

CO₂-Messprogramm in Schulgebäuden der Stadt Nürnberg im Zeitraum 2012 bis 2014

Abschlussbericht

Berichtersteller:
Arbeitsgruppe Bau-Umwelt-Gesundheit (bug)

Ersteller:
Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN)
Fachbereich Gebäudeuntersuchungen – SUN/U-M3
Dipl. Ing. Norbert Nix

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1 Einführung	5
2 Messprogramm	7
2.1 Beurteilungsgrundlagen	7
2.2 Auswahl der Messstellen	8
2.3 Dauer des Messprogramms	10
2.4 Messinstrumente	11
2.4.1 Luftgüte-Ampel	11
2.4.2 Klimagriff	12
2.4.3 Klimamessgeräte	13
2.4.4 Klimadaten Außen	13
2.5 Erhebung der Basisdaten	13
2.6 Messdatenerhebung	13
3 Ergebnisse	16
3.1 Überblick	16
3.1.1 Mittlere CO ₂ -Belastung über den gesamten Untersuchungszeitraum	16
3.1.2 CO ₂ -Belastungssituation an den Unterrichtstagen in einem Klassenraum mit zentraler Lüftungsanlage	18
3.1.3 CO ₂ -Belastungssituation an den Unterrichtstagen in einem Klassenraum mit Fassaden-Lüftungsgerät	19
3.1.4 CO ₂ -Belastungssituation an den Unterrichtstagen in Klassenräumen ohne mechanische Lüftung	20
3.1.5 Tagesverläufe der CO ₂ -Raumlufkonzentration in Klassenräumen ohne mechanische Lüftung	21
3.2 CO ₂ -Belastung in den einzelnen Untersuchungsphasen	25
3.2.1 CO ₂ -Belastungssituation in einem Klassenraum mit Fassaden-Lüftungsgerät	25
3.2.2 CO ₂ -Belastungssituation an den Unterrichtstagen in Klassenräumen ohne mechanische Lüftung	26
3.3 Einfluss der Jahreszeiten auf die CO ₂ -Raumlufbelastung	29
3.4 Rückmeldungen	31
3.5 Erfahrungen beim Einsatz der Klimagriffe	32
3.6 Erfahrungen beim Einsatz der Luftgüte-Ampel	33
4 Fazit zur Raumlufthygiene in Klassenräumen	34
4.1 Ist-Situation	34
4.2 Möglichkeiten manueller bzw. mechanischer Lüftungsmaßnahmen	34
4.3 Effekte signalgebender Messinstrumente	35
Anlagen	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Frontansicht einer Luftgüte-Ampel	11
Abbildung 2-3:	Frontansicht des Klimagriffs	12
Abbildung 3-1:	Darstellung der CO ₂ -Belastungssituation in den ausgewählten Klassenräumen als Mittelwert über den gesamten Untersuchungszeitraum	17
Abbildung 3-2:	Darstellung der CO ₂ -Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G01R02, angeschlossen an eine zentrale Lüftungsanlage.	18
Abbildung 3-3:	Darstellung der CO ₂ -Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G02R01 (ausgestattet mit dezentraler Fassaden-Lüftungsanlage)	19
Abbildung 3-4:	Darstellung der CO ₂ -Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G02R02, Grundschule	20
Abbildung 3-5:	Darstellung der CO ₂ -Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G06R01, Gymnasium	21
Abbildung 3-6:	Tagesverläufe der CO ₂ -Raumlufkonzentrationen im Februar 2013 in Raum G06R01, Gymnasium, Phase 04, „Keine-Vorgaben“	22
Abbildung 3-7:	Tagesverläufe der CO ₂ -Raumlufkonzentrationen im Dezember 2013 in Raum G06R01, Gymnasium, Phase 23: „Luftgüte-Ampel“	23
Abbildung 3-8:	Tagesverläufe der CO ₂ -Raumlufkonzentrationen im Dezember 2013 in Raum G02R02, Grundschule, Phase 24, „Klimagriff“	24
Abbildung 3-9:	Vergleich der Spannweiten der CO ₂ -Raumlufkonzentrationen in Raum G02R01, Grundschule, im Zeitraum Januar 2013 bis Mitte April 2014 während der Unterrichtstage in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr	26
Abbildung 3-10:	Vergleich der Spannweiten der CO ₂ -Raumlufkonzentrationen in Raum G02R02, Grundschule, im Zeitraum Januar 2013 bis Mitte April 2014 während der Unterrichtstage in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr	27
Abbildung 3-11:	Vergleich der Spannweiten der CO ₂ -Raumlufkonzentrationen in Raum G06R01, Gymnasium, im Zeitraum Januar 2013 bis Mitte April 2014 während der Unterrichtstage in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr	28
Abbildung 3-12:	Außenlufttemperaturen als Stundenmittelwerte für den Zeitraum 01.01.-31.12.2013 an der Messstelle Flughafen Nürnberg	30
Abbildung 3-13:	Außenlufttemperaturen als Stundenmittelwerte für den Zeitraum 01.01.-31.12.2014 an der Messstelle Flughafen Nürnberg	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	CO ₂ -Konzentration in der Raumluft - Zusammenstellung der Bewertungsgrundlagen	8
Tabelle 2-2:	Liste der Auswahlkriterien für die Messstellen des CO ₂ -Messprogramms	8
Tabelle 2-3:	Liste der für das CO ₂ -Messprogramm ausgewählten Messstellen	9
Tabelle 2-4:	Luftgüte-Ampel - Bedeutung der Signale	11
Tabelle 2-5:	Klimagriff - Bedeutung der Signale	12
Tabelle 2-6:	Luftgüte-Ampel - Beschreibung der Geräteeinstellung und der erforderlichen Maßnahmen während der Phasen der Luftgüte-Ampel (CO ₂ -Konzentration in ppm)	14
Tabelle 2-7:	Klimagriff - Beschreibung der Geräteeinstellung und der erforderlichen Maßnahmen während der Phasen des Klimagriffs	14
Tabelle 2-8:	Einteilung der Messreihen	15

1 Einführung

Zwischen September 2009 und Juli 2011 wurden in insgesamt 17 Nürnberger Schulen und Kindertagesstätten im Rahmen des Konjunkturpakets II Maßnahmen zur energetischen Sanierung durchgeführt. Dabei wurden neue Fenster eingesetzt und die Fassaden gedämmt. Nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen wurden Messungen zur Überprüfung der Raumluftqualität durchgeführt.

Neben der Bestimmung der VOCs¹ wurden dabei auch Kohlendioxid-Messungen während der Unterrichtsstunden ausgeführt^{2,3}. Die Konzentration an Kohlendioxid (CO₂) ist eine Indikatorgröße für die hygienische Qualität der Innenraumluft: Je höher die Konzentration, umso schlechter ist die hygienische Raumluftsituation⁴. Es zeigte sich, dass die Raumluftqualität in den untersuchten Klassenräumen unabhängig davon, ob die Belüftung über eine mechanische Lüftungsanlage oder über freie Fensterlüftung erfolgt, häufig nicht den hygienischen Anforderungen entsprach, wie sie z.B. im „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamtes⁵ gefordert werden.

In den sanierten Räumen ohne mechanische Lüftung wurden regelmäßig über längere Zeitintervalle hinweg CO₂-Konzentrationen im hygienisch inakzeptablen Bereich (> 2000 ppm) gemessen⁶. Aber auch in den nicht energetisch sanierten Schulgebäuden war die Lüftungssituation nicht ideal.

In Räumen mit mechanischer Lüftung stellte sich die Situation etwas besser dar. Jedoch lagen die CO₂-Konzentrationen auch hier regelmäßig im hygienisch auffälligen Bereich (>1000 - <2000 ppm).

Durch eine zu hohe CO₂-Konzentration lässt das Konzentrationsvermögen nach und man fühlt sich müde. Dies wurde jüngst durch eine amerikanische Studie erneut belegt⁷. Die Studie zeigte, dass bei den Probanden schon ab einer CO₂-Konzentration von 1.000 ppm die Leistungsfähigkeit merklich und bei 2.500 ppm deutlich sank.

In der Sitzung „Runder Tisch zur CO₂-Belastung in Schulgebäuden“ am 28.03.2012, an dem Vertreter des Geschäftsbereich 3, Bürgermeister, des Umweltreferates und des Baureferates teilnahmen, wurde ein CO₂-Untersuchungsprogramm zur Beantwortung folgender Fragestellungen beschlossen:

¹ volatile organic compound = flüchtigen organischen Verbindungen

² SUN-Bericht Nr.: 10230-16-2012, Zur CO₂-Problematik in Räumen energetisch sanierter Schulen und Kindertagesstätten

³ SUN-Bericht Nr.: 10230-20-2012, Ergebnis der Raumluftuntersuchungen nach energetischer Modernisierung

⁴ Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden; Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 2008 – 51:1358-1369

⁵ Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“, Berlin, 2008.

⁶ SUN-Bericht Nr.: 10230-18-2012, Zur CO₂-Problematik in Räumen energetisch sanierter Schulen und Kindertagesstätten, 2012

⁷ U.Satish, M.J.Mendell et al; Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance; Environmental Health Perspectives, Vol.120, No.12, December 2012

- Ist hinsichtlich CO₂ eine hygienisch unbedenkliche Raumluftsituation über eine freie Lüftung erreichbar (manuelle Fensterlüftung, Fassadendurchbrüche, innenliegende Schächte)?
- Können signalgebende Messgeräte unter vertretbarem personellen Aufwand wesentlich zur Verbesserung der Raumlufthqualität beitragen?
- Ist der Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen zur Gewährleistung hygienisch unbedenklicher CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen zwingend erforderlich?

Dabei sollten möglichst alle Schularten erfasst und deren unterschiedliche Bauzustände hinsichtlich des geltenden energetischen Standards berücksichtigt werden.

Durch die Arbeitsgruppe bug wurde dazu ein CO₂-Messprogramm⁸ erarbeitet, welches zwischen Dezember 2012 und Juli 2013 in ausgewählten Klassenräumen, die nach zuvor festgelegten Kriterien ausgesucht wurden, durch SUN/U durchgeführt wurde. Dabei kamen auch zwei signalgebende Messgeräte, die Luftgüte-Ampel und der Klimagriff, zum Einsatz.

Im Juli 2013 wurden dem Stadtrat mit dem Bericht „Bedeutung und Bewertung der Kohlendioxid-Belastung der Luft in Schulgebäuden“⁹ erste Ergebnisse des CO₂-Messprogramms als Zwischenbericht der Arbeitsgruppe bug vorgelegt. Der Stadtrat erteilte den Auftrag zur Fortführung des CO₂-Messprogramms.

In einer zweiten Untersuchungsphase, welche die Monate September 2013 bis April 2014 und damit die kältere Jahreszeit umfasste, wurden die zuvor optimierten Geräteeinstellungen der signalgebenden Messgeräte (Luftgüte-Ampel bzw. Klimagriff) im Schulalltag weiter getestet.

⁸ SUN-Bericht Nr.: 10230-30-2012, CO₂-Messprogramm in Schulen der Stadt Nürnberg, Beschreibung des Messprogramms

⁹ SUN-Bericht Nr.: 10230-31-2013, Erste Ergebnisse aus dem CO₂-Messprogramm in Schulen der Stadt Nürnberg

2 Messprogramm

Mit dem Messprogramm sollten die CO₂-Belastungssituationen in verschiedenen Schulen der Stadt Nürnberg in Abhängigkeit von der Nutzungsform der Räume und der außen-klimatischen Rahmenbedingungen erfasst und beurteilt werden. Die Möglichkeiten einer Einflussnahme auf das Nutzerverhalten sollte durch die Verwendung signalgebender Messgeräte getestet werden.

2.1 Beurteilungsgrundlagen

Für die Beurteilung der CO₂-Konzentrationen in der Innenraumluft und der damit verbundenen Raumluftqualität gibt es verschiedene Vorgaben. Zum einem sind es die DIN-Normen DIN EN 13779 und DIN EN 15251, zum anderen die Festlegung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte (Tabelle 2-1).

Die Leitwerte der Ad-hoc-AG IRK/AOLG (3 Wertestufen) beschreiben die aktuellen CO₂-Konzentrationen (Momentanwerte) mit einem Messintervall von < 2 min, und haben nicht die über eine Schulstunde gemittelten Werte, wie sie z.B. in der VDI 6040-1¹⁰ gefordert werden, als Grundlage. Der wesentliche Unterschied zwischen den DIN-Vorschriften und den Vorgaben der Ad-hoc-AG IRK/AOLG besteht darin, dass die DIN-Anforderungen für einen Mindeststandard stehen, die Vorgaben der Ad-hoc-AG IRK/AOLG hingegen Leitwerte für die „gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft“ darstellen. Diese werden im Folgenden für die Beurteilung der Ergebnisse herangezogen.

Die DIN EN 13779:2007-09¹¹ regelt die allgemeinen Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme in Nichtwohngebäuden, die in vier Wertestufen IDA 1 (=Indoor Air 1) bis IDA 4 unterteilt sind.

Die DIN EN 13779:2007-09 ersetzt seit 2005 die DIN 1946 Teil 2, die für Schulen mit technischen Lüftungseinrichtungen einen CO₂-Wert von 1.500 ppm als hygienischen Richtwert vorgegeben hatte. Diese CO₂-Konzentration gilt mittlerweile als „hygienisch auffällig“ (Ad-hoc-AG IRK/AOLG¹²) bzw. kennzeichnet schon eine „niedrige Qualität“ (IDA 4).

Mit der Einführung der DIN EN 15251:2007¹³ wurden die Bewertungskriterien der DIN EN 13779 auch für nichtindustrielle Gebäude übernommen. Auch hier wird in vier Wertestufen I, II, III und IV unterteilt.

Der „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamtes¹⁴ beinhaltet für CO₂ die Leitwerte der Ad-hoc-AG IRK/AOLG (2008) und die Klassifizierung der

¹⁰ VDI 6040-1 – Raumlufttechnik, Schulen, Anforderungen – Pkt.4.3 Kohlendioxidkonzentration

¹¹ DIN EN 13779:2007-09 – Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme

¹² Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden; Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 2008 – 51:1358-1369

¹³ DIN EN 15251:2007 – Eingangssparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik

¹⁴ Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“, Berlin, 2008.

Raumluftqualität nach DIN EN 13779:2007-09 und fordert im Schulbereich die Erarbeitung von Konzepten zur Einhaltung der Leitwerte.

Tabelle 2-1: CO₂-Konzentration in der Raumluft - Zusammenstellung der Bewertungsgrundlagen

Einstufung und Bewertung nach DIN EN 13779 DIN EN 15251				Einstufung nach Ad-hoc-AG IRK/AOLG 2008
≤ 800 ppm CO ₂	IDA 1	hohe Qualität	---	<1.000 ppm CO ₂ Hygienisch unbedenklich; keine weiteren Maßnahmen
	I	hohes Erwartungsmaß	für empfindliche und anfällige Personen	
>800-1.000 ppm CO ₂	IDA 2	mittlere Qualität	---	1.000-2.000 ppm CO ₂ Hygienisch auffällig; bei Überschreitung eines Wertes von 1.000 ppm CO ₂ soll gelüftet werden sowie Lüftungsmaßnahmen /-verhalten sind zu überprüfen und verbessern
	II	normales Erwartungsmaß	für neue und renovierte Gebäude	
>1.000-1.400 ppm CO ₂	IDA 3	mäßiges Qualität	---	>2.000 ppm CO ₂ Hygienisch inakzeptabel; bei Überschreitung eines Wertes von 2.000 ppm CO ₂ muss gelüftet werden. Die Belüftbarkeit des Raumes bzw. weitergehende Maßnahmen sind zu prüfen.
	III	moderates Erwartungsmaß	kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden	
>1.400 ppm CO ₂	IDA 4	niedrige Qualität	---	
	IV	außerhalb obiger Kategorien	nur für einen begrenzten Teil des Jahres anwendbar	

2.2 Auswahl der Messstellen

Ausgehend von den schon aus früheren Untersuchungen vorliegenden Ergebnissen wurden in weiteren Schulen Messungen durchgeführt. Um ein möglichst flächendeckendes Ergebnis zu erhalten, waren die Objekte an Hand der folgenden Kriterien (Tabelle 2-2) ausgewählt worden.

Tabelle 2-2: Liste der Auswahlkriterien für die Messstellen des CO₂-Messprogramms

Kriterium	Bedingungen		
A	Schulen, in denen in der jüngeren Vergangenheit bauliche Verbesserungen und energetische Teilsanierungen erfolgt sind		
B	Schulen, in denen keine Sanierung erfolgte und in denen aus Sicherheitsgründen Fenster verschraubt wurden, und somit nur eine eingeschränkte Lüftungsmöglichkeit besteht		
C	Schulen, in denen keine Sanierung erfolgte und die als beschwerdefrei gelten.		

In Zusammenarbeit von Schulverwaltungsämtern, Hochbauamt, Umweltanalytik und Gesundheitsamt wurde unter Berücksichtigung der genannten Kriterien eine Vorschlagsliste erstellt, aus der die in Tabelle 2-3 aufgelisteten Schulen ausgewählt wurden.

Tabelle 2-3: Liste der für das CO₂-Messprogramm ausgewählten Messstellen

Objekt- kennung	Anwesen – Typ – Schule Raum		renoviert	saniert	Fenster	Baujahr
Schulen, die das Kriterium A erfüllen						
<u>Schule 01: Grundschule</u>						
G01R01	Raum 105		nein	nein	Altbestand	ca. 1950
G01R02	Raum 203 - RLT-Anlage		nein	saniert	neue Fenster, 2011	ca. 1950
<u>Schule 02: Grundschule</u>						
G02R01	Raum 005 - RLT-Anlage		nein	saniert	neue Fenster, 2011	1955
G02R02	Raum 014		nein	nein	Altbestand	1955
Schulen, die das Kriterium B erfüllen						
<u>Schule 03: Hauptschule</u>						
G03R01	Raum 211		nein	nein	Altbestand	1900 1950
G03R02	Raum 303		nein	nein	Altbestand	1900 1950
<u>Schule 04: Grundschule</u>						
G04R01	Raum 203		nein	nein	z.T. neue Fenster, 2012	1912 1970
G04R02	Raum 206		nein	nein	z.T. neue Fenster, 2012	1912 1970
Schulen, die das Kriterium C erfüllen						
<u>Schule 05: Berufliche Schule</u>						
G05R01	Raum A126		teil- renoviert	nein	neue Fenster	1929 1960
G05R02	Raum B005		teil- renoviert	nein	neue Fenster	1929 1960
<u>Schule 06: Gymnasium</u>						
G06R01	Raum 018		teil- renoviert	nein	neue Fenster	1960
G06R02	Raum 218		teil- renoviert	nein	neue Fenster	1960

Die Schulen 01 und 02, die schon in den Voruntersuchungen über den Wirkungsvergleich nachträglich eingebauter technischer Lüftungen untersucht worden waren, wurden in die vorliegende Studie aufgenommen, um den Vergleich der Raumlufthqualität bei mechanischer Belüftung mit der bei freier Fensterlüftung ermöglichen zu können.

Pro Schule wurden zwei Klassenräume ausgewählt, die auf unterschiedlichen Geschossen und in verschiedenen Gebäudeteilen lagen. Die geografische Ausrichtung der Referenzräume sollte dabei der der meisten regelmäßig genutzten Klassenräume entsprechen.

2.3 Dauer des Messprogramms

Das Programm wurde als kontinuierlicher Prozess angelegt, bei dem die gemachten Erfahrungen direkten Einfluss auf die nachfolgenden Messungen hatten und so zu verbesserten Nachfolgesituationen führen sollten.

Da das Lüftungsverhalten mit dem Wechsel der Jahreszeiten variiert, waren Wiederholungen der Messzyklen notwendig: Wird im Winter oft auf das Lüften verzichtet, sei es der Kälte wegen, oder um Heizkosten zu sparen, wird im Sommer, so es die örtlichen Gegebenheiten erlauben, intensiv gelüftet. Liegen die Objekte allerdings an oder in der Nähe stark befahrener Straßen, so ist auch im Sommer die Lüftung über die Fenster auf Grund der lauten Außengeräusche in der Regel nur eingeschränkt möglich.

Der erste Untersuchungszeitraum des Messprogramms erstreckte sich über drei Jahreszeiten, beginnend Anfang Dezember 2012, und endend zum Schuljahresende 2012/13. Zwischen dem 07. Januar 2013 und dem Schuljahresende am 30. Juli 2013 lagen, getrennt durch Ferienzeiten, vier Unterrichtszeiträume von je 5-6 Wochen. In diesen Zeiträumen wurden unterschiedliche Teilstudien durchgeführt.

Mit dem Beginn des neuen Schuljahres 2013/14 startete der zweite Untersuchungszeitraum des Messprogramms, der sich ebenfalls über drei Jahreszeiten von Mitte September 2013 bis Mitte April 2014 erstreckte. Im Zeitraum 12. September 2013 bis 11. April 2014, dem letzten Schultag vor den Osterferien, lagen, getrennt durch Ferienzeiten, wiederum vier Unterrichtszeiträume von je 5-8 Wochen. In diesen Zeiträumen wurden die Reaktionen auf die Klimagriffe und auf die Luftgüte-Ampel genauer untersucht.

2.4 Messinstrumente

2.4.1 Luftgüte-Ampel



Abbildung 2-1: Frontansicht einer Luftgüte-Ampel

Funktionsweise und Einstellungen der Luftgüte-Ampel

Abbildung 2-1 zeigt die Front einer Luftgüte-Ampel. Mit der Luftgüte-Ampel¹⁵ lässt sich die CO₂-Konzentration im Raum bestimmen. Das Gerät speichert alle 60 Sekunden den gemessenen Wert. Die Speicherkapazität reicht für einen Messzeitraum von sieben Tagen aus. Danach werden zwar die aktuellen Messwerte weiter angezeigt, jedoch nicht mehr gespeichert. Erst nachdem der Speicher ausgelesen und das Gerät neu initialisiert wurde, können weiter Messdaten registriert werden. Der interne Gerätespeicher wird mit einer speziellen Software ausgelesen. Die Geräte müssen an der Stromversorgung angeschlossen bleiben. Wird das Gerät vom Netz genommen, muss es neu initiiert werden, die Daten im Speicher bleiben dabei erhalten.

Die Luftgüte-Ampel ist ein signalgebendes Messgerät. Über verschiedenfarbige LEDs und ein akustisches Signal wird das Erreichen bzw. Überschreiten der eingestellten Sollwerte angezeigt. Werksseitig ist eine Standardeinstellung programmiert.

Weiterhin konnten den Luftgüte-Ampeln zwei Grenzen pro Schwellenwert vorgegeben werden. Einerseits die Grenze, ab der die Ampel eine Stufe höher schaltet, zum Beispiel von Grün auf Gelb. Andererseits konnte der Ampel auch eine Grenze vorgegeben werden, ab der sie eine niedrigere Stufe wieder freigeben durfte, zum Beispiel von Gelb zurück auf Grün. Gingen die CO₂-Konzentrationen über die Grenze „Rot“ hinaus, so gab es kein weiteres akustisches Signal, jedoch ging die rote LED in einen Blinkmodus über.

Tabelle 2-4: Luftgüte-Ampel - Bedeutung der Signale

LED	Geschlossenes Fenster
Grün	CO ₂ -Konzentration liegt unter den eingestellten Grenzwerten
Gelb	CO ₂ -Konzentration überschreitet den ersten eingestellten Grenzwert => Bitte Lüften
Rot	CO ₂ -Konzentration überschreitet den zweiten eingestellten Grenzwert => Dringend Lüften
Rot blinkend	Dringend Fenster öffnen

¹⁵ Produkt der Firma J. DITTRICH ELEKTRONIK GmbH & Co. KG, Baden-Baden.

2.4.2 Klimagriff

Funktionsweise des Klimagriffs

Der Klimagriff (KLIMAGRIFF®¹⁶, siehe Abbildung 2-3) ist ein Fenstergriff, mit dem sich die Art und Weise des Lüftens speichern lässt. Er registriert wann, wie, wie lange und wie viele Fenster gekippt und/oder geöffnet sind. Daneben werden die Temperatur und die relative Feuchte im Umfeld des Griffes erfasst.

Über spezielle Eckdaten, die bezogen auf den jeweiligen Gebäudestandort eingegeben werden müssen, werden die Lufttemperatur und die relative Feuchte im Raum berechnet und auf dem Display angezeigt. Die Speicherung von Daten erfolgt nur bei Veränderungen der Messwerte. Gespeichert werden Datum, Uhrzeit, Temperatur, relative Feuchte und die Fensterposition. Die Speicherkapazität der verwendeten Geräteserie (14.000 Datensätze) reicht nach Herstellerangaben für etwa 2 Jahre. Die einzelnen optischen Signale werden in Tabelle 2-5 erläutert. Über die gespeicherten Daten berechnet das Programm außerdem einen theoretischen Anstieg der „CO₂-Konzentration“ im Raum, basierend auf der Anzahl der üblicherweise anwesenden Personenzahl.



Abbildung 2-2:
Frontansicht des
Klimagriffs

Tabelle 2-5: Klimagriff - Bedeutung der Signale

LED	Geschlossenes Fenster		Offenes Fenster
Grün			Lüftungsdauer war ausreichend. Fenster schließen.
Gelb	Raum heizen		Lüftungsdauer wurde um 5 Minuten überschritten. Fenster schließen!
Rot	Fenster öffnen		Lüftungsdauer wurde um mind. 10 Minuten überschritten. Fenster schließen!
Rot - Rot	Dringend Fenster öffnen		

Der Klimagriff ist ein signalgebendes Messgerät. Bei Überschreitung der eingestellten Schwellenwerte werden die Nutzer des Raumes über ein akustisches und/oder Lichtsignal zum Öffnen bzw. zum Schließen des Fensters aufgefordert. Die Geräte wurden zunächst stumm geschaltet und dann je nach Phase in den gewünschten Betriebszustand gesetzt.

Es sind batteriebetriebene, netzunabhängige Geräte, deren Speicher mit einer speziellen Software ausgelesen werden. Die Geräte werden an die Stelle der vorhandenen Fenstergriffe montiert.

¹⁶ Produkt der Firma Klimagriff GmbH, Solingen.

2.4.3 Klimamessgeräte

Mit Klimamessgeräten bzw. Klimadatenloggern wurden Lufttemperatur und relative Feuchte im Raum kontinuierlich gemessen und gespeichert. Die Geräte bzw. die Messfühler wurden in der Raummitte, ca. 2,2 bis 2,4 m über Boden installiert. Es kamen netzunabhängige Geräte, deren Speicher mit einer speziellen Software programmiert und ausgelesen werden können, zum Einsatz. Verwendet wurden die folgenden Klimadatenlogger: TESTO 454, TESTO 175 H1 und TESTO 175 H2. Bei der 175-Serie handelt es sich um Datenlogger mit integrierten Messfühlern. An das TESTO 454 wurde ein Feuchte/Temperatur-Luftfühler (TESTO Art.No. 0636.9740) angeschlossen.

2.4.4 Klimadaten Außen

Daten über Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit etc. werden an der Luftmessstation Nürnberg Flugfeld durch SUN/U kontinuierlich gemessen. Diese Daten konnten für das Messprogramm als Vergleichsdaten genutzt werden. Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 (Kapitel 3.3) zeigen den Verlauf der Außenlufttemperatur als Stundenmittelwerte in den Jahren 2013 und 2014.

2.5 Erhebung der Basisdaten

Für die Beurteilung der Messergebnisse war auch die Erfassung von Basisdaten notwendig. Diese lassen sich in zwei Kategorien unterteilen.

Kategorie A

umfasst alle unveränderlichen Daten, wie Raumgröße, Möblierung, bauliche Ausstattung, Lage im Gebäude, Ausrichtung der Fensterfront, Lage des Gebäudes im Gelände, Art des Umfeldes, Lüftungsmöglichkeiten

Kategorie B

umfasst alle veränderlichen Daten. Es sind dies Daten wie: Personenanzahl im Raum, Art der Tätigkeiten/Aktivitäten, aktuelle Wetterlage.

Für die Kategorie B konnte nur die Anzahl der Personen im Raum und die Klimadaten der Luftmessstation Nürnberg Flugfeld ermittelt werden. Die ursprünglich vorgesehene Datenerhebung über die verschiedenen Tätigkeiten resp. Aktivitäten während der Unterrichtszeiten musste aus Datenschutzgründen ausgesetzt werden.

2.6 Messdatenerhebung

Jeder Klassenraum wurde für den gesamten Untersuchungszeitraum mit einer Luftgüte-Ampel, welche die CO₂-Konzentration in der Einheit „parts per million“ (ppm) misst, eine je nach nutzbaren Fenstern variierende Anzahl an Klimagriffen (KLIMAGRIFF), die als Bezugsgröße sowohl die Lufttemperatur als auch die relative Feuchte im Raum und zusätzlich den Öffnungswinkel des Fensters erfassen, und einem TESTO-Datenlogger, der die Lufttemperatur und die relative Feuchte erfasst (Klimamaus), ausgestattet.

Die zwei signalgebenden Messgeräte, Luftgüteampel und Klimagriff, wurden zunächst nur zur Erhebung von Messdaten genutzt. Später wurden die Nutzer durch optische bzw. akustische Signale der Geräte angewiesen zu lüften. Auf die Funktionsweise der Fenstergriffe und der Luftgüte-Ampel wird unter Kapitel 2.4 genauer eingegangen.

Im Rahmen des Messprogramms wurden im Zeitraum Januar 2013 bis April 2014 insgesamt 30 Messphasen durchgeführt, die sich auf elf Messreihen verteilten (Tabelle 2-8). Während des Messprogramms kamen folgende Vorgaben in den Phasen zum Einsatz:

- **„Keine Vorgaben“**

mit der Aufforderung nach der Gewohnheit zu lüften. Mit diesen Messungen wird das normale Lüftungsverhalten im Bezug auf den jahreszeitlichen Verlauf erfasst. Bei diesen Messungen sind die akustischen und optischen Signale sowohl der Luftgüte-Ampel als auch der Klimagriffe deaktiviert.

- **Luftgüte-Ampel**

gibt den Lüftungstakt vor. Es werden unterschiedliche Einstellungen (Warngrenzen) getestet. Wenn in Tabelle 2-6 nicht anders angegeben wird das Überschreiten der Warngrenzen jeweils durch ein optisches und ein akustisches Signal angezeigt. Bei diesen Messungen sind die akustischen und optischen Signale der Klimagriffe deaktiviert.

Tabelle 2-6: Luftgüte-Ampel - Beschreibung der Geräteeinstellung und der erforderlichen Maßnahmen während der Phasen der Luftgüte-Ampel (CO₂-Konzentration in ppm)

	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5	L 6	L 7
GRÜN	bis 1500	bis 1000	bis 1000	bis 1250	bis 1000	bis 1000	im Anstieg bis 1000 bei Lüftung ab 750
GELB	bis 2500	bis 2500	bis 2500	bis 2500	bis 2000	bis 2000	im Anstieg bis 1950 bei Lüftung ab 1500
ROT	ab 3000	ab 3000	ab 3000	ab 3000	ab 3000	ab 2000	im Anstieg ab 2050 bei Lüftung ab 1960
Sonstiges	Fenster nach Gewohnheit öffnen		alle Fenster öffnen		nur optisches Signal alle Fenster öffnen		alle Fenster öffnen

- **Klimagriff**

gibt den Lüftungstakt vor. Dabei sind die Nutzer aufgefordert entweder alle (K2-K4) oder entsprechend der Gewohnheit (K1) Fenster zu öffnen. Bei diesen Messungen sind die akustischen und optischen Signale der Luftgüte-Ampel deaktiviert.

Tabelle 2-7: Klimagriff - Beschreibung der Geräteeinstellung und der erforderlichen Maßnahmen während der Phasen des Klimagriffs

	K1	K2	K3	K4
Einstellung	Werkseinstellung	Werkseinstellung	Personenanzahl im Raum auf 50 heraufgesetzt; 1. und letztes Fenster geben Signal	Personenanzahl im Raum auf 50 heraufgesetzt; nur das Fenster am Lehrerpult gibt Signal
Maßnahmen	Fenster nach Gewohnheit öffnen	alle Fenster öffnen		

Tabelle 2-8 gibt eine Übersicht über den Ablauf des Messprogramms mit den einzelnen Phasen, in denen unterschiedliche Vorgaben zum Lüftungsverhalten gemacht wurden.

Im ersten Untersuchungszeitraum, von Januar bis Juli 2013, sollte für das Unterrichtsgeschehen eine sinnvolle und durchführbare Einstellung der Luftgüte-Ampel und der Klimagriffe gefunden werden. Die Phase „Keine Vorgaben“ diente als Kontrolle, um zu sehen, ob die Schüler und Lehrer auch ohne signalgebende Geräte ausreichend lüften.

Tabelle 2-8: Einteilung der Messreihen¹⁷

Messreihe 1	Phase 01	Phase 02	Phase 03			Winter 08.01.- 08.02.2013 5 Wochen
	08.01.-28.01.2013	25.01.-01.02.13	01.02.-08.02.13			
	Keine Vorgaben	L1	K1			
Messreihe 2	Phase 04	Phase 05	Phase 06	Phase 07	Phase 08	Winter 18.02.- 22.03.2013 5 Wochen
	18.02.-27.02.13	26.02.-05.03.13	04.03.-11.03.13	08.03.-15.03.13	14.03.-22.03.13	
	Keine Vorgaben	L2	L3	K2	L4	
Messreihe 3	Phase 09	Phase 10	Phase 11	Phase 12		Frühjahr 05.04.- 17.05.2013 6 Wochen
	08.04.-16.04.13	16.04.-24.04.13	23.04.-02.05.13	30.04.-17.05.13		
	Keine Vorgaben	L5	L6	K3		
Messreihe 4	Phase 13	Phase 14	Phase 15			Frühjahr 03.06.- 02.07.2013 5 Wochen
	31.05.-12.06.13	11.06.-21.06.13	20.06.-02.07.13			
	Keine Vorgaben	L7	K4			
Messreihe 5	Phase 16	Phase 17	Phase 18			Sommer 29.06.- 30.07.2013 4 Wochen
	29.06.-11.07.13	10.07.-22.07.13	19.07.-30.07.13			
	Keine Vorgaben	L7	K4			
Messreihe 6		Phase 19	Phase 20			Sommer / Herbst 12.09.- 18.10.2013 6 Wochen
		12.09.-18.10.13	12.09.-18.10.13			
		L7	K4			
Messreihe 7		Phase 21	Phase 22			Herbst 21.10.- 22.11.2013 4 Wochen
		18.10.-22.11.13	18.10.-22.11.13			
		L7	K4			
Messreihe 8		Phase 23	Phase 24			Herbst 25.11.- 20.12.2013 4 Wochen
		22.11.-20.12.13	22.11.-20.12.13			
		L7	K4			
Messreihe 9		Phase 25	Phase 26			Winter 07.01.- 31.01.2014 4 Wochen
		03.01.-31.01.14	03.01.-31.01.14			
		L7	K4			
Messreihe 10		Phase 27	Phase 28			Winter 01.02.- 28.02.2014 4 Wochen
		31.01.-28.02.14	31.01.-28.02.14			
		L7	K4			
Messreihe 11		Phase 29	Phase 30			Winter / Frühjahr 10.03.- 11.04.2014 5 Wochen
		04.03.-11.04.14	04.03.-11.04.14			
		L7	K4			

¹⁷ Die Abkürzungen stehen für Luftgüte-Ampel (L) bzw. Klimagriff (K), die Zahlen für den jeweiligen Einstellungsmodus, der den beiden vorangegangenen Tabellen zu entnehmen ist. Die Datumsangaben bei den Phasen umfassen die Zeitspanne „Einrichtung der Messstelle“ bis „Ende des Messzeitraums“

Nachdem eine passende Geräteeinstellung für beide Messinstrumente gefunden war (L7 und K4), konnten im zweiten Untersuchungszeitraum, von September 2013 bis April 2014, die Auswirkungen von Klimagriff und Luftgüte-Ampel genauer untersucht werden. Die Phase „Keine Vorgaben“ wurde ausgesetzt. So wurde in einer Messreihe das Lüftungsverhalten in einem Klassenraum einer Schule durch die Signale der Luftgüte-Ampel und im anderen Klassenraum durch die Klimagriffe gesteuert. Nach der Hälfte der Zeit der Messreihe wurden die Einstellungen der beiden Klassenräume getauscht.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Messstellen sind im Anhang des Berichtes zusammengestellt und geben einen detaillierten Einblick in die Daten der Luftgüte-Ampel und des Klimagriffs.

Das Messprogramm war in zwei Untersuchungszeiträume aufgeteilt und lief über zwei Schuljahre. Mit dem Schuljahreswechsel fand auch der Wechsel in den zweiten Untersuchungszeitraum statt. Es ist daher zu beachten, dass sich der erste und der zweite Untersuchungszeitraum nicht nur durch geänderte Fragestellungen hinsichtlich des Messprogramms unterscheiden sondern möglicherweise auch in Bezug auf das Nutzerverhalten, da mit dem Schuljahreswechsel unter Umständen auch eine neue Raumbelegung vorliegt.

3.1 Überblick

3.1.1 Mittlere CO₂-Belastung über den gesamten Untersuchungszeitraum

Abbildung 3-1 gibt einen Überblick über die mittlere Belastungssituation mit CO₂, im Vergleich mit den Vorgaben der Ad-hoc-AG IRK/AOLG, über den gesamten Untersuchungszeitraum (30 Phasen) in den einzelnen ausgewählten Klassenräumen. Dafür wurden nur die im Zeitraum von 8.00 bis 17.00 Uhr an Unterrichtstagen erhobenen Daten verwendet. Da die CO₂-Belastung in der Raumluft alleine von den Nutzern herrührt, liegen die höchsten Konzentrationen jeweils während der Unterrichtszeiten vor.

Die ersten beiden Säulen links zeigen die CO₂-Belastungssituationen in den beiden mit mechanischen Be- und Entlüftungssystemen versehenen Klassenräumen. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Lüftungssysteme, durch die unterschiedliche Belastungssituationen entstehen. Der Klassenraum G01R02 ist an eine zentrale Lüftungsanlage angeschlossen, die nicht über die Möglichkeit einer Einzelsteuerung in den angeschlossenen Räumen verfügt.

Anders ist die Situation im Schulgebäude G02. Der Klassenraum G02R01 ist mit einem Fassaden-Lüftungsgerät ausgestattet, das sowohl eine aktivierte automatische Gerätesteuerung besitzt, als auch eine manuelle Schaltung zulässt. Letztere verursacht, wie erkennbar ist, eine Verschlechterung der Belastungssituation, bei der auch CO₂-Konzentrationen von >2000 ppm entstehen. Zu 11 bis 15%, was einer Zeitspanne von 0:59

bis 1:17 Stunden pro Tag entspricht, liegen die CO₂-Konzentrationen im hygienisch auffälligen Bereich, einige wenige auch im hygienisch inakzeptablen Bereich.

Betrachtet man die übrigen zehn Säulen, so fällt innerhalb dieser Gruppe kein wirklicher Unterschied auf. Zu 26 bis 67%, was einer Zeitspanne von 2:20 bis 6:02 Stunden pro Tag entspricht, liegen die CO₂-Konzentrationen im hygienisch unbedenklichen (≤ 1000 ppm), zu 30 bis 57%, entsprechend 2:42 bis 5:08 Stunden pro Tag, im hygienisch auffälligen ($>1000 - \leq 2000$ ppm) und zu 1,5 bis 29%, entsprechend 0:08 bis 2:37 Stunden pro Tag, im hygienisch inakzeptablen Bereich (>2000 ppm). Alles in allem eine nicht zufriedenstellende Situation. Lüftungsmaßnahmen während der Unterrichtsstunden werden nur selten durchgeführt, ebenso wird die Möglichkeit zu intensiveren Lüftungsmaßnahmen während der Pausenzeiten nur selten genutzt. Sehr häufig entfällt auch eine intensive Lüftung am Ende der Unterrichtszeit, so dass am nächsten Morgen noch vergleichsweise hohe CO₂-Werte vorliegen.

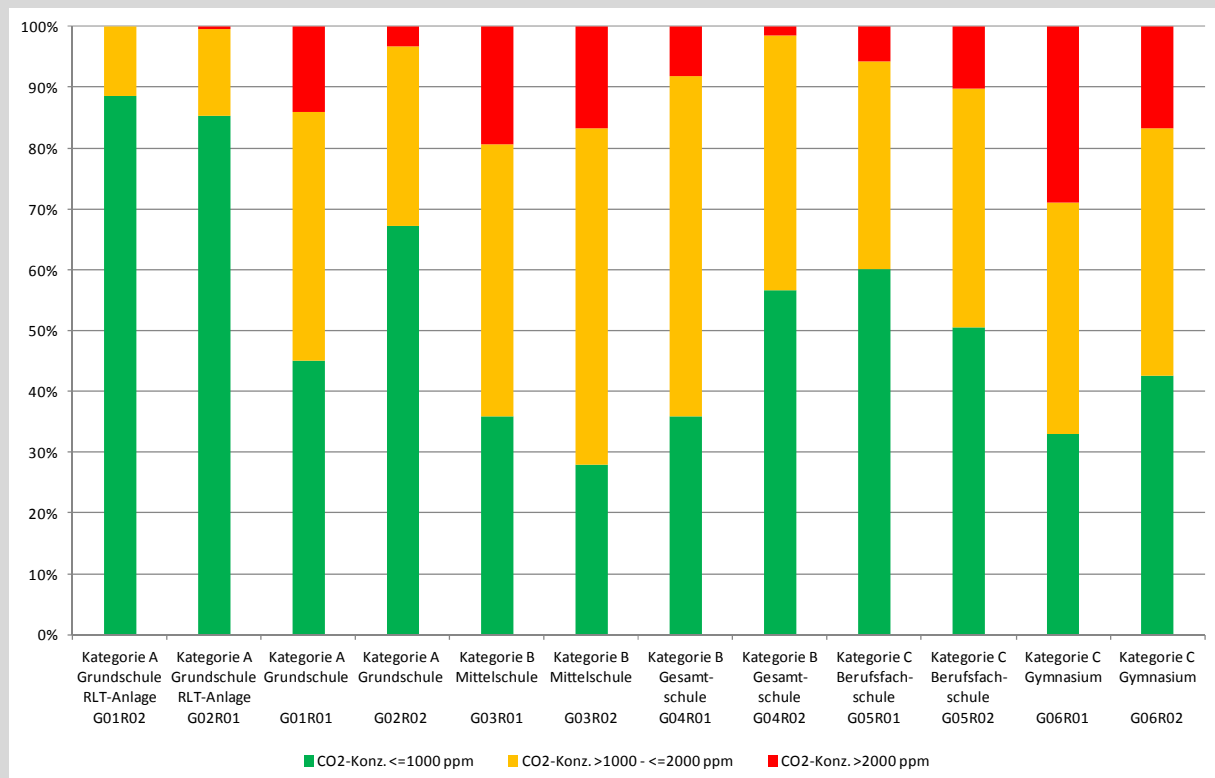


Abbildung 3-1: Darstellung der CO₂-Belastungssituation in den ausgewählten Klassenräumen als Mittelwert über den gesamten Untersuchungszeitraum

Die nachfolgenden vier Abbildungen zeigen die CO₂-Belastungssituation an den einzelnen Unterrichtstagen im gesamten Untersuchungszeitraum jeweils in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr, und stehen stellvertretend für die übrigen Messstellen. Bei der Auswahl wurde unterschieden in Klassenräume mit und ohne mechanische Lüftung, bei den letzten auch beim Schultyp.

3.1.2 CO₂-Belastungssituation an den Unterrichtstagen in einem Klassenraum mit zentraler Lüftungsanlage

Im Klassenraum G01R02 (Abbildung 3-2), der an einer zentralen Lüftungsanlage angeschlossen ist, herrscht über den ganzen Untersuchungszeitraum eine gleichmäßige nur geringfügig von der Jahreszeit beeinflusste Raumluftqualität vor. Den Nutzern war es möglich jederzeit die Fenster zu öffnen. Im Mittel liegt die CO₂-Konzentration zu knapp 90% des Tages (ca. 8 Stunden) im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤ 1000 ppm. Die übrigen 11% (ca. 1 Stunde) liegt die CO₂-Konzentration im hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤ 2000 ppm. Es wurden im Untersuchungszeitraum keine CO₂-Konzentrationen >2000 ppm gemessen.

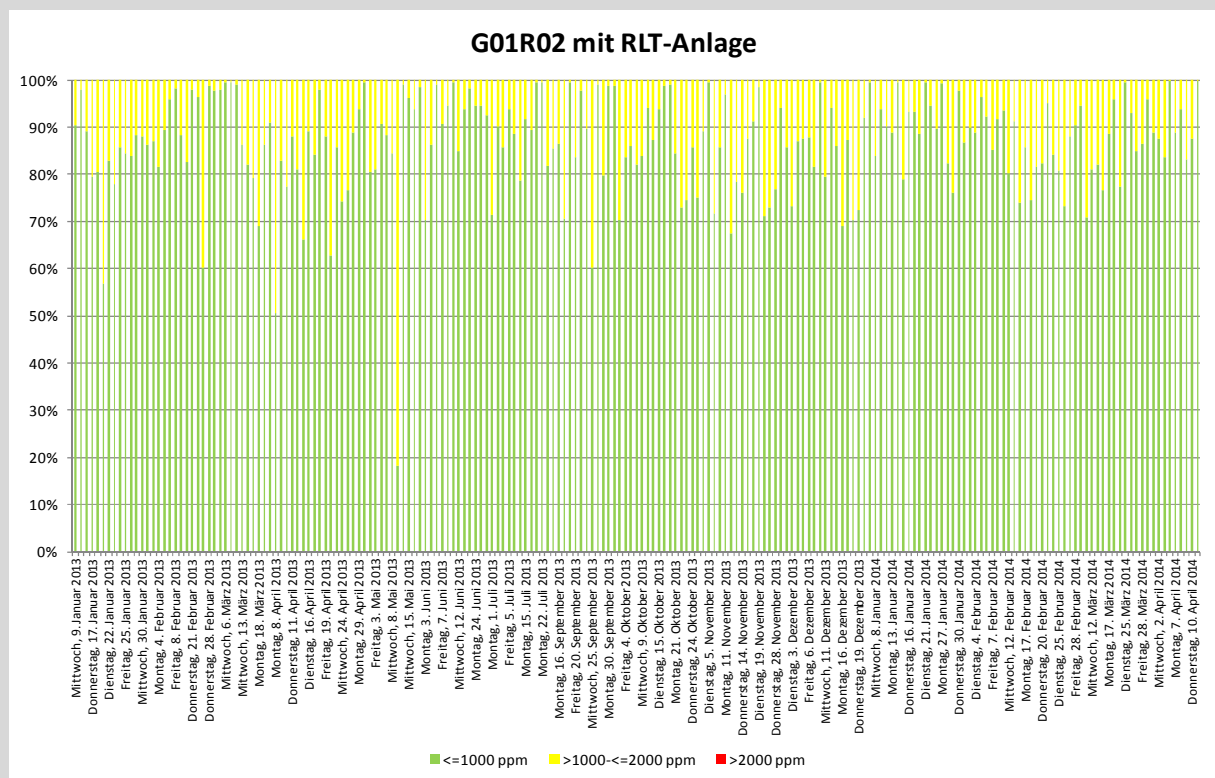


Abbildung 3-2: Darstellung der CO₂-Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G01R02, angeschlossen an eine zentrale Lüftungsanlage.

3.1.3 CO₂-Belastungssituation an den Unterrichtstagen in einem Klassenraum mit Fassaden-Lüftungsgerät

Der Klassenraum G02R01 (Abbildung 3-3), der mit einem Fassaden-Lüftungsgerät ausgestattet ist, zeigt eine etwas andere Verteilung der Belastungssituation. Der negative Einfluss der kälteren Jahreszeit auf die Belastungssituation ist hier ausgeprägter. In einem geringen Maße (0,5%) liegen die CO₂-Konzentration durch die Reduzierung der Lüftungsmaßnahmen im hygienisch inakzeptablen Bereich >2000 ppm. An einzelnen Tagen stehen diese Konzentrationen auch über einen Zeitraum von ca. 1:20 Stunde an.

Wie schon erwähnt, sinkt die Raumluftqualität während der kälteren Jahreszeit. Dennoch liegt sie im Durchschnitt auf dem gleichen Niveau wie im Klassenraum G01R02: zu 85% (entsprechend 6:22 Stunden) im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤1000 ppm und zu 14% (1:16 Stunden) im hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤2000 ppm. Dass sie etwas schlechter ausfällt hat noch einen anderen Grund. Der/die Nutzer konnten die Leistung des Fassaden-Lüftungsgerätes bei Bedarf drosseln.

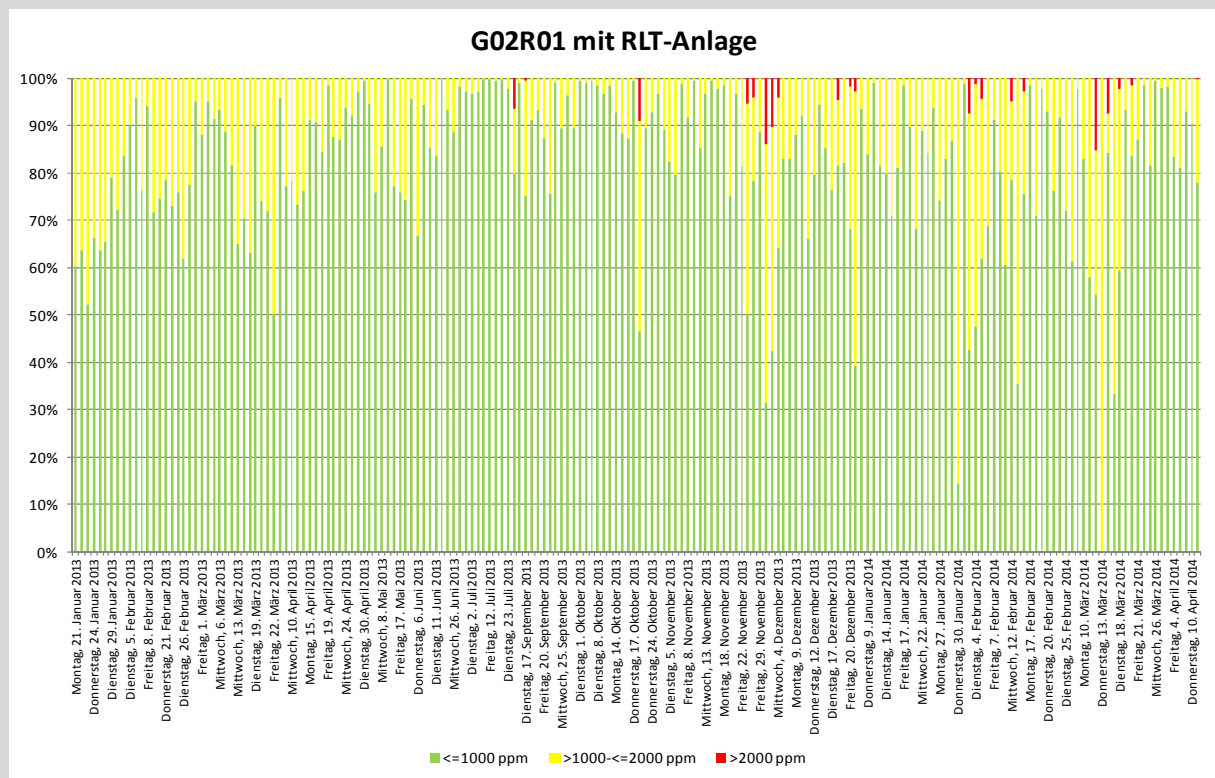


Abbildung 3-3: Darstellung der CO₂-Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G02R01 (ausgestattet mit dezentraler Fassaden-Lüftungsanlage)

3.1.4 CO₂-Belastungssituation an den Unterrichtstagen in Klassenräumen ohne mechanische Lüftung

Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 verdeutlichen die Spannweite der vorgefundenen CO₂-Belastungssituationen am Beispiel von zwei Klassenräumen ohne mechanische Lüftung. Die Abbildungen machen deutlich, dass die CO₂-Konzentration in den Räumen zwischen Oktober und Ende März häufig die 1000 ppm Grenze überschreitet. In Einzelfällen liegen diese CO₂-Konzentrationen auch über längere Zeiträume an, in Raum G02R02 für maximal 5 Stunden, in Raum G06R01 für maximal rund 8 Stunden.

Zwischen April und Ende September ist die Belastungssituation in den Räumen aufgrund des geänderten Lüftungsverhaltens bei höheren Außentemperaturen deutlich besser.

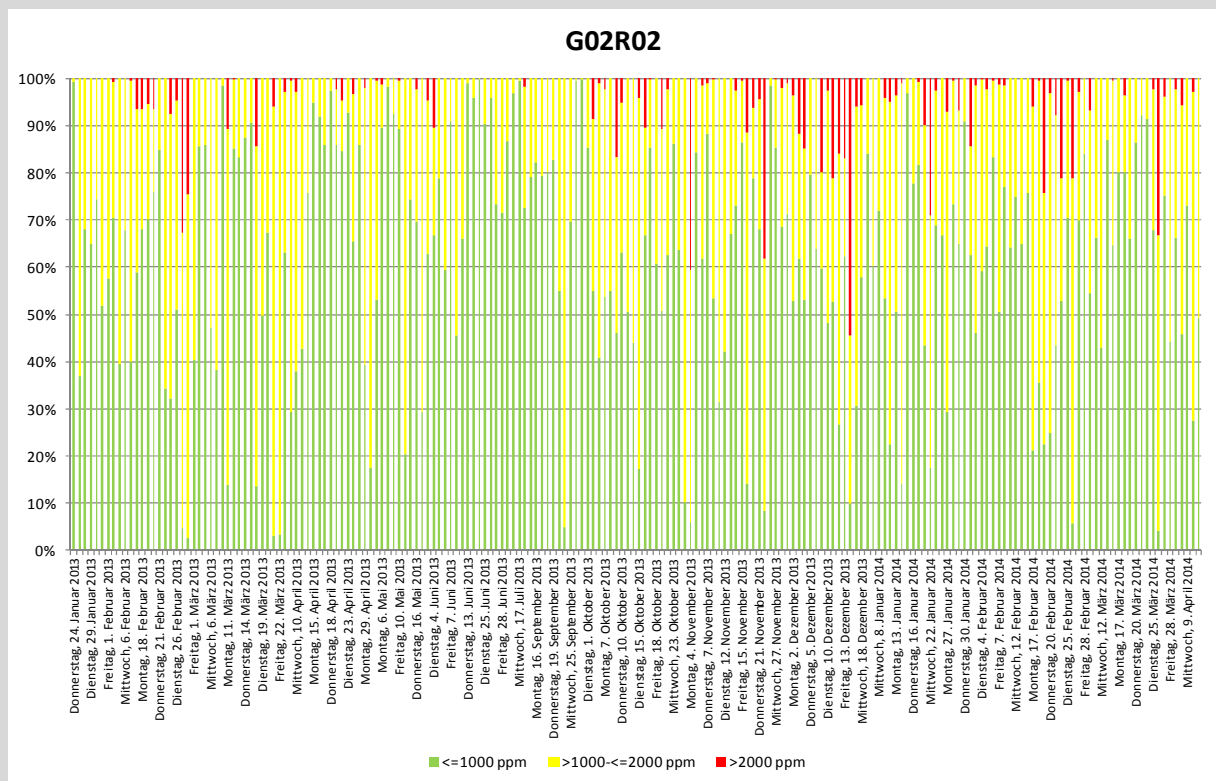


Abbildung 3-4: Darstellung der CO₂-Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G02R02, Grundschule

Im Vergleich der Schultypen schneidet die Grundschule (Abbildung 3-4) gegenüber dem Gymnasium (Abbildung 3-5) deutlich besser ab. Der Unterschied wird im Wesentlichen durch das Nutzerverhalten bestimmt, weniger durch den unterschiedlichen Bauzustand, wie Fensterbaujahr oder Kubatur des Raumes.

Die Grundschulklassen sind, inklusive Lehrkraft, „standorttreu“, wohingegen im Gymnasium ein mehr oder weniger häufiger Wechsel von Lehrkräften und Klassenverbänden in den einzelnen Klassenräumen erfolgt. Dies führte dazu, dass nicht alle Nutzer, Lehrkräfte wie Schüler, fest in das CO₂-Messprogramm eingebunden waren.

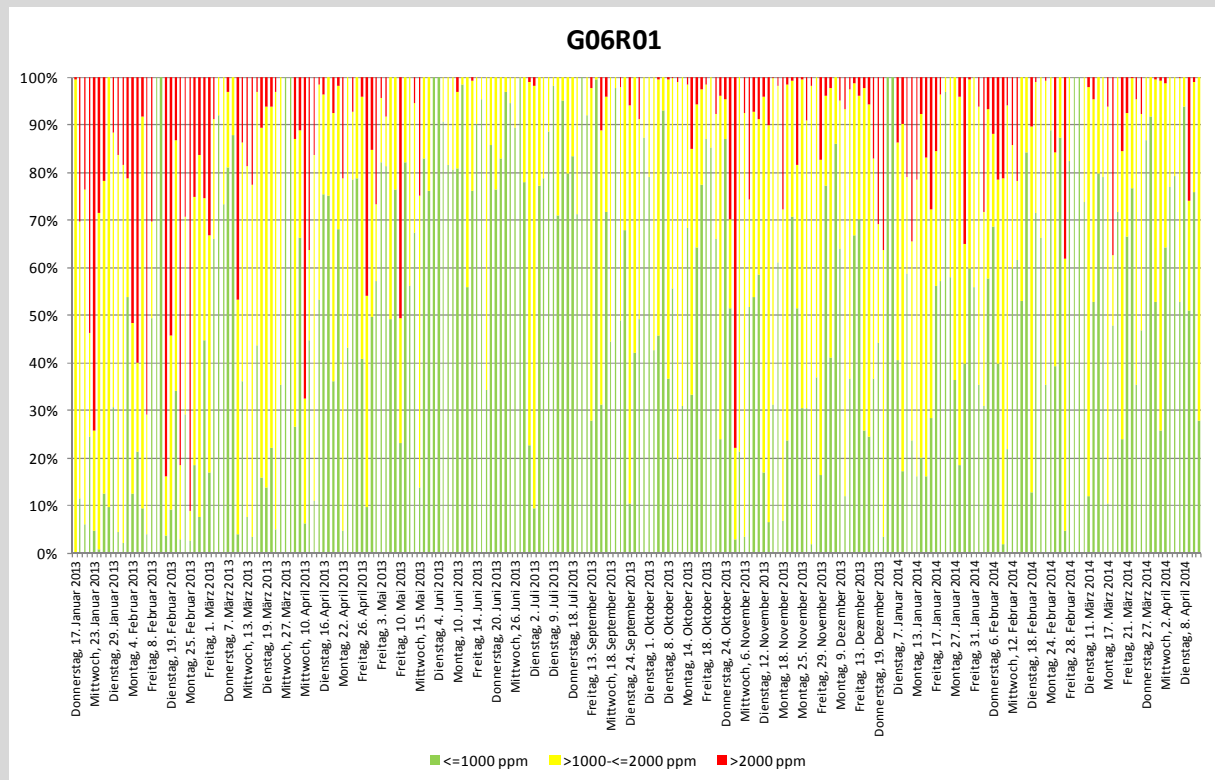


Abbildung 3-5: Darstellung der CO₂-Belastungssituation an Unterrichtstagen über den gesamten Untersuchungszeitraum in Raum G06R01, Gymnasium

3.1.5 Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentration in Klassenräumen ohne mechanische Lüftung

Mit dem Einsatz signalgebender Messgeräte sollte geprüft werden, ob sich das Lüftungsverhalten der Nutzer positiv beeinflussen lässt.

Dass CO₂-Konzentrationen von über 2000 ppm keine Seltenheit sind, wird an den folgenden Beispielen gezeigt. Die oben erwähnten langen Zeiträume von 5 bzw. 8 Stunden sind in allen Untersuchungsphasen zu finden.

- „Keine Vorgaben“

Die Abbildung 3-6 zeigt die Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentrationen im Raum G06R01, Gymnasium, zwischen dem 18. und 26. Februar 2013. In diesem Zeitraum wurden vom Messprogramm keine Vorgaben zum Lüftungsverhalten gemacht.

Die rote Kurve (21.02.13) erreicht gegen 08.45 Uhr erstmals den Wert von 2000 ppm CO₂ in der Raumlufte. Sie steigt nach Absinken auf 1.500 ppm durch eine kurze Lüftungsphase bis zum Ende der 2. Schulstunde um 09.30 bis auf eine CO₂-Konzentration von ca. 2750 ppm an.

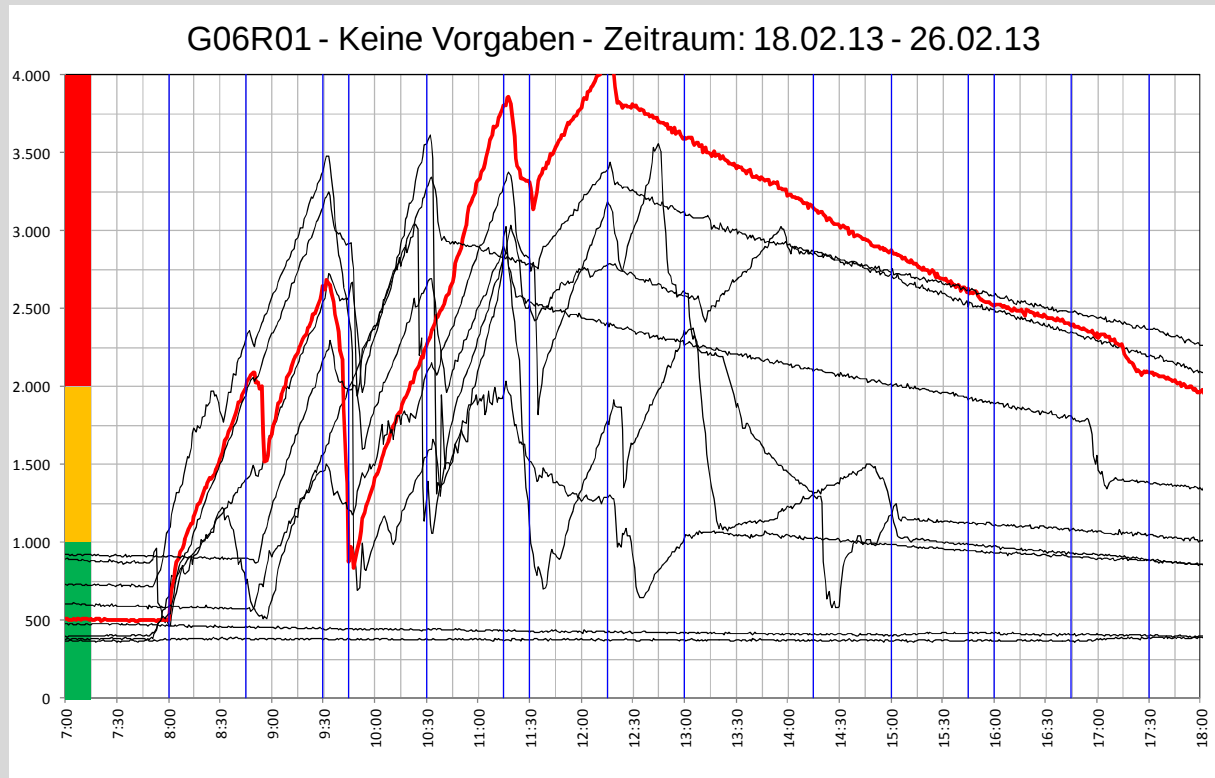


Abbildung 3-6: Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentrationen im Februar 2013 in Raum G06R01, Gymnasium, Phase 04, „Keine-Vorgaben“

In der nachfolgenden intensiven Lüftungsphase während der Pause sinkt die CO₂-Konzentration auf etwa 800 ppm ab. Während der 3. und 4. Stunde steigt sie stetig bis auf ca. 3800 ppm an. Die Lüftungsmaßnahme in der folgenden Pause bewirkt nur ein geringes Absinken der CO₂-Konzentration, so dass am Ende der 5. Stunde, um 12.15 Uhr, eine Konzentration von 4090 ppm erreicht wird.

An diesem Tagesverlauf wird deutlich, dass die durchgeführten Lüftungsphasen die CO₂-Konzentrationen nur für einen kleinen Zeitraum im hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤2000 ppm halten konnten. CO₂-Konzentrationen im hygienisch inakzeptablen Bereich von >2000 ppm lagen hingegen über die Dauer von 8 Stunden vor.

Generell auffällig sind die langen Abklingphasen nach Ende der Unterrichtstage. Stellenweise liegen gegen 18.00 Uhr noch CO₂-Konzentrationen im hygienisch inakzeptablen bzw. hygienisch auffälligen Konzentrationsbereich vor. Dies hat zur Folge, dass der Unterricht am anderen Morgen bei deutlich höheren CO₂-Konzentrationen als in der Außenluft (von 300 bis 400 ppm) beginnt.

- **Luftgüte-Ampel**

Abbildung 3-7 zeigt die Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentrationen im Raum G06R01, Gymnasium, zwischen dem 07. und 20. Dezember 2013 bei der Vorgabe an die Raumnutzer, auf die Signale der Luftgüte-Ampel mit Lüftungsphasen zu reagieren.

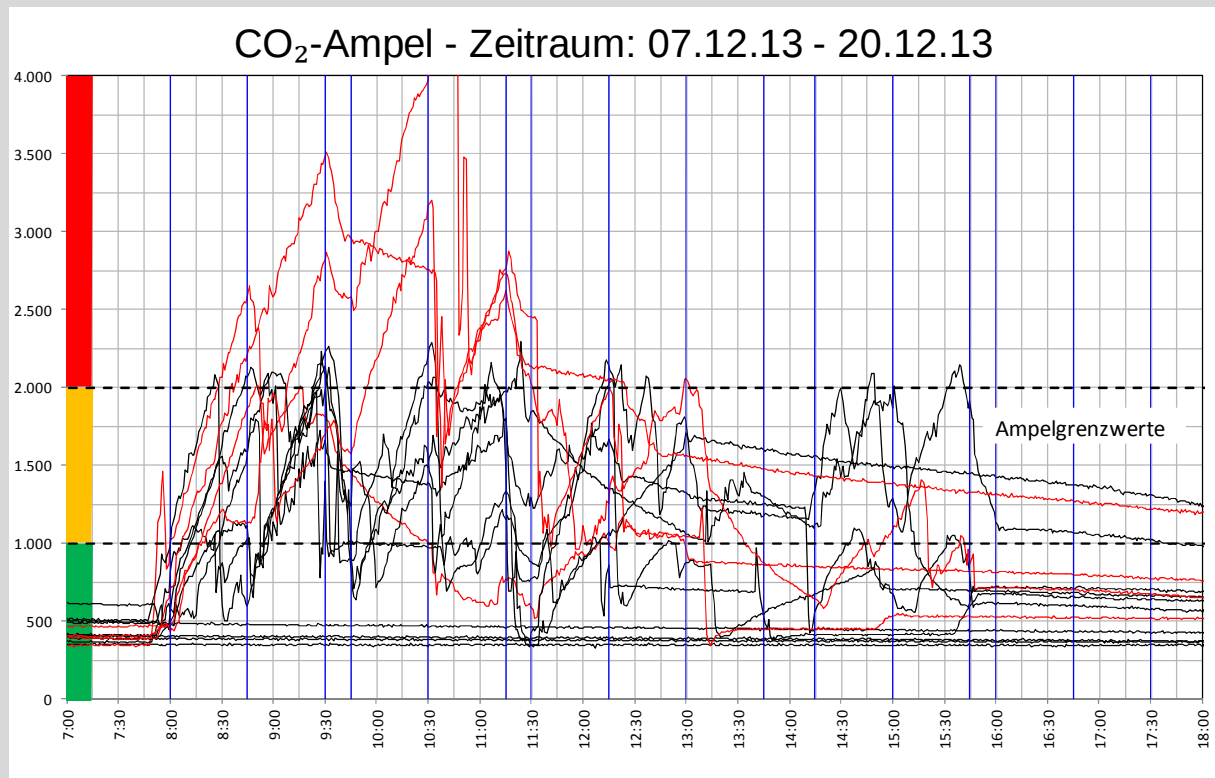


Abbildung 3-7: Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentrationen im Dezember 2013 in Raum G06R01, Gymnasium, Phase 23: „Luftgüte-Ampel“

Beim Einsatz der Luftgüte-Ampel wird die CO₂-Konzentration in der Raumluft während einer Einzelstunde überwiegend im hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤2000 ppm gehalten (schwarze Kurven). Doch werden auch mit der Luftgüte-Ampel in einigen Schulstunden CO₂-Konzentrationen im hygienisch inakzeptablen Bereich von >2000 ppm erreicht (2700 bis 4400 ppm; rote Kurven), die dann meist über 2-3 Schulstunden vorliegen.

Auffällig sind auch in dieser Abbildung die langen Abklingphasen nach Ende der Unterrichtstage. Stellenweise liegen gegen 18.00 Uhr noch CO₂-Konzentrationen im hygienisch auffälligen Konzentrationsbereich vor. Am Ende der Unterrichtsstunden wird meistens gelüftet, doch sind Ausgangswerte zwischen 400 bis 500 ppm am anderen Morgen häufig noch nicht erreicht.

- **Klimagriff**

Abbildung 3-8 zeigt die Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentrationen im Raum G02R02, Grundschule, zwischen dem 07. und 20. Dezember 2013 mit der Vorgabe an die Raumnutzer, auf die Signale der Klimagriffe mit Lüftungsphasen zu reagieren. Die rote Kurve (16.12.2013) erreicht gegen 10.15 Uhr den Wert von 2000 ppm CO₂ in der Raumluft. Erst lange nach Unterrichtsschluss gegen 15.15 Uhr wird diese Konzentration wieder unterschritten.

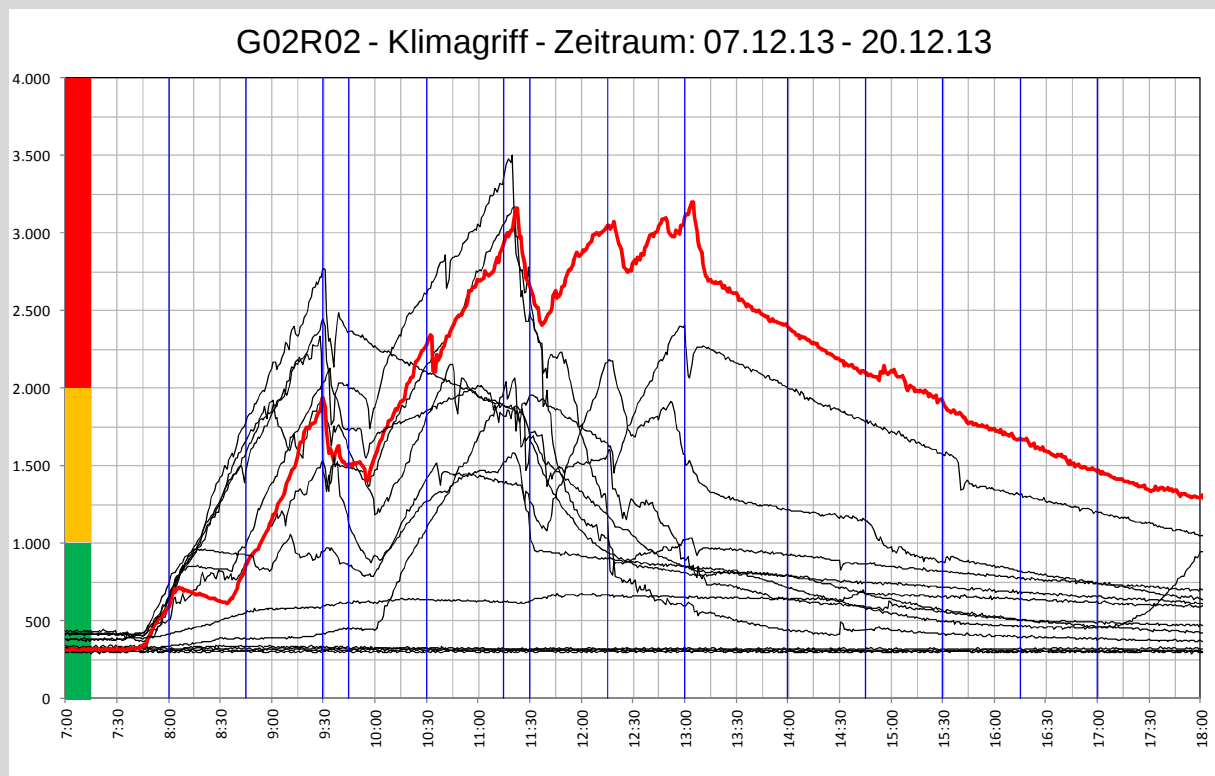


Abbildung 3-8: Tagesverläufe der CO₂-Raumluftkonzentrationen im Dezember 2013 in Raum G02R02, Grundschule, Phase 24, „Klimagriff“

Entsprechend lag während der 3. bis zur 5. Unterrichtsstunde trotz mehrerer Lüftungsphasen die CO₂-Konzentration im hygienisch inakzeptablen Bereich von >2000 ppm. Schon in der Zeitspanne von 08.50 bis 10.15 Uhr, in der die CO₂-Konzentrationen im hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤2000 ppm lagen, sollte häufiger gelüftet werden, was jedoch nicht geschah.

Beim Einsatz des Klimagriffs war in vielen Fällen nicht das Signal des Messgerätes, sondern das Ende der Doppelstunde das Signal zum Lüften. Lüftungsphasen während der Doppelstunden hatten keinen großen Einfluss auf die anstehende CO₂-Konzentration im Raum. Nur selten wurden bei den Lüftungsmaßnahmen am Ende der Unterrichtseinheiten Ausgangswerte zwischen 400 bis 500 ppm CO₂ erreicht.

Insgesamt zeigt sich, dass zwischen Oktober und Ende März häufig schon relativ kurze Nutzungsdauern von teils weniger als 27 Minuten (5%) am Morgen ausreichen, um die CO₂-Konzentration im Raum über die 1000 ppm-Grenze steigen zu lassen. Teilweise liegen auch bereits vor Unterrichtsbeginn Werte um bzw. über 1000 ppm vor, wenn die Konzentrationen am Vortag sehr hoch waren und nach Unterrichtsende nicht gelüftet wurde. Entsprechend schnell stellten sich dann auch CO₂-Werte oberhalb 2000 ppm ein.

3.2 CO₂-Belastung in den einzelnen Untersuchungsphasen

In den einzelnen Untersuchungsphasen wurden unterschiedliche Vorgaben zum Lüftungsverhalten gemacht. Die signalgebenden Geräte (Luftgüte-Ampel, Klimagriff) wurden dazu mit unterschiedlichen Solldaten programmiert. Ziel war es zunächst, eine Geräteeinstellung zu finden, die langfristig eine optimal erreichbare Raumluftqualität liefern würde.

Im ersten Teil der Studie (Phasen 1 bis 18) wurde untersucht, wie und wie weit das normale Lüftungsverhalten („Keine Vorgaben“) durch die Signale der Luftgüte-Ampel bzw. des Klimagriffs beeinflussbar ist. Im zweiten Teil der Studie (Phasen 19-30) wurden die ermittelten Einstellungen im schulischen Alltag getestet.

Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsphasen aus jedem Klassenraum wurden in einem Boxplot-Diagramm¹⁸ gegenübergestellt. Die Daten aus drei Klassenräumen (G02R01; G02R02; G06R01) sollen als typische Beispiele stellvertretend für die übrigen Messorte stehen.

3.2.1 CO₂-Belastungssituation in einem Klassenraum mit Fassaden-Lüftungsgerät

In Raum G02R01, der mit einem Fassaden-Lüftungssystem ausgestattet ist, liegen die über den gesamten Untersuchungszeitraum gemessenen CO₂-Konzentrationen zu 85% im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤ 1000 ppm (Abbildung 3-9). Weitere 14% liegen im hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤ 2000 ppm und lediglich 0,5% der Werte liegen im hygienisch inakzeptablen Bereich >2000 ppm. In den Phasen 14 bis 18 macht sich der Einfluss des veränderten Lüftungsverhaltens während der Monate Juni und Juli bemerkbar. Dann liegen ca. 75% der CO₂-Konzentrationen unterhalb von 750 ppm.

Der Einfluss der Messgeräte spielt während der Phasen 1-18 eine eher untergeordnete Rolle. Anders in den Phasen 19 bis 30, die Maximalwerte hier liegen trotz Lüftungsanlage nun mit 1880 bis 2860 ppm deutlich höher als in den Phasen 1 bis 18 mit 1000 bis 1710 ppm. Der Grund liegt im veränderten Lüftungsverhalten. Während der Phasen mit der

¹⁸ Der unter und obere waagerechte Strich steht für den Minimal- bzw. Maximalwert. Die Box gibt den Bereich der mittleren 50% der Messwerte an. Der untere und obere senkrechte Strich zeigt die Verteilungstrecke der jeweils unteren und oberen 25% der Messwerte. Das grüne Kreuz steht für die mittlere gemessene Konzentration, das rote für die gemittelte Konzentration. Aus dem Beispiel, Abbildung 3-9, Phase 21, mit $n=5353$ Messwerten, ergeben sich folgende Informationen: Die unteren 25% der Werte ($n=1338$) liegen zwischen 399 ppm, dem Minimalwert, und 504 ppm, dem 25%-Wert. Die mittleren 50% ($n=2677$) der Werte liegen zwischen >504 und <764 ppm. Die oberen 25% ($n=1338$) der Werte liegen im Bereich zwischen 764 ppm, dem 75%-Wert, und 1968 ppm, dem Maximalwert. Der Medianwert beträgt 666 ppm, der Mittelwert 683 ppm. D.h., über 75% der gemessenen Konzentration liegen im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤ 1000 ppm. Wie sich die jeweils unteren und oberen 25% Werte auf den senkrechten Strichen verteilen, gleichmäßig oder in Gruppen, zeigt diese Darstellung nicht. Die Länge der Striche dokumentiert die jeweilige Spannweite der Streuung.

„Luftgüte-Ampel“ als signalgebendes Gerät wurde nun das Signal bei Erreichen der 1000 ppm-Grenze ignoriert und erst mit Erreichen der 2000 ppm-Grenze gelüftet. Im ersten Untersuchungszeitraum hatten sich die Nutzer dagegen an die 1000 ppm-Grenze gehalten. Die CO₂-Verläufe in den Zeiten mit den Klimagriffen als signalgebendes Gerät zeigen während der Doppelstunden regelmäßig Konzentrationen von 2000 bis 2500 ppm und lassen in den Phasendiagrammen keine wirksamen mechanischen Lüftungsmaßnahmen erkennen. (s. Anhang, Messergebnisse, Anlage 3)

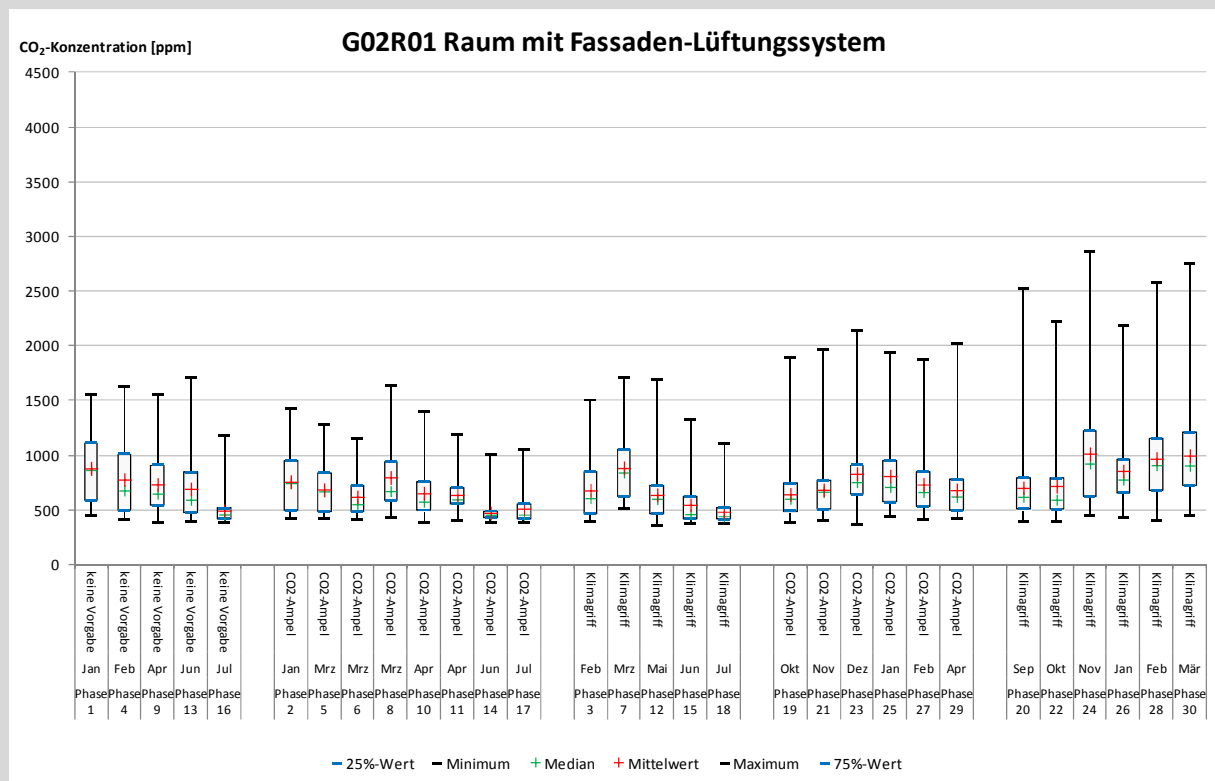


Abbildung 3-9: Vergleich der Spannweiten der CO₂-Raumluftkonzentrationen in Raum G02R01, Grundschule, im Zeitraum Januar 2013 bis Mitte April 2014 während der Unterrichtstage in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr

3.2.2 CO₂-Belastungssituation an den Unterrichtstagen in Klassenräumen ohne mechanische Lüftung

Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 zeigen die Spannbreite der vorgefundenen Belastungssituationen an zwei Beispielen für Klassenräume ohne mechanische Lüftung.

In Raum G02R02 (Abbildung 3-10), der nur manuell über die Fenster zu Lüften ist, liegen die über den gesamten Untersuchungszeitraum gemessenen CO₂-Konzentrationen zu 67% im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤ 1000 ppm. Auf den hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤ 2000 ppm entfallen 30%, und auf den hygienisch inakzeptablen Bereich >2000 ppm 3,0%. Konzentrationen >1000 ppm liegen dabei über die Dauer einer Doppelstunde und gelegentlich darüber hinaus an.

Deutlich ist in den Phase 14 bis 16 der positive Einfluss der Sommermonate auf die CO₂-Raumluftkonzentration zu erkennen, da in dieser Zeit offensichtlich verstärkt gelüftet wird. Die niedrigen CO₂-Werte in den Phasen 17 und 18 resultieren vermutlich aus der nun unregelmäßigeren Nutzung des Raumes kurz vor den Sommerferien.

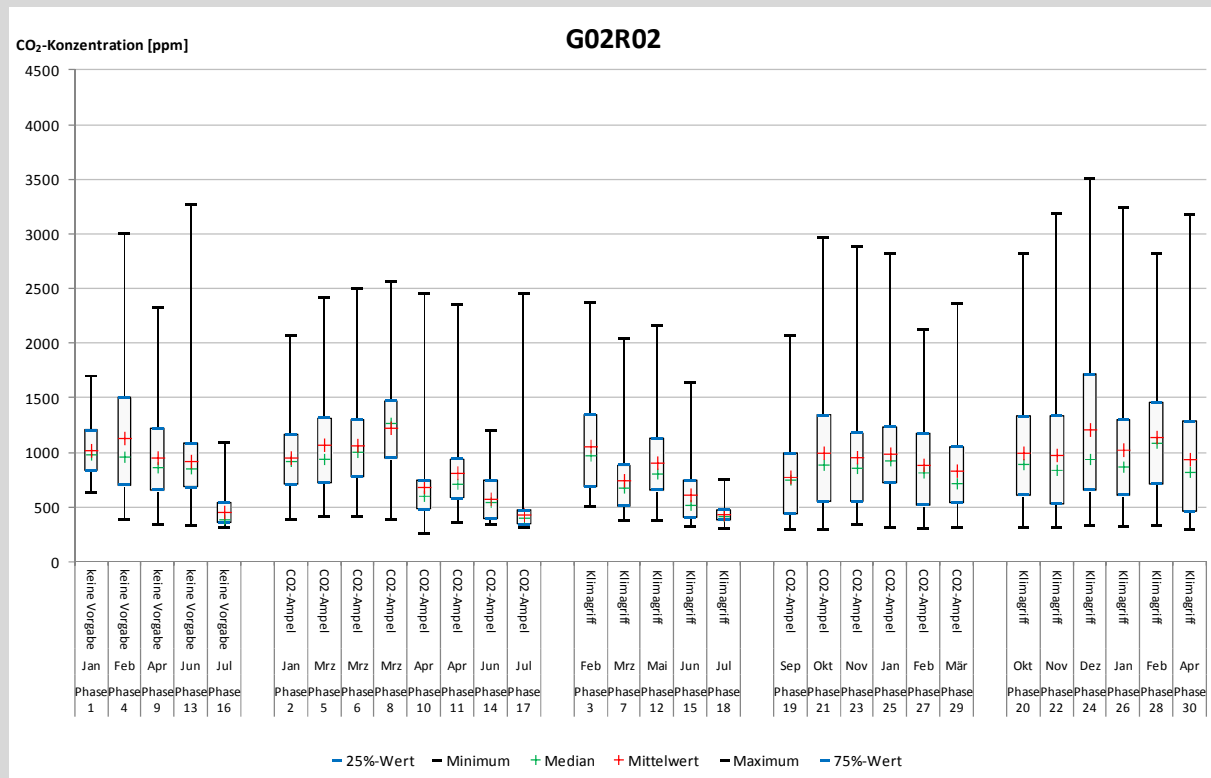


Abbildung 3-10: Vergleich der Spannweiten der CO₂-Raumluftkonzentrationen in Raum G02R02, Grundschule, im Zeitraum Januar 2013 bis Mitte April 2014 während der Unterrichtstage in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr

Aus den Phasendiagrammen (s. Anhang, Messergebnisse, Anlage 4) geht hervor, dass in den Phasen 10 bis 18, neben dem bereits erwähnten Sommereffekt, ein neues und effektiveres Lüftungsverhalten durchgeführt wird. In den Pausen und nach dem Unterricht wird eine Querlüftung durchgeführt, welche die CO₂-Konzentration bis auf das Außenluftniveau absenkt, unabhängig davon, ob von der Luftgüte-Ampel ein akustisches Signal ausgegangen ist oder nicht. In den Phasen 12 und 13 ist das veränderte Lüftungsverhalten nur schwach zu erkennen.

Die Boxplots der Phasen 19 bis 30 zeigen eine deutlich größere Streuung der Werte, was auf ein abermals verändertes Lüftungsverhalten hindeutet. Die einzelnen Phasendiagramme zeigen, dass man zum ursprünglichen Lüftungsverhalten zurück gekehrt ist und intensive Lüftungen nur gelegentlich durchführt. Beim Einsatz der Luftgüte-Ampel wird man erst beim Erreichen der oberen Warngrenze aktiv, beim Einsatz des Klimagriffs ist das Ende der Doppelstunde das Signal zum Lüften. Das Außenluftniveau zwischen 400 und 500 ppm CO₂ wurde dabei allerdings nur selten erreicht.

In der Abbildung 3-11, Raum G06R01, lässt sich im ersten Untersuchungszeitraum nur schwer ein Steuerungseffekt durch die eingesetzten signalgebenden Messgeräte erkennen.

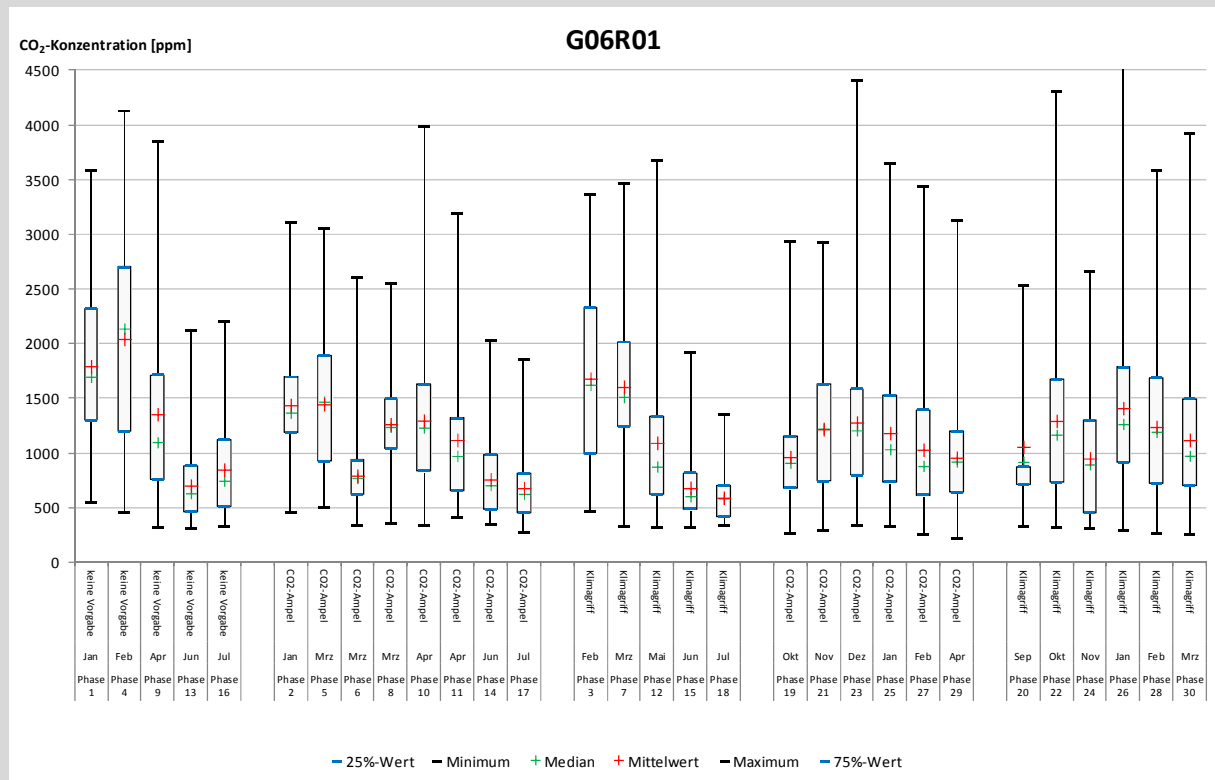


Abbildung 3-11: Vergleich der Spannweiten der CO₂-Raumluftkonzentrationen in Raum G06R01, Gymnasium, im Zeitraum Januar 2013 bis Mitte April 2014 während der Unterrichtstage in der Zeitspanne von 08.00 bis 17.00 Uhr

Deutlicher tritt der positive Einfluss der Sommermonate hervor, in denen verstärkt gelüftet wird. Wie aus den Phasendiagramme 10 bis 18 hervorgeht, verbessert sich ab Mai die Belastungssituation, sowohl die morgendliche Ausgangssituation als auch die während der Unterrichtsstunden, da dann die Fenster länger geöffnet blieben. Der Klassenraum wurde im gesamten ersten Untersuchungszeitraum durchgängig genutzt (s. Anhang, Messergebnisse, Anlage 11).

In dem Raum, der ebenfalls nur manuell über die Fenster zu Lüften ist, liegen die über den gesamten Untersuchungszeitraum gemessenen CO₂-Konzentrationen nur zu 33% im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤ 1000 ppm. Auf den hygienisch auffälligen Bereich zwischen >1000 und ≤ 2000 ppm entfallen 38% und auf den hygienisch inakzeptablen Bereich >2000 ppm 29%.

Die Boxplots der Phasen 19 bis 30 zeigen eine größere Streuung der Werte. Die Maximalwerte liegen in allen Phasen oberhalb 2000 ppm, in acht Fällen auch über 3000 ppm. Die maximale CO₂-Konzentration in der Raumluft betrug 4980 ppm. Die hohen Konzentrationen sind keine kurzzeitigen Einzelwerte, sondern liegen über die Dauer von einer bis zwei Doppelstunden im Klassenraum vor.

3.3 Einfluss der Jahreszeiten auf die CO₂-Raumluftbelastung

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der Außentemperaturen, dargestellt als Stundenmittelwerte für die Jahre 2013 und 2014.

Während der Phasen 1 bis 8 und 22 bis 28 des CO₂-Messprogramms lag die mittlere Tages-temperatur mit einigen wenigen Ausnahmen zwischen -5° und +5°C. In den übrigen Zeiten lagen sie dauerhaft über +5°C. Beim Vergleich der beiden Jahreskurven fällt auf, dass die Kaltphase am Jahresbeginn 2013 bis Anfang April reicht, dagegen 2014 schon Ende Februar endet. Zum Jahresende 2013 hin beginnt die Kaltphase etwa ab Mitte November. Auch sie ist durch kurzzeitige Warmphasen unterbrochen.

Erster Untersuchungszeitraum Phasen 1-18

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Lüftungsmaßnahmen während der Kaltphase (Phase 1-8) eingeschränkt wurden, sowohl zeitlich wie auch in Bezug auf die Anzahl der geöffneten Fenster. Während dieser Zeiträume liegen die CO₂-Raumluftkonzentrationen in den Räumen ohne mechanische Lüftung selten im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤1000 ppm. Auch die signalgebenden Messinstrumente hatten wenig Einfluss auf dieses Verhalten. Man arrangierte sich zwischen den beiden Warngrenzen gelb bis rot.

In den Phasen 9-12 zeichnen sich sinkende CO₂-Belastungen ab, aber erst in den Phasen 13 bis 18 bewirken die nun aufgrund der wärmeren Witterung langen Lüftungsphasen überwiegend Raumluftkonzentrationen im hygienisch unbedenklichen Bereich ≤1000 ppm.

Zweiter Untersuchungszeitraum Phasen 19-30

Während der Phasen 19-30 ist keine Veränderung in der CO₂-Belastung im Zusammenhang mit der Außentemperatur festzustellen. Eigentlich war mit niedrigeren CO₂-Konzentrationen in den Phasen 19-21 sowie 29 und 30 zu rechnen, da hier die mittlere Tagestemperatur bei etwa 10°C lag. Doch im gesamten zweiten Untersuchungsbereich unterschieden sich die einzelnen Phasen nicht grundlegend voneinander. Es gab lediglich einen Unterschied zwischen den Phasen mit Steuerung des Lüftungsverhaltens durch die Luftgüte-Ampel und den Klimagriff. Bei letzterem war die Streuung der Werte etwas größer.

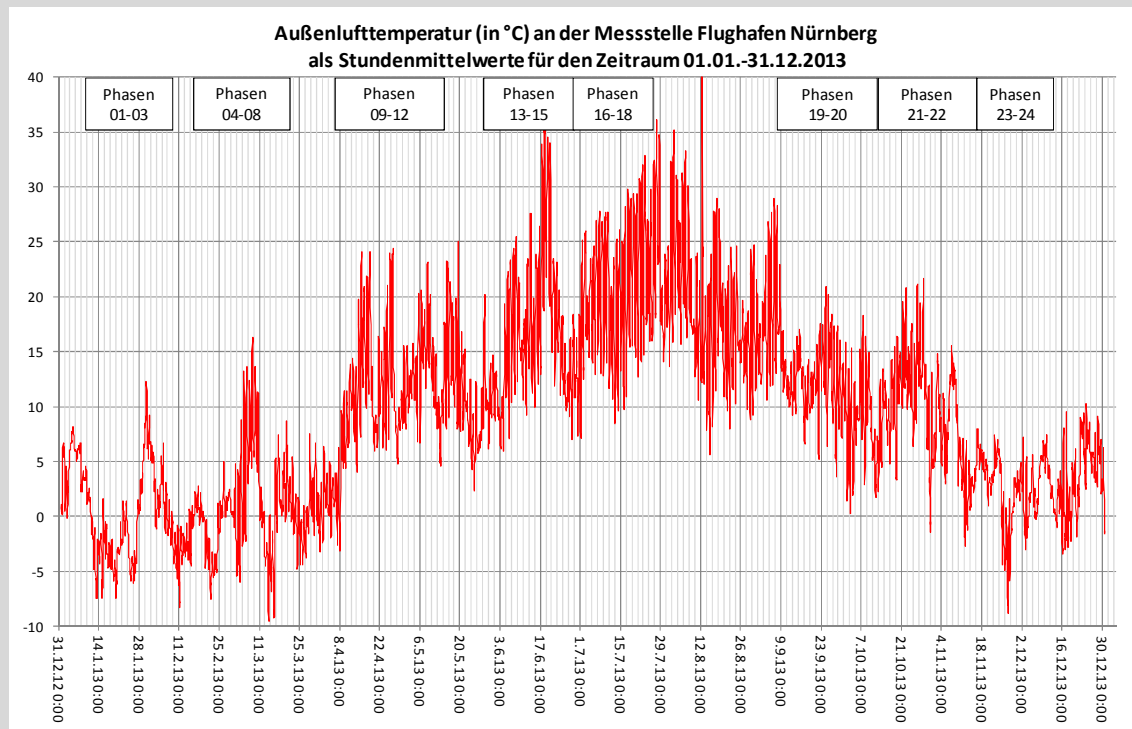


Abbildung 3-12: Außenlufttemperaturen als Stundenmittelwerte für den Zeitraum 01.01.-31.12.2013 an der Messstelle Flughafen Nürnberg

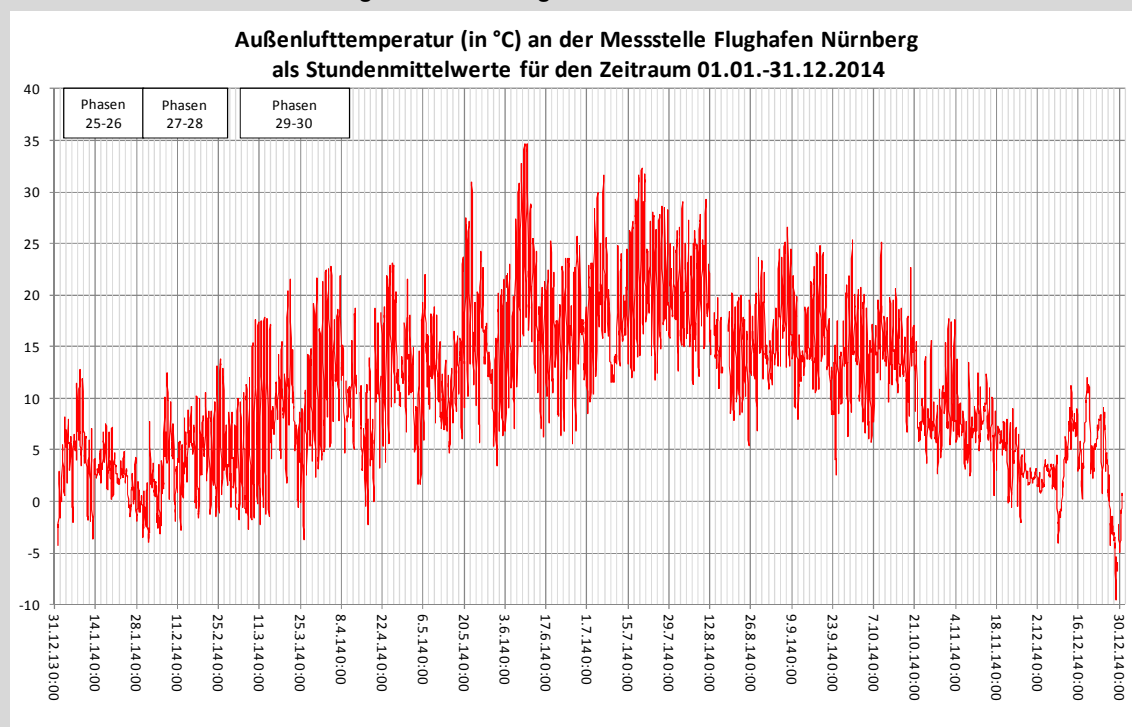


Abbildung 3-13: Außenlufttemperaturen als Stundenmittelwerte für den Zeitraum 01.01.-31.12.2014 an der Messstelle Flughafen Nürnberg

3.4 Rückmeldungen

Durch die Benennung von Ansprechpartnern auf den Phasenzetteln konnten sich die Raumnutzer bei Problemen oder Fragen direkt an die Mitarbeiter von SUN/U wenden. Leider wurde diese Möglichkeit nicht von allen Teilnehmern genutzt.

Die eingegangenen Mitteilungen betrafen überwiegend Probleme technischer Natur, die zu störenden Einflüssen im Unterrichtsbetrieb führten. Die Schwerpunkte lagen dabei in den Monaten Juni/Juli und Oktober bis Anfang Februar.

So verhinderten Außenjalousien und Innenvorhänge in den Zeiten stärkerer Sonneneinstrahlung einen optimalen Luftaustausch, der in der warmen Jahreszeit sowieso schon aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen geringer ausfällt. Die eingesetzten signalgebenden Messgeräte forderten dabei weitere Lüftungsmaßnahmen, die von den Nutzern aber nicht durchgeführt werden konnten. In den Fällen, in denen die Fenster zusätzlich durch mechanische Sicherungen nur in Kippstellung zu öffnen waren, und auch keine wirksame Querlüftung erzeugt werden konnte, verschärfte sich die Situation noch.

In den Wintermonaten und während der Übergangszeiten betrafen die Rückmeldungen meist folgende Punkte: die Außentemperaturen seien zu kalt, der Klassenraum kühle zu stark ab und /oder die Schüler frören. Da in den wenigsten Fällen auch während der Unterrichtszeiten eine Querlüftung möglich war, die einen raschen Luftaustausch bewirkt hätte, kam bzw. kommt es zu einem starken Temperaturgefälle zwischen den Sitzreihen an der Fensterfront und denen an der Innenwand und somit zu einer zeitlich verzögerten CO₂-Absenkung. Die eingesetzten signalgebenden Messgeräte forderten auch in diesem Fall weitere Lüftungsmaßnahmen ein.

„Es ist unterrichtstechnisch nicht möglich alle Fenster zum Lüften zu nutzen“, „Zum Lüften konnten die Fenster meist nur gekippt werden“, es sei „aus Sicherheits- und organisatorischen Gründen nicht möglich, beim Lüften die Fenster ganz zu öffnen“ sind drei Aussagen, die öfters gemacht wurden, meist aus dem Grund- bis Mittelschulbereich. Dafür gibt es mehrere Gründe: Die Fenster sind mit Schlössern gesichert und lassen sich daher nicht drehöffnen, oder die Fensterbänke werden als Ablageflächen genutzt, so dass die Fenster nicht ganz geöffnet werden können, oder die Fensterflügel sind so groß dimensioniert, dass sie geöffnet weit in den Raum hineinreichen, oder die Bestuhlung ist so angeordnet, dass die Fenster nicht ohne weiteres zu erreichen und zu öffnen sind.

Alle geschilderten Ursachen hatten zur Folge, dass sich die Nutzer zeitweise durch die optischen und akustischen Signale der Messgeräte genervt fühlten.

Doch es gab auch Positives zu berichten. So sei „die Luftgüte-Ampel angenehmer als der Klimagriff“ und es habe sich „ein Lüftungsrythmus eingestellt“, da „vor allem die Schüler auf die Ampel reagieren“ würden.

3.5 Erfahrungen beim Einsatz der Klimagriffe

Damit der Klimagriff verlässliche Signale aussenden konnte, mussten die Eingaben zu den Bereichen Raumnutzung, Wärmeschutz, Baujahr, Maße der Fenster und des Raumes, Lage der Fenster innerhalb des Gebäudes, Anzahl der Personen im Raum und Lage der Heizkörper möglichst genau sein.

Ebenso mussten bei der Kalibrierung einige Faktoren berücksichtigt werden, damit der Klimagriff den Öffnungswinkel des Fensters korrekt aufzeichnen konnte. Es musste zwischen der Position „ganz offen“ und „90° geöffnet“ mindestens ein Abstand von 20 cm vorliegen. Falls dies nicht zutraf, so musste der Öffnungswinkel von 90° soweit verkleinert wurde, bis dieser Abstand erreicht war. Dabei musste wiederum darauf geachtet werden, dass die Positionen „90° geöffnet“ und „Kippoffen“ sich nicht zu nahe kamen. Für die verschiedenen Kalibrierungsvorgänge musste das Fenster gleichmäßig und langsam geöffnet bzw. geschlossen werden.

Im Lauf des Messprogramms kam es immer wieder vor, dass einige Klimagriffe ihre Kalibrierung verloren. Dies führte zu fehlerhaften Datensätzen, die sich in den Klimagriff-Diagrammen anhand typischer Muster erkennen lassen (s. Anlagen 1-12, Kapitel 8, Daten der Klimagriffe).

Problematisch war auch, dass die Einstellungen wie Datum, Uhrzeit, Modus und Signalton nicht PIN-gesichert waren. Dadurch kam es in einigen Phasen zu Umstellungen seitens der Raumnutzer, weshalb zum Beispiel durch Veränderung des Datums oder der Uhrzeit der gemessene Zeitraum für die Messung nicht mehr verwertbar war, da die Messdaten nicht mehr zugeordnet werden konnten.

Aber auch ohne das direkte Zutun der Raumnutzer konnte es vorkommen, dass die Zeit- und Datumseinstellungen des Klimagriffs gelöscht wurden. Wurde das Fenster zum Beispiel durch einen Luftzug oder beim Schließen zu kraftvoll zugezogen, können die Batterien des Klimagriffs kurzzeitig den Kontakt verlieren, so dass der Klimagriff für einen kurzen Moment ohne Stromversorgung war. Nach der Unterbrechung wurde der Klimagriff automatisch neu gestartet und die einprogrammierte Zeitangabe ging verloren. Als Messdatum lag dann der 01.01.2010 vor. Die Messdaten ab diesem Zeitpunkt konnten nicht in die Auswertung aufgenommen werden, da auch hier eine nachträgliche Zuordnung nicht möglich war.

Alle oben genannten Probleme konnten durch eine Neukalibrierung und anschließend korrekte Eingabe von Datum und Uhrzeit behoben werden. Jedoch war dadurch ein gewisser Teil der Messdaten nur schwer auswertbar oder ging vollständig verloren.

Für den Einsatz in Schulen wäre ein lauterer Signalton nützlich, da dieser im normalen Unterrichtsgeschehen oft untergegangen ist. Eine komplette PIN-Sicherung würde außerdem unerlaubte Veränderungen an den bis jetzt nicht gesicherten Einstellungen verhindern.

Durch das Aussägen des Gehäuses im Bereich der Datenbuchse war das Auslesen ohne Demontage des Klimagriffs möglich. Auch die Phasenumstellung erfolgte unkompliziert und konnte ohne Anbringung eines Kabels durchgeführt werden. Die Software für das Auslesen und die Auswertung der Klimadaten war verständlich und überschaubar dargestellt, so dass nach kurzer Zeit ein effektives Arbeiten damit möglich war.

Der Klimagriff gab einen sehr guten Einblick in das Lüftungsverhalten der Raumnutzer und durch die effiziente Datenaufzeichnung (nur bei Veränderung der Messwerte) konnten Ergebnisdiagramme über den gesamten Zeitraum dargestellt werden, da es nicht übermäßig viele Datenpunkte gab. Durch diese Art der Datenaufzeichnung musste im Laufe des Messprogramms keine Batterie ausgetauscht werden. Die Montage und Demontage verlief ohne größere Probleme, jedoch würde ein enger an dem Batterieschacht anliegendes Gehäuse helfen, Kontaktverluste der Batterien bei zu festem Fensterschließen zu vermeiden.

3.6 Erfahrungen beim Einsatz der Luftgüte-Ampel

Sowohl bei der Montage als auch während der Betriebszeit der Luftgüte-Ampel war darauf zu achten, dass kein Fein- oder Baustaub in das Gehäuse eindringt. Weiterhin durfte das Auslesegerät (hier: Laptop) nicht mit dem Stromnetz verbunden sein. Wurden diese Anforderungen nicht beachtet, waren Beschädigungen bzw. Überlastungen einzelner Bauteile die Folge, so dass die Luftgüte-Ampel erst nach einer Wartung / Reparatur durch die Herstellerfirma wieder funktionsfähig war.

Leider wurden während des laufenden Messprogramms Renovierungs- oder Grundreinigungsmaßnahmen der Schulen teilweise zu spät oder gar nicht mitgeteilt, sodass es vereinzelt zu Ferienbeginn oder aber am Ende der Ferien vorkam, dass die Ampel verschmutzt und nicht mehr funktionstüchtig vorgefunden wurde.

Ebenso kam es trotz Laptop im Akkubetrieb beim Auslesen und Umprogrammieren gelegentlich zu Bauteilüberlastungen. Um die Luftgüte-Ampel bei einem Phasenwechsel neu zu programmieren, musste der Deckel entfernt und das Gerät vom Strom getrennt werden. Anschließend wurde ein Datenkabel mit der Luftgüte-Ampel verbunden, das Gerät wieder an den Strom gesteckt und die Neuprogrammierung durchgeführt. Da das Messprogramm insgesamt 30 Phasen umfasste, könnten die Bauteile auch aufgrund der häufigen Neuprogrammierung zu Schaden gekommen sein. Dadurch kam es gelegentlich zu Datenausfällen, da der Auslesezyklus zwischen 4 und 7 Tage betrug.

Zusammenfassend sei gesagt, dass die Luftgüte-Ampel ein zuverlässiges Messgerät ist, wenn es um die Bestimmung der CO₂-Konzentration in einem Raum geht. Sie kann nur mit Hilfe eines Programms und des richtigen Datenkabels umprogrammiert werden, wodurch keine andere Person das Gerät verstellen kann. Der einzige Weg, die Daten unbrauchbar zu machen ist, das Gerät nach der Initiierung vom Stromnetz zu trennen. Die erneute Verbindung mit dem Stromnetz zeigt, dass die Daten, die bis zum Zeitpunkt der Stromnetztrennung aufgezeichnet wurden, noch verwertbar sind. Die neu aufgezeichneten Daten werden jedoch ohne Zeit und Datum angegeben, da die Luftgüte-Ampel diese Daten nur bei der Initiierung mit dem Laptop erhält.

Eine Verbesserung der Luftgüte-Ampel wäre durch eine Vergrößerung der Speicherkapazität und durch eine Möglichkeit die Ampel neu zu programmieren, ohne dass diese vom Strom getrennt oder aufgeschraubt werden muss, zu erreichen.

4 Fazit zur Raumlufthygiene in Klassenräumen

4.1 Ist-Situation

Die üblicherweise in Klassenräumen vorherrschende Raumlufthygienqualität ist mindestens als hygienisch auffällig, meist aber als hygienisch inakzeptabel einzustufen. Für eine optimale Raumlufthygienqualität ist das persönliche Lüftungsverhalten alleine nicht ausreichend, zumal es an einer ausgeprägten sensorischen Fähigkeit des Menschen mangelt, eine sich langsam verschlechternde Raumlufthygienqualität frühzeitig zu erkennen.

Die Messdaten der Klimagriffe haben außerdem gezeigt, dass nicht alle Fenster zum Lüften genutzt werden, wodurch die CO₂-Konzentrationen in der Raumlufthygien durch freie Fensterlüftung nachweislich nicht im gewünschten Maße reduziert wurden. Viele der Fensterbänke werden als Dauerablage genutzt, als zusätzliches Bücherregal oder als Präsentationsflächen. Die zum Lüften notwendigen Fensterflügel werden dadurch dauerhaft blockiert. Andere Fenster sind aus Sicherheitsgründen durch Schlösser gesperrt und lassen sich daher nur kippen oder, mit dem passenden Schlüssel, nur durch die Lehrkräfte ganz öffnen.

Aus den Messreihen zeigt sich generell, dass das Lüften zur Verbesserung der Raumlufthygienqualität gegenwärtig einen eher untergeordneten Stellenwert im Unterrichtsbetrieb besitzt.

4.2 Möglichkeiten manueller bzw. mechanischer Lüftungsmaßnahmen

Hygienisch unbedenkliche Bedingungen, d.h. CO₂-Raumlufthygienkonzentrationen <1000 ppm, wie sie auf Basis der Ad-hoc-AG IRK/AOLG Leitwerte im „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umweltbundesamtes vorgegeben werden, bzw. die Mindestanforderungen der DIN EN 15251 für „neue und renovierte Gebäude“, bei denen ein „normales Erwartungsmaß“ zu Grunde gelegt wird, sind im Ergebnis des vorliegenden CO₂-Messprogramms ohne den Einsatz von raumlufthygientechnischen Anlagen in Klassenräumen kaum dauerhaft zu etablieren.

Dabei spielt auch die fachgerechte Auslegung und Installation der RLT-Anlagen eine wichtige Rolle. In den in das Messprogramm inkludierten Klassenräumen mit RLT-Anlagen war es z.B. in einigen Fällen angezeigt, zusätzlich in regelmäßigen Abständen über die Fenster zu lüften, um hygienisch unbedenkliche CO₂-Konzentrationen einzuhalten.

Die Mindestanforderung der DIN EN 15251 sieht für „bestehende Gebäude“, bei denen ein „moderates Erwartungsmaß“ (Stufe III) zu Grunde gelegt wird, eine maximale CO₂-Konzentration von 1400 ppm vor. Diese Vorgaben ließen sich unter optimalen gebäude-technischen Gegebenheiten wohl mit der freien Fensterlüftung einhalten. Nach der Vorgabe der Ad-hoc-AG charakterisiert der Konzentrationsbereich > 1000 ppm allerdings bereits eine hygienisch auffällige Situation, die Lüftungsmaßnahmen erfordert, welche ggf. überprüft und verbessert werden müssten.

Das grundsätzliche Ziel, die Raumlufthqualität in den Klassenräumen mit einfachen Mitteln deutlich zu verbessern, erscheint auf der Basis der Ergebnisse des durchgeführten CO₂-Messprogramms daher generell möglich. Die im Untersuchungszeitraum erhobenen Daten lassen eine zum Teil deutliche Reduzierung der maximalen CO₂-Konzentration in der Innenraumlufth alleine durch die bewusste und systematische freie Fensterlüftung erkennen.

Allerdings werden weitergehende und regelmäßig wiederkehrende Maßnahmen (Informationen, Schulung der Lehrkräfte, etc.) für notwendig erachtet, um ein entsprechendes Bewusstsein bei den Gebäudenutzern und damit eine dauerhafte Verbesserung im Unterrichtsbetrieb zu schaffen und nachhaltig zu etablieren.

Dafür ist eine referats- bzw. dienststellenübergreifende Zusammenarbeit erforderlich, um geeignete bauliche, gestalterische, organisatorische und administrative Maßnahmen umzusetzen.

4.3 Effekte signalgebender Messinstrumente

Einige der Untersuchungsphasen haben gezeigt, dass der Einsatz signalgebender Messinstrumente zu einer Verbesserung der Raumlufthqualität beitragen kann.

Besonders gut wurden die Vorgaben in einer der Grundschulen und in einem Raum der Berufsschule umgesetzt. Die CO₂-Messwerte beim Einsatz der Luftgüte-Ampel liegen hier zu mindestens 50% unterhalb der 1000 ppm-Grenze. Auch in den Phasen, in denen der Klimagriff aktiv ist, wird dieser Wert ungefähr gehalten. In der Mittelschule und dem Gymnasium wurde während der Phasen mit der Luftgüte-Ampel etwa die Grenze von 2000 ppm eingehalten, in den Phasen des Klimagriffs zeigte sich jedoch meist das ursprüngliche Lüftungsverhalten.

Die Luftgüte-Ampel schneidet dabei sichtbar besser ab als die Klimagriffe, die Wirkung beider Systeme zeigte aber eine fundamentale Abhängigkeit von der generellen und insbesondere der langfristigen Akzeptanz durch die Nutzer. Der Vorteil der Luftgüte-Ampel liegt darin, dass sie die CO₂-Konzentration in der Raumlufth direkt misst und die Überschreitung akustisch laut mitteilt, im Gegensatz zum Klimagriff, der über den zeitlichen Anstieg der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur im Raum rechnerisch auf ein notwendiges Lüftungsintervall hinweist, dessen akustische Signale aber im Schulbetrieb meist untergehen.

In den Klassenräumen, in denen Vorhänge als Sonnenschutz genutzt werden, liefern die Klimagriffe häufig falsch positive Informationen, da sich zwischen Fenster und Vorhang ein Klima aufbaut, das nicht mit dem im Klassenraum vergleichbar ist.

Bei der Verwendung von Außenrollos oder Jalousien vor den Fenstern wird der notwendige Lüftungsquerschnitt soweit eingeschränkt, dass er maximal mit einem gekippten Fensterflügel gleichzusetzen ist und damit nicht für einen wirksamen Luftaustausch ausreicht. Die Folge ist, dass sowohl die Luftgüte-Ampel wie auch die Klimagriffe ständig zum Lüften auffordern, was dem geordneten Unterrichtsbetrieb nicht zuträglich ist.

Anlagen

- Anlage 1** Grundschule G01R01 (Schulgebäude der Kategorie A)
- Anlage 2** Grundschule G01R02 (Schulgebäude der Kategorie A)
- Anlage 3** Grundschule G02R01 (Schulgebäude der Kategorie A)
- Anlage 4** Grundschule G02R02 (Schulgebäude der Kategorie A)
- Anlage 5** Hauptschule G03R01 (Schulgebäude der Kategorie B)
- Anlage 6** Hauptschule G03R02 (Schulgebäude der Kategorie B)
- Anlage 7** Grundschule G04R01 (Schulgebäude der Kategorie B)
- Anlage 8** Grundschule G04R02 (Schulgebäude der Kategorie B)
- Anlage 9** Berufliche Schule G05R01 (Schulgebäude der Kategorie C)
- Anlage 10** Berufliche Schule G05R02 (Schulgebäude der Kategorie C)
- Anlage 11** Gymnasium G06R01 (Schulgebäude der Kategorie C)
- Anlage 12** Gymnasium G06R02 (Schulgebäude der Kategorie C)