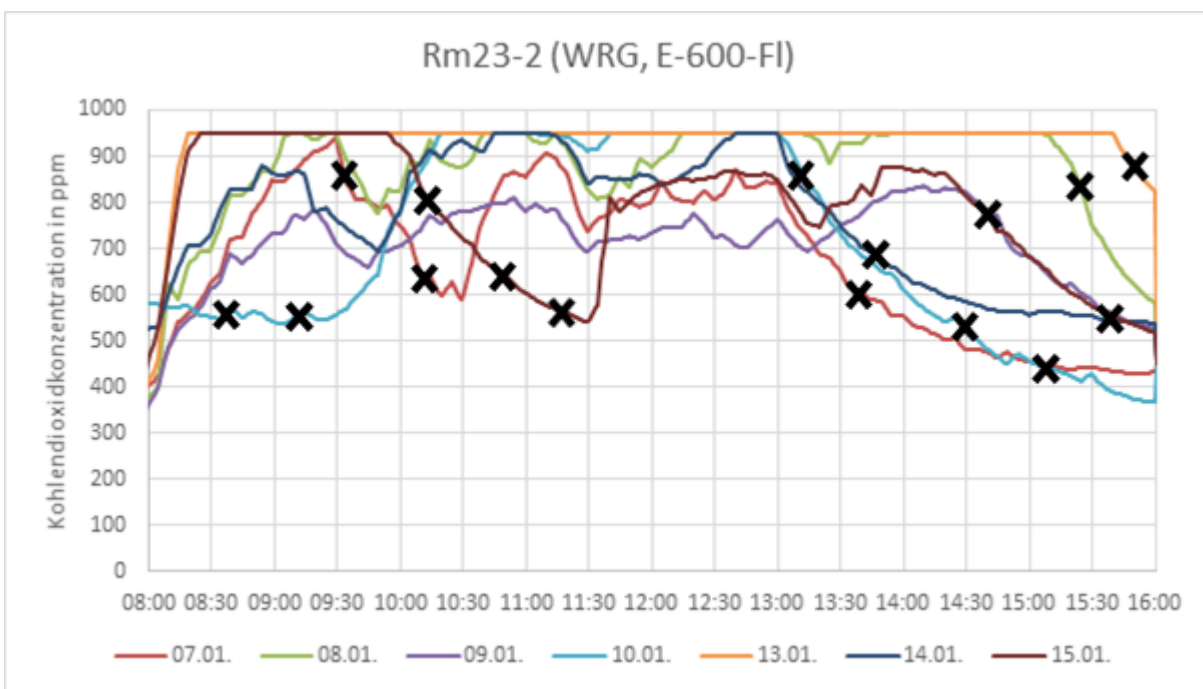


Abbildung E.58: Studie Lambertz, Raum 23-2: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Jene Kurvenbereiche, bei denen keine Unterrichtsnutzung des Raumes vermutet wird (z.B. Pausen oder Freistunden), sind ausgekreuzt und werden im Folgenden nicht mit ausgewertet.

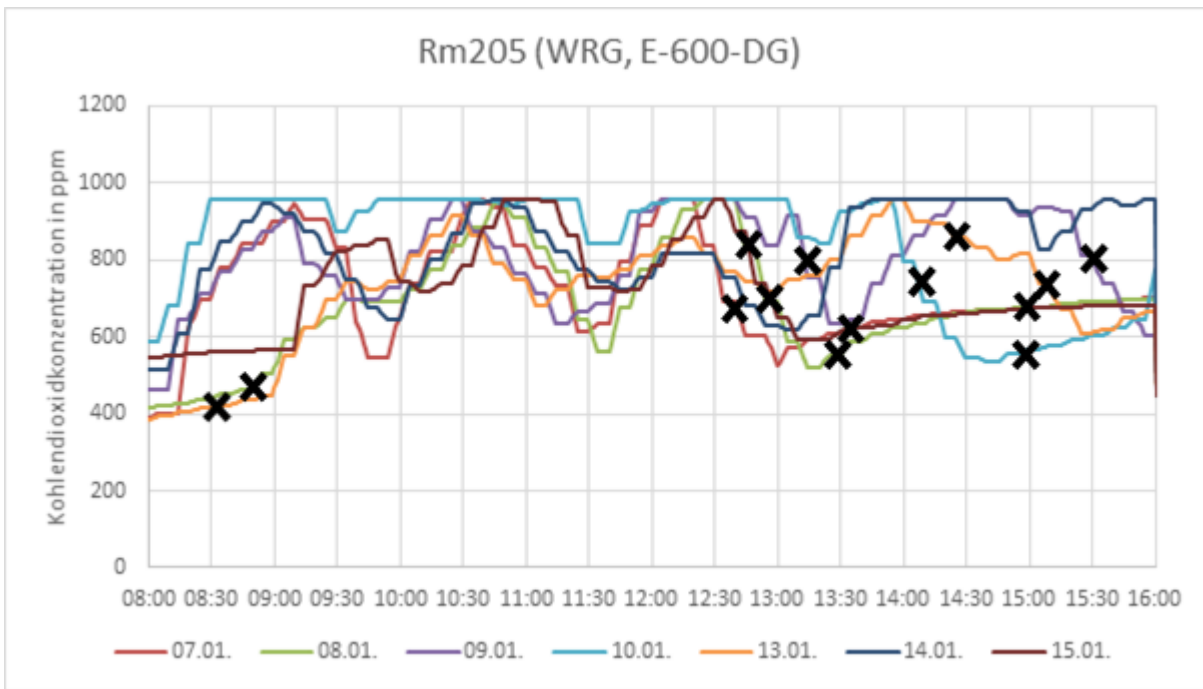


Abbildung E.59: Studie Lambertz, Raum 205: Verlauf der gemessenen CO₂-Konzentration während der erfassten ersten 7 Schultagen 2003. Jene Kurvenbereiche, bei denen keine Unterrichtsnutzung des Raumes vermutet wird (z.B. Pausen oder Freistunden), sind ausgekreuzt und werden im Folgenden nicht mit ausgewertet.

Damit ergeben sich die folgenden Diagramme für die Studie Lambertz:

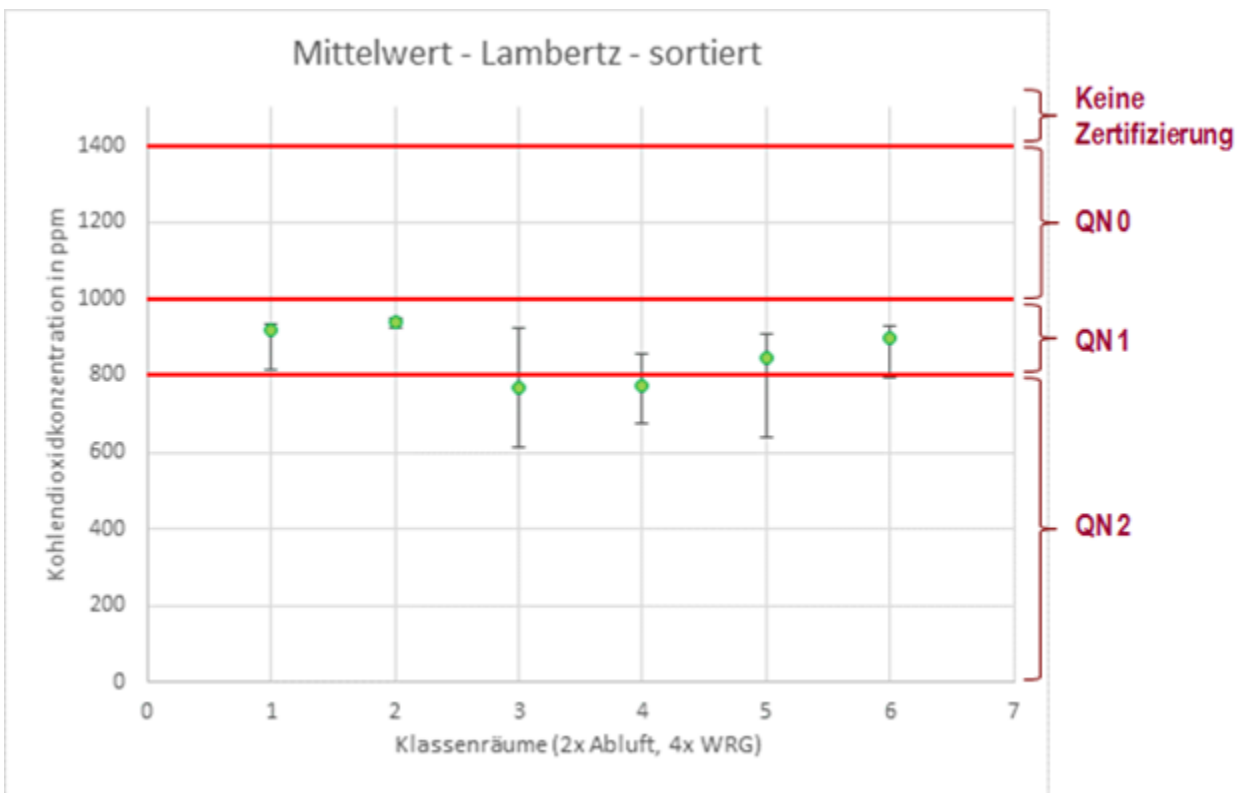


Abbildung E.60: Sortiertes Streudiagramm der Mittelwerte je Klassenraum der Studie "Lambertz" (links: 2x Abluftanlage, rechts: 4x Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) mit den Qualitätsniveaus nach BNB (rote Linien QN 2, QN 1 und QN 0, von unten nach oben).

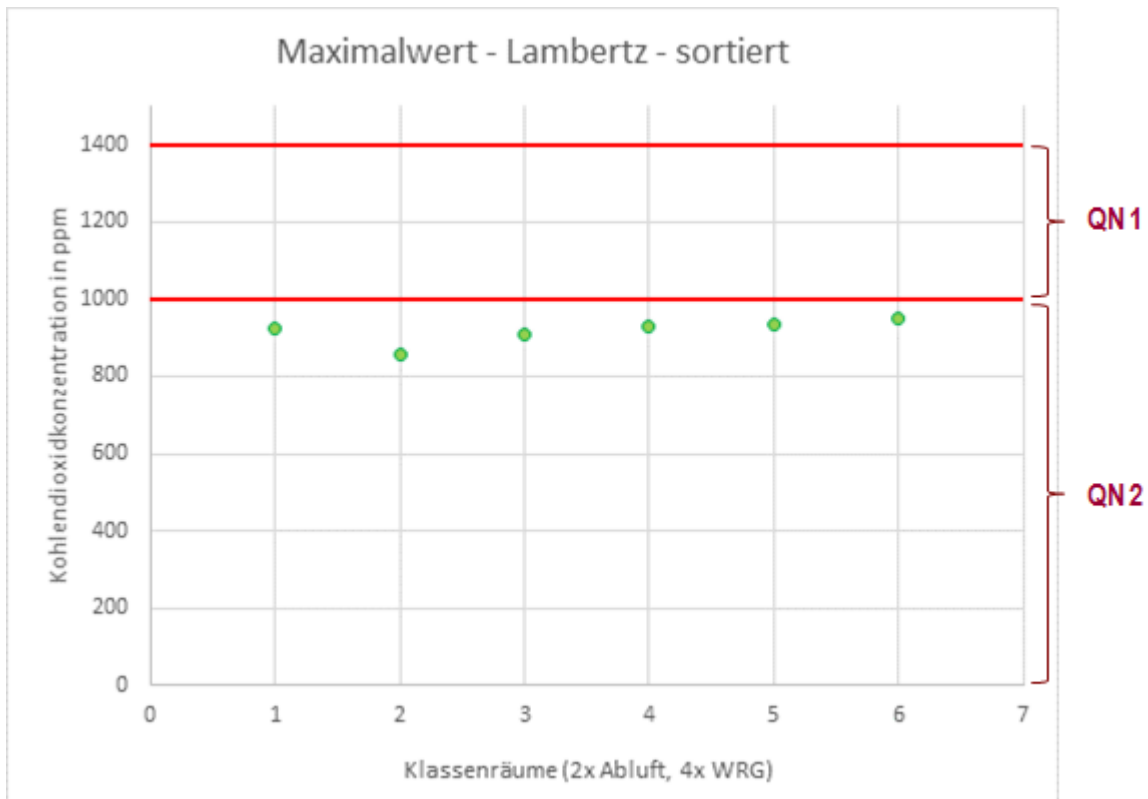


Abbildung E.61: Sortiertes Streudiagramm der Maximalwerte je Klassenraum der Studie "Lambertz" (links: 2x Abluftanlage, rechts: 4x Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) mit den Qualitätsniveaus nach BNB (rote Linien QN 2 und QN 1, von unten nach oben).

Anhang F: Vorträge beim AIVC-Workshop

- Considerations on IAQ metrics from regulatory and compliance point of view – Use of IAQ metrics in practice, Peter Wouters, BBRI, Belgium
- Defining the metrics to assess the IAQ in low-energy residential buildings: results from IEA EBC Annex 68 Subtask 1, Marc Abadie, U. La Rochelle, France
- The promise and problems of performance based ventilation, William P. Bahnfieth, Pennsylvania State University, USA
- What can('t) perceived air quality indices tell you about indoor air quality? Pawel Wargocki, DTU, Denmark
- Indoor carbon dioxide as metric of ventilation and IAQ: Yes or No or Maybe? Andrew Persily, NIST, USA
- IAQ assessment in high performing buildings, Kevin Teichman, Environmental Protection Agency, USA
- Rationale behind current ventilation airflow rates, Wouter Borsboom, the Netherlands
- Concentration versus m³ air per hour – the battle of assessors, Marcel G.L.C. Loomans, Eindhoven University of Technology, the Netherlands
- Status and perspectives for the development of IAQ metrics in the US, Iain Walker, LBNL, USA
- Performance-based control of an adaptive hybrid IAQ system. The user as key performance indicator. Bert Belmans, VU Brussel, Belgium
- Can contaminant air quality indices be used to analyse the risk of airborne cross infections in hospital environments? Manuel Ruiz de Adana Santiago, University of Cordoba, Spain
- Balanced Ventilation Systems: designed, energy efficient and well distributed or can we live healthy without good lungs? Kurt Johnson, Fresh Air Ventilation Systems, USA
- Suitable ventilation in schools – mechanical or natural? Christine Knaus, ITG Dresden, Germany
- Radon measurement for the assessment of IAQ, Tiberiu Catalina, Technical University of Civil Engineering, Romania
- A review of pollutants and sources of concern and performance-based approaches to residential smart ventilation, Gaëlle Guyot, Cerema, France
- Indoor Air Quality and thermal comfort in Irish retrofitted energy efficient homes, Marie Coggins, National University of Ireland, Ireland
- Modelling trade-offs between building energy and health, Catherine Noakes, University of Leeds, UK
- Comparison of different performance-based approaches for the definition of ventilation requirements in dwellings, Samuel Caillou, BBRI, Belgium
- The influence of different ventilation strategies and demand control on the indoor air quality in dwellings, Romy Van Gaever, BBRI, Belgium
- Demand controlled ventilation in residential buildings, Caroline Markusson, SP, Sweden