

Bericht BAG-Projekt „Messungen zur Raum- luftqualität und Lüftung in Schulräumen“ – Nachmessungen Formal- dehyd

Nr. 03-19-0009

Ausstelldatum 10. März 2020 rev20200617

Objektbezeichnung BAG-Projekt „Messungen zur Raumluftqualität und Lüftung in Schulräumen“

Auftraggeber Eidgenössisches Departement des Innern EDI; Bundesamt für Gesundheit BAG; Direktionsbereich Verbraucherschutz; Fachstelle Wohngifte; Stationsstrasse 15; CH-3003 Bern

Adressat Eidgenössisches Departement des Innern EDI; Bundesamt für Gesundheit BAG; Direktionsbereich Verbraucherschutz; Fachstelle Wohngifte; Roger Waeber; Stationsstrasse 15; CH-3003 Bern

Inhaltsverzeichnis

Ausgangslage	4
Aufgabe	4
Vorgehen	4
Auswahl der Räume	4
Einfluss der Klimabedingungen in reellen Räumen	5
Bestimmung des Luftwechsels während der Nutzungssimulation	6
Verlauf der Formaldehydkonzentration während eines reellen Schultages	6
Beurteilung des Handlungsbedarfs	6
Resultate	7
Formaldehyd und Luftwechsel unter Standard- und Nutzungsbedingungen	7
Formaldehyd und Luftwechsel während eines Schultages	7
Interpretation nachgewiesener Konzentrationen	9
Grundlagen	9
Vergleich Sommer- zu Wintermessung	9
Einfluss der Fensterlüftung auf die Formaldehydkonzentration	13
Verlauf der Formaldehydkonzentration während Schultag	16
Hochrechnung auf 100 Klassenzimmer	20
Schlussfolgerungen	25
Wie hoch ist die Formaldehydkonzentration unter Sommerbedingungen im Vergleich zur Wintermessung?	25
Wie hoch ist die Formaldehydkonzentration unter Nutzungsbedingungen?	25
Wie verhält sich die Formaldehydkonzentration während eines üblichen Schultages?	25
Wo besteht Handlungsbedarf?	26
Anhang	27

Material und Methoden	27
Formaldehydmessungen	28
Literaturverzeichnis	29

Ausgangslage

Im Rahmen des Projekts „Messungen zur Raumluftqualität und Lüftung in Schulräumen“ wurden unter anderem auch Formaldehydmessungen in 100 Klassenzimmern durchgeführt. Anhand der Resultate ist davon auszugehen, dass einige der im Winter gemessenen Formaldehydwerte im Sommer aufgrund der Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte den Richtwert des Bundesamts für Gesundheit überschreiten werden. Mit Nachmessungen unter sommerlichen Bedingungen in ausgewählten Klassenzimmern soll der Einfluss abgeklärt werden.

Das Bundesamt für Gesundheit beauftragte die Firma Ganz Klima GmbH am 21. August 2015 und 8. Januar 2019¹ mit den Abklärungen.

Aufgabe

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

1. Wie hoch ist die Formaldehydkonzentration unter Sommerbedingungen im Vergleich zur Wintermessung?
2. Wie hoch ist die Formaldehydkonzentration unter Nutzungsbedingungen?
3. Wie verhält sich die Formaldehydkonzentration während eines üblichen Schultages?
4. Wo besteht Handlungsbedarf?

Vorgehen

Auswahl der Räume

Die Auswahl der Räume wurde vom Auftraggeber (Bundesamt für Gesundheit) vorgenommen. Als Grundlage wurde neben der nachgewiesenen Formaldehydkonzentration die statistische Auswertung der gemessenen CO₂-Konzentrationen herangezogen (Tab. 1).

¹ Die Messungen wurden 2015 durch den Auftraggeber auf 2019 verschoben.

Objekt	Formaldehydkonzentration			CO ₂ -ANTEIL		Belegungs-quotient	Nachmessung
	Mess- bedingung	Normklima- bedingung	Sommer- bedingung	<1000	>2000		
SH63	154	250	484	12	10	0.10	ja + Tagesmessung
SH99	133	191	370	0	93	0.05	ja
SH51	87	189	366	53	2	0.06	ja (Tagesmessung vorgesehen aber nicht mehr möglich, da zwischenzeitlich saniert)
SH24	60	137	265	3	33	0.10	ja
SH72	60	116	225	15	22	0.09	ja
SH75	95	116	225	18	16	0.08	ja + Tagesmessung
SH11	78	99	191	14	16	0.09	nein (keine Messung möglich, da zwischenzeitlich saniert)
SH80	80	93	180	1	56	0.10	ja
SH55	76	88	170	34	17	0.06	ja
SH21	51	72	140	41	24	0.12	ja

Tab. 1: Untersuchte Klassenzimmer (Objekte) gemäss Auswahl durch Auftraggeber zusammen mit den Auswahlkriterien (Formaldehydkonzentration, CO₂-Anteile und Belegung)

Einfluss der Klimabedingungen in reellen Räumen

In neun² Schulräumen mit erhöhter Formaldehydkonzentration wurden unter sommerlichen Klimabedingungen die Messung unter Standardbedingung (Situation vor der ersten Schulstunde) sowie unter simulierter Nutzungsbedingung wiederholt. Die Nutzungssimulation wurde gemäss (SN EN ISO 16000-2, 2006) nach folgendem Schema durchgeführt:

- Stößlüftung 10 Minuten (entspricht Pausenlüftung³)
- Konditionierung 60 Minuten (Fenster und Türen geschlossen)
- Messung 30 Minuten

² Vorgesehen waren 10 Schulräume, wobei ein Schulzimmer zwischenzeitlich saniert wurde (wurde erst am Messtag vor Ort kommuniziert).

³ Gemäss Norm soll 5 Minuten gelüftet werden. Da in der Praxis vor und nach einer Doppellection (2 x 45 Minuten) eine grössere Pause stattfindet, wurde eine realistischere Lüftung von 10 Minuten durchgeführt.

Bestimmung des Luftwechsels während der Nutzungssimulation

Zur Quantifizierung der Effizienz der Fensterlüftung während der Nutzungs-simulation wurde zusätzlich der Luftwechsel bestimmt. Diese Messung er-folgt über die Abnahme der CO₂-Konzentration gemäss (DIN ISO 16000-8, 2008).

Verlauf der Formaldehydkonzentration während eines ree-len Schultages

Zur Beantwortung der Frage, welchen Einfluss der übliche Tagesablauf in einem Schulzimmer auf die Formaldehydkonzentration ausübt, wurden Mes-sungen während je eines Schultages in zwei Schulzimmern durchgeführt. Während des Schultages wurde die CO₂-Konzentration gemessen sowie die Belegung und die Fensterlüftung protokolliert. Die Fensterlüftung war grundsätzlich den Lehrpersonen überlassen, doch wurden sie aufgefordert, regelmässig zu lüften. Die Messungen wurden vor Schulbeginn und jeweils in den letzten 30 Minuten jeder Schulstunde durchgeführt.

Beurteilung des Handlungsbedarfs

Anhand der Resultate obiger Messungen wurde ein Schema zur Beurteilung des Handlungsbedarfs aufgrund der im Winter nachgewiesenen Formaldehydkonzentrationen entworfen. Dieses wurde anschliessend auf die Werte von allen 100 untersuchten Schulzimmern angewandt.

Weitere Angaben zur Messmethodik sind im Anhang zusammengestellt.

Resultate

Formaldehyd und Luftwechsel unter Standard- und simulierten Nutzungsbedingungen

Messort	Formaldehyd Standard	Formaldehyd Nutzung	Luftwechsel während Stosslüftung ⁴
	µg/m³	µg/m³	h⁻¹
SH21	80	60	11
SH24	145	111	11
SH51	374	320	7
SH55	210	176	15
SH63	304	260	6
SH72	114	71	13
SH75	162	104	27
SH80	102	58	24
SH99	276	196	15

Tab. 2: Resultate der Formaldehyd- und Luftwechselmessungen (Stichproben)

Formaldehyd und Luftwechsel während eines Schultages

Zeitpunkt	Uhrzeit	Formaldehyd	Luftwechsel während Stosslüftung ⁵
		µg/m³	h⁻¹
Vor Beginn	5:30-6:00	191	0.013 ⁶
Lektion 1	7:40-8:10	156	5
Lektion 2	8:30-9:00	73	13
Lektion 3	9:20-9:50	100	0
Lektion 4	10:25-10:55	61	12
Lektion 5	11:15-11:45	71	4
Lektion 6	13:45-14:15	74	10
Lektion 7	14:35-15:05	69	12

Tab. 3: Resultate der Formaldehyd- und Luftwechselmessungen im SH75 (Tagesmessung)

⁴ Eine Stunde vor Messung (simulierte Nutzungsbedingungen).

⁵ Direkt vor Lektion.

⁶ Während Statusmessung im ungelüfteten und unbelegten Raum

Zeitpunkt	Uhrzeit	Formaldehyd µg/m³	Luftwechsel während Stosslüftung ⁷ h⁻¹
Vor Beginn	5:30-6:00	180	0 ⁸
Lektion 1	8:28-8:58	125	9
Lektion 2	9:19-9:49	111	14
Lektion 3	10:23-10:53	100	7
Lektion 4	11:14-11:44	125	6
Lektion 5	13:46-14:16	125	6
Lektion 6	14:33-15:03	126	5

Tab. 4: Resultate der Formaldehyd- und Luftwechselmessungen im SH63 (Tagesmessung)

⁷ Direkt vor Lektion.

⁸ Während Statusmessung im ungelüfteten und unbelegten Raum

Interpretation nachgewiesener Konzentrationen

Grundlagen

Richtwert

Das Bundesamt für Gesundheit (BAG, 2016) empfiehlt für Formaldehyd einen Richtwert von 0.1 ppm (entspricht 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 20°C). Dieser Richtwert ist als Schwelle zu einer Gesundheitsgefährdung zu verstehen. Ist er überschritten, sollen umgehend Massnahmen zur Senkung der Belastung getroffen werden.

Klimaabhängigkeit

Formaldehydemissionsraten sind unter anderem abhängig von der Temperatur und von der Luftfeuchte. Im Merkblatt der DGfH (Marutzki, 1993) wird die Umrechnung von Formaldehydkonzentrationen unter Messbedingungen auf Bezugsbedingungen (23 °C; 45 %rF) mittels der umgeformten Andersen-Formel vorgeschlagen. Mit der Umrechnung auf das Normklima wird die über ein Jahr zu erwartende durchschnittliche Formaldehydkonzentration geschätzt. Die Sommerbedingungen (26 °C/ 60%rF)⁹ entsprechen dagegen Extremwerten. Für Spanplatten stimmt die Berechnung gut mit der realen Situation überein. Andere Holzwerkstoffe mit einer Formaldehyd-Harz-Verleimung können auf Klimaveränderungen verschieden reagieren.

Vergleich Sommer- zu Wintermessung

Messwerte

Eines der Hauptziele der Untersuchung liegt in der Beantwortung der Frage, wie sich die im Winter nachgewiesenen Formaldehydkonzentrationen auf den Sommerfall übertragen lassen. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass es sich bei dem Richtwert für Formaldehyd aufgrund der akuten Reizwirkung um einen 30-Minuten-Wert handelt.

In Abb. 1 sind die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintermessung dargestellt. Im Sommer werden in allen neun untersuchten Klassenzimmern im ungelüfteten Zustand höhere Formaldehydkonzentrationen nachgewiesen als im Winter. Die Unterschiede liegen zwischen einem Faktor 1.3 (SH80) und 4.3 (SH51).

⁹ Beruhend auf Auslegungskriterien gemäss (SIA 382/1, 2007)

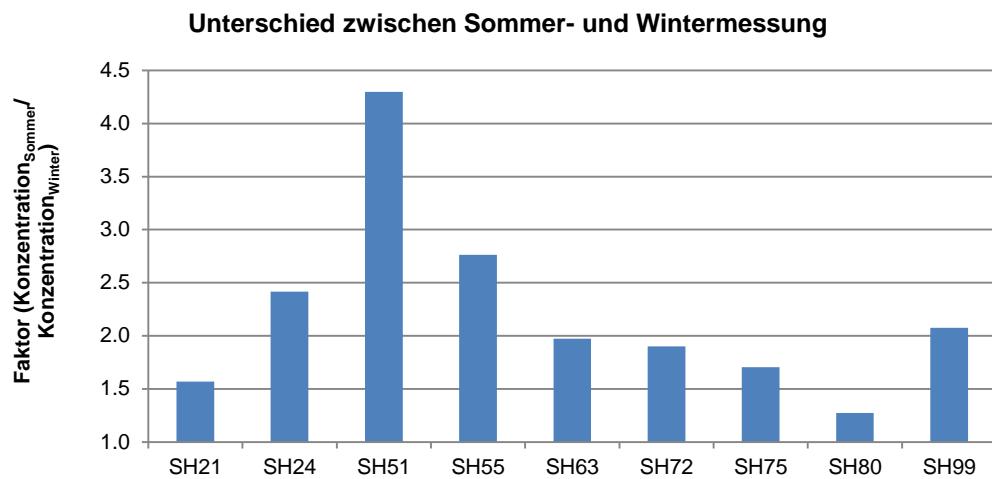


Abb. 1: Im Sommer nachgewiesene Formaldehydkonzentrationen als Faktor der Wintermessung

Da die Sommermessungen bei unterschiedlichen Raumlufttemperaturen und -feuchten durchgeführt wurden, interessiert die Frage, inwieweit die raumklimatischen Bedingungen unter Messbedingungen die Resultate beeinflussen. Mit anderen Worten, stimmt die Hochrechnung von Winter- auf Sommerbedingungen in den einzelnen Klassenzimmern mit den Messwerten überein. Zur Klärung wurden die Messwerte der Winter- und Sommermessungen jeweils auf Normklimabedingungen umgerechnet und den so normierten Sommerwert als Faktor des normierten Winterwerts wiedergegeben (Abb. 2).

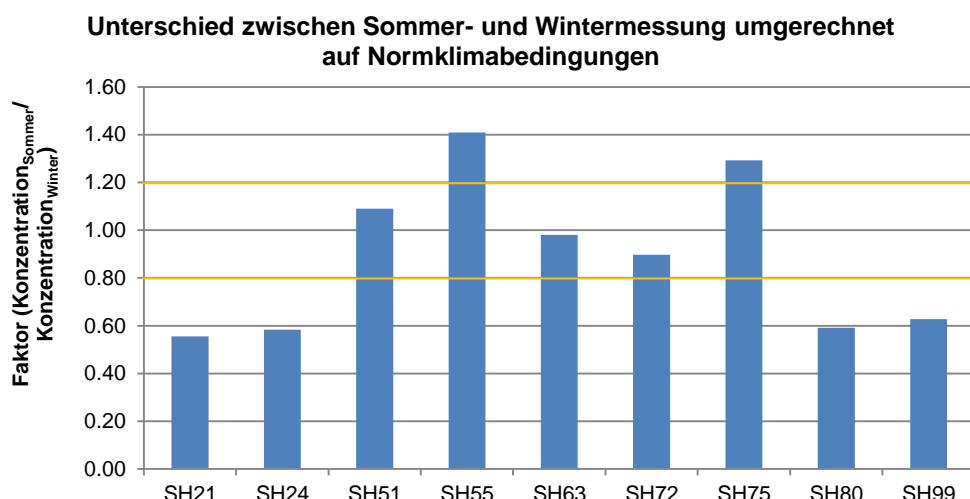


Abb. 2: Im Sommer nachgewiesene und auf Normklimabedingungen umgerechnete Formaldehydkonzentrationen als Faktor der Wintermessung zusammen mit einer Fehlerabschätzung (Probenahme, Analytik und Raumsituation) von ±20%.

Bei drei der neun untersuchten Klassenzimmer stimmt die Umrechnung auf Normklimabedingungen sehr gut mit der umgeformten Andersen-Formel überein (Abb. 2). Bei zwei Klassenzimmern wird im Sommer eine höhere Formaldehydkonzentration als aus der Wintermessung errechneten nachgewiesen. Bei vier Klassenräumen liegen die im Sommer festgestellten Formaldehydkonzentrationen bei tieferen Werten als erwartet.

Auf Sommerbedingungen umgerechnete Formaldehydkonzentrationen

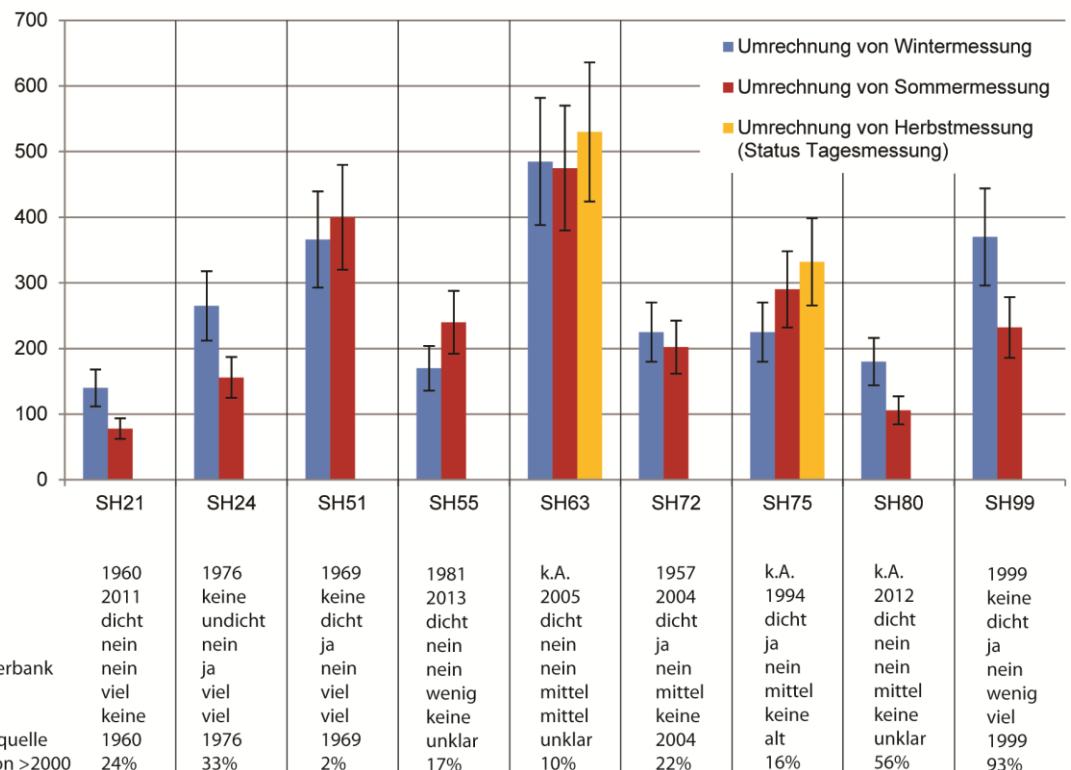


Abb. 3: Auf Sommerbedingungen umgerechnete Formaldehydkonzentrationen zusammen mit relevanten Raumdaten und mit einer Fehlerabschätzung (Probenahme, Analytik und Raumsituation) von ±20%

In Abb. 3 sind die Formaldehydkonzentrationen der Winter- und Sommermessungen jeweils umgerechnet auf Sommerbedingungen dargestellt. Zudem sind die Statusmessungen während der Tagesmessungen in den zwei untersuchten Klassenzimmern SH63 und SH75 eingefügt. Zu den einzelnen Klassenräumen sind ausserdem die relevanten Raumdaten zusammengestellt. Aus diesen Daten lassen sich folgende Schlüsse ziehen (Tab. 5):

Objekt	Übereinstimmung mit Hochrechnung	Veränderungen gegenüber Wintermessung	Mögliche Gründe für Übereinstimmung resp. Nichtübereinstimmung
SH21	Nein Tiefere Konzentration im Sommer als erwartet.	Bücherregal mit offenen Kanten aus Raum entfernt. Neue potentielle Quelle im Raum (Holzkisten von Schülern, gefertigt aus 3-Schichtplatten, und 2 Sofas).	Allenfalls entferntes Bücherregal für die tieferen Werte verantwortlich.
SH24	Nein Tiefere Konzentration im Sommer als erwartet.	Teilweise neue Büchergestelle zusätzlich.	Fensterbank mit offener Spanplattenfläche über Heizradiator: allenfalls führt die erhöhte Temperatur der Spanplatte im Winter zu einer erhöhten Formaldehydabgabe, was zu einer Überschätzung der Sommerwerte führen kann.
SH51	Ja	Keine	Größere Fläche an offenen und älteren Spanplattenoberflächen vorhanden.
SH55	Nein Etwas höhere Konzentration im Sommer als erwartet.	Zusätzlich ein ev. furniertes Holzmöbel vorhanden.	Allenfalls neues Holzmöbel für höhere Werte verantwortlich.
SH63	Ja Drei Messungen in unterschiedlichen Jahreszeiten mit gleichem Resultat.	Keine	Keine Veränderungen gegenüber Messung von 2014.
SH72	Ja	Neues Lehrerpult (keine offenen Spanplatten mehr)	Spanplatten mit mittlerer offener Fläche (2004).
SH75	Nein Etwas höhere Konzentration im Sommer als erwartet.	Einzelne Möbelstücke mit offenen Flächen (Bücherstell aus bemalten Spanplatten, Stehpult aus offenen MDF-Platten) entfernt. Altes Schülerpult 2019 neu im Raum (offene Spanplatte).	Ältere Spanplatten mit mittlerer offener Fläche. Ev. altes Schülerpult mit offener Spanplatte für höhere Werte verantwortlich.
SH80	Nein Tiefere Konzentration im Sommer als erwartet.	Neu ein alter kleiner Tisch mit offener Spanplatte vorhanden.	Alter der potentiellen Hauptquellen unklar. Grund nicht eruierbar.
SH99	Nein Tiefere Konzentration im Sommer als erwartet.	Keine	Grossflächig verlegte OSB-Platten (Einbau 1999) mit mutmasslich anderer Klimaabhängigkeit.

Tab. 5: Zusammenstellung möglicher Gründe für resp. gegen die Übereinstimmung mit der Hochrechnung der im Winter und Sommer nachgewiesenen Formaldehydkonzentrationen

Einfluss der Fensterlüftung auf die Formaldehydkonzentration

Nach einer 10-minütigen Fensterlüftung und anschliessender einstündiger Wartezeit werden Reduktionen der Formaldehydkonzentrationen auf 55% bis 81% der Werte vor der Lüftung nachgewiesen (Abb. 4).

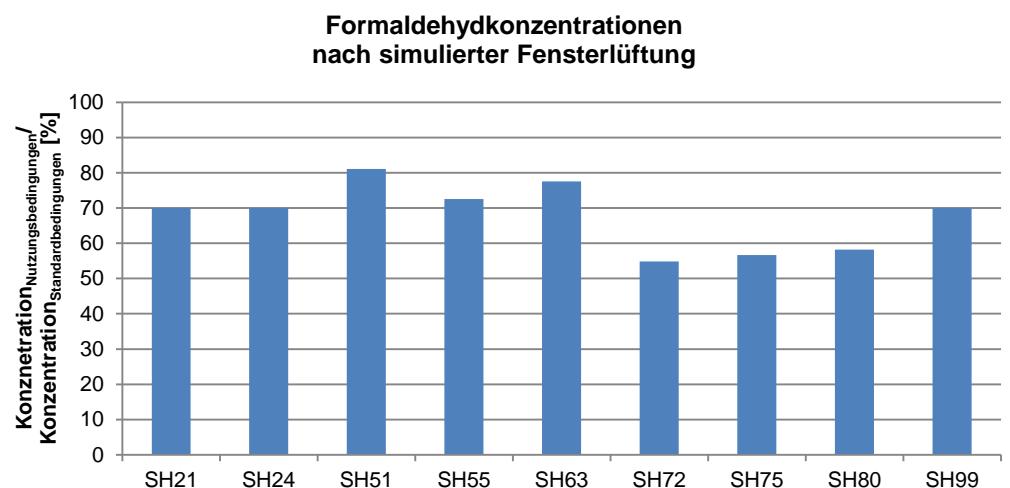


Abb. 4: Formaldehydkonzentrationen nach der Nutzungssimulation (nach 10-minütiger Fensterlüftung und einer Stunde Wartezeit) bezogen auf den Zustand vor der Simulation (Formaldehydkonzentrationen jeweils auf Normklimabedingungen umgerechnet).

Dabei spielt die Effektivität der Fensterlüftung, ausgedrückt als Luftwechsel während der Lüftungsphase, zwar eine Rolle, aber offensichtlich nicht die einzige. Aus den wenigen Werten zeigt sich ein schwacher Zusammenhang zwischen Formaldehydkonzentration und Luftwechsel, Aussentemperatur sowie Etage (Abb. 5). Zwischen der Konzentration und der Windgeschwindigkeit, der Raumlufttemperatur und dem Anteil der offenbaren Fensterfläche am Raumvolumen besteht kaum ein Zusammenhang.

Die grösste Abhängigkeit des Luftwechsels wird in den neun untersuchten Klassenzimmern in Bezug auf die Etage festgestellt (Abb. 6). Je höher das Schulzimmer im Gebäude liegt, desto besser die Durchlüftung während der 10-minütigen Stosslüftung.

Die Klassenzimmer SH51, SH72, SH75 und SH99 können quergelüftet werden. Unter den vorgefundenen Bedingungen hatte dies kein Einfluss auf den Luftwechsel (Abb. 7).

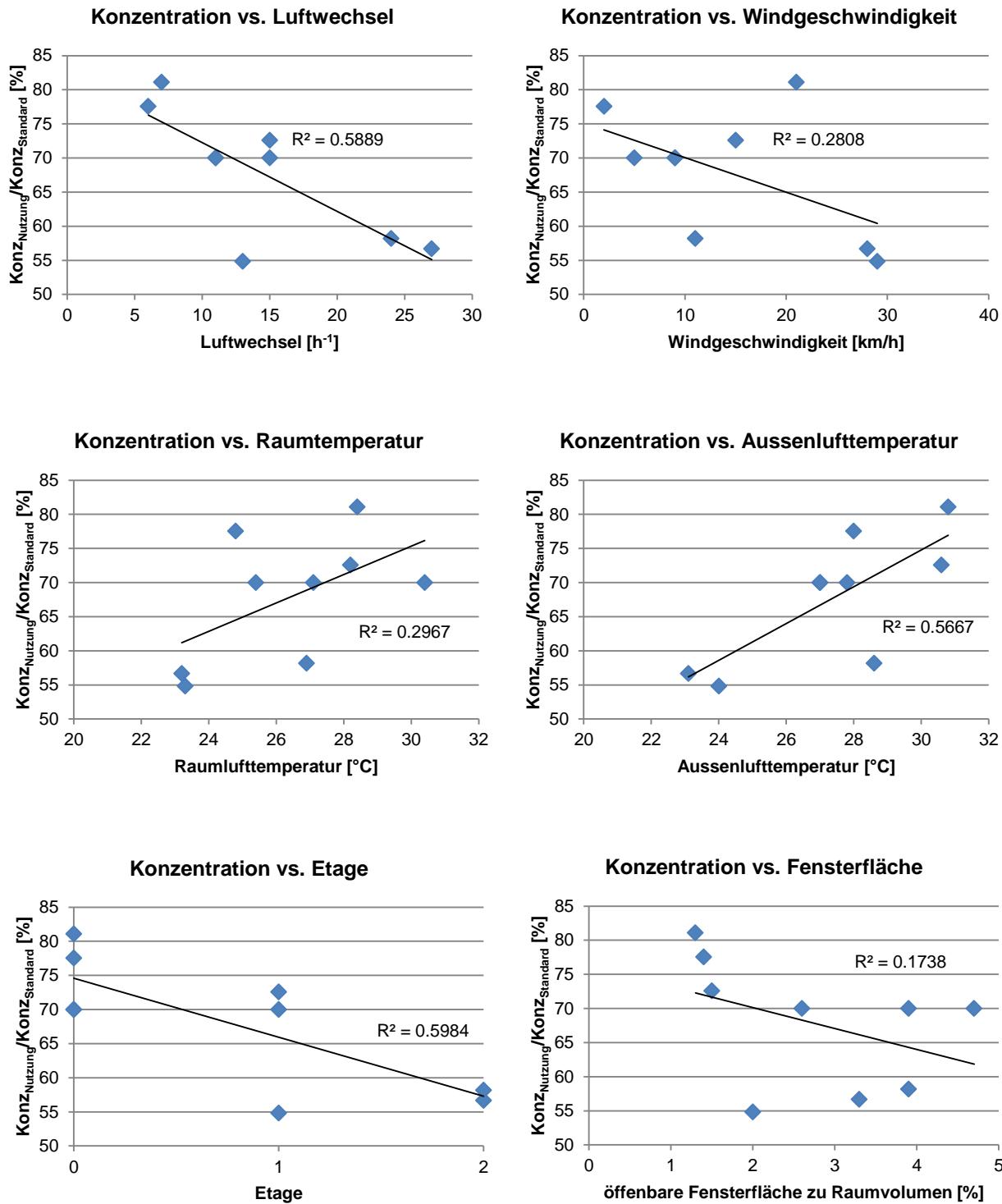


Abb. 5: Korrelationen zwischen der Formaldehydkonzentration (als Prozentsatz von Wert unter Nutzungsbedingungen und Wert unter Standardbedingungen) und verschiedenen weiteren Parametern

Zusammenhang zwischen Luftwechsel, Etage, geöffneter Fensterflügel, Aussentemperatur und Windgeschwindigkeit

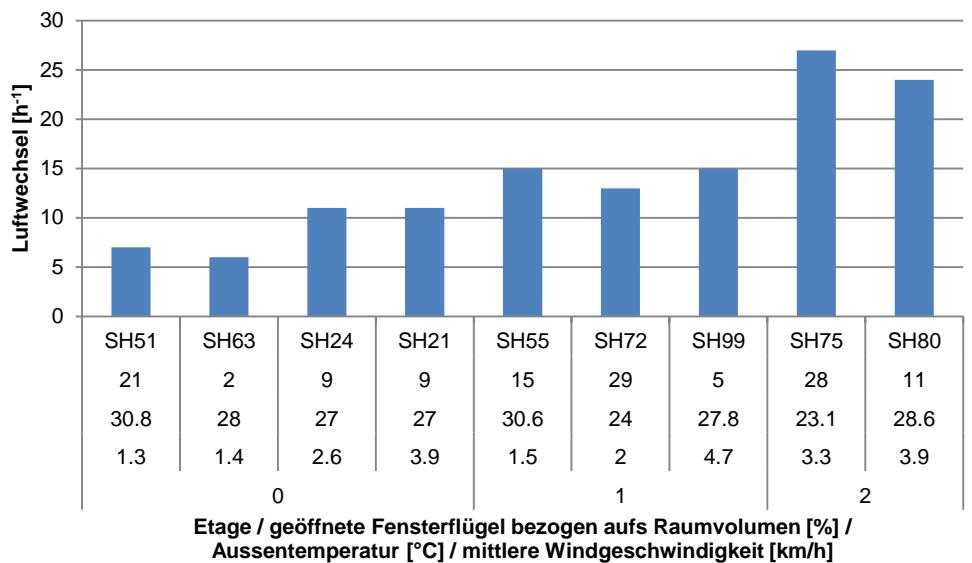


Abb. 6: Nachgewiesener Luftwechsel während der 10-minütigen Fensterlüftung in Abhängigkeit von Etage, geöffneter Fensterflügel (bezogen aufs Raumvolumen), Aussentemperatur und mittlerer Windgeschwindigkeit (von unten nach oben)

Zusammenhang zwischen Luftwechsel und Querlüften/Etage

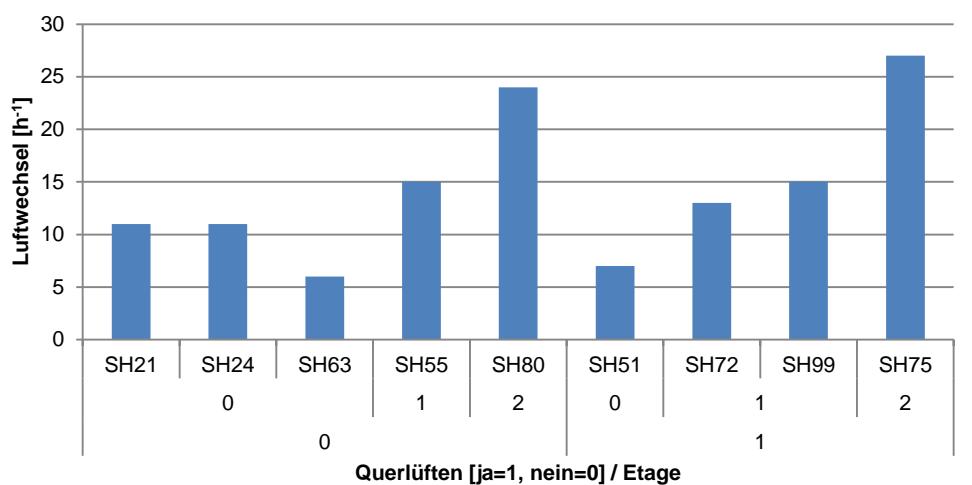


Abb. 7: Nachgewiesener Luftwechsel während der 10-minütigen Fensterlüftung in Abhängigkeit von Querlüftung und Etage (von unten nach oben)

Verlauf der Formaldehydkonzentration während Schultag

Zwei Fragen stellen sich bezüglich der Formaldehydkonzentrationen während eines üblichen Schultages:

1. Wie verhält sich die Formaldehydkonzentration im Tagesverlauf?
2. Wie beeinflusst das individuelle Lüftungsverhalten den Verlauf der Formaldehydkonzentration?

In Abb. 8 sind die während der letzten 30 Minuten jeder Lektion nachgewiesenen Formaldehydkonzentrationen im Objekt SH63 zusammengestellt. In Abb. 9 ist die Abnahme bezogen auf die Statusmessung vor Schulbeginn dargestellt. Bei dieser Zusammenstellung sind die Konzentrationen auf das Normklima umgerechnet, um Einflüsse unterschiedlicher Klimaverhältnisse auszugleichen¹⁰. Daneben sind der Luftwechsel vor jeder Lektion (während Fensterlüftung), die Anzahl Personen im Raum sowie die am Ende der Lektionen herrschenden CO₂-Spitzenkonzentrationen (nur in Abb. 9) dargestellt. Die Aussentemperaturen erreichten an diesem Tag maximal 14°C bei sonnigem Wetter und schwachem Wind.

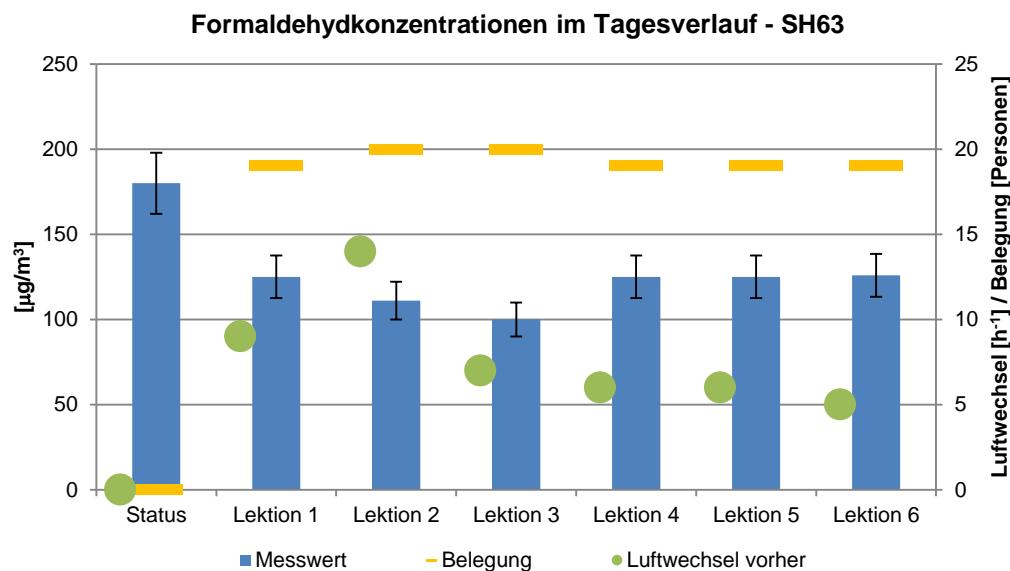


Abb. 8: Nachgewiesene Formaldehydkonzentrationen im Tagesverlauf in SH63 dargestellt zusammen mit dem vor der Lektion herrschenden Luftwechsel (grüne Markierung), der Belegung während der Lektionen (gelbe Markierung) und dem Standardfehler ($\pm 10\%$).

¹⁰ Die Hochrechnung von Winter- auf Sommerbedingungen stimmt für die zwei untersuchten Schulzimmer gut überein (siehe dazu Abb. 3).

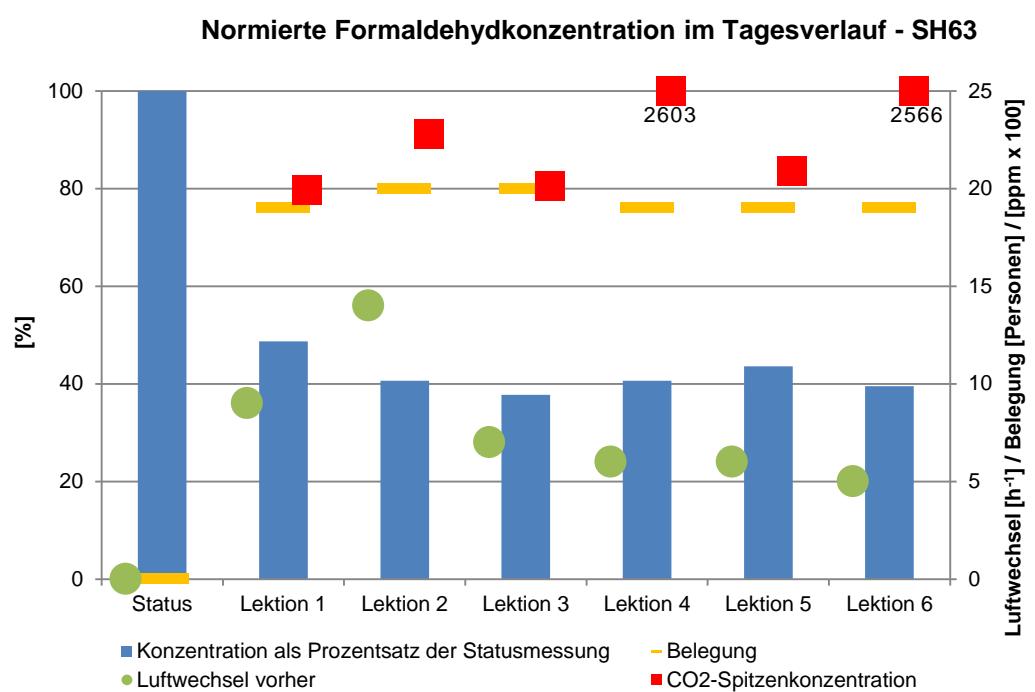


Abb. 9: Konzentration der auf Normklimabedingungen (23°C/45%) umgerechneten Formaldehydkonzentrationen als Prozentsatz der Statuskonzentration im Tagesverlauf in SH63 dargestellt zusammen mit dem vor der Lektion herrschenden Luftwechsel (grüne Markierung), der Belegung während der Lektionen (gelbe Markierung) sowie der CO₂-Spitzenkonzentration (rote Markierung).

Durch die Fensterlüftung vor Schulbeginn wird eine Reduktion der Formaldehydkonzentration auf 49% des ursprünglichen Werts (Statusmessung im ungelüfteten Zustand vor Schulbeginn) erreicht. Im weiteren Tagesverlauf pendelt die Abnahme auf Werte zwischen 38 und 44%, im Mittel auf 42% des ursprünglichen Werts.

Unter den vorgefundenen Klimabedingungen (21.8 - 23.1°C bei 48 - 52% relativer Feuchte) liegt die Formaldehydkonzentration bei regelmässiger Fensterlüftung im Bereich des Richtwerts. Bei höheren Raumtemperaturen und -feuchten und ansonsten gleichen Bedingungen (regelmässige Fensterlüftung) wäre im untersuchten Klassenzimmer eine durchschnittliche Formaldehydkonzentration um 200 µg/m³ zu erwarten (Abb. 10).

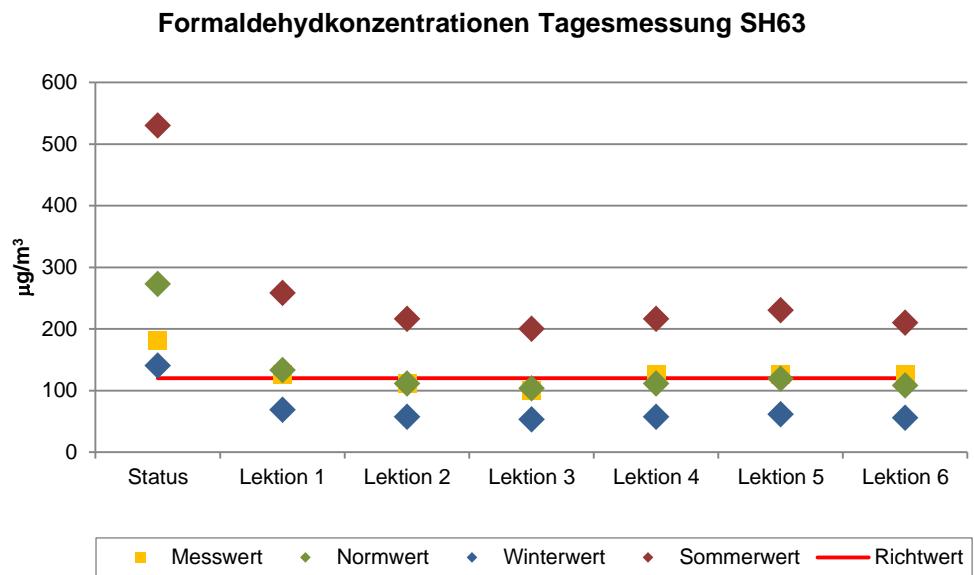


Abb. 10: Gemessene und auf verschiedene Klimabedingungen umgerechnete Formaldehydkonzentrationen dargestellt zusammen mit dem Richtwert (gelb: Messwert; grün: auf Normklima umgerechnete Konzentration [23°C/45%]; rot/blau: auf Sommer [26°C/60%]- resp. Winterbedingungen [21°C/30%] umgerechnete Werte)

In Abb. 11 und Abb. 12 sind die Daten aus dem Objekt SH75 zusammengestellt. Die Außentemperaturen erreichten an diesem Tag maximal 18°C bei sonnigem Wetter und schwachem Wind. In diesem Klassenzimmer schwanken die Formaldehydkonzentrationen mehr als im vorgehenden Beispiel. Während der ersten Lektion wird eine Abnahme auf 74% der Konzentration der Statusmessung festgestellt. In der zweiten Lektion sinkt die Konzentration auf 37%. Zwischen der zweiten und dritten Lektion findet keine Fensterlüftung statt. In der Folge steigt die Formaldehydkonzentration wieder auf 49% des Werts der Statusmessung. In den weiteren Pausen wird jeweils gelüftet und die Konzentrationen sinken auf Werte zwischen 28 und 33%.

Unter den Messbedingungen (23.2 – 25.0°C bei 47 - 50% relativer Feuchte) liegt die Formaldehydkonzentration nur während der ersten Lektion oberhalb des Richtwerts. Bei regelmässiger Fensterlüftung wird der Richtwert nicht erreicht (Abb. 13). Bei höheren Temperaturen und Feuchten im Klassenzimmer wird die Formaldehydkonzentration auch bei regelmässiger Fensterlüftung voraussichtlich den Richtwert erreichen. Wird ungenügend gelüftet, wird die Formaldehydkonzentration unter diesen Bedingungen den Richtwert überschreiten.

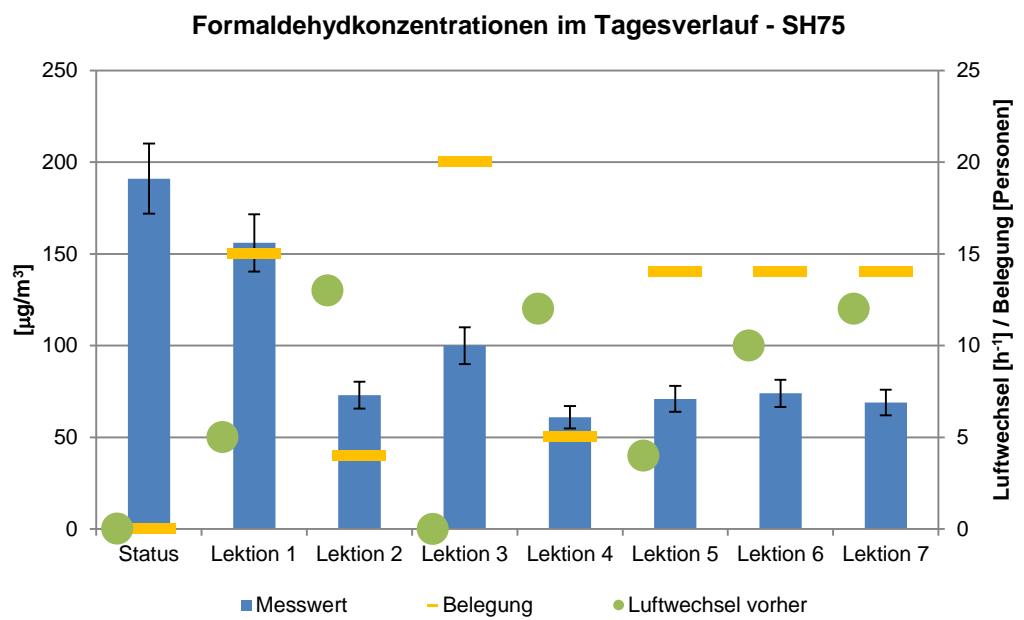


Abb. 11: Nachgewiesene Formaldehydkonzentrationen im Tagesverlauf in SH75 dargestellt zusammen mit dem vor der Lektion herrschenden Luftwechsel (grüne Markierung), der Belegung während der Lektionen (gelbe Markierung) und dem Standardfehler ($\pm 10\%$).

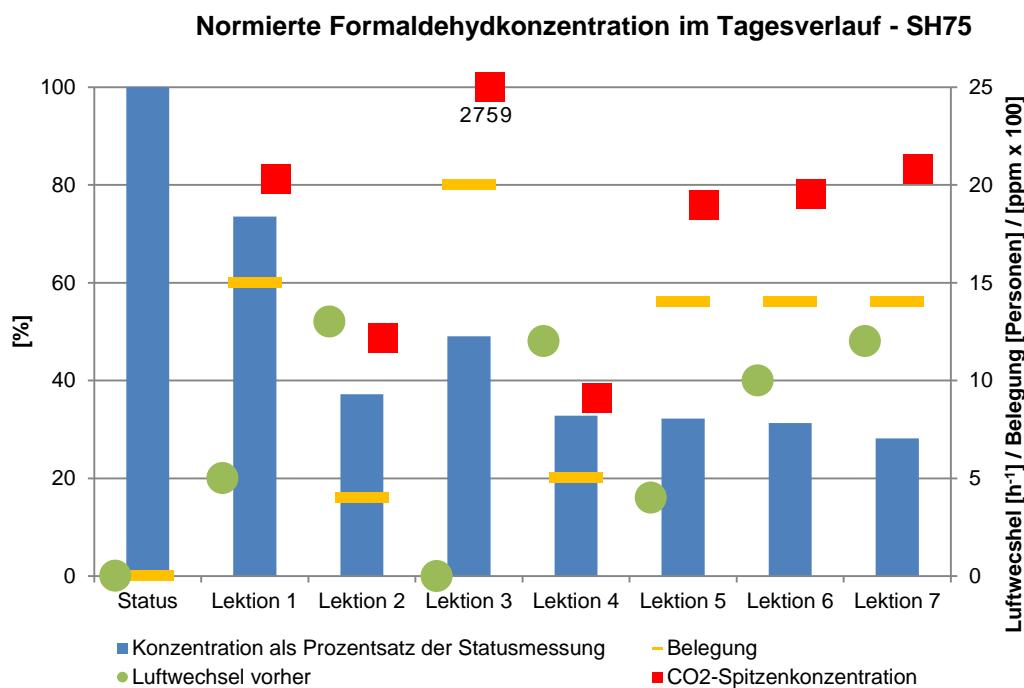


Abb. 12: Konzentration der auf Normklimabedingungen (23°C/45%) umgerechneten Formaldehydkonzentrationen als Prozentsatz der Statuskonzentration im Tagesverlauf in SH75 dargestellt zusammen mit dem vor der Lektion herrschenden Luftwechsel (grüne Markierung), der Belegung während der Lektionen (gelbe Markierung) sowie der CO₂-Spitzenkonzentration am Ende jeder Lektion (rote Markierung).

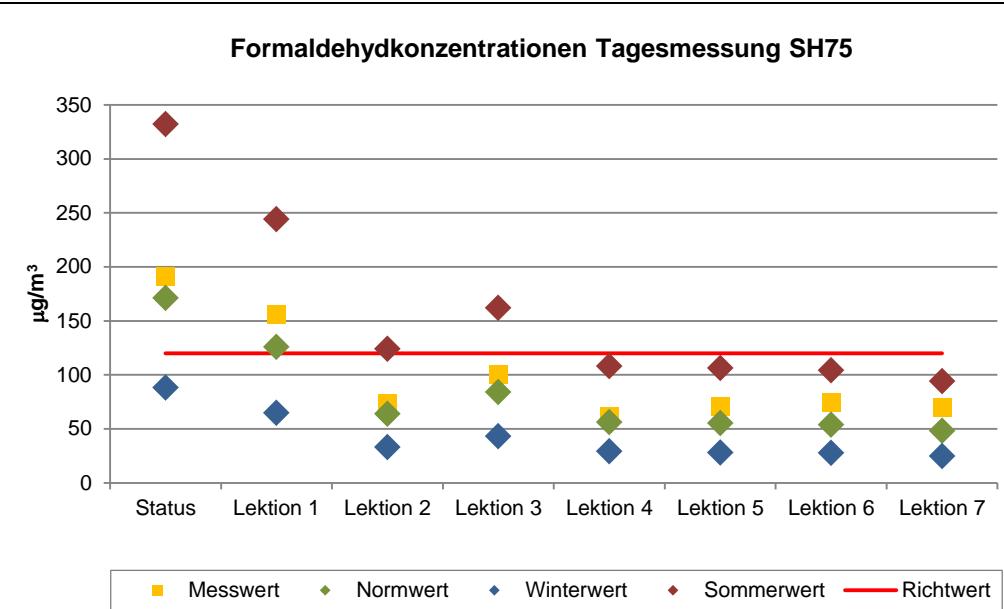


Abb. 13: Gemessene und auf verschiedene Klimabedingungen umgerechnete Formaldehydkonzentrationen dargestellt zusammen mit dem Richtwert (gelb: Messwert; grün: auf Normklima umgerechnete Konzentration [23°C/45%]; rot/blau: auf Sommer [26°C/60%]- resp. Winterbedingungen [21°C/30%] umgerechnete Werte)

Hochrechnung auf 100 Klassenzimmer

Berechnungsgrundlagen

Für den Einfluss der Fensterlüftung auf die Formaldehydkonzentration stehen 11 Resultate zur Verfügung: 9 Nutzungssimulationen und 2 Messwerte während der ersten Schulstunde unter realen Bedingungen (Verlauf der Formaldehydkonzentration während Schultag). Anhand dieser Daten ergibt sich eine mittlere Abnahme der Formaldehydkonzentration auf 67% des Werts vor der Lüftung mit einer Standardabweichung von $\pm 10\%$.

Für die Abschätzung des Einflusses einer regelmässigen Fensterlüftung vor jeder einzelnen Schulstunde stehen zwei Datensätze zur Verfügung. Daraus lässt sich im Objekt SH75 eine mittlere Abnahme der Formaldehydkonzentration auf 32% (nur Werte berücksichtigt, wenn vorher gelüftet wurde), im Objekt SH63 auf 42% des Werts ohne Lüftung ableiten.

Fünf der neun im Sommer untersuchten Klassenzimmer stimmen gut mit dem mathematischen Modell zur Hochrechnung der im Winter gemessenen Formaldehydkonzentrationen auf Sommerbedingungen überein (im Mittel liegt die Übereinstimmung bei 113%).

In vier Klassenzimmern werden im Sommer im Vergleich zur Hochrechnung tiefere Formaldehydkonzentrationen nachgewiesen. Die Übereinstimmung mit dem Modell liegt hier zwischen 56 und 63%. Bei drei dieser Fälle liegen Hinweise auf die Gründe für die Nichtübereinstimmung mit der Hochrechnung vor, die nicht in Zusammenhang mit dem mathematischen Modell stehen (Fensterbank über Heizradiatoren, entferntes Möbelstück und grossflächig verlegte OSB-Platten). Deshalb kann gefolgert werden, dass die Hochrechnung grundsätzlich stimmt, dabei aber andere Faktoren (unter anderem Art der Holzwerkstoffe und Platzierung über Wärmequellen) mitberücksichtigt werden müssen. Bei den 100 untersuchten Klassenräumen wurden in 12 Zimmern Fensterbänke mit offenen Holzwerkstoffen über den Heizradiatoren gefunden, in weiteren 10 Zimmern wurden im Vergleich zu den Spanplatten vermehrt andere Holzwerkstoffe vorgefunden. Daraus kann abgeleitet werden, dass rund einem Viertel der Fälle die Hochrechnung zu höheren Resultaten führen wird.

	Annahme	Bemerkungen
Einfluss der ersten Fensterlüftung (vor Schulbeginn)	67% \pm 10%	Ausgehend von 11 Messwerten
Einfluss einer regelmässigen Fensterlüftung (inkl. vor Schulbeginn)	37%	Ausgehend von 2 Datensätzen
Übereinstimmung Hochrechnung Winter-Sommer	75 von 100 Schulzimmern	Ausgehend von Räumen mit anderen Holzwerkstoffen als Spanplatten und offenen Holzwerkstoffen über Heizradiatoren

Tab. 6: Berechnungsgrundlagen zur Abschätzung der Formaldehydkonzentrationen in 100 Klassenzimmern unter sommerlichen Bedingungen und bei unterschiedlichen Lüftungsvarianten

Prognostizierte Formaldehydkonzentrationen

Ohne Fensterlüftung und bei Annahme einer hundertprozentigen Übereinstimmung mit dem mathematischen Modell wird die Formaldehydkonzentration unter sommerlichen Bedingungen im Mittel (50% Perzentil) bei $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen (Abb. 14 und Abb. 15). Nach der ersten Fensterlüftung am Morgen vor Schulbeginn sinkt das 50% Perzentil auf $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und bei einer zusätzlichen regelmässigen Stößlüftung wird das 50% Perzentil bei $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen. In diesem Fall werden mehr als 95% der Werte unterhalb des Richtwerts liegen.

Formaldehydkonzentrationen unter Sommerbedingungen

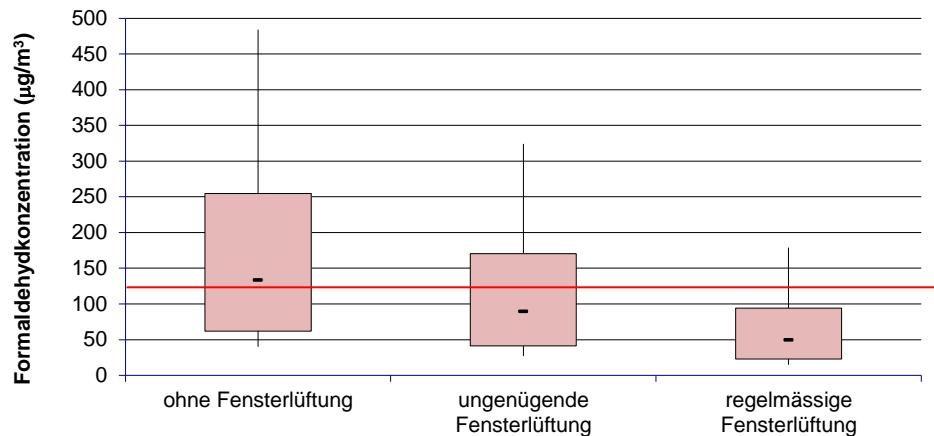


Abb. 14: Statistische Auswertung aller auf Sommerbedingungen (26°C/60%) hochgerechneten Formaldehydkonzentrationen bei unterschiedlichen Lüftungsbedingungen (**ohne Fensterlüftung**: Status ohne Lüften am Morgen; **ungenügende Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach unregelmässige Fensterlüftung; **regelmässige Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach regelmässige Fensterlüftung in allen Pausen) zusammen mit Richtwert (rote Linie). Die Box entspricht dem 5% bzw. 95% Perzentil, die Strichenden dem Minimal- bzw. Maximalwert und der Querstrich dem 50% Perzentil.

Häufigkeiten prognotizierter Formaldehydkonzentrationen bei unterschiedlichen Lüftungsvarianten

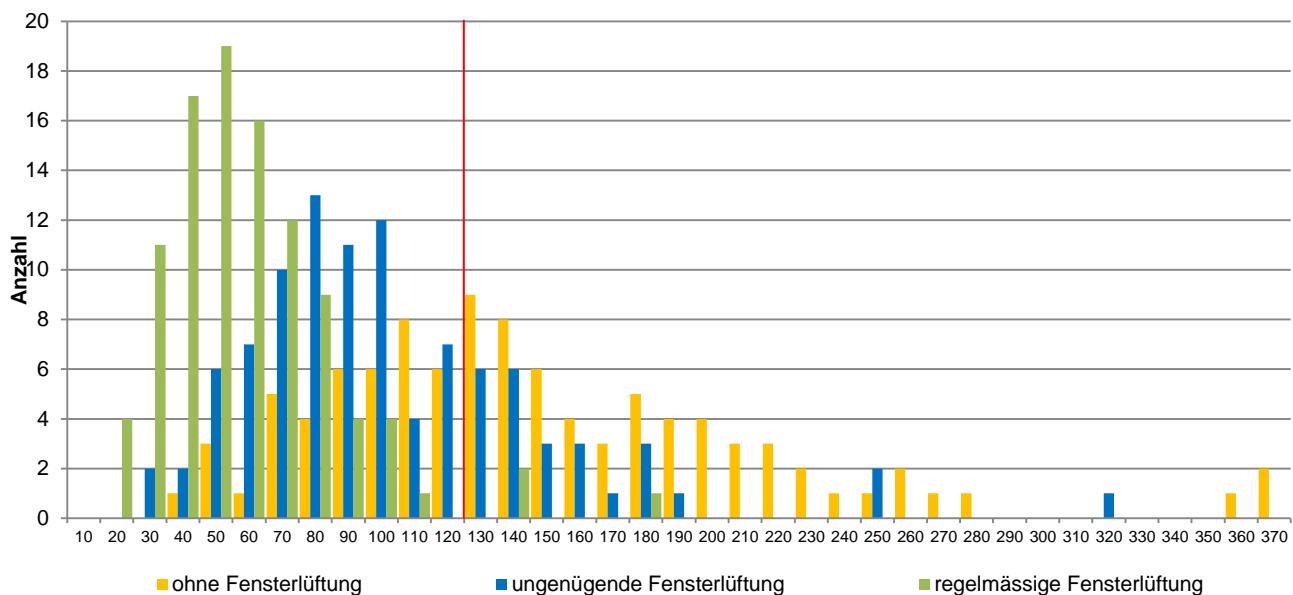
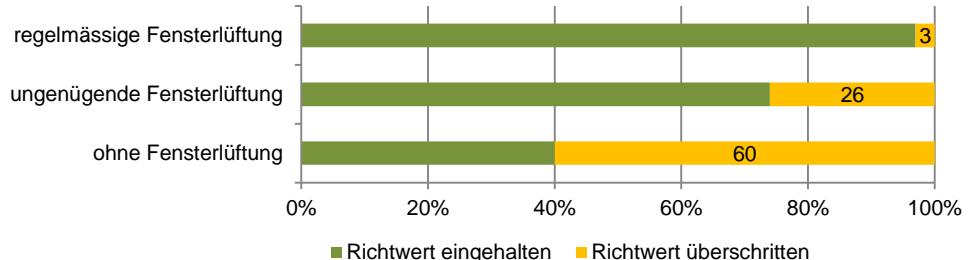
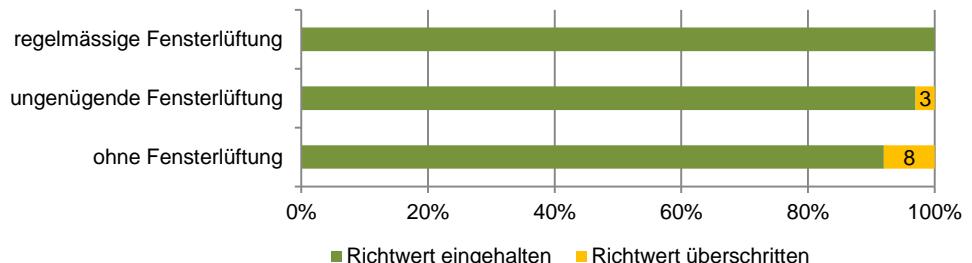


Abb. 15: Verteilung der berechneten Formaldehydkonzentrationen unter sommerlichen Bedingungen (26°C/60%) bei unterschiedlichen Lüftungsvarianten (**ohne Fensterlüftung**: Status ohne Lüften am Morgen; **ungenügende Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach unregelmässige Fensterlüftung; **regelmässige Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach regelmässige Fensterlüftung in allen Pausen)

Anteil Richtwertüberschreitungen unter Sommerbedingungen



Anteil Richtwertüberschreitungen unter Normklimabedingungen



Anteil Richtwertüberschreitungen unter Winterbedingungen

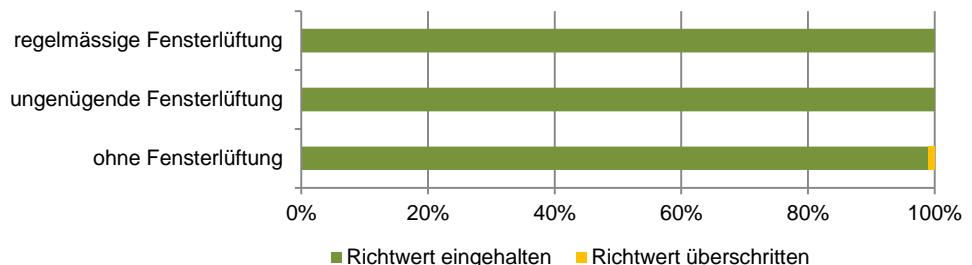


Abb. 16: Berechnete Anteile an Formaldehyd-Richtwertüberschreitungen unter verschiedenen Klima- und Lüftungsbedingungen (**ohne Fensterlüftung**: Status ohne Lüften am Morgen; **ungenügende Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach unregelmäßige Fensterlüftung; **regelmäßige Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach regelmäßige Fensterlüftung in allen Pausen)

In Abb. 16 sind die Anteile an Richtwertüberschreitungen hochgerechnet aus den oben dargelegten Berechnungsgrundlagen zusammengestellt. Im Sommer sind in 3% der Klassenzimmer Richtwertüberschreitung auch bei regelmässiger Fensterlüftung zu erwarten. Diese Zahl kann bei ansonsten gleichen Bedingungen aufgrund der Unsicherheiten bezüglich des mathematischen Modells zur Hochrechnung von Winter- auf Sommerbedingungen tiefer liegen.

Wird dagegen ungenügend gelüftet, kann der Anteil Richtwertüberschreitungen deutlich steigen. Nach der ersten Fensterlüftung vor Schulbeginn

liegt der Anteil bei 26%. Ohne Fensterlüftung wird der Richtwert voraussichtlich in 60% überschritten.

Unter Normklimabedingungen (23°C und 45% relative Feuchte) ist bei einer regelmässigen Fensterlüftung von keiner Richtwertüberschreitung auszugehen. Wird ungenügend gelüftet, liegt der Anteil bei 3%, wird gar nicht gelüftet bei 8%. Im Winter wird der Richtwert in 1% der untersuchten Klassenzimmer überschritten, allerdings nur, wenn gar nicht gelüftet wird.

Die Abnahme der Formaldehydkonzentration durch die erste Fensterlüftung schwankt zwischen 57% und 77%. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass der Anteil an Richtwertüberschreitungen unter sommerlichen Bedingungen nach der ersten Fensterlüftung zwischen 14 und 34% liegen wird.

Anteil Richtwertüberschreitungen unter Sommerbedingungen

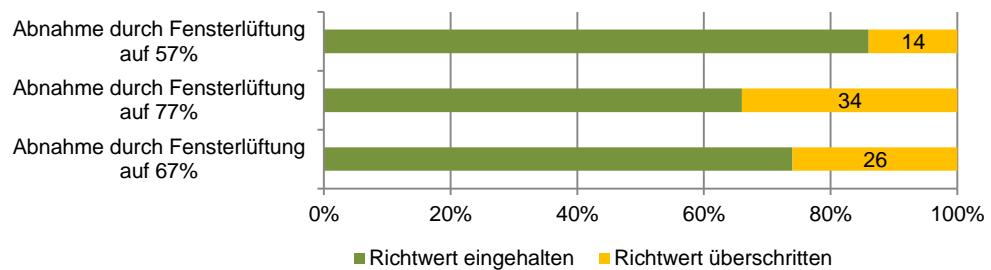


Abb. 17: Einfluss des abgeschätzten Fehlerbereichs (gemäß Tab. 6) auf den Anteil an Formaldehyd-Richtwertüberschreitungen unter sommerlichen Bedingungen (26°C/60%) nach der ersten Fensterlüftung vor Schulbeginn.

Ausserdem ist davon auszugehen, dass die Hochrechnung auf Sommerbedingungen in etwa einem Viertel überschätzt wird. Unter der Annahme, dass sich diese Schätzung gleich auf alle nachgewiesenen Formaldehydkonzentrationen verteilt, würde der Anteil an Richtwertüberschreitung unter sommerlichen Bedingungen und nach der ersten Fensterlüftung zwischen 11 und 26% liegen.

Schlussfolgerungen

Wie hoch ist die Formaldehydkonzentration unter Sommerbedingungen im Vergleich zur Wintermessung?

Im Sommer werden in allen untersuchten Klassenzimmern im Vergleich zur Wintermessung eine um den Faktor 1.3 bis 4.3 höhere Formaldehydkonzentrationen nachgewiesen.

Die Hochrechnung von Winter- auf Sommerbedingungen durch das mathematische Modell (Marutzki, 1993) stimmt dabei gut mit den Messwerten überein. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass spezifische Faktoren wie Quellen über Heizradiatoren oder neuere Holzwerkstoffe zu einer Überschätzung der Sommerwerte führen können.

Wie hoch ist die Formaldehydkonzentration unter Nutzungsbedingungen?

In den neun untersuchten Klassenzimmern wird unter sommerlichen Bedingungen durch die standardisierte Fensterlüftung (Nutzungssimulation) eine Reduktion der Formaldehydkonzentration auf 55% bis 81% der Werte vor der Lüftung erreicht.

Wie verhält sich die Formaldehydkonzentration während eines üblichen Schultages?

Mit der Fensterlüftung vor Schulbeginn wird in den zwei untersuchten Klassenzimmern eine Reduktion der Formaldehydkonzentration auf 49% resp. 74% des Werts vor der Lüftung erreicht. Die Formaldehydkonzentrationen sinken dann nach der ersten Lektion weiter ab und pendeln sich auf 42% resp. 32% der ursprünglichen Konzentration ein.

Wird regelmäßig in allen Pausen und über Mittag gelüftet, sind die Werte stabil. Wird in der Pause nicht gelüftet, steigt die Konzentration gleich wieder an.

Die Messungen wurden bei moderaten Außentemperaturen durchgeführt, da unter diesen Bedingungen eine regelmäßige Stosslüftung erwartet werden kann. Bei hohen Außentemperaturen wird zur Vermeidung zu hoher Raumtemperaturen weniger gelüftet. Die Abnahme der Formaldehydkonzentration im Tagesverlauf wird unter diesen Bedingungen mutmasslich kleiner sein.

Wo besteht Handlungsbedarf?

Werden die in dieser Untersuchung erhaltenen Resultate und Schlussfolgerungen auf alle 100 Klassenräume der Studie hochgerechnet, werden unter sommerlichen Bedingungen je nach Lüftungssituation und Raumausstattung zwischen 3 und 26% der Klassenzimmer Formaldehydkonzentrationen aufweisen, die über dem Richtwert liegen (Tab. 7).

Annahme	Bemerkung	Prognostizierte Anteile Richtwertüberschreitungen unter sommerlichen Bedingungen (26°C/60%)
Ohne Fensterlüftung	Situation am Morgen vor Schulbeginn	60%
Ungenügende Fensterlüftung	Nach der ersten Fensterlüftung	26%
Regelmässige Fensterlüftung	Ausreichende Fensterlüftung in jeder Pause	3%
Ungenügende Fensterlüftung - Fehlerbereich	Ausgehend von 11 Messwerten	14% - 34%
Ungenügende Fensterlüftung – Fehlerbereich und Unsicherheit Hochrechnung	Ausgehend von 11 Messwerten und Anzahl Räume mit offenen Holzwerkstoffen über Heizradiator und neueren Holzwerkstoffen als Hauptquelle	11% - 26%

Tab. 7: Abschätzung der Anzahl Richtwertüberschreitungen unter verschiedenen Annahmen (**ohne Fensterlüftung**: Status ohne Lüften am Morgen; **ungenügende Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach unregelmässige Fensterlüftung; **regelmässige Fensterlüftung**: Fensterlüftung vor Schulbeginn, danach regelmässige Fensterlüftung in allen Pausen)

Bei heissen Aussentemperaturen ist davon auszugehen, dass zur Vermeidung hoher Raumlufttemperaturen weniger häufig gelüftet wird oder die Lüftbarkeit durch den Einsatz des Sonnenschutzes reduziert ist. Beide Fälle führen zu höheren Formaldehydkonzentrationen. Der Anteil an Klassenzimmern mit Richtwertüberschreitungen wird unter diesen Bedingungen eher im Bereich einer ungenügenden Fensterlüftung sein. Diese Möglichkeit müsste mittels einer Untersuchung bei heissen Aussentemperaturen ($>30^{\circ}\text{C}$) verifiziert resp. falsifiziert werden.

Rüti, 10. März 2020 rev20200617

Ganz Klima
Roland Ganz

Dieser Untersuchungsbericht wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Er besteht aus 29 Seiten (inkl. Titelseiten). Ohne schriftliche Genehmigung der Ganz Klima GmbH darf der Bericht nur vollständig wiedergegeben werden. Aussagen, die auf Auszügen beruhen, sind unzulässig.

Anhang

Material und Methoden

Aldehyde

Die Probenahme auf Aldehyde erfolgte auf Dinitrophenylhydrazin (DNPH) mit vorgeschaltetem Ozonfilter. Im Labor (Interlabor Belp AG in Belp) wurde das Probenrörchen eluiert und mittels Hochdruckflüssigkeitschromatograph analysiert. Neben Formaldehyd können mit dieser Methode 13 weitere Aldehyde nachgewiesen werden. Der Fehler (bezogen auf Probenahme und Analytik) liegt bei ca. $\pm 10\%$.

Die Probenahmen und Analysen wurde nach den Schweizer Normenreihen SN EN ISO 16000 und 16017 durchgeführt.

Kohlendioxid

Die Messung von Kohlendioxid (CO_2) erfolgte passiv nach dem 2-Kanal-Infrarot Absorptionsprinzip mit einer Genauigkeit von $\pm 50 \text{ ppm} + 2\%$ vom Messwert. Die Geräte werden regelmässig mit Prüfgas ($\text{CO}_2 2'700 \text{ ppm}$ und $\text{N}_2\text{O} \text{ ppm}$) kalibriert.

Raumlufttemperatur und -feuchte

Die Temperaturmessung erfolgte über einen NTC-Sensor (Thermistor), die Feuchte wurde kapazitiv gemessen. Temperaturmessungen erfolgten bei einer Genauigkeit von $< \pm 0.1\text{K}$, Feuchtemessungen bei einer von $< \pm 2\%$.

Formaldehydmessungen

Objekt- nummer	Mess- datum	Bedin- gungen	Formaldehydkonzentration				Raumluft- temperatur	Raumluft- luft- feuchte	Aussen- lufttempe- ratur
			Messbe- dingungen	Normklima- bedingungen	Winterbe- dingungen	Sommerbe- dingungen			
			[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
SH21	29.6.19	S	80	40	21	78	25.9	62	27
SH21	29.6.19	N	60	28	15	55	27.1	59	27
SH24	29.6.19	S	145	80	41	156	24.1	71	27
SH24	29.6.19	N	111	56	29	109	25.4	66	27
SH51	29.8.15	S	374	206	106	400	28.3	43	31
SH51	29.8.15	N	320	167	86	324	28.4	45	31
SH55	29.8.15	S	210	124	64	240	27.3	45	31
SH55	29.8.15	N	176	90	46	175	28.2	47	31
SH63	29.8.15	S	304	245	126	475	24.0	49	28
SH63	29.8.15	N	260	190	98	368	24.8	49	28
SH72	15.6.19	S	114	104	54	202	22.9	50	24
SH72	15.6.19	N	71	57	30	110	23.3	54	24
SH75	15.6.19	S	162	150	77	290	22.8	50	23
SH75	15.6.19	N	104	85	44	165	23.2	54	23
SH80	31.8.19	S	102	55	28	106	26.3	55	29
SH80	31.8.19	N	58	32	17	63	26.9	51	29
SH99	30.8.15	S	276	120	62	232	30.1	45	28
SH99	30.8.15	N	196	84	43	163	30.4	44	28
SH63	4.11.19	S	180	273	140	530	19.1	53	7
SH63	4.11.19	1	125	133	69	258	21.8	50	11
SH63	4.11.19	2	111	111	57	216	22.1	51	13
SH63	4.11.19	3	100	103	53	200	22.3	48	13
SH63	4.11.19	4	125	111	57	216	23.1	50	13
SH63	4.11.19	5	125	119	61	230	22.6	50	14
SH63	4.11.19	6	126	108	56	210	23.1	52	13
SH75	19.9.19	S	191	171	88	332	23.2	49	11
SH75	19.9.19	1	156	126	65	244	23.7	51	12
SH75	19.9.19	2	73	64	33	124	23.4	49	13
SH75	19.9.19	3	100	84	43	162	23.4	51	14
SH75	19.9.19	4	61	56	29	108	23.3	47	16
SH75	19.9.19	5	71	55	28	106	24.3	49	17
SH75	19.9.19	6	74	54	28	104	24.7	50	18
SH75	19.9.19	7	69	48	25	94	25.0	50	17

Tab. 8: Messdaten zusammen mit Umrechnungswerten.

Bedingungen: Statusmessung ohne Fensterlüftung (S); Nutzungssimulation (N); während Lektion (Nr.)
 Normklimabedingungen: 23°C/45%; Winterbedingungen: 21°C/30%; Sommerbedingungen: 26°C/60%.
 Aussenlufttemperatur zum Messzeitpunkt (Quelle Temperaturdaten: MeteoSchweiz und Agroscope).

Literaturverzeichnis

- BAG. (2016). *"FORMALDEHYD in der Innenraumluft - Informationen und Tipps für Verbraucher"*. Bern: Bundesamt für Gesundheit (BAG).
- DIN ISO 16000-8. (2008). *"Innenraumluftverunreinigungen - Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen"*. SNV.
- Marutzki, R. (1993). *"Richtlinie - Durchführung von Formaldehydmessungen in Häusern aus Holz und Holzwerkstoffen"*. München: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH).
- SIA 382/1. (2007). *"Lüftungs- und Klimaanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen"*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SN EN ISO 16000-2. (2006). *"Innenraumluftverunreinigungen . Teil2: Probenahmestruktur für Formaldehyd"*. SNV.