

Innenraumsituation in OÖ. Pflichtschulen, Berufsschulen und Landwirtschaftlichen Fachschulen

Erhebungs- und Messprogramm:

Kohlenstoffdioxid und Raumklima

Endbericht

April 2003

Projektmitarbeiter:

¹Achleitner Manfred
⁵Benesch Tobias
²Bernreiter Markus
⁶Brandl Alexander
¹Buchwiser Leo
⁴Damberger Bernhard
¹Edtstadler Thomas
⁷Gruber Valeria
¹Gruber Wolfgang
⁵Hrnecek Erich
¹Hofstädter Cornelia
⁸Hutter Hans-Peter
⁴Jansson Marie
¹Kaineder Heribert
¹Kaltenberger Johann
¹Kernöcker Robert
¹Kirsch Renate
¹Leonhartsberger Doris
^{5,7}Maringer Franz Josef
¹Markowetz Thomas
¹Mittermayr-Rauch Elke
¹Mühlberger Albert
¹Nadschläger Erwin
¹Powolny Roland
²Ringer Wolfgang
¹Sperker Sigrid
¹Schinerl Adolf
^{3,4}Tappler Peter
⁴Twrdik Felix
⁵Wihlidal Heinz
¹Winkler Günther
¹Zeisel Andreas

Beteiligte Institutionen:

¹Land Oberösterreich: Umwelt- und Anlagentechnik (Bau- und Sicherheitstechnik, Umwelttechnik, Umweltüberwachung), Bildung, Jugend und Sport, Jugendwohlfahrt, Landessanitätsdirektion, Statistik)
²Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit, Agrarbiologie Linz
³Donauuniversität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt
⁴Innenraum Mess- und Beratungsservice, Wien
⁵ARC Seibersdorf research GmbH, Low-Level Counting Labor Arsenal, Wien
⁶Oberösterreichischer Energiesparverband
⁷Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Bodenforschung
⁸Universität Wien, Institut für Umwelthygiene

Projektkoordination:

Erwin Nadschläger, Heribert Kaineder, Cornelia Hofstädter
Land Oberösterreich
Abteilung Umwelt- und Anlagentechnik, Umwelttechnik - Strahlenschutz, Linz

Wissenschaftliche Gesamtleitung:

Franz Josef Maringer
ARC Seibersdorf research GmbH, Umweltforschung
Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Bodenforschung

Inhalt

1	Motivation und Ziele.....	5
2	Untersuchungskonzept, Messmethoden und Durchführung der Messungen in Schulen	6
2.1	Allgemeines Untersuchungskonzept	6
2.2	Durchführung der Untersuchungen	7
2.3	Messmethode Luftwechsel.....	12
2.4	Messmethode Radon	13
2.5	Messmethode Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle (BlowerDoor-Verfahren)	13
3	Ergebnisse	15
3.1	Ergebnisse der Messungen auf CO₂, Raumklimaparameter	15
3.2	Ergebnisse der Messung von Luftwechsel und personenbezogenem Zuluftvolumenstrom	20
3.3	Ergebnisse der Messungen nach dem Blower-Door Verfahren.....	27
3.4	Gegenübergestellte Ergebnisse CO₂ - Radon	28
4	Entwicklung eines Rechenmodells für Kohlendioxid in Schulklassen	35
4.1	Beschreibung des CO₂-Modells.....	35
4.2	Mathematische Formulierung des CO₂-Modells	36
4.3	Quellstärken der CO₂-Abgabe.....	38
4.4	Luftwechselzahlen	39
4.5	Vergleich der Modellrechnung mit den realen Bedingungen in Klassenräumen	40
4.6	Beispiele zur Anwendung der Modellrechnung	44
5	Vorangegangene Messungen in oberösterreichischen Schulen	52
6	Bewertung, Empfehlungen und Maßnahmen.....	54

6.1	Bewertungsgrundlagen	54
6.2	Bewertung des Raumklimas in den untersuchten Schulklassen	58
6.3	Bewertung der Blower Door Messungen	60
6.4	Bewertung der CO₂-Modellrechnungen	60
7	Maßnahmen	61
8	Literatur.....	62

1 Motivation und Ziele

Im Mai 2001 wurde das Messprogramm in den oberösterreichischen Kindergärten im Rahmen des Projekts des Landes ‚Gesunde Luft für Oberösterreichs Kinder: Messprogramm in Oberösterreichs Kindergärten‘ abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden in einem Bericht veröffentlicht. In weiterer Folge wurde seitens des Landes Oberösterreich beschlossen, die Untersuchungen und Bewertung der Innenraumluftqualität, der akustischen Verhältnisse sowie bauphysikalischer Qualitätsfaktoren auf Oberösterreichs Pflicht-, Berufsschulen und landwirtschaftliche Fachschulen sowie Oberösterreichs Kinderbetreuungseinrichtungen (eigene Publikation) auszuweiten.

Vorliegender Teil der Untersuchung beschäftigt sich im Wesentlichen mit dem Parameter Kohlenstoffdioxid als Marker für die Qualität der Raumluft in Hinblick auf menschliche Ausdünstungen und dem Luftwechsel. Weiters wird ein Rechenmodell vorgestellt, das als Grundlage für Lüftungsanweisungen in bestehenden Schulen bzw. für die Planung von zukünftigen Schulräumen dienen kann.

Die Ergebnisse dieser Erhebung sollen anhand von aktuellen wissenschaftlich-technischen und raumhygienischen Maßstäben bewertet werden. Auf Basis dieser Bewertung sollen bestehende Mängel und Lösungsmöglichkeiten sowie deren Umsetzungsmöglichkeiten aufgezeigt und bei den zuständigen Stellen angeregt werden. Für zukünftige Schulneubauten sollen im Zuge dieses Projekts Richtlinien erarbeitet werden, die auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse zukünftig bauphysikalische Mängel der Innenraumqualität verhindern können.

2 Untersuchungskonzept, Messmethoden und Durchführung der Messungen in Schulen

2.1 Allgemeines Untersuchungskonzept

Um fundierte Daten für die Entwicklung eines CO₂-Rechenmodells für Schulklassen zu gewinnen, wurden zwei ausgewählte repräsentative Schulen apparativ untersucht. Es handelte sich um eine Volksschule (SID 580) die mit modernen Kunststofffenstern ausgestattet ist und eine Hauptschule (SID 76) mit alten Metallfenstern. In jeweils zwei Räumen pro Schule wurden im Zeitraum von Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsende die Parameter Kohlenstoffdioxid (CO₂), Temperatur und rel. Luftfeuchte bestimmt. In einem der Klassenräume wurden parallel dazu die gleitenden Mittelwerte der Luftwechselzahl bestimmt. Um Korrelationen zwischen den Konzentrationen an CO₂ und Radon festzustellen, wurde die Raumluft mittels eines zeitlich hoch auflösenden Gerätes auf Radon untersucht. Nach Unterrichtsschluß erfolgten Messungen des Luftwechsels (n₅₀ Wert) mittels einer Blower-Door Apparatur.

Das Lüftungsregime in den jeweiligen Klassenräumen wurde genau vorgegeben. Die Untersuchungen wurden jeweils im Sommer und im Winter durchgeführt, wobei darauf geachtet wurde, dass die Außenluftsituation in etwa der Jahreszeit entsprach. Extreme Windgeschwindigkeiten im Außenbereich waren nicht gegeben.

Folgende Vorgaben in Bezug auf die Randbedingungen für die Messungen wurden in den jeweiligen Klassenräumen gewählt, den Verantwortlichen in der Schule (Direktion, Klassenlehrer) mitgeteilt und während der Messungen überprüft:

- | | |
|----------------------------|--|
| 1. – 2. Schulstunde: | Alle Fenster geschlossen, Türe geschlossen |
| 3. Schulstunde: | Alle Fenster geschlossen, Türe geschlossen, eine Lüftungsperiode über 5 Minuten in der Mitte der Unterrichtsstunde |
| 4. Schulstunde: | Ein Fenster gekippt, Türe geschlossen |
| 5. Schulstunde (optional): | Zwei Fenster gekippt, Türe geschlossen |

In den Pausen wurden sowohl Fenster als auch Türen vollständig geöffnet.

2.2 Durchführung der Untersuchungen

Die Raumluft in den Klassen, in denen simultan CO₂ und der Luftwechsel gemessen wurde, wurde während der Messungen mittels eines Ventilators umgewälzt. Die Probenahme erfolgte im hinteren Teil der Klassenräume in einer Höhe zwischen 1,2 und 1,5 m.

Durch die Nutzung der Klassenräume von Leistungsgruppen mit unterschiedliche Schülerzahl schwankte die Anzahl der Schüler zwischen den Unterrichtseinheiten zum Teil beträchtlich.

Die Raumdimensionen und die Belegungsdichte der Klassen sowie die aktuelle Lüftungssituation in den Unterrichtseinheiten ist in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Die Unterrichtseinheiten betragen jeweils 50 Minuten, die durch Pausen im Ausmaß von je 5 Minuten unterbrochen werden. Nach der zweiten Unterrichtseinheit ist in beiden untersuchten Schulen davon abweichend eine 15-minütige Pause vorgesehen.

Tabelle 2.2.1 Daten der Probenahmen, Schule SID 76, Sommer

Schule SID 76 Klassenraum 1A					
Datum der Messung:		28.05.2002			
Raumvolumen [m³]:		216			
Raumfläche [m²]:		67			
Luftumwälzung:		Luftumwälzung mittels Ventilator			
Unterrichts- einheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	6 Fenster geschlossen	28	2	07:50	08:40
2 UE	6 Fenster geschlossen	29	1	08:45	09:35
3 UE	6 Fenster geschlossen 1 x gelüftet (5 min)	27	1	09:50	10:40
4 UE	2 Fenster gekippt 2 Fenster Oberlichte offen	28	2	10:45	11:35
5 UE	1 von 6 Fenstern gekippt	18	2	11:40	12:30

Schule SID 76 Klassenraum 3A					
Datum der Messung:		28.05.2002			
Raumvolumen [m³]:		216			
Raumfläche [m²]:		67			
Luftumwälzung:		keine mechanische Lüftung			
Unterrichts- einheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	6 Fenster geschlossen	21	1	07:50	08:40
2 UE	6 Fenster geschlossen	17	1	08:45	09:35
3 UE	6 Fenster geschlossen 1 x gelüftet (5 min)	24	1	09:50	10:40
4 UE	1 Fenster gekippt 3 Fenster Oberlichte offen	29	1	10:45	11:35
5 UE	1 von 6 Fenstern gekippt	30	1	11:40	12:30

Tabelle 2.2.2 Daten der Probenahmen, Schule SID 580, Sommer

Schule SID 580 Klassenraum 3B					
Datum der Messung:		29.05.2002			
Raumvolumen [m³]:		206			
Raumfläche [m²]:		64			
Luftumwälzung:		Luftumwälzung mittels Ventilator			
Unterrichtseinheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	3 Fenster geschlossen	13	2	08:00	08:50
2 UE	3 Fenster geschlossen	13	2	08:55	09:45
3 UE	1 x gelüftet (5 min) 1. Hälfte: 1 Fenster gekippt 2. Hälfte: alles geschlossen	11	3	10:00	10:50
4 UE	1 von 3 Fenstern gekippt	11	1	10:55	11:45
5 UE	2 von 3 Fenstern gekippt	11	1	11:55	12:45

Schule SID 580 Klassenraum 4A					
Datum der Messung:		29.05.2002			
Raumvolumen [m³]:		212			
Raumfläche [m²]:		67			
Luftumwälzung:		keine mechanische Lüftung			
Unterrichtseinheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	3 Fenster geschlossen	27	1	08:00	08:50
2 UE	3 Fenster geschlossen	27	1	08:55	09:45
3 UE	3 Fenster geschlossen, 1 x gelüftet (5 min)	27	1	10:00	10:50
4 UE	1 von 3 Fenstern gekippt	27	1	10:55	11:45
5 UE	2 von 3 Fenstern gekippt	27	1	11:55	12:45

Tabelle 2.2.3 Daten der Probenahmen, Schule SID 76, Winter

Schule SID 76 Klassenraum 1A					
Datum der Messung:		18.12.2002			
Raumvolumen [m³]:		216			
Raumfläche [m²]:		67			
Luftumwälzung:		Luftumwälzung mittels Ventilator			
Unterrichts- einheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	6 Fenster geschlossen	23	1	07:50	08:40
2 UE	6 Fenster geschlossen	15	1	08:45	09:35
3 UE	6 Fenster geschlossen 1 x gelüftet (5 min)	29	1	09:50	10:40
4 UE	1 von 6 Fenstern gekippt	28	1	10:45	11:35
5 UE	1 von 6 Fenstern gekippt	26	1	11:40	12:30

Schule SID 76 Klassenraum 4A (vormals 3A)					
Datum der Messung:		18.12.2002			
Raumvolumen [m³]:		216			
Raumfläche [m²]:		67			
Luftumwälzung:		keine mechanische Lüftung			
Unterrichts- einheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	6 Fenster geschlossen	15	1	07:50	08:40
2 UE	6 Fenster geschlossen	13	1	08:45	09:35
3 UE	6 Fenster geschlossen 1 x gelüftet (5 min)	26	2	09:50	10:40
4 UE	1 von 6 Fenstern gekippt	17	1	10:45	11:35
5 UE	1 von 6 Fenstern gekippt	26	1	11:40	12:30

Tabelle 2.2.4 Daten der Probenahme Schule SID 580, Winter

Schule SID 580 Klassenraum 4B (vormals 3B)					
Datum der Messung:		17.12.2002			
Raumvolumen [m³]:		206			
Raumfläche [m²]:		64			
Luftumwälzung:		Luftumwälzung mittels Ventilator			
Unterrichts- einheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	3 Fenster geschlossen	14	1	08:00	08:50
2 UE	3 Fenster geschlossen	14	2	08:55	09:45
3 UE	3 Fenster geschlossen, 1 x gelüftet (5 min)	14	2	10:00	10:50
4 UE	1 von 3 Fenstern gekippt	14	2	10:55	11:45
5 UE	1 von 3 Fenstern gekippt	14	1	11:55	12:45

Schule SID 580 Klassenraum 3A (vormals 4A)					
Datum der Messung:		17.12.2002			
Raumvolumen [m³]:		212			
Raumfläche [m²]:		67			
Luftumwälzung:		keine mechanische Lüftung			
Unterrichts- einheiten	Fenster	Anzahl Schüler	Anzahl Erwachsene	Unterrichtszeit Anfang	Unterrichtszeit Ende
1 UE	3 Fenster geschlossen	24	1	08:00	08:50
2 UE	3 Fenster geschlossen	24	1	08:55	09:45
3 UE	3 Fenster geschlossen, 1 x gelüftet (5 min)	24	1	10:00	10:50
4 UE	1 von 3 Fenstern gekippt	24	1	10:55	11:45
5 UE	1 von 3 Fenstern gekippt	24	1	11:55	12:45

2.2.1 Messmethode Kohlenstoffdioxid, Temperatur, relative Luftfeuchte

Die kontinuierliche Bestimmung der CO₂-Konzentration, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur wurde mit Multifunktions-Messgeräten [testo 650; Testotherm; Datenlogger, Dräger - Messzelle] durchgeführt. Die Momentanwerte der Messgrößen wurden gespeichert, ausgelesen und elektronisch weiterverarbeitet.

2.3 Messmethode Luftwechsel

Zur Bestimmung des Luftwechsels wurde der Raumluft das Tracergas SF₆ (Schwefelhexafluorid) in geeigneter Konzentration beigemischt und mit einem Ventilator gleichmäßig verteilt. Die Konzentration des Tracergases SF₆ wurde mit Hilfe eines Detektors mit dem Funktionsprinzip der photoakustischen Infrarotspektroskopie mit selektivem Filter [Bruel & Kjaer Single Gas Monitor] gemessen und aufgezeichnet. Der zeitliche Abstand der Messungen betrug eine Minute. Es wurde die Abnahme der Tracergaskonzentration über einen Zeitraum von mindestens 0,5 Stunden gemessen und aufgezeichnet. Aus der Abnahmekurve wird die Luftwechselzahl rechnerisch ermittelt (DGH 1993).

Es bestehen folgende Beziehungen:

$$h = \frac{\ln c_1 - \ln c_2}{t_2 - t_1} \qquad h = \frac{V}{V_R}$$

c₁ Tracergaskonzentration zum Zeitpunkt t₁ [ppm]

t₁ Zeitpunkt 1 [h]

c₂ Tracergaskonzentration zum Zeitpunkt t₂ [ppm]

t₂ Zeitpunkt 2 [h]

V Luftvolumenstrom [m³/h]

V_R Raumvol. [m³]

Aus der gemessenen Luftwechselzahl wurde das zugeführte Luftvolumen pro Zeiteinheit mit Hilfe obiger Formel sowie der pro anwesender Person zugeführte personenbezogene Luftvolumenstrom berechnet.

Das in die jeweiligen Klassenräume einströmende Luftvolumen besteht jedoch nur zu einem Teil aus Außenluft, da in der Regel ein Luftaustausch mit anderen Räumen des Gebäudes besteht. Die aus anderen Räumen zuströmende Luft kann sowohl mit anthropogen verursachten Raumlufbelastungen als auch mit Schadstoffen aus Baumaterialien angereichert sein und hat daher nicht Außenluftqualität. Der reale Außenluftvolumenstrom ist daher in der Regel geringer als der nach obiger Formel aus der Luftwechselzahl berechnete Luftvolumenstrom V .

Bei veränderten meteorologischen und raumklimatischen Verhältnissen (Windstärke, Temperaturen innen - außen) könnten veränderte Situationen entstehen. Die Luftwechselzahl ist daher in der Regel nur als Momentaufnahme zu betrachten.

2.4 Messmethode Radon

Die kontinuierliche Bestimmung der Radon-Konzentration erfolgte mit einem mobilen Radon-Monitor [AlphaGUARD; Genitron Instruments] nach dem Messprinzip der 3D-Alpha-spektroskopie und Strommessung. Die Momentanwerte der Messgröße wurden gespeichert, ausgelesen und elektronisch weiterverarbeitet. Die Probenahme erfolgte im hinteren Teil der Klassenräume in einer Höhe zwischen 1,2 und 1,5 m.

2.5 Messmethode Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle (BlowerDoor-Verfahren)

Zur Messung der Luftdurchlässigkeit wurde ein stationäres Differenzdruck-Verfahren nach ÖNORM EN 13829 angewendet. Mittels eines Gebläses wurde im Inneren des Gebäudeteils ein konstanter Überdruck bzw. Unterdruck erzeugt. Gemessen wurde die Druckdifferenz und die dabei geförderte Luftmenge.

Unter Einbeziehung des Luftvolumens des untersuchten Gebäudes bzw. Gebäudeteils wurde die Luftwechselrate pro Stunde bei einem Differenzdruck von 50 Pascal (n_{50}) errechnet. Die Bestimmung nach ÖNORM EN 13829 (Bestimmung der

Luftdurchlässigkeit von Gebäuden-Differenzdruckverfahren) erfolgte sowohl bei Unterdruck als auch bei Überdruck.

Anmerkung: Der angegebene Kennwert n_{50} ist etwa 10 bis 25 mal höher als die Luftwechselrate pro Stunde bei Windstille unter realen Bedingungen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Messungen auf CO₂, Raumklimaparameter

Tabelle 3.1.1: Ergebnisse der Untersuchung des Raumklimas (CO₂-Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur)

Schule SID 76 Klasse 1A Messung 28.05.2002	Parameter		
	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Kohlendioxid [ppm]
Minimum	15,6	52	818
Maximum	21,7	64	3849
arithm. Mittelwert	20,1	58	1700

Schule SID 76 Klasse 3A Messung 28.05.2002	Parameter		
	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Kohlendioxid [ppm]
Minimum	16,8	49	755
Maximum	23,6	60	2190
arithm. Mittelwert	22,1	54	1419

Schule SID 580 Klasse 4A Messung 29.05.2002	Parameter		
	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Kohlendioxid [ppm]
Minimum	20,8	49	614
Maximum	23,6	62	2957
arithm. Mittelwert	22,7	55	1582

Schule SID 76 Klasse 1A Messung 18.12.2002	Parameter		
	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Kohlendioxid [ppm]
Minimum	6,0	33	767
Maximum	22,5	52	2521
arithm. Mittelwert	20,5	40	1618

Schule SID 580 Klasse 4B (ehemals 3B) Messung 17.12.2002	Parameter		
	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Kohlendioxid [ppm]
Minimum	18,5	35	744
Maximum	22,6	52	2793
arithm. Mittelwert	21,6	42	1622

Tabelle 3.1.2: Ergebnisse der Untersuchung des Raumklimas (CO₂-Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur)

Schule SID 580 Klasse 3A (ehemals 4A) Messung 17.12.2002	Parameter		
	Temperatur	relative Luftfeuchte	Kohlendioxid
	[°C]	[%]	[ppm]
Minimum	18,6	29	639
Maximum	23,4	57	2842
arithm. Mittelwert	22,4	43	1518

Die Minima, Maxima und arithm. Mittelwerte der jeweiligen Parameter beziehen sich auf die Zeit von Unterrichtsbeginn bis Ende der letzten Schulstunde (siehe Abbildungen).

Der in den folgenden Diagrammen gekennzeichnete Bereich von 1000 bis 1500 ppm stellt den Konzentrationsbereich von CO₂ dar, der zur Vermeidung hygienisch unzureichender Situationen nicht über einen längeren Zeitraum überschritten werden sollte.

Schule SID 76 - Klasse 1A - 28.05.2002

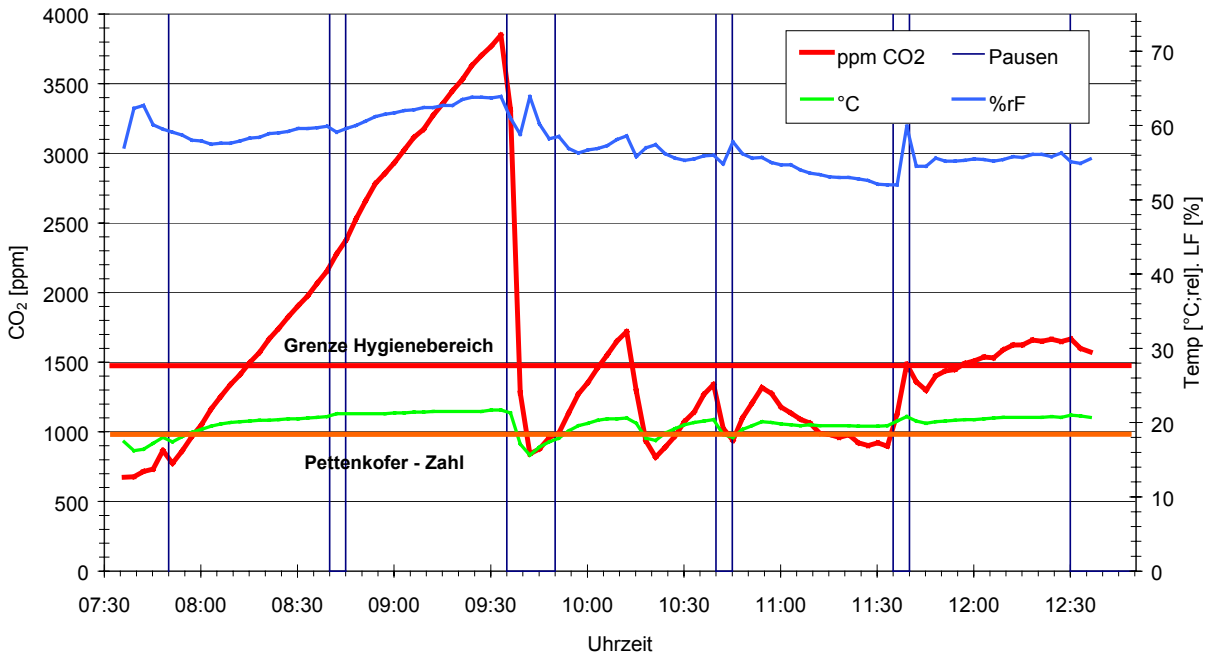


Abb. 3.1.1: Zeitlicher Verlauf der Raumklimaparameter

Schule SID 76 - Klasse 3A - 28.05.2002

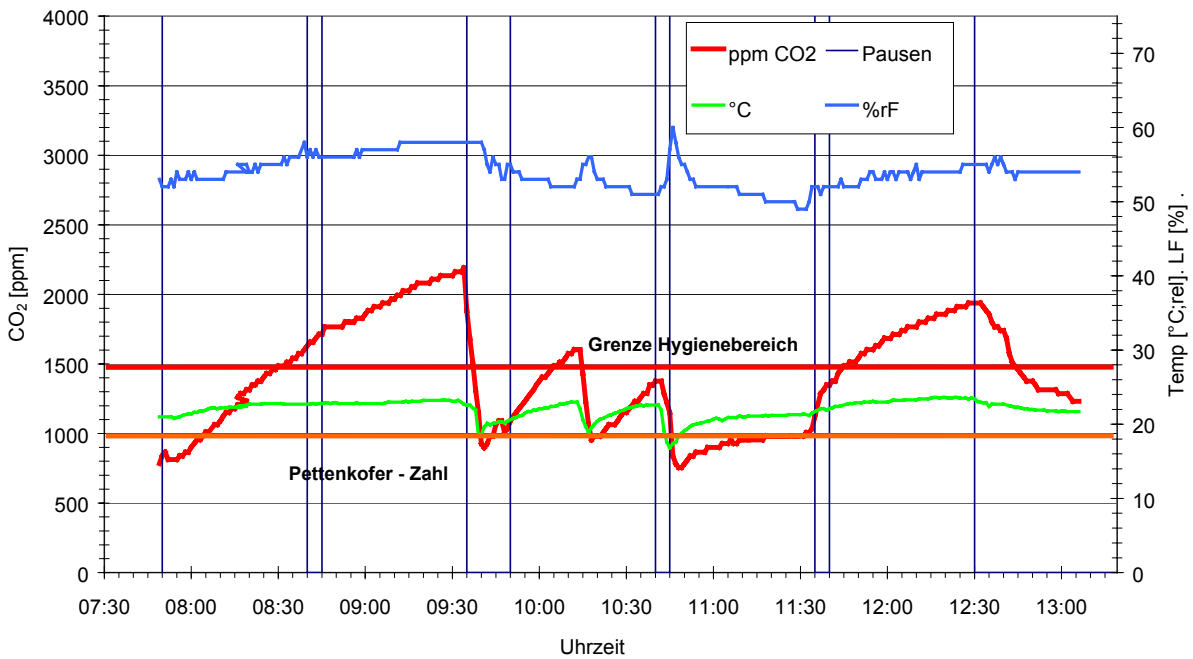


Abb. 3.1.2: Zeitlicher Verlauf der Raumklimaparameter

Schule SID 580 - Klasse 4A - 29.05.2002

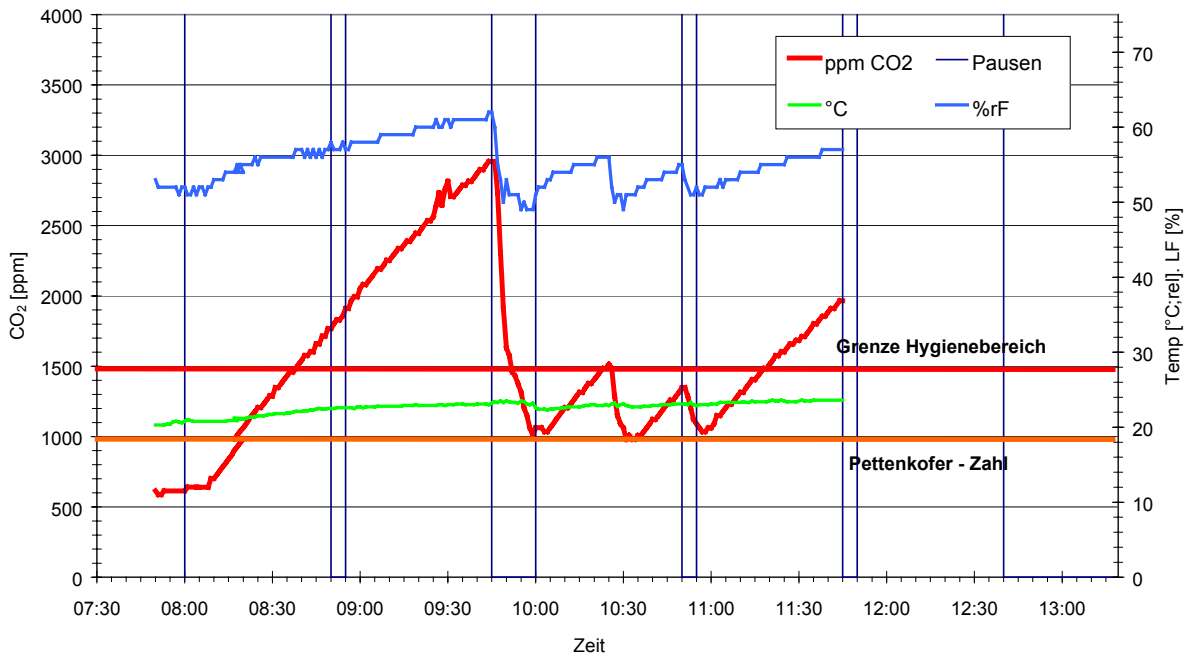


Abb. 3.1.3: Zeitlicher Verlauf der Raumklimaparameter

Schule SID 76 - Klasse 1A - 18.12.2002

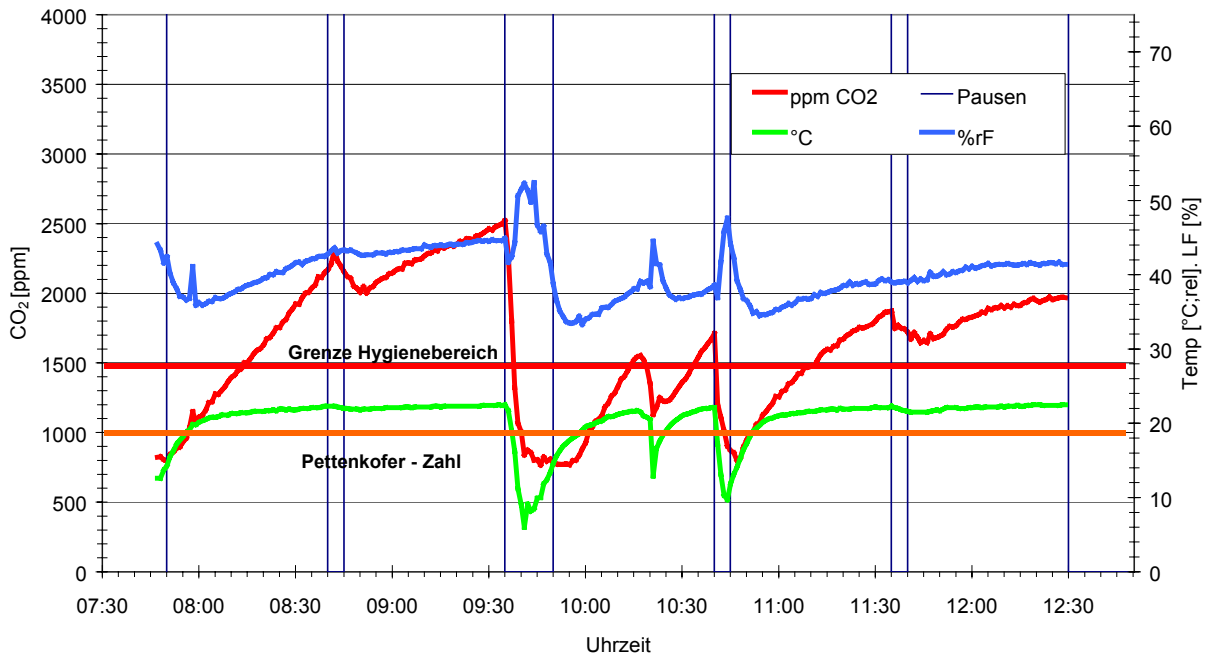


Abb. 3.1.4: Zeitlicher Verlauf der Raumklimaparameter

Schule SID 580 - Klasse 4B(vormals 3B) - 17.12.2002

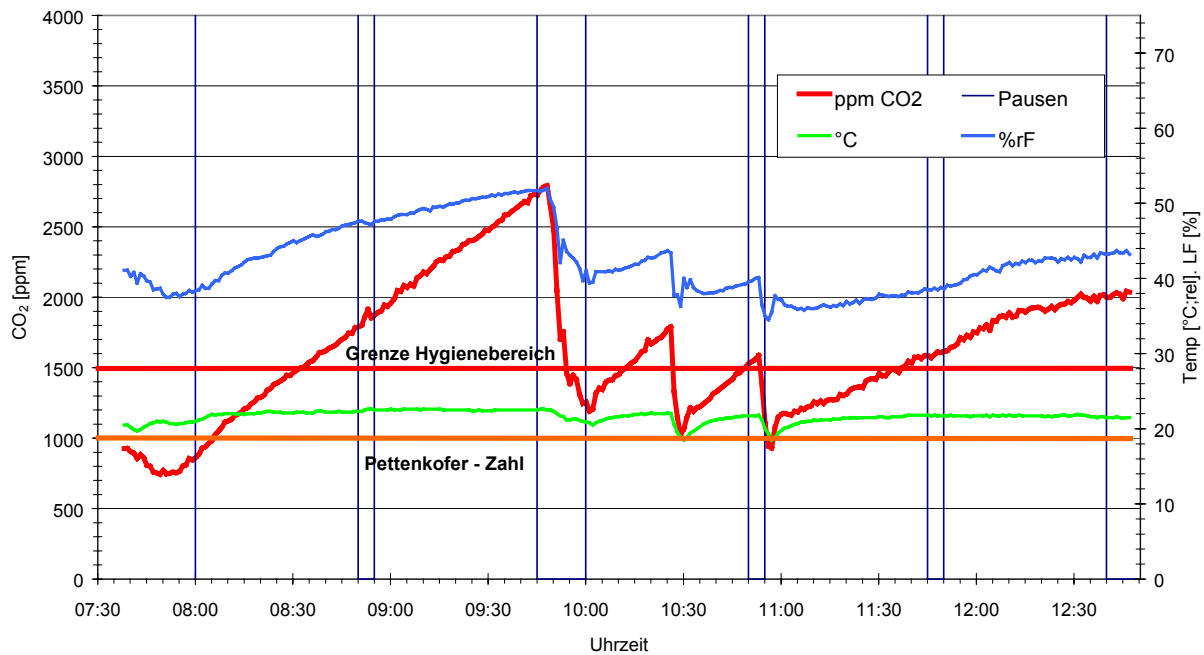


Abb. 3.1.5: Zeitlicher Verlauf der Raumklimaparameter

Schule SID 580 - Klasse 3A (vormals 4A) - 17.12.2002

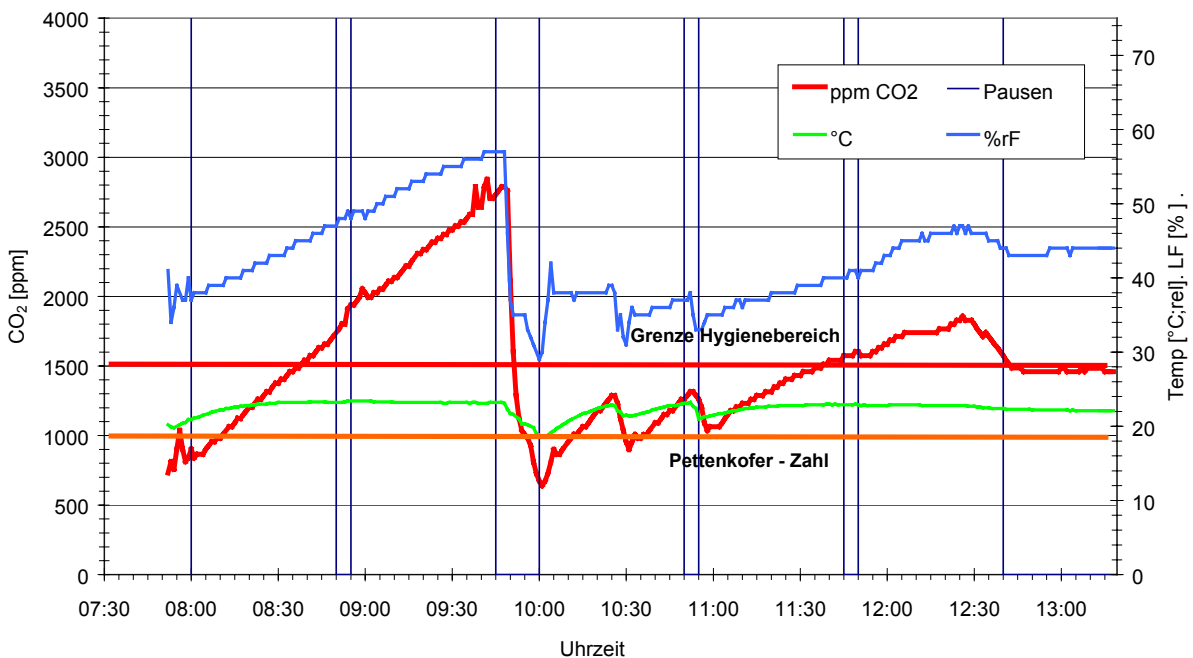


Abb. 3.1.6: Zeitlicher Verlauf der Raumklimaparameter

3.2 Ergebnisse der Messung von Luftwechsel und personenbezogenem Zuluftvolumenstrom

Tabelle 3.2.1: Messparameter und Ergebnisse der Untersuchungen des personenbezogenen Zuluftvolumenstromes, Schule SID 76

	Einheit	Daten		Daten
Ort der Probenahme		Schule SID 76		Schule SID 76
Raum / Messstelle		Klasse 1A		Klasse 1A
Datum der Probenahme		28.05.02		28.05.02
Lüftungsregime		alle Fenster geschlossen		1 Fenster gekippt
Probenahmebeginn	[hh:mm]	08:12		11:52
Probenahmeende	[hh:mm]	09:33		12:30
Raumvolumen	[m ³]	216		216
Mittelwert Luftwechsel	[1/h]	0,09		0,92
Belegung des Raumes Kinder	Pers.	28	29	18
Belegung des Raumes Lehrer	Pers.	2	1	2
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom	[m ³ /P*h]	0,63	0,63	10,0

	Einheit	Daten		Anmerkungen
Ort der Probenahme		Schule SID 76		
Raum / Messstelle		Klasse 1A		
Datum der Probenahme		28.05.02		
Lüftungsregime		2 Fenster gekippt		
Probenahmebeginn	[hh:mm]	11:00		
Probenahmeende	[hh:mm]	11:40		
Raumvolumen	[m ³]	216		
Mittelwert Luftwechsel	[1/h]	5,2		
Belegung des Raumes Kinder	Pers.	28		
Belegung des Raumes Lehrer	Pers.	2		
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom	[m ³ /P*h]	37		

	Einheit	Daten		Daten	
Ort der Probenahme		Schule SID 76		Schule SID 76	
Raum / Messstelle		Klasse 1A		Klasse 1A	
Datum der Probenahme		18.12.2002		18.12.2002	
Lüftungsregime		alle Fenster geschlossen		1 Fenster gekippt	
Probenahmebeginn	[hh:mm]	07:59		10:57	
Probenahmeende	[hh:mm]	09:33		12:27	
Raumvolumen	[m ³]	216		216	
Mittelwert Luftwechsel	[1/h]	0,13		1,0	
Belegung des Raumes Kinder	Pers.	23	15	28	26
Belegung des Raumes Lehrer	Pers.	1		1	
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom	[m ³ /P*h]	1,3	1,6	8,0	8,1

Tabelle 3.2.2: Messparameter und Ergebnisse der Untersuchungen des personenbezogenen Zuluftvolumenstromes, Schule SID 580

	Einheit	Daten	Daten
Ort der Probenahme		Schule SID 580	Schule SID 580
Raum / Messstelle		Klasse 3B	Klasse 3B
Datum der Probenahme		29.05.2002	29.05.2002
Lüftungsregime		alle Fenster geschlossen	1 Fenster gekippt
Probenahmebeginn	[hh:mm]	08:12	11:02
Probenahmeende	[hh:mm]	09:45	11:44
Raumvolumen	[m ³]	206	206
Mittelwert Luftwechsel	[1/h]	0,03	0,52
Belegung des Raumes Kinder	Pers.	13	11
Belegung des Raumes Lehrer	Pers.	2	1
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom	[m ³ /P*h]	0,47	8,9

	Einheit	Daten	Anmerkungen
Ort der Probenahme		Schule SID 580	
Raum / Messstelle		Klasse 3B	
Datum der Probenahme		29.05.2002	
Lüftungsregime		2 Fenster gekippt	
Probenahmebeginn	[hh:mm]	12:02	
Probenahmeende	[hh:mm]	12:51	
Raumvolumen	[m ³]	206	
Mittelwert Luftwechsel	[1/h]	2,1	
Belegung des Raumes Kinder	Pers.	11	
Belegung des Raumes Lehrer	Pers.	1	
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom	[m ³ /P*h]	36	

	Einheit	Daten		Daten	
Ort der Probenahme		Schule SID 580		Schule SID 580	
Raum / Messstelle		Klasse 4B (vormals 3B)		Klasse 4B (vormals 3B)	
Datum der Probenahme		17.12.2002		17.12.2002	
Lüftungsregime		alle Fenster geschlossen		1 Fenster gekippt	
Probenahmebeginn	[hh:mm]	08:40		11:02	
Probenahmeende	[hh:mm]	09:45		12:44	
Raumvolumen	[m ³]	206		206	
Mittelwert Luftwechsel	[1/h]	0,12		0,81	
Belegung des Raumes Kinder	Pers.	14		14	
Belegung des Raumes Lehrer	Pers.	1	2	2	1
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom	[m ³ /P*h]	1,7	1,6	10,5	11,2

Tabelle 3.2.3: Gemessene mittlere Luftwechselzahl bei ausgewählten Lüftungssituationen

Schule SID 76 Klasse 1A	alle Fenster geschlossen		1 Fenster gekippt		2 Fenster gekippt	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
	Mittlerer Luftwechsel [1/h]	0,09	0,13	0,92	1,0	5,2

Schule SID 580 Klasse 3B (Sommer) 4B (Winter)	alle Fenster geschlossen		1 Fenster gekippt		2 Fenster gekippt	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
	Mittlerer Luftwechsel [1/h]	0,03	0,12	0,52	0,81	2,1

n.b. nicht bestimmt

Im Winter wäre der Zustand mit zwei ständig gekippten Fenstern mit einem großen Wärmeverlust im Klassenraum und Zugerscheinungen verbunden, was den Schülern von den anwesenden Lehrern nicht zugemutet wurde. Bei diesem Zustand konnten daher keine Messungen durchgeführt werden.

Nachfolgend werden auf Grund der Ergebnisse der Messungen des Luftwechsels die gemittelten, personenbezogenen Zuluftvolumenströme bei ausgewählten Lüftungssituationen und unterschiedlicher Belegung berechnet. Der Luftwechsel bei vollständig geöffneten Fenstern und geöffneter Eingangstüre wurde bei beiden Schulen mit 10 h^{-1} , der Luftwechsel bei zwei Fenstern gekippt im Winter wurde mit 5 h^{-1} angenommen.

Zu beachten ist, dass die gemittelten personenbezogenen Zuluftvolumenströme jedoch keine Auskunft über die in kürzeren Zeiträumen tatsächlich zugeführten Luftvolumina geben. So liegt bei dem unten gewählten Szenario z.B. der über eine Übungseinheit mit geschlossenen Fenstern und anschließend 5 Minuten Querlüftung mit vollständig geöffneten Fenstern gemittelte Wert bei etwa 7 m^3 pro Person und Stunde. Der Wert für den gleichen Raum mit geschlossenen Fenstern liegt jedoch nur bei rund 1 m^3 pro Person und Stunde, also bei einem Bruchteil des Durchschnittswertes. Der Lüftungszustand „geschlossene Fenster“ ist jedoch häufig über einen längeren Zeitraum von mehreren Schulstunden gegeben.

Tabelle 3.2.4: Berechnete personenbezogene Zuluftvolumenströme bei ausgewählten Lüftungs- und Belegungssituationen auf Grund gemessener Luftwechsellzahlen

Schule SID 76 Klasse 1A	alle Fenster geschlossen, Pause gleiche Situation		1 Fenster gekippt, Pause gleiche Situation		2 Fenster gekippt, Pause gleiche Situation	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom [m ³ /Pers.*h]	0,65	1,2	9,9	7,4	37	n.b.
Belegung (Schüler + Lehrer)	31	31	31	31	31	31

Schule SID 76 Klasse 1A	50' alle Fenster geschlossen, 5'Pause 2 Fenster gekippt		50' alle Fenster geschlossen, 10'Pause 2 Fenster gekippt		50' alle Fenster geschlossen, 5'Pause alle Fenster und Türe voll geöffnet	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom [m ³ /Pers.*h]	3,9	4,1	6,6	6,8	6,9	7,2
Belegung (Schüler + Lehrer)	31	31	31	31	31	31

Schule SID 76 Klasse 1A	50' alle Fenster geschlossen, 10'Pause alle Fenster und Türe voll geöffnet		50' 1 Fenster gekippt, 10'Pause 2 Fenster gekippt		50' 1 Fenster gekippt, 10'Pause alle Fenster und Türe voll geöffnet	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom [m ³ /Pers.*h]	12,1	12,4	11,4	11,8	17,0	17,4
Belegung (Schüler + Lehrer)	31	31	31	31	31	31

n.b. keine Messdaten, daher nicht berechnet

Tabelle 3.2.5: Berechnete personenbezogene Zuluftvolumenströme bei ausgewählten Lüftungs- und Belegungssituationen auf Grund gemessener Luftwechsell-zahlen

Schule SID 580 Klasse 3B (Sommer), entspricht 4B (Winter)	alle Fenster geschlossen, Pause gleiche Situation		1 Fenster gekippt, Pause gleiche Situation		2 Fenster gekippt, Pause gleiche Situation	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom [m ³ /Pers.*h]	0,24	1,0	4,1	6,4	16,6	n.b.
Belegung (Schüler + Lehrer)	26	26	26	26	26	26

Schule SID 580 Klasse 3B (Sommer), entspricht 4B (Winter)	50' alle Fenster geschlossen, 5'Pause 2 Fenster gekippt		50' alle Fenster geschlossen, 10'Pause 2 Fenster gekippt		50' alle Fenster geschlossen, 5'Pause alle Fenster und Türe voll geöffnet	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom [m ³ /Pers.*h]	1,7	4,5	3,0	7,4	7,4	8,1
Belegung (Schüler + Lehrer)	26	26	26	26	26	26

Schule SID 580 Klasse 3B (Sommer), entspricht 4B (Winter)	50' alle Fenster geschlossen, 10'Pause alle Fenster und Türe voll geöffnet		50' 1 Fenster gekippt, 10'Pause 2 Fenster gekippt		50' 1 Fenster gekippt, 10'Pause alle Fenster und Türe voll geöffnet	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Personenbezogener Zuluftvolumenstrom [m ³ /Pers.*h]	13,4	14,0	6,2	12,0	16,6	18,6
Belegung (Schüler + Lehrer)	26	26	26	26	26	26

n.b. keine Messdaten, daher nicht berechnet

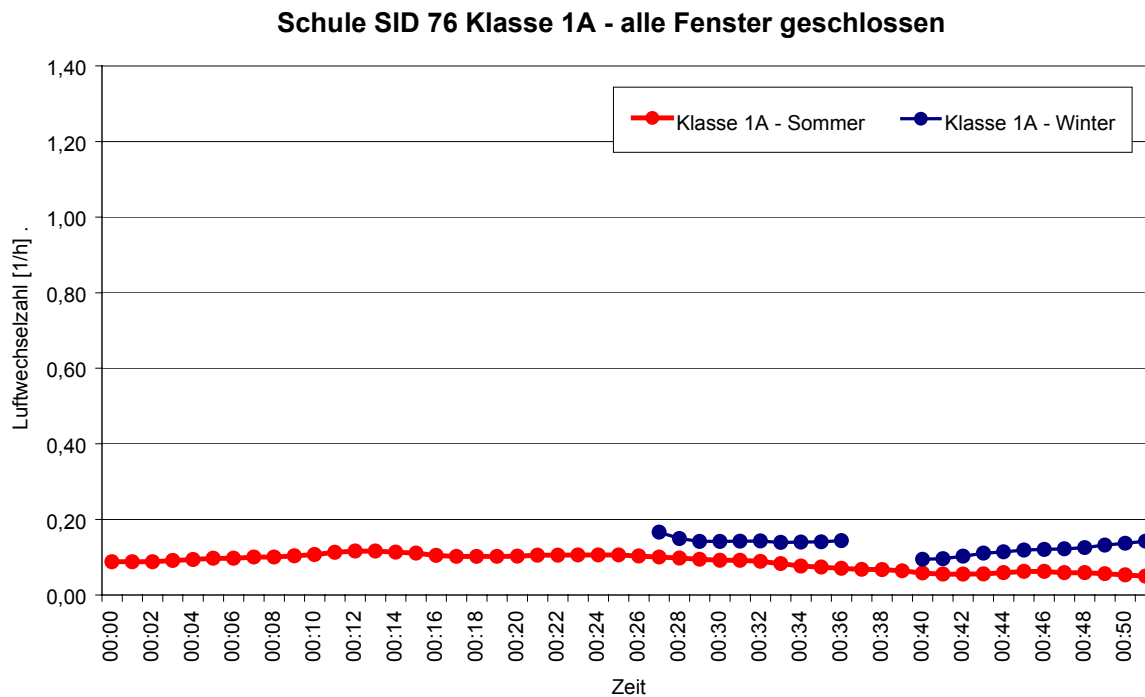


Abb. 3.2.1: Zeitlicher Verlauf der gleitenden Halbstunden - Mittelwerte der Luftwechselzahl, Winter- und Sommervergleich

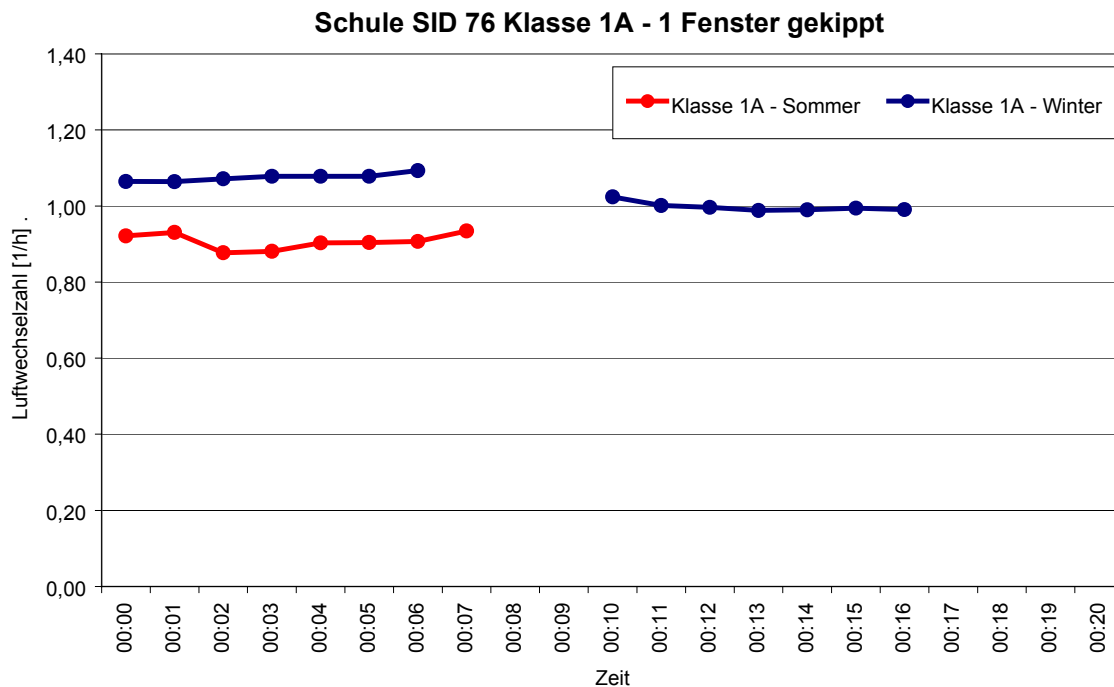


Abb. 3.2.2: Zeitlicher Verlauf der gleitenden Halbstunden- Mittelwerte der Luftwechselzahl, Winter- und Sommervergleich

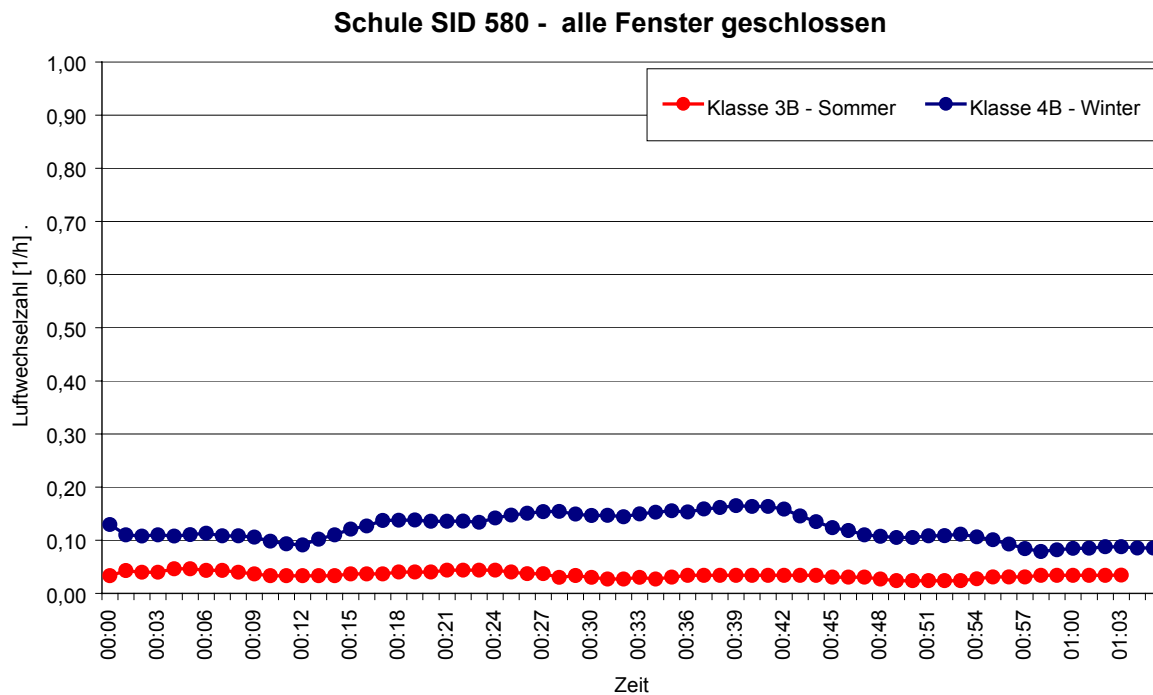


Abb. 3.2.3: Zeitlicher Verlauf der gleitenden Halbstunden- Mittelwerte der Luftwechselzahl, Winter- und Sommergegleich

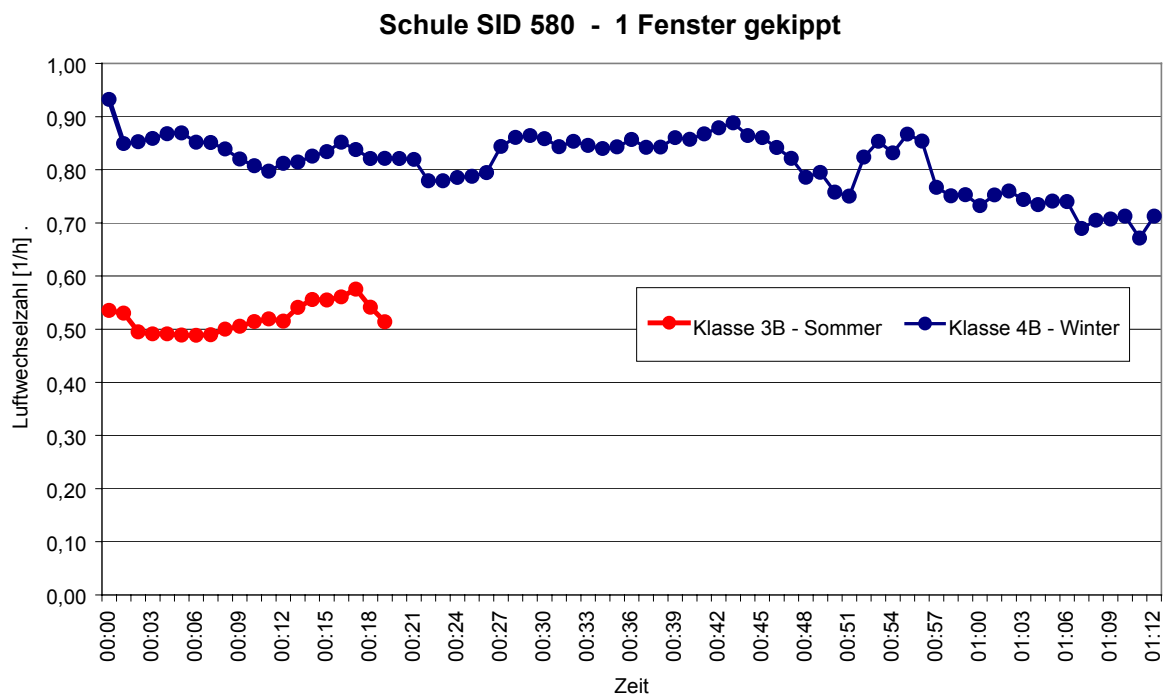


Abb. 3.2.4: Zeitlicher Verlauf der gleitenden Halbstunden - Mittelwerte der Luftwechselzahl, Winter- und Sommergegleich

3.3 Ergebnisse der Messungen nach dem Blower-Door Verfahren

Tabelle 3.3.1: Luftwechselrate bei einem Differenzdruck von 50 Pa

	Objekt	Schule SID 76 Klasse 1A		Schule SID 76 Klasse 3A (Sommer), 4A (Winter)	
		Kenngröße n_{50}^a		Kenngröße n_{50}^a	
Messbedingung	Einheit	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Unterdruck	[h ⁻¹]	2,4	1,9	3,1	3,4
Überdruck	[h ⁻¹]	1,4	1,3	2,2	2,3
arithm. Mittelwert	[h ⁻¹]	1,9	1,6	2,6	2,9

	Objekt	Schule SID 580 Klasse 3B (Sommer), 4B (Winter)		Schule SID 580 Klasse 4A (Sommer), 3A (Winter)	
		Kenngröße n_{50}^a		Kenngröße n_{50}^a	
Messbedingung	Einheit	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Unterdruck	[h ⁻¹]	0,99	1,1	0,34	0,39
Überdruck	[h ⁻¹]	0,90	1,1	0,32	0,39
arithm. Mittelwert	[h ⁻¹]	0,94	1,1	0,33	0,39

^a Die Kenngröße n_{50} beschreibt die Luftwechselrate pro Stunde bei einem Differenzdruck von 50 Pa

3.4 Gegenübergestellte Ergebnisse CO₂ - Radon

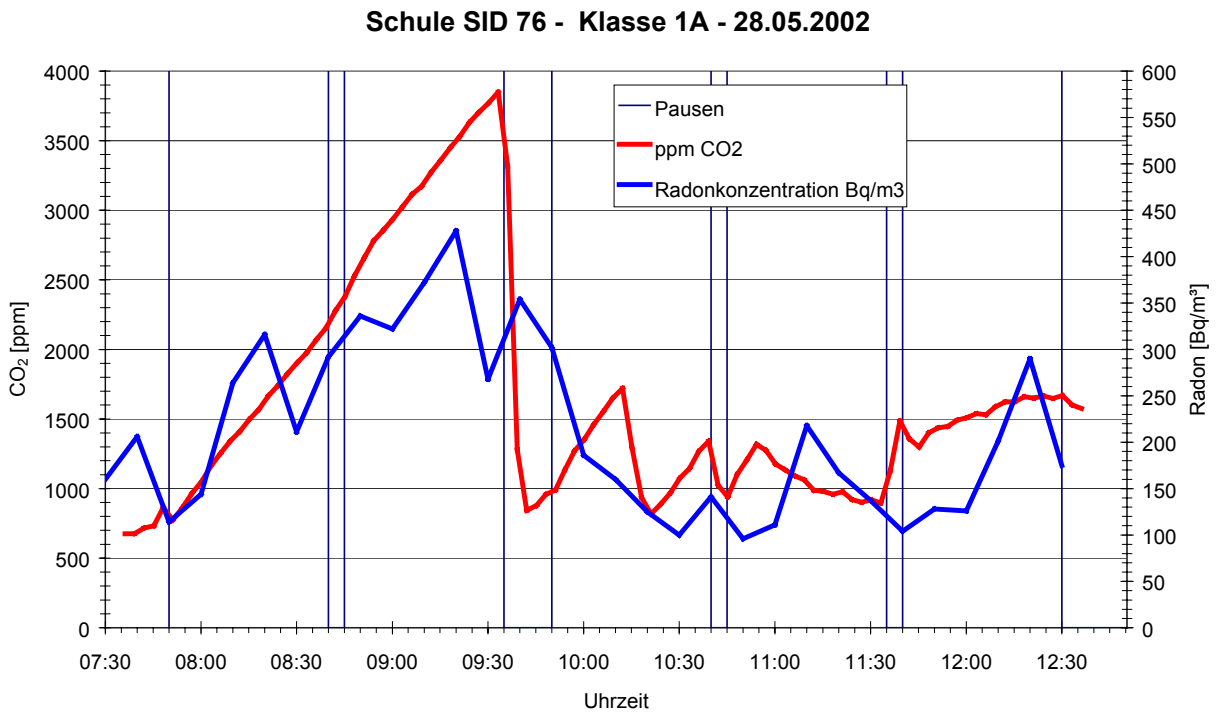


Abb. 3.4.1: Zeitlicher Verlauf der CO₂- sowie der Radonkonzentration

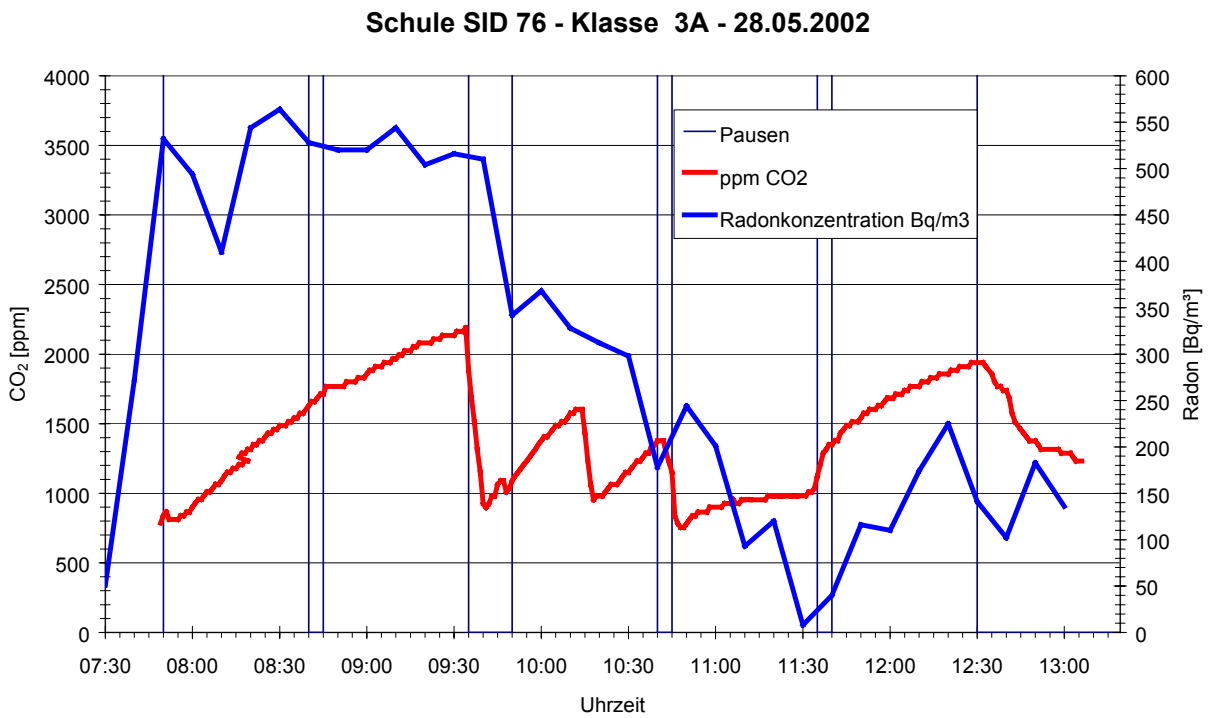


Abb. 3.4.2: Zeitlicher Verlauf der CO₂- sowie der Radonkonzentration

Schule SID 580 - Klasse 4A - 29.05.2002

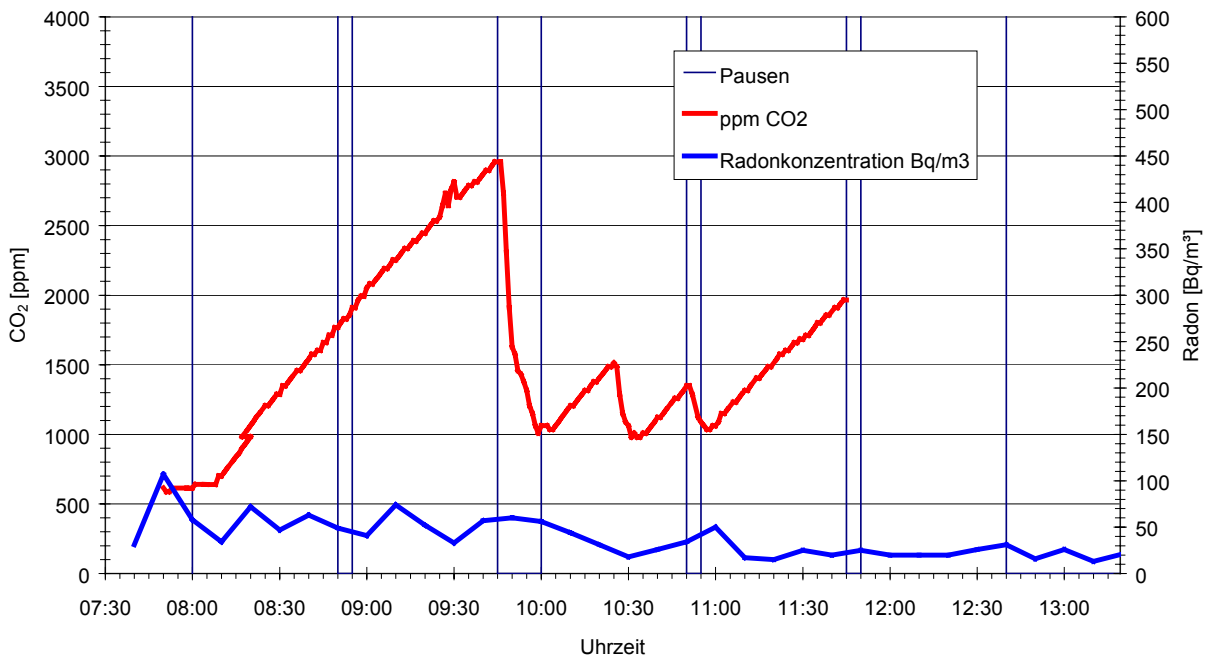


Abb. 3.4.3: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration und der Radonkonzentration

Schule SID 580 - Klasse 3B - 29.05.2002

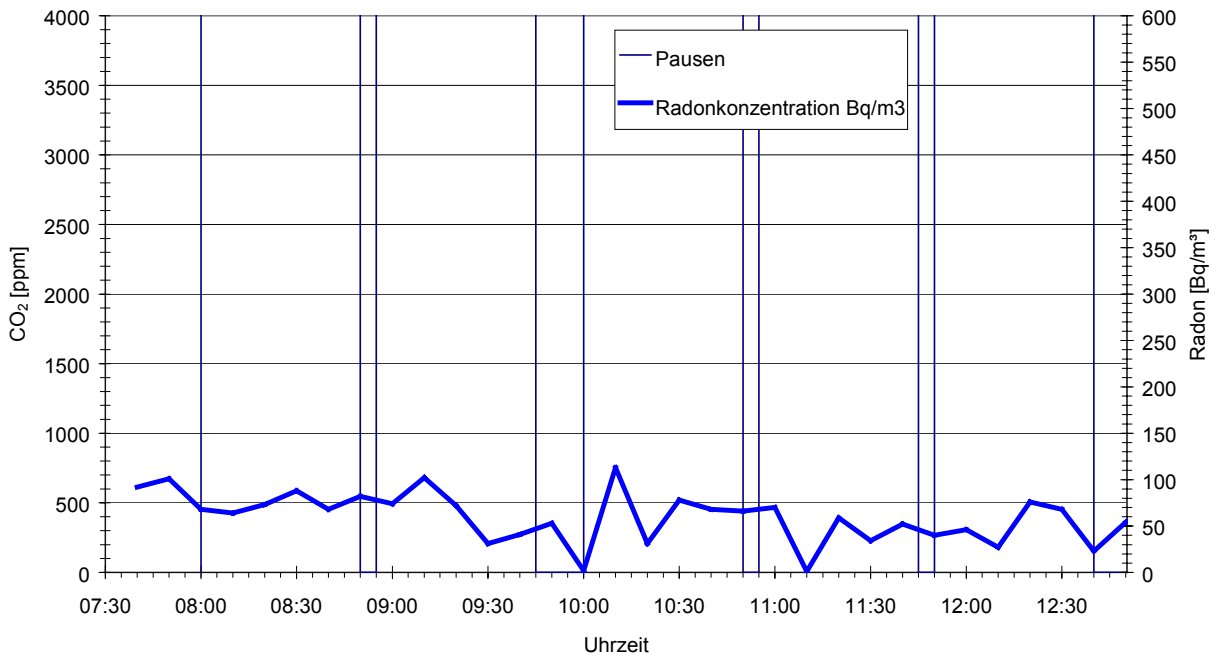


Abb. 3.4.4: Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration

Schule SID 76 - Klasse 1A - 18.12.2002

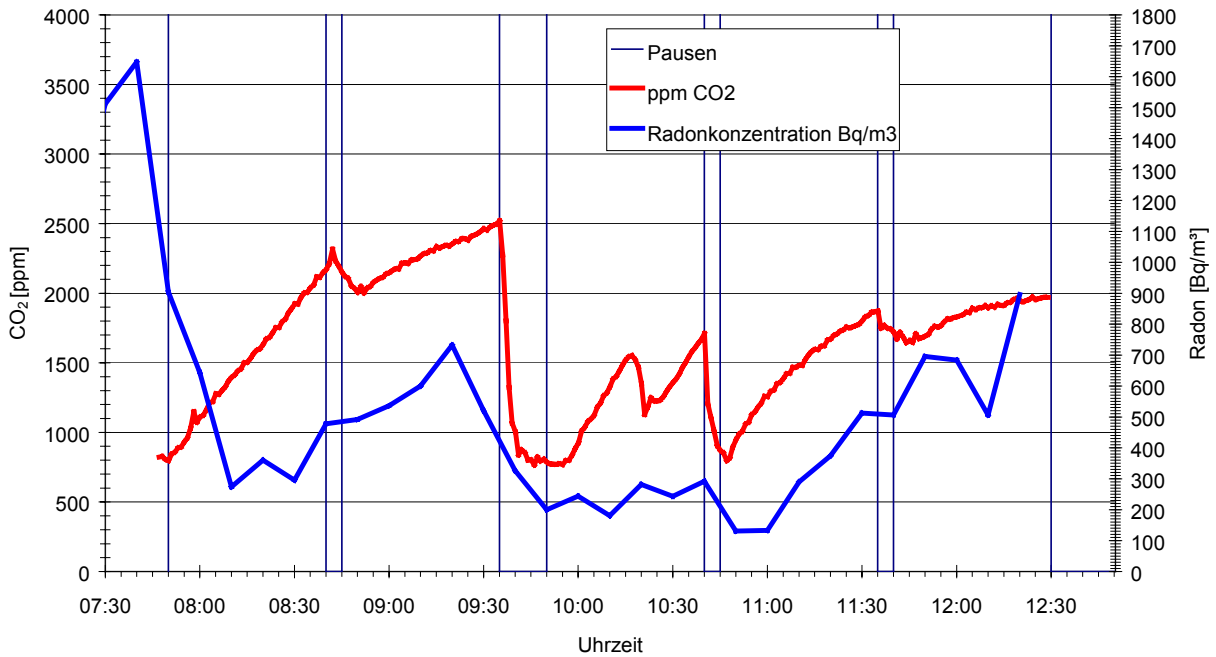


Abb. 3.4.5: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration und der Radonkonzentration

Schule SID 76 - Klasse 4A (vormals 3A) - 18.12.2002

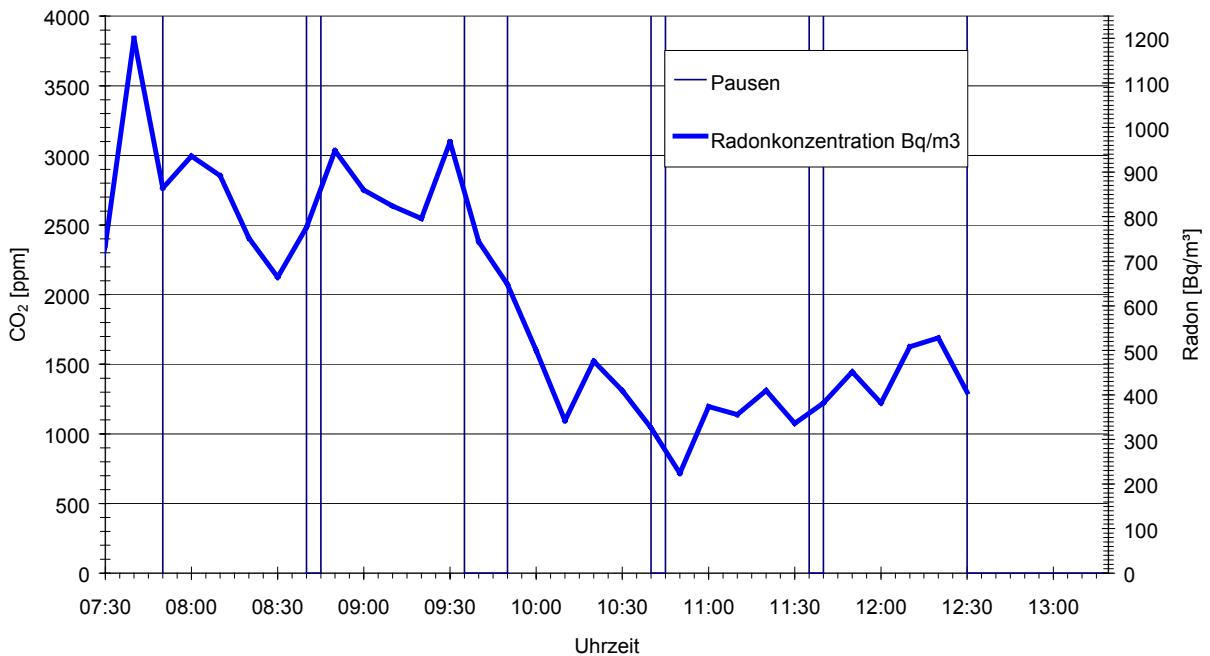


Abb. 3.4.6: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration und der Radonkonzentration

Schule SID 580 - Klasse 4B (vormals 3B) - 17.12.2002

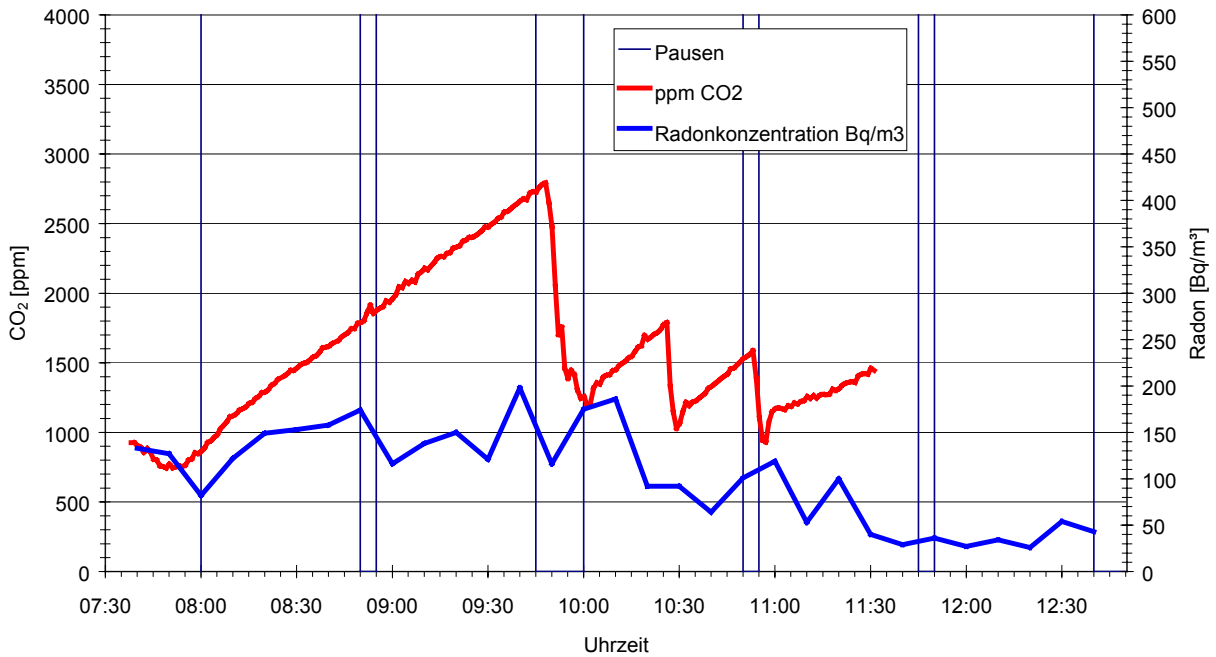


Abb. 3.4.7: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration und der Radonkonzentration

Schule SID 580 - Klasse 3A (vormals 4A) - 17.12.2002

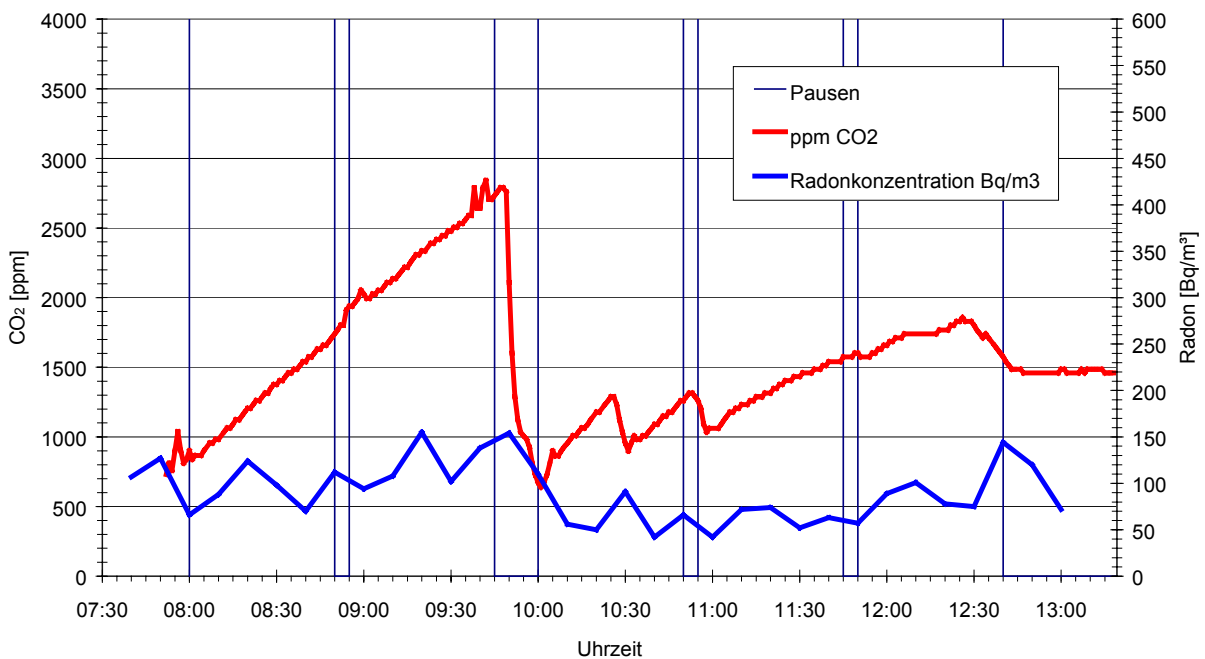


Abb. 3.4.8: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration und der Radonkonzentration

3.4.1 Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte

An den Messtagen der Sommermessung lag die Außentemperatur im Mittel bei 9,8 °C (SID 76) und 22 °C (SID 580). Bei der Wintermessung lag die Außentemperatur im Mittel bei -1,8 °C (SID 76) und 0,2 °C (SID 580).

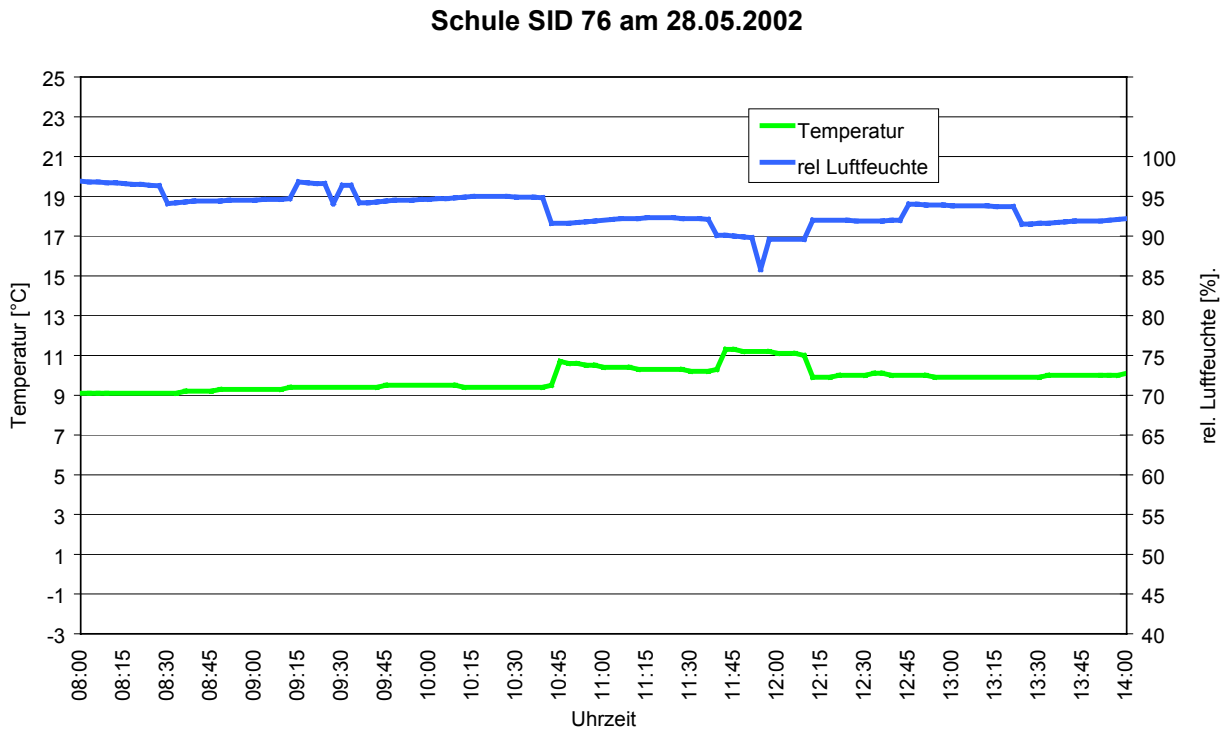


Abb. 3.4.9: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur sowie rel. Luftfeuchte

Schule SID 76 am 18.12.2002

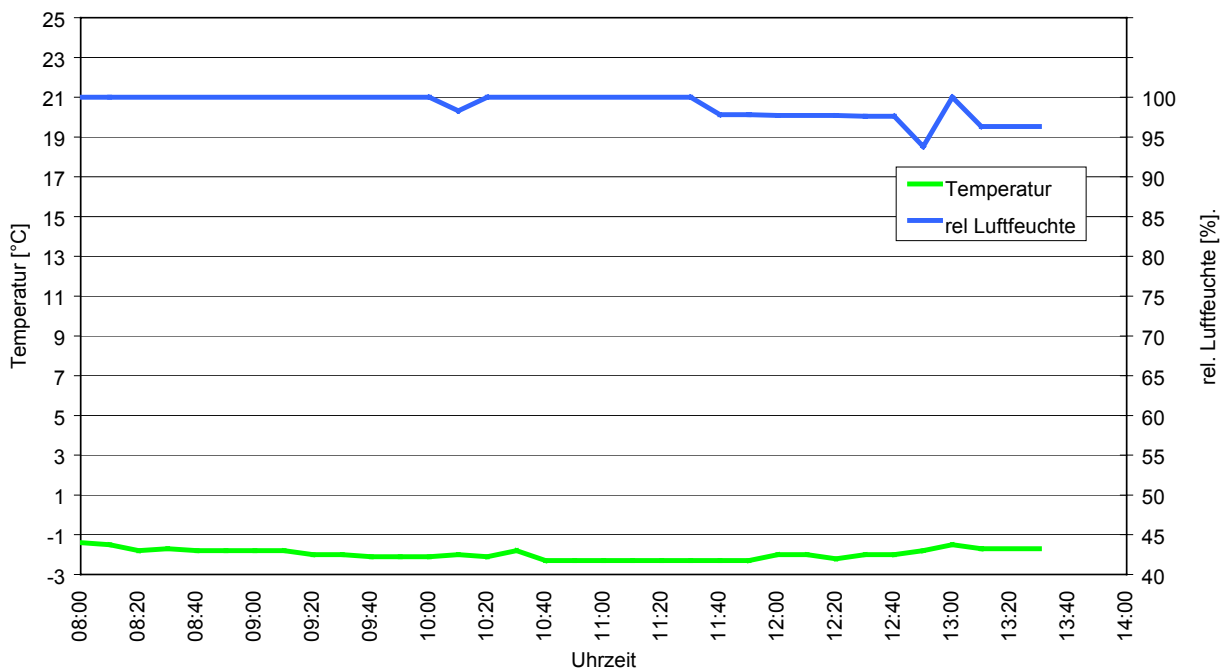


Abb. 3.4.10: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur sowie rel. Luftfeuchte

Schule SID 560 am 29.05.2002

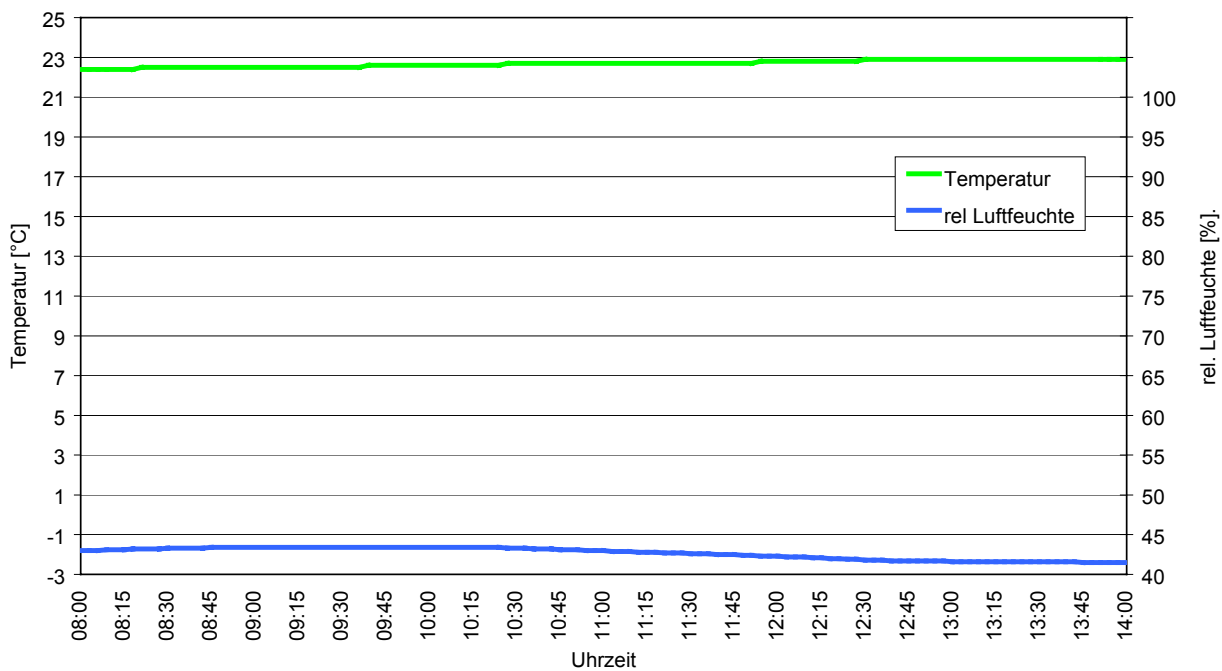


Abb. 3.4.11: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur sowie rel. Luftfeuchte

Schule SID 580 am 17.12.2002

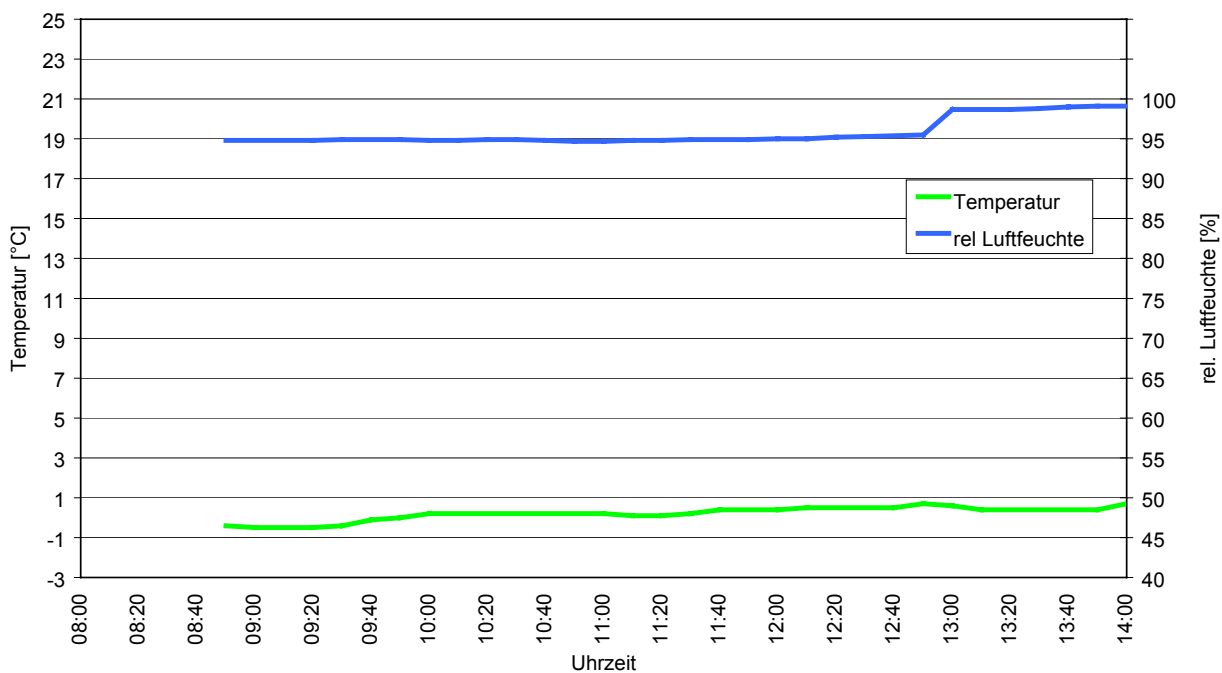


Abb. 3.4.12: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur sowie rel. Luftfeuchte

4 Entwicklung eines Rechenmodells für Kohlendioxid in Schulklassen

Aufbauend auf theoretischen Überlegungen wurde ein Rechenblatt entwickelt, das als Grundlage für Lüftungsanweisungen in bestehenden Schulen bzw. für die Planung von zukünftigen Schulräumen dienen kann. Das Modell wurde anhand der ermittelten Praxisdaten mehrerer Klassenräume angepasst.

Es wurde darauf geachtet, dass die Berechnung auf für den Nutzer einfache Weise mittels einer Microsoft[®] Excel-Datei erfolgen kann. In einem Eingabeblatt werden die unterschiedlichen Vorgaben eingetragen. In dieser Weise können für Klassenräume z.B. die maximale Klassenbelegung, der notwendige Luftraum oder das resultierende Zuluftvolumen pro Schüler bestimmt werden.

4.1 Beschreibung des CO₂-Modells

Das CO₂-Rechenmodell ist in der Lage, ausgehend von den Raumdimensionen und der Lüftungssituation für eine bestimmte Anzahl von Schülern und Lehrern eine Prognose für den Verlauf der CO₂-Konzentration im Klassenraum abzugeben. Folgende Parameter können vorgegeben werden:

- Fläche und Höhe des Klassenraumes
- Anzahl und Alter der Schüler
- Anzahl der Lehrer
- Aktivitätsgrad von Schülern und Lehrern
- Lüftungssituation (geschlossene Fenster, ein gekipptes Fenster usw.), resultierend in einer Luftwechselzahl pro Stunde
- Dichtheit der Fenster, resultierend in einer Luftwechselzahl pro Stunde bei geschlossenen Fenstern
- CO₂ Anfangskonzentration am Beginn der ersten Unterrichtseinheit

Es wird von 5 Minuten Unterrichts- bzw. Pauseneinheiten ausgegangen, die frei kombinierbar sind. Die Belegung des Klassenraums, der Aktivitätsgrad von Schülern und Lehrern und die Lüftungssituation kann für jede Einheit getrennt vorgegeben werden.

4.2 Mathematische Formulierung des CO₂-Modells

Bei der Formulierung des CO₂-Modells wurden einige vereinfachende Annahmen getroffen.

Es wird von einem durch Grundfläche [in m²] und Höhe [in m] definierten Raumvolumen [V in m³] ausgegangen, das mit seiner Umgebung durch isothermen Luftaustausch in Wechselwirkung steht. Dieser Luftaustausch wird durch die Luftwechselzahl [n in 1/h] beschrieben. In der Umgebung herrscht eine zeitlich konstante CO₂-Außenluftkonzentration [C₀ in mL/m³].

Schüler und Lehrer stellen CO₂-Quellen dar und werden durch ihre Quellstärken beschrieben. Die aus den Einzelquellen resultierende Gesamtquellstärke E [in mL/h] wird für eine Betrachtungseinheit (Unterrichtseinheit oder Pause) zeitlich konstant angenommen. Die Belegungsdichte, das heißt die Anzahl der CO₂-Quellen ist für jede Betrachtungseinheit frei wählbar. Die Stärke der CO₂-Quellen wird weiters durch den für Lehrer bzw. Schüler zu wählenden Aktivitätsgrad beeinflusst.

Für die Luft im Klassenraum wird eine ideale Durchmischung angenommen, so dass zu jeder beliebigen Zeit die CO₂-Konzentration in allen Punkten des Raumes den selben Wert annimmt. Die Anfangskonzentration am Beginn der Berechnung [C_{START} in mL/m³] weicht in der Regel von der Außenluftkonzentration ab und muss vorgegeben werden.

Die Massenbilanz ohne Berücksichtigung von Ad- und Desorptionseffekten lässt sich folgendermaßen aufstellen, wobei die Formelzeichen die Bedeutung haben:

V	Raumvolumen des Klassenraums [m ³]
n	Luftwechselzahl [1/h]
E	Gesamtquellstärke [mL/h]

$C(t)$	CO ₂ -Konzentration als Funktion der Zeit [mL/ m ³]
C_0	CO ₂ -Außenluftkonzentration [mL/ m ³]
C_{START}	CO ₂ - Anfangskonzentration am Beginn der Berechnung [mL/ m ³]

$$(1) \quad V * dC(t)/dt = E - (n*V) * (C(t) - C_0)$$

Die Lösung der resultierenden Differentialgleichung ist die Überlagerung der allgemeinen Lösung des homogenen Teils

$$(2) \quad C(t) = \exp(-n*t)$$

mit einer speziellen Lösung des inhomogenen Teils unter Berücksichtigung der Randbedingungen

$$(3) \quad C(\text{Gleichgewicht}) = C_0 + E/(n*V)$$

$$(4) \quad C(t=0) = C_{START}$$

in der Form

$$(5) \quad C(t) = C_0 + E/(n*V) + K * \exp(-n*t)$$

wobei die Konstante K je nach Wahl der Randbedingungen unterschiedliche Werte annehmen kann. Im gegenständlichen Fall wird

$$(6) \quad K = C_{START} - C_0 - E/(n*V)$$

und die Lösung lautet

$$(7) \quad C(t) = C_0 + (C_{START} - C_0) * \exp(-n*t) + E/(n*V) * (1 - \exp(-n*t))$$

Die Grundlagen zur gewählten Vorgangsweise sind in VDI 4300 Bl. 7 beschrieben.

4.3 Quellstärken der CO₂-Abgabe

Für die Beschreibung der Unterrichtssituation wird für die Schüler in den meisten Fällen von einer leichten vorwiegend sitzenden Tätigkeit (Aktivitätsgrad 1,2) auszugehen sein. Bei den Lehrern wird in den meisten Fällen von einer körperlich leichten Tätigkeit mit Sitz-, Geh- und Stehphasen auszugehen sein (Aktivitätsgrad 1,4).

Die Literaturangaben der CO₂-Abgabe für erwachsene Personen schwanken in einem weiten Bereich.

Tabelle 4.3.1 Literaturangaben für die CO₂-Abgabe von Menschen ^a

Literatur	Einheit	Wert	Anmerkung
Rietschel (1994)	[L/h]	20,4	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit entspanntes Stehen
	[L/h]	27,2	Stehende Tätigkeit
Witthauer, Horn, Bischof (1993)	[L/h]	12	Ruhiger Zustand
	[L/h]	18	Sitzende Tätigkeit
	[L/h]	180	Schwerarbeit
Recknagel, Sprenger, Schramek (1999)	[L/h]	20	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit
VDI 4300 Bl. 7	[L/h]	15 ... 20	Sitzende Tätigkeit
	[L/h]	20 ... 40	Leichte Arbeit
	[L/h]	70 ... 110	Schwere Arbeit

a Angaben in Liter CO₂ pro Stunde

Für die Modellüberlegungen wurden in erster Näherung geschätzte CO₂-Emissionsraten angenommen, die anhand der messtechnischen Untersuchungen in Klassenräumen an die realen Gegebenheiten angepasst wurden. Für diese Beurteilung wurden in erster Linie die Messungen im Winter herangezogen, da in der kalten Jahreszeit ein intensiverer Luftaustausch mit der wesentlich kühleren Außenluft angenommen werden kann. In der warmen Jahreszeit ist es eher möglich, dass aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Außen ein größerer Anteil des zugeführten Luftvolumens in Form von verbrauchter Innenraumluft aus anderen Teilen des Gebäudes erfolgt.

Zur Berücksichtigung des Alters der Schüler wurde ein linearer Anstieg der CO₂ Abgabe mit dem Lebensalter zwischen 6 und 18 Jahren angenommen. Für den Aktivitätsgrad 1 wird zwischen mit 10 Liter pro Stunde für 6-jährige Kinder und 18 l/h für erwachsene Personen interpoliert. Je nach vorgegebenen Aktivitätsgrad wird die CO₂-Emission um diesen Faktor erhöht.

Tabelle 4.3.2 Gewählte CO₂-Emissionsraten für die Modellberechnungen ^a

	Einheit	Wert	Anmerkung
Schüler 10 Jahre	[L/h]	15,2	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit (Aktivitätsgrad 1,2)
Schüler 14 Jahre	[L/h]	18,4	Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit (Aktivitätsgrad 1,2)
Lehrer, Erwachsene	[L/h]	25,2	Leichte Tätigkeit mit Sitzen, Gehen, Stehen (Aktivitätsgrad 1,4)

a Angaben in Liter CO₂ pro Stunde

4.4 Luftwechselzahlen

Die mittels Tracergasuntersuchungen experimentell bestimmten Luftwechselzahlen in den Klassenräumen lagen je nach Lüftungssituation in folgenden Bereichen:

Tabelle 4.4.1 Bereich der bei den Messungen in den Schulen SID 76 und SID 580 ermittelten Luftwechselzahlen

Lüftungssituation	Einheit	Sommer	Winter
geschlossene Fenster und Türen	[1/h]	0,02 ... 0,10	0,10 ... 0,15
Ein Drittel der Fenstern gekippt	[1/h]	0,5 ... 0,9	0,7 ... 1,2
alle Fenster gekippt	[1/h]	2 ... 5	--
Alle Fenster und Türe geöffnet - Querlüften	[1/h]	10 ... 20	10 ... 30

Diese Messwerte liegen im unteren Bereich von typischen Literaturangaben.

Tabelle 4.4.2 Luftwechselzahlen bei verschiedenen Lüftungsarten ^a

Lüftungssituation	Einheit	ohne Querlüftung	mit Querlüftung
Fenster und Türen dicht	[1/h]	0,1 ... 0,3	--
Fenster gekippt	[1/h]	0,8 ... 2,5	2 ... 4
Fenster ganz geöffnet	[1/h]	9 ... 15	> 20

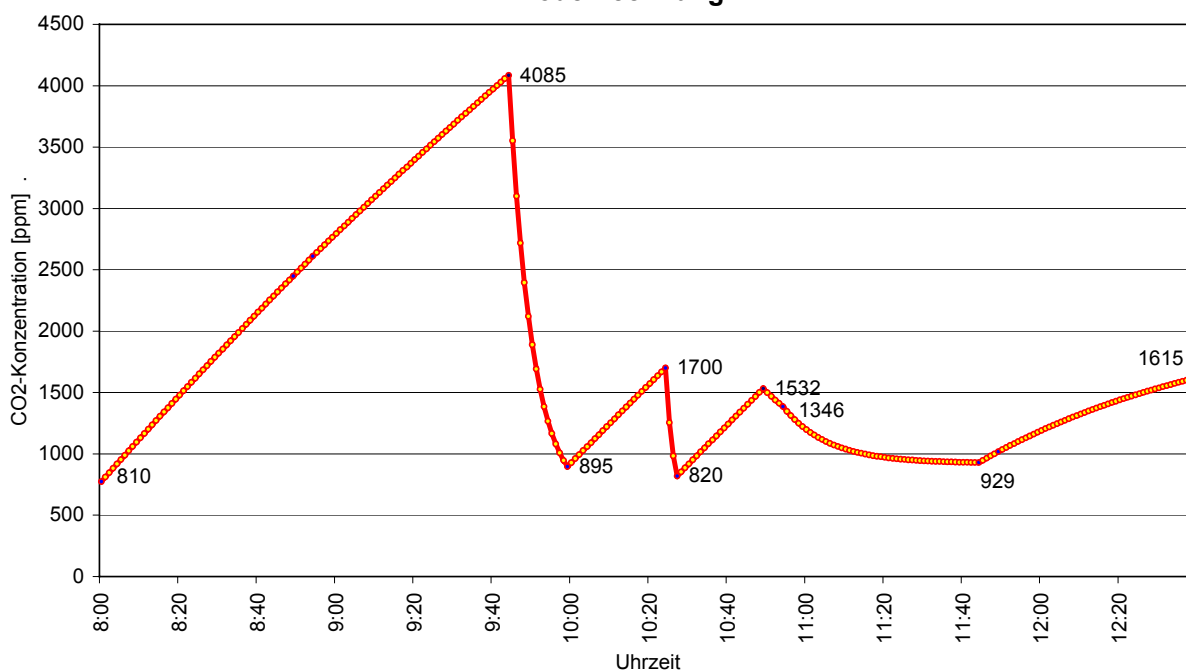
a Angaben aus IWU 2001

4.5 Vergleich der Modellrechnung mit den realen Bedingungen in Klassenräumen

Zum Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnung mit den realen Bedingungen im Unterricht, wie sie in exemplarischen Klassen messtechnisch erfasst wurden, wurden drei unterschiedliche Situation herausgegriffen.

Auf den folgenden Seiten wird der mit dem Modell errechnete Verlauf der CO₂-Konzentration den Messdaten gegenübergestellt. Im Rahmen der zur Modellierung notwendigen Vereinfachungen zeigt sich eine gute tendenzielle Übereinstimmung.

**Verlauf der CO₂-Konzentration Schule SID 76 - Klasse 1A - Sommer
Modellrechnung**



**Verlauf der CO₂-Konzentration SID 76 - Klasse 1A - Sommer
Messdaten**

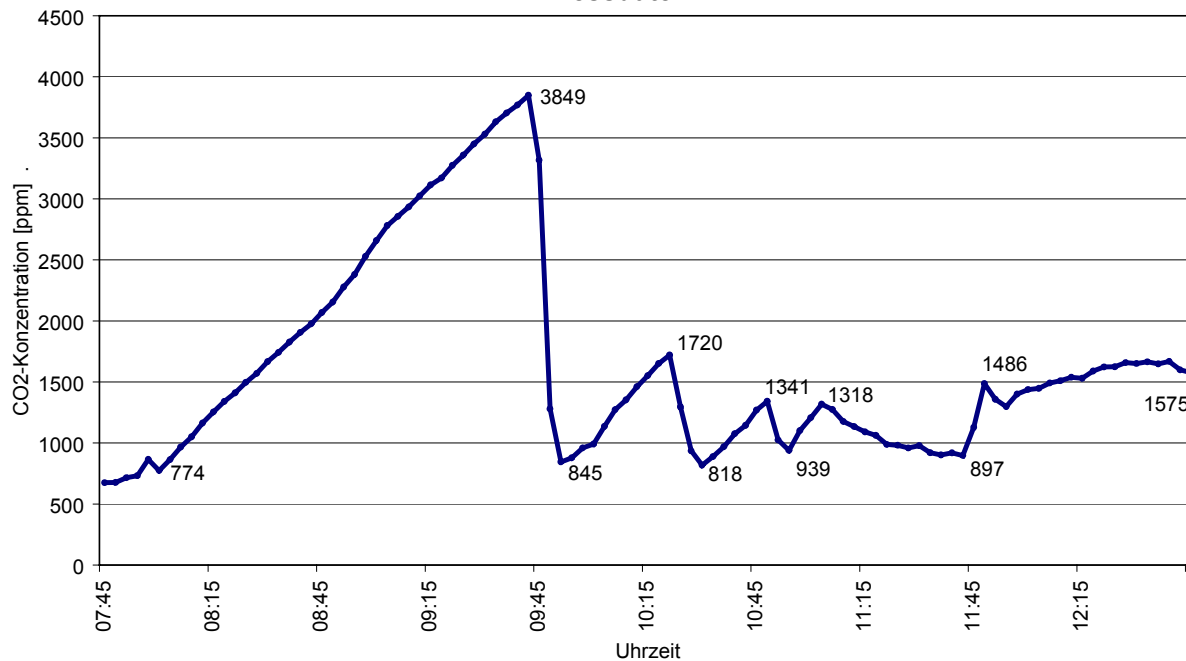
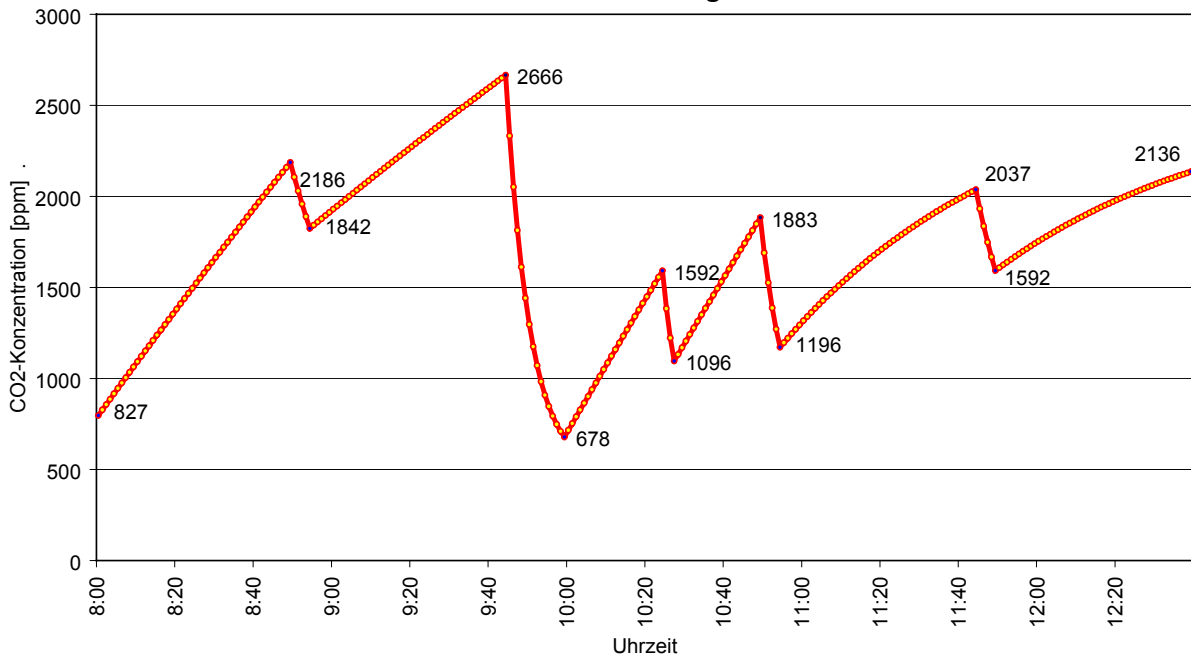


Abb. 4.5.1: Vergleich Modellrechnung - Messdaten

**Verlauf der CO₂-Konzentration Schule SID 76 - Klasse1A - Winter
Modellrechnung**



**Verlauf der CO₂-Konzentration Schule SID 76 - Klasse 1A - Winter
Messdaten**

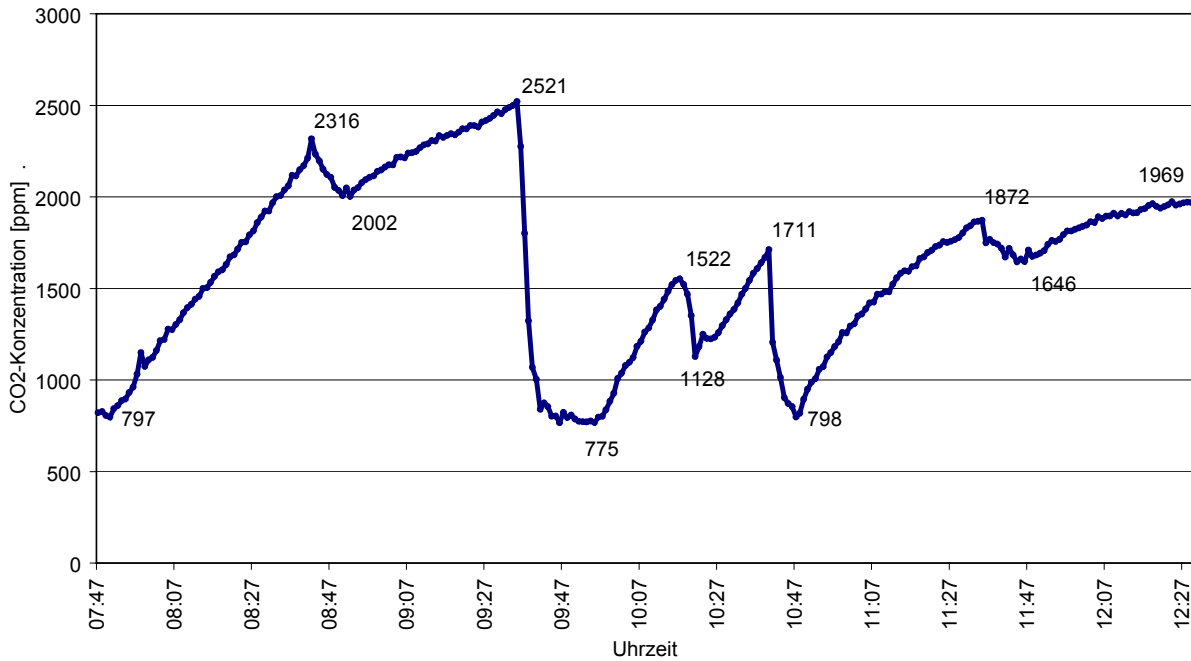
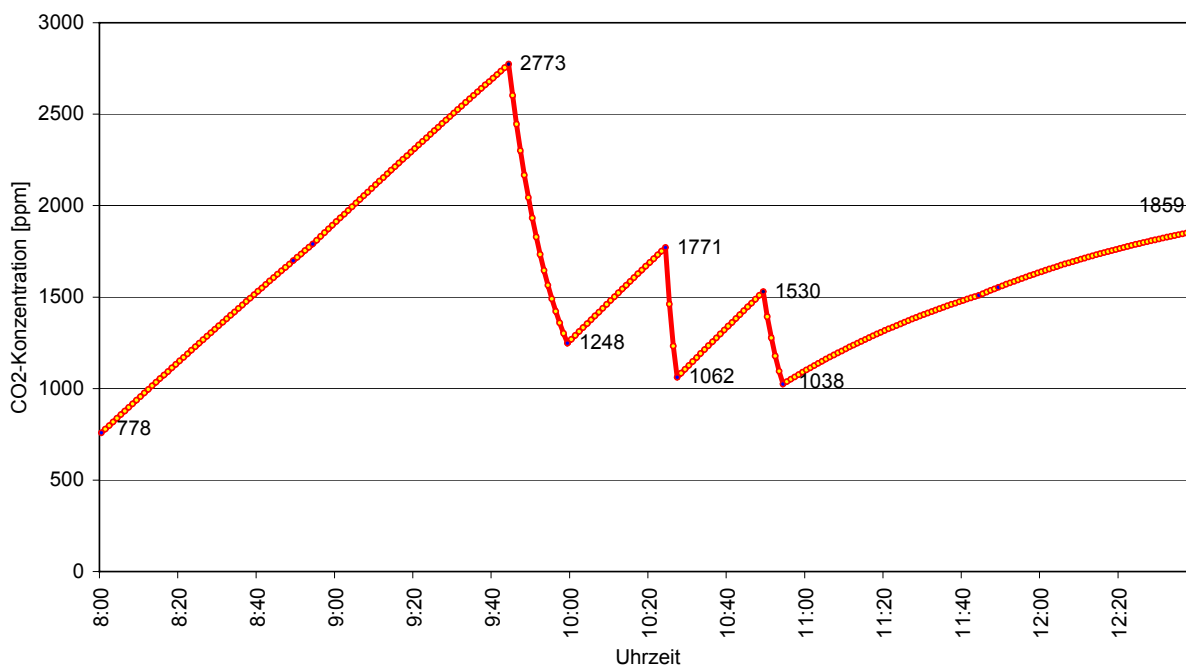


Abb. 4.5.2: Vergleich Modellrechnung – Messdaten

**Verlauf der CO₂-Konzentration Schule SID 580 - Klasse 4B - Winter
Modellrechnung**



**Verlauf der CO₂-Konzentration Schule SID 580 - Klasse 4B - Winter
Messdaten**

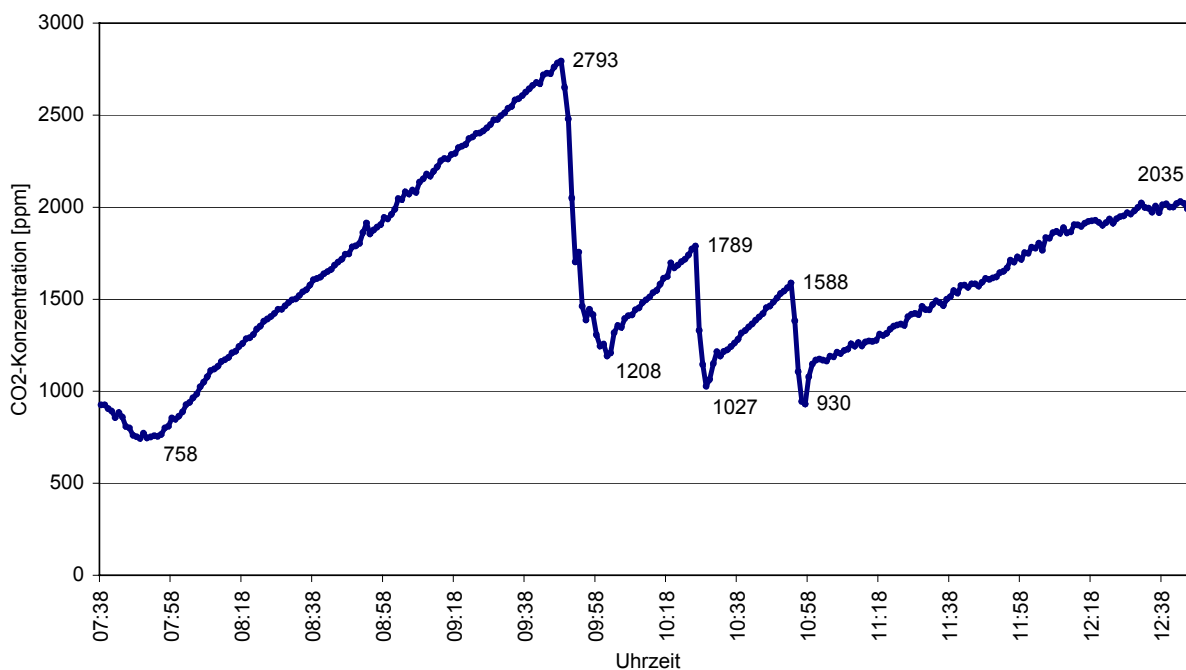


Abb. 4.5.3: Vergleich Modellrechnung - Messdaten

4.6 Beispiele zur Anwendung der Modellrechnung

Wesentliche Unterschiede in Bezug auf die Raumluftqualität sind beim Vergleich einer typischen Sommersituation charakterisiert durch ständig gekippte Fenster mit Wintersituationen mit oftmals über längere Zeit geschlossenen Fenstern zu erwarten. In den folgenden Szenarien wurde mittels Rechenmodell das Lüftungsverhalten für ausgewählte Sommer- und Wintersituationen bei gleicher Klassenbelegung simuliert.

Bei Szenario 1 wird eine typische Klasse mit höherer Belegung durch 10-jährige Schüler und eher dichten Fenstern (typisch für neuere Fenster) angenommen. Die Sommersituation ist charakterisiert durch ein ständig gekipptes Fenster während des Unterrichts und gekippte Fenster während den Pausen, die Wintersituationen durch geschlossene Fenster während des Unterrichts und gekippte (Situation 1) bzw. völlig geöffnete Fenster (Situation 2) während den Pausen. Der komplette Parametersatz ist in folgender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.6.1 Modellparameter für Szenario 1 (Variantenvergleich)

Parameter	Einheit	Sommer-situation	Winter-situation 1	Winter-situation 2
Fläche des Klassenraumes	[m ²]	62,5	62,5	62,5
Höhe des Klassenraumes	[m]	3	3	3
Fenstertyp	[a]	Eher dicht	Eher dicht	Eher dicht
Alter der Schüler	[a]	10	10	10
Anzahl der Schüler (UE)	[1]	28	28	28
Aktivitätsgrad der Schüler (UE)	[1]	1,2	1,2	1,2
Anzahl der Schüler (Pausen)	[1]	14	14	14
Aktivitätsgrad der Schüler (Pausen)	[1]	2	2	2
Anzahl der Lehrer (UE)	[1]	1	1	1
CO ₂ -Konzentration bei Unterrichtsbeginn	[ppm]	500	500	500
Luftwechselzahl (UE) und Fensterstellung	[1/h]	1 1 Fenster gekippt	0,1 Fenster geschl.	0,1 Fenster geschl.
Luftwechselzahl (Pausen) und Fensterstellung	[1/h]	3 Alle Fenster gekippt ohne Querlüftung	3 Alle Fenster gekippt ohne Querlüftung	10 Alle Fenster geöffnet ohne Querlüftung

Variantenvergleich Sommer - Winter, 28 Schüler, 10 Jahre, eher dichte Fenster

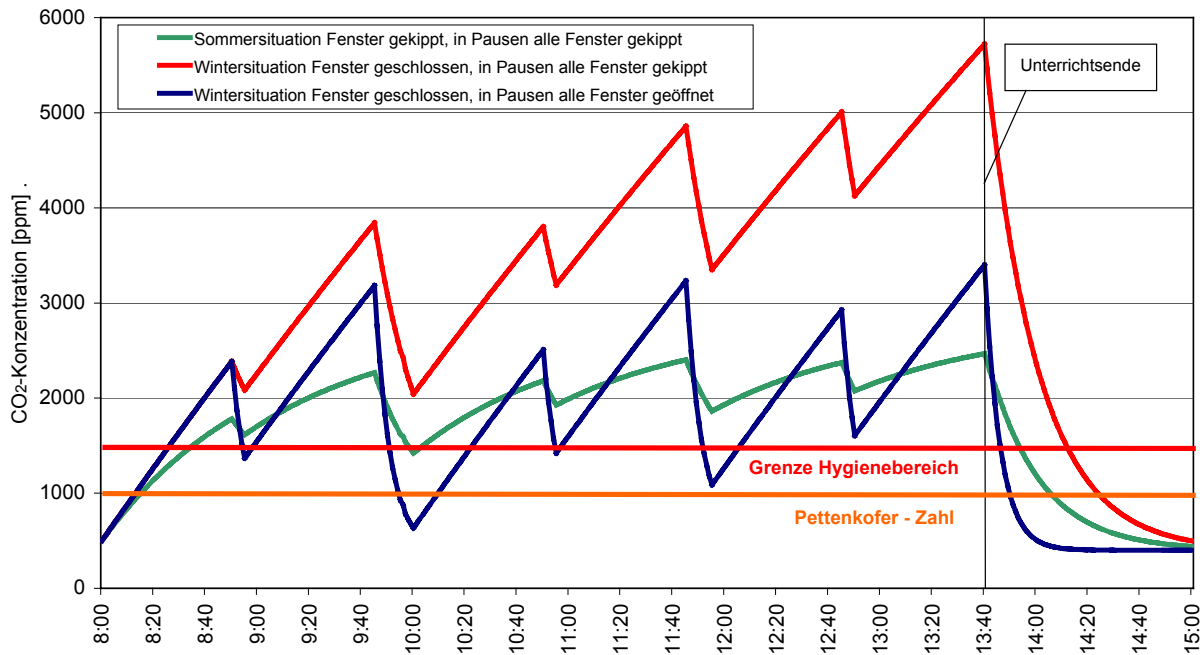


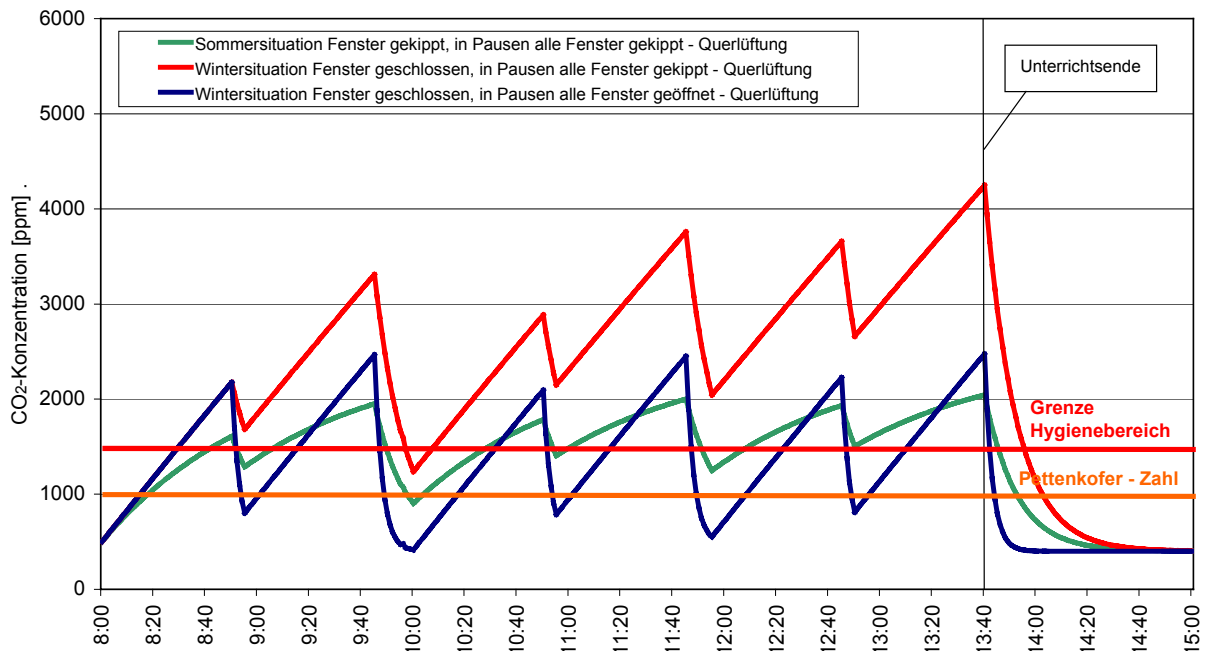
Abb. 4.6.1: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration - Modellrechnung

Bei Szenario 2 wird eine Klasse mit eher niedriger Belegung durch 14-jährige Schüler und sehr dichten Fenstern (typisch für moderne Fenster nach dem Stand der Technik) angenommen. Die Sommersituation ist charakterisiert durch ein ständig gekipptes Fenster während des Unterrichts und gekippte Fenster mit Querlüftung während den Pausen, die Wintersituationen durch geschlossene Fenster während des Unterrichts und gekippte (Situation 1) bzw. völlig geöffnete Fenster (Situation 2), jeweils mit Querlüftung, während den Pausen. Der komplette Parametersatz ist in folgender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.6.2 Modellparameter für Szenario 2 (Variantenvergleich)

Parameter	Einheit	Sommer-situation	Winter-situation 1	Winter-situation 2
Fläche des Klassenraumes	[m ²]	62,5	62,5	62,5
Höhe des Klassenraumes	[m]	3	3	3
Fenstertype/ Grundlüftung	[a]	Sehr dicht	Sehr dicht	Sehr dicht
Alter der Schüler	[a]	14	14	14
Anzahl der Schüler (UE)	[1]	20	20	20
Aktivitätsgrad der Schüler (UE)	[1]	1,2	1,2	1,2
Anzahl der Schüler (Pausen)	[1]	10	10	10
Aktivitätsgrad der Schüler (Pausen)	[1]	2	2	2
Anzahl der Lehrer (UE)	[1]	1	1	1
CO ₂ -Konzentration bei Unterrichtsbeginn	[ppm]	500	500	500
Luftwechselzahl (UE) und Fensterstellung	[1/h]	1 1 Fenster gekippt	0,05 Fenster geschl.	0,05 Fenster geschl.
Luftwechselzahl (Pausen) und Fensterstellung	[1/h]	5 Alle Fenster gekippt mit Querlüftung	5 Alle Fenster gekippt mit Querlüftung	20 Alle Fenster geöffnet mit Querlüftung

Variantenvergleich Sommer - Winter, 20 Schüler, 14 Jahre, sehr dichte Fenster



Ab

b. 4.6.2: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration - Modellrechnung

Szenario 3 zeigt die Wintersituationen aus dem vorigen Beispiel (Szenario 2) mit höherer Belegung (28 Kinder), verglichen mit einer neu eingeführten Situation 3, die Situation 2 bis auf die Tatsache gleicht, dass zusätzlich während der Stunde einmal gelüftet wird. Der komplette Parametersatz ist in folgender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.6.3 Modellparameter für Szenario 3 (Variantenvergleich)

Parameter	Einheit	Winter-situation 1	Winter-situation 2	Winter-situation 3
Fläche des Klassenraumes	[m ²]	62,5	62,5	62,5
Höhe des Klassenraumes	[m]	3	3	3
Fenstertype/ Grundlüftung	[a]	Sehr dicht	Sehr dicht	Sehr dicht
Alter der Schüler	[a]	14	14	14
Anzahl der Schüler (UE)	[1]	28	28	28
Aktivitätsgrad der Schüler (UE)	[1]	1,2	1,2	1,2
Anzahl der Schüler (Pausen)	[1]	14	14	14
Aktivitätsgrad der Schüler (Pausen)	[1]	2	2	2
Anzahl der Lehrer (UE)	[1]	1	1	1
CO ₂ -Konzentration bei Unterrichtsbeginn	[ppm]	500	500	500
Luftwechselzahl (UE) und Fensterstellung	[1/h]	0,05 Fenster geschl.	0,05 Fenster geschl.	0,05 Fenster geschl., 1x 5' pro Stunde alle Fenster geöffnet mit Querlüftung
Luftwechselzahl (Pausen) und Fensterstellung	[1/h]	5 Alle Fenster gekippt mit Querlüftung	20 Alle Fenster geöffnet mit Querlüftung	20 Alle Fenster geöffnet mit Querlüftung

Variantenvergleich Winter, 28 Schüler, 14 Jahre, sehr dichte Fenster

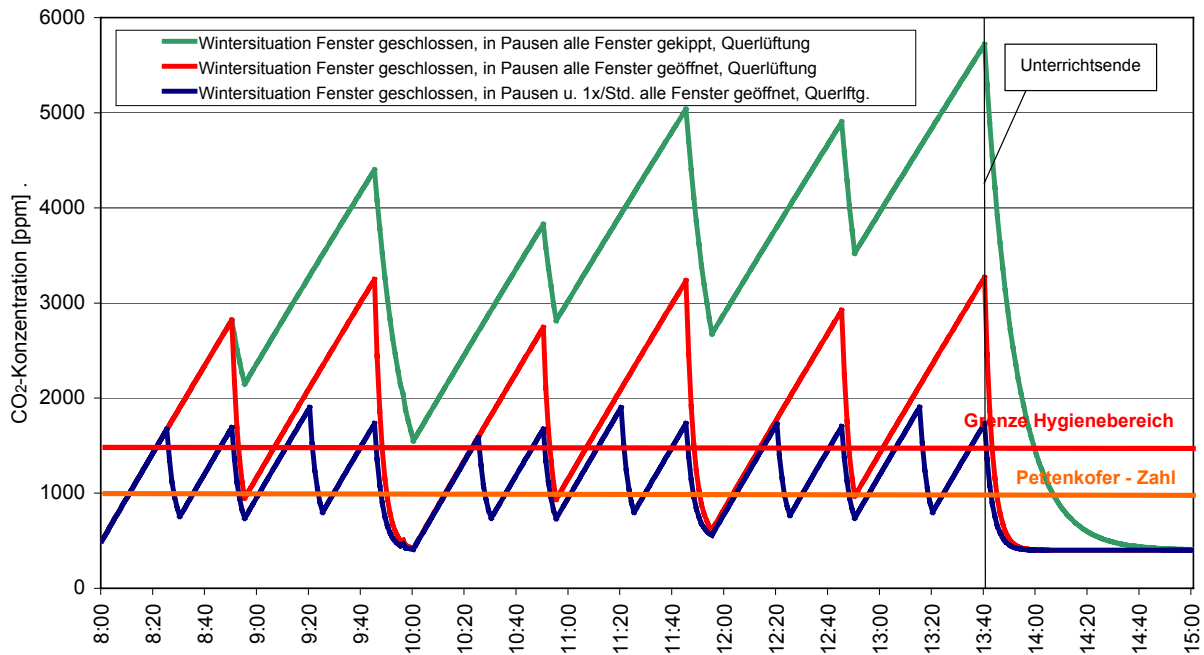


Abb. 4.6.3: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration - Modellrechnung

Bei Szenario 4 wird eine Klasse mit eher niedriger Belegung durch 10-jährige Schüler und eher undichten Fenstern (typisch für ältere, schlecht gewartete Fenster) angenommen. Die Sommersituation ist charakterisiert durch ein ständig gekipptes Fenster während des Unterrichts und gekippte Fenster mit Querlüftung während den Pausen, die Wintersituation durch geschlossene Fenster während des Unterrichts und gekippte (Situation 1) bzw. völlig geöffnete Fenster (Situation 2), jeweils mit Querlüftung, während den Pausen. Der komplette Parametersatz ist in folgender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.6.4 Modellparameter für Szenario 4 (Variantenvergleich)

Parameter	Einheit	Sommer-situation	Winter-situation 1	Winter-situation 2
Fläche des Klassenraumes	[m ²]	62,5	62,5	62,5
Höhe des Klassenraumes	[m]	3	3	3
Fenstertyp/ Grundlüftung	[a]	Eher undicht	Eher undicht	Eher undicht
Alter der Schüler	[a]	10	10	10
Anzahl der Schüler (UE)	[1]	20	20	20
Aktivitätsgrad der Schüler (UE)	[1]	1,2	1,2	1,2
Anzahl der Schüler (Pausen)	[1]	10	10	10
Aktivitätsgrad der Schüler (Pausen)	[1]	2	2	2
Anzahl der Lehrer (UE)	[1]	1	1	1
CO ₂ -Konzentration bei Unterrichtsbeginn	[ppm]	500	500	500
Luftwechselzahl (UE) und Fensterstellung	[1/h]	3 Alle Fenster gekippt	0,35 Fenster geschl.	0,35 Fenster geschl.
Luftwechselzahl (Pausen) und Fensterstellung	[1/h]	5 Alle Fenster gekippt mit Querlüftung	5 Alle Fenster gekippt mit Querlüftung	20 Alle Fenster geöffnet mit Querlüftung

Variantenvergleich Sommer - Winter, 20 Schüler, 10 Jahre, eher undichte Fenster

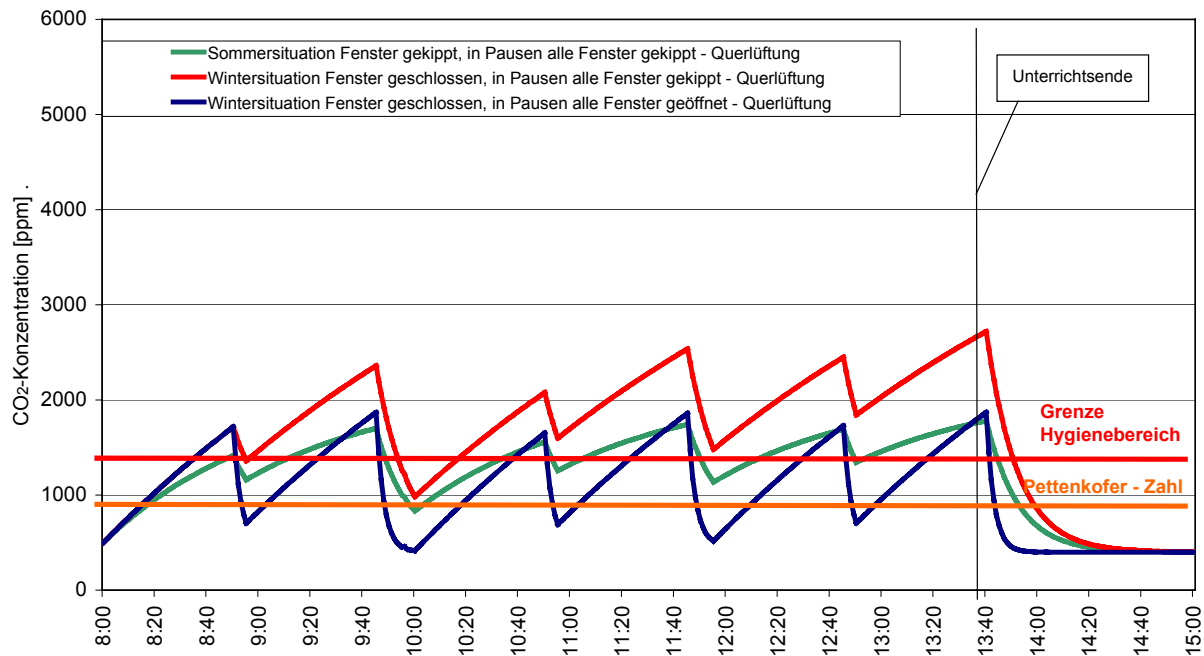


Abb. 4.6.4: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration - Modellrechnung

Bei Szenario 5 werden unterschiedlich genutzte Klassenräume mit kontrollierten Raumlüftungsanlagen modelliert. Durch die Lüftungsanlagen wird ein Grundluftwechsel von $1,5 \text{ h}^{-1}$ realisiert. Es werden hier nur Wintersituationen betrachtet, bei der bei den Situationen 1 und 2 nach jeweils zwei Unterrichtsstunden während den Pausen bzw. bei Situation 3 in allen Pausen bei völlig geöffneten Fenstern gelüftet wird. Der komplette Parametersatz ist in folgender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.6.5 Modellparameter für Szenario 5

Parameter	Einheit	Winter-situation 1	Winter-situation 2	Winter-situation 3
Fläche des Klassenraumes	[m ²]	62,5	62,5	62,5
Höhe des Klassenraumes	[m]	3	3	3
Fenstertype/ Grundlüftung	[a]	Kontr. Bel.anlage	Kontr. Bel.anlage	Kontr. Bel.anlage
Alter der Schüler	[a]	10	14	14
Anzahl der Schüler (UE)	[1]	20	28	28
Aktivitätsgrad der Schüler (UE)	[1]	1,2	1,2	1,2
Anzahl der Schüler (Pausen)	[1]	10	14	14
Aktivitätsgrad der Schüler (Pausen)	[1]	2	2	2
Anzahl der Lehrer (UE)	[1]	1	1	1
CO ₂ -Konzentration bei Unterrichtsbeginn	[ppm]	500	500	500
Luftwechselzahl (UE) und Fensterstellung	[1/h]	1,5 Fenster geschl.	1,5 Fenster geschl.	1,5 Fenster geschl.
Luftwechselzahl (Pausen) und Fensterstellung	[1/h]	10 Alle Fenster geöffnet ohne Querlüftung	10 Alle Fenster geöffnet ohne Querlüftung	10 Alle Fenster geöffnet ohne Querlüftung
Anmerkungen		Jede zweite Pause gelüftet	Jede zweite Pause gelüftet	Jede Pause gelüftet

Variantenvergleich Winter, kontrollierte Raumlüftung

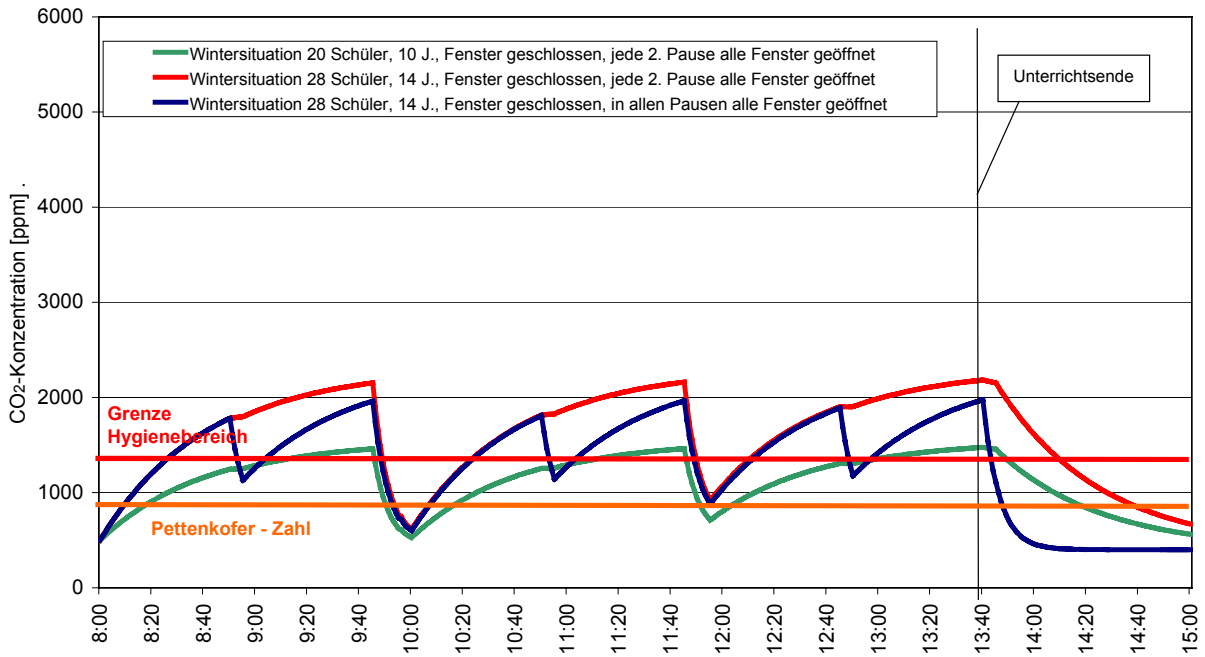


Abb. 4.6.5: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration - Modellrechnung

5 Vorangegangene Messungen in oberösterreichischen Schulen

Einen Einblick über die reale lufthygienische Situation in österreichischen Schulen gab eine Untersuchung, die im Frühjahr 2001 in zehn oberösterreichischen Schulen durchgeführt wurde (Brandl et al. 2001)

Die Schulauswahlkriterien waren:

- Beschränkung auf einen politischen Bezirk
- 4 Volksschulen, 4 Hauptschulen, 2 AHS
- 3 Neubauten, 3 Altbauten, 4 Altbauten nach Sanierung
- Je 1 stark und 1 schwach belegter Klassenraum

Die Schulauswahl erfolgte mit dem zuständigen Bezirksschulinspektor.

Zur überblicksmäßigen Bestimmung der Innenraumluftqualität wurden in je 2 Klassenräumen pro Schule punktuelle Messungen von flüchtigen Kohlenwasserstoffen und Formaldehyd durchgeführt. Die CO₂-Konzentration wurde während mehrerer Unterrichtseinheiten kontinuierlich aufgezeichnet, die Gebäudedichtigkeit (Blower Door) wurde analytisch bestimmt.

Es folgt die graphische Zusammenstellung einzelner Ergebnisse der Studie in Bezug auf CO₂:

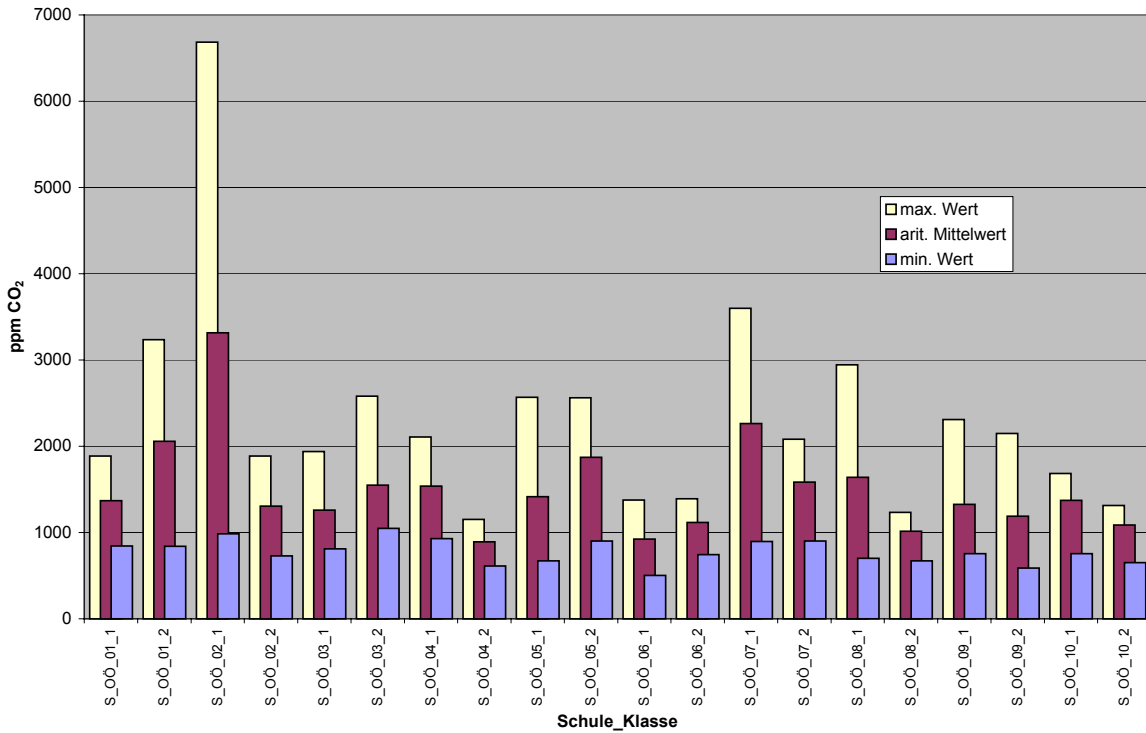


Abb. 4.6.1: Ergebnisse Konzentrationen CO₂ - Raumluft

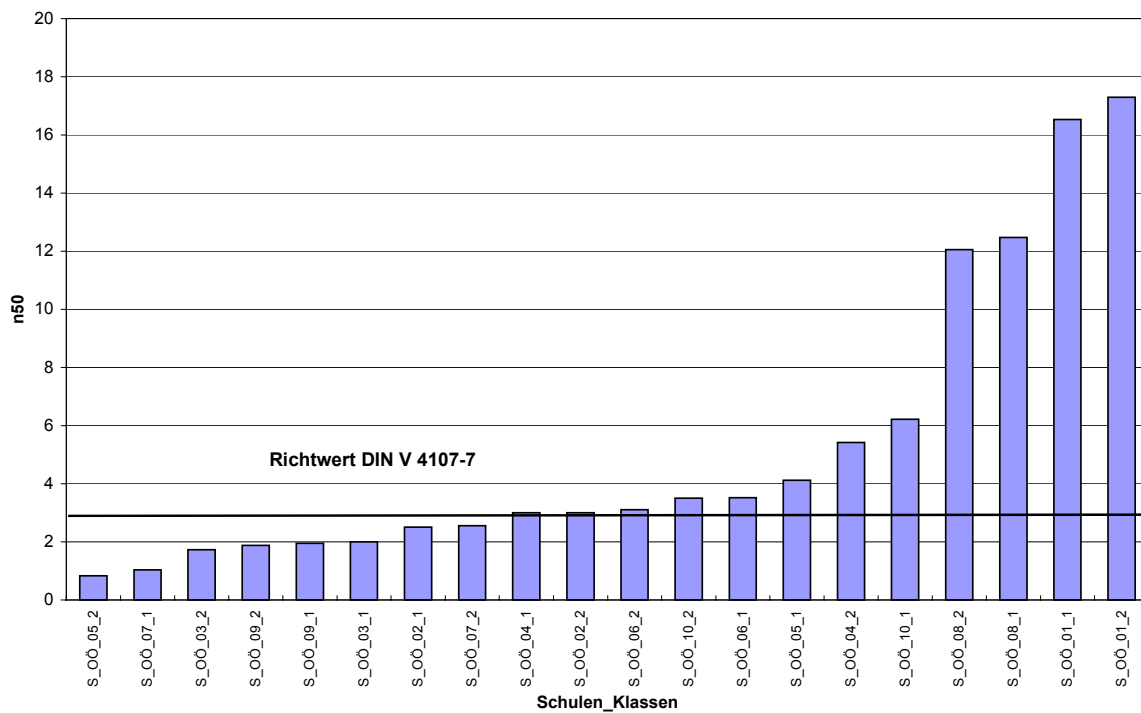


Abb. 4.6.2: Ergebnisse Blower-Door Messungen

6 Bewertung, Empfehlungen und Maßnahmen

6.1 Bewertungsgrundlagen

6.1.1 Allgemeines zur Bewertung

In Österreich sind für Schüler in Bezug auf die untersuchten Raumklimaparameter keine gesetzlichen Grenzwerte vorhanden. Für Lehrer und Erzieher gelten je nach Dienstnehmerverhältnis unterschiedliche Regelungen. Sind die Dienstnehmer beim Land Oberösterreich beschäftigt, gilt das Landesbedienstetenschutzgesetz für Oberösterreich. Für alle anderen Dienstnehmer gelten die Vorgaben der Arbeitsstättenverordnung. Da das Landesbedienstetenschutzgesetz keine genaue Vorgaben für das Arbeitsklima liefert, werden die Vorgaben der Arbeitsstättenverordnung (sofern sie existieren) zur Bewertung herangezogen.

6.1.2 Luftwechsel, zugeführtes Frischluftvolumen

Allgemeingültige Grenzwerte für den Luftwechsel bei nicht klimatisierten Gebäuden sind in Österreich nicht bekannt. Angaben, die speziell auf Schulen ausgelegt sind, finden sich in den Richtlinien für den Schulbau des ÖISS (1999), in denen in Unterrichtsräumen für bis 10-jährige eine Frischluftfrate von 15 m³ pro Person und Stunde und für über 10-jährige 20 m³ pro Person und Stunde empfohlen werden.

Die Arbeitsstättenverordnung definiert Anforderungen an die Qualität der Raumluft sowie, allerdings nur für klimatisierte Räume, Mindestanforderungen an das personenbezogene Außenluftvolumen und damit an den mittleren Luftwechsel. Die ÖNORM B 8135 (Vornorm) definiert einen hygienisch erforderlichen Mindestluftwechsel in Aufenthaltsräumen von 0,5 h⁻¹ für Ein- und Mehrfamilienhäuser mit großzügigem Raumangebot und von 0,7 h⁻¹ für den sozialen Wohnbau und übliche Bürobauten ohne wesentlichen Parteienverkehr.

Zur Beurteilung einer konkreten Situation in Innenräumen muss die Größe des Raumes berücksichtigt werden. Aus der Größe des Raumes und der Luftwechselzahl lässt sich die Luftmenge, die pro Stunde zugeführt wird (Luftvolumenstrom) berechnen. Der Luftvolumenstrom bei geschlossenen Fenstern und Türen, der als Grundlüftung bezeichnet wird, setzt sich aus Außenluft sowie aus Luft aus anderen Räumen des Gebäudes zusammen. Durch zu geringe Außenluftvolumenströme werden anthropogen verursachte Luftverunreinigungen sowie emittierte Schadstoffe aus Baustoffen und Materialien des Innenausbaus in zu geringem Ausmaß abgeführt. Der hygienisch wünschenswerte personenbezogene Außenluftvolumenstrom pro erwachsener Person wird in ÖNORM H 6000 Teil 3 (1989) bei 20 – 30 m³/h bei geringer körperlicher Aktivität, insbesondere zur Einhaltung des Richtwertes für CO₂ von 0,1 Vol % angesetzt. Diese Norm gilt allerdings für klimatisierte Gebäude.

6.1.2.1 Anforderungen an das Raumklima laut Arbeitsstättenverordnung bzw. laut Gemeinde-, Landes- und Bundesbedienstetenschutzgesetz

Die Arbeitsstättenverordnung definiert Anforderungen an die Qualität der Raumluft sowie, allerdings nur für klimatisierte Räume, Mindestanforderungen an das personenbezogene Außenluftvolumen. Diese Mindestanforderungen können jedoch prinzipiell auch auf nicht klimatisierte Räume angewendet werden, um hygienisch einwandfreie Raumluft zu charakterisieren. Die Vorgaben der Arbeitsstättenverordnung gelten für Erwachsene.

§ 26. (1) Als Arbeitsräume dürfen nur Räume verwendet werden, denen ausreichend frische, von Verunreinigungen möglichst freie Luft zugeführt und aus denen verbrauchte Luft abgeführt wird. Die Lüftung hat so zu erfolgen, dass die Räume möglichst gleichmäßig be- und entlüftet werden.

§ 27. (2) Arbeitsräume sind mechanisch zu be- und entlüften, wenn die natürliche Lüftung nicht ausreicht, insbesondere wenn

3. trotz Einhaltung der erforderlichen Lüftungsquerschnitte

a) eine ausreichend gute Luftqualität nicht gewährleistet werden kann (zB bei erschwerenden Bedingungen wie erhöhter Wärme-, Rauch- oder Dampfeinwirkung, Belastung der Raumluft durch gefährliche Stoffe)

3) Wird ein Arbeitsraum ausschließlich mechanisch be- und entlüftet, gilt folgendes:

1. Pro anwesender Person und Stunde ist mindestens folgendes Außenluftvolumen zuzuführen:

a) 35 m³, wenn in dem Raum nur Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung durchgeführt werden

§ 28. (1) Es ist dafür zu sorgen, daß die Lufttemperatur in Arbeitsräumen beträgt:

1. zwischen 19 und 25°C, wenn in dem Raum Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung durchgeführt werden;

2. zwischen 18 und 24°C, wenn in dem Raum Arbeiten mit normaler körperlicher Belastung durchgeführt werden;

3. mindestens 12°C, wenn in dem Raum nur Arbeiten mit hoher körperlicher Belastung durchgeführt werden;

Das Landesbedienstetenschutzgesetz (1998) für Oberösterreich definiert folgende Anforderungen an Arbeitsplätze (Auszug):

§ 19 Arbeitsräume und sonstige Betriebsräume

(1) Arbeitsräume müssen für den Aufenthalt von Menschen geeignet sein und unter Berücksichtigung der Arbeitsvorgänge und Arbeitsbedingungen den Erfordernissen des Schutzes des Lebens und der Gesundheit der Bediensteten entsprechen.

(2) In Arbeitsräumen muß unter Berücksichtigung der Arbeitsvorgänge und der Arbeitsbedingungen ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft vorhanden sein und müssen raumklimatische Verhältnisse herrschen, die dem menschlichen Organismus angemessen sind.

6.1.3 Kohlenstoffdioxid CO₂

Grenzwerte für CO₂ sind in Österreich nicht vorhanden. Im deutschen Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden (Umweltbundesamt 2000) wird die Meinung

vertreten, dass zur Einhaltung des hygienischen Bereiches von unter 1500 ppm CO₂ ein 3- bis 4-facher Luftwechsel pro Stunde erforderlich ist, dies würde allerdings in der Praxis nur durch eine Klimaanlage bzw. Lüftungsanlage mit hohem Luftwechsel erreicht werden können.

CO₂ ist ein guter Indikator für die durch den Menschen verursachte Raumlufbelastung. Bei 0,1 Vol% = 1000 ppm empfinden rund 20 % der Personen die Raumluf als unbefriedigend (Luftqualität in Innenräumen 1997). Bei Überschreitung dieses Wertes erhöht sich die Zahl der Personen, die die Luft als unbefriedigend empfinden, die Raumluf erfüllt nach übereinstimmender Expertenmeinung bei deutlicher Überschreitung dieses Wertes nicht mehr die notwendige hygienischen Anforderungen an saubere Raumluf (unter anderem definiert in ÖNORM H 6000). Erhöhte Konzentrationen entstehen bei Überbelegung von Innenräumen und unzureichender Belüftung sowie bei den meisten Verbrennungsvorgängen. Als erhöht bezeichnet man in der Regel Konzentrationen, die den Wert von 1000 ppm maßgeblich (nicht nur geringfügig) und über einen längeren Zeitraum überschreiten.

Im Bereich von 1000 bis 2000 ppm CO₂ in der Atemluft verringert sich durch die leichte Verschiebung des Blut-pH der Sauerstofftransport im Blut. Dies kann zu Kopfschmerzen, Benommenheit und Verringerung des Leistungsvermögens führen (Müller-Limroth 1977). Darüber hinaus gehende physiologische Effekte treten nach heutigem Kenntnisstand erst bei einer längerfristigen Exposition ab 10000 ppm auf. Hohe CO₂-Konzentrationen sind auch ein Hinweis auf zu geringe Frischluftvolumina, die dem jeweiligen Raum zugeführt werden.

Obwohl CO₂ in der Regel kein unmittelbares Gesundheitsrisiko darstellt, können jedoch ab bestimmten Konzentrationen Befindlichkeitsstörungen wie z.B. Beeinträchtigung von Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kopfschmerzen auftreten. Es wurde z.B. in künstlich belüfteten Prüfkammern nachgewiesen, dass niedrige personenbezogene Frischluftvolumenströmen zu signifikanten Leistungseinbußen und diversen Befindlichkeitsstörungen führen (Wargotzki et al. 2000). Eine Zusammenschau von Studien zu gesundheitlichen Wirkungen und Kohlendioxid zeigt, dass sich mit abnehmender CO₂-Konzentration die sogenannten Sick-Building-Syndrom-assozierten

Beschwerden (z.B. Reizungen und Trockenheit von Schleimhäuten, Müdigkeit, Kopfschmerzen) ebenfalls verringern.

6.2 Bewertung des Raumklimas in den untersuchten Schulklassen

Im gegenständlichen Untersuchungszeitraum blieben sowohl Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit im üblicherweise als behaglich empfundenen Bereich. Die zur Bewertung sinngemäß herangezogenen Vorgaben der Arbeitsstättenverordnung wurden eingehalten.

In allen untersuchten Schulräumen lag der gemessene Luftwechsel bei der Situation „geschlossene Fenster“ in einem sehr niedrigen Bereich. Bei der Wintermessung zeigten sich aufgrund des geringfügig größeren Grundluftwechsels etwas bessere Werte als bei der Sommersituation. Die Situation „geschlossene Fenster“ kommt erfahrungsgemäß häufiger im Winter bzw. an dicht befahrenen Straßen vor.

Die berechneten personenbezogenen Zuluftvolumina lagen in beiden untersuchten Schulen unter den hygienisch notwendigen Gesamtmengen, bezogen auf den Zeitraum Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsschluss.

In allen untersuchten Räumen konnten darüber hinaus erhöhte Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid (CO₂) nachgewiesen werden, die innerhalb der Beobachtungszeit bei geschlossenen Fenstern weiter deutlich anstiegen. Dies ist ein Hinweis dafür, dass die für eine Aufrechterhaltung hygienischer Bedingungen notwendige Frischluftmenge während der Unterrichtsstunden nicht zugeführt wurde. Der Verlauf der Konzentrationen zeigte, dass bei höherer Belegung der Räume sogar bei ständig gekippten Fenstern ein weiterer Anstieg und damit eine Überschreitung des hygienisch erforderlichen Zielbereichs von maximal 1000 bis 1500 ppm CO₂ gegeben war. Dieser Zielbereich wird bei den üblichen Belegungszahlen in Klassenräumen bei geschlossenen Fenstern schon nach relativ kurzer Zeit überschritten.

Lüften in den Pausen führte zu einer starken Absenkung der Konzentration an CO₂., vor allem, wenn die Möglichkeit zum quer Lüften gegeben war. Der hygienisch erforderliche Zielbereich wurde jedoch damit bei höherer Belegung der Räume nicht bzw. nur kurzfristig

erreicht. Ein probeweise verstärktes Lüften (Lüften in den Pausen und 5 Minuten Lüftung bereits nach jeweils 25 Minuten Unterricht) führte ebenfalls zu einer deutlichen Senkung der Konzentration. Das Querlüften mit vollständig geöffneten Fenstern und Türen würde somit die wirkungsvollste Lüftungsmethode darstellen. Aus den Messungen ging allerdings hervor, dass einmaliges Lüften in der Pause nicht ausreichte, die erforderlichen Zuluftmengen sicherzustellen. Auch ist es in vielen Klassenräumen aus Sicherheitsgründen und wegen der teils heftigen Zugscheinungen nicht möglich, in den Pausen Fenster und Türen vollständig zu öffnen und quer zu lüften.

Aus den Messungen wurde klar ersichtlich, dass erst bei ständig gekippten Fenstern und geringer Klassenschülerzahl die CO₂- Konzentrationen im hygienisch erforderlichen Zielbereich liegen. Diese Maßnahme ist jedoch auf Grund einer Reihe von Einschränkungen nur in der warmen Jahreszeit umsetzbar. Bei den Wintermessungen waren bereits bei einem gekippten Fenster Zugscheinungen und ein starkes Absinken der Raumtemperatur zu beobachten. Im Winter wäre der Zustand mit 2 ständig gekippten Fenstern mit einem unzumutbar großen Wärmeverlust im Klassenraum und Zugscheinungen verbunden, eine Situation, die den Schülern nicht zugemutet werden kann. Auch ist nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Überlegungen das ständige Offenhalten von Fenstern in der Heizperiode keine sinnvolle Lösung.

Die Raumluft der untersuchten Klassenräume entsprach auf Grund der erhöhten Konzentrationen an CO₂ über längere Zeiträume nicht den Vorgaben der §§ 26 und 27 der Arbeitsstättenverordnung bzw. den Vorgaben des Landesbediensteten-schutzgesetzes in Bezug auf hygienisch einwandfreie Raumluft. Diese Regelungen sind allerdings formal nur für das Lehrpersonal gültig.

Durch die zu geringen Frischluftvolumina ist vor allem in der kalten Jahreszeit, in der die Fenster nicht permanent geöffnet bleiben können, mit deutlichen Einbußen der Leistungsfähigkeit der Lehrer und Schüler zu rechnen. Befindlichkeitsstörungen und auch erhöhte Risiken in Bezug auf Anfälligkeit gegenüber Infektionen sind unter derartigen Raumluftbedingungen möglich.

6.3 Bewertung der Blower Door Messungen

Zur Beurteilung der Dichtheit der Klassenraumhüllen erfolgten Differenzdruck-Messungen nach dem Blower-Door Verfahren. Hierbei zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Klassen mit alten Metallfenstern wesentlich höhere n_{50} Kennzahlen aufwiesen, als die Unterrichtsräume mit modernen Kunststofffenstern. Während die n_{50} -Werte bei den relativ undichten Metallfenstern etwa im Bereich von 2 bis 3 lagen, wurden bei den Kunststofffenstern Vergleichswerte zwischen 0,3 und 1 gemessen. Dieser markante Unterschied spiegelte sich jedoch nur bedingt in den Luftwechselzahlen bei normalen Bedingungen wieder. Bei der Wintermessung zeigte sich nur ein geringfügiger Unterschied im Zuluftvolumenstrom zwischen den Vergleichsklassen.

6.4 Bewertung der CO₂-Modellrechnungen

Im Rahmen des Projektes wurde ein Rechenmodell zur Prognose des CO₂-Konzentrationsverlaufes in Schulklassen entwickelt und mit den messtechnisch ermittelten Daten abgestimmt. Dabei zeigte sich, dass das Modell in der Lage ist, die messtechnisch ermittelten Kurvenverläufe tendenziell richtig wiederzugeben.

Das Modell ist so aufgebaut, dass leicht verschiedene Belegungs- und Lüftungsvarianten berechnet und miteinander verglichen werden können. Es wurden für unterschiedlich besetzte Schulklassen mit Schülern verschiedenen Alters typische Sommer- und Wintersituationen simuliert, wobei die Raumgeometrie und die experimentell ermittelten Luftwechselzahlen von real existierenden Klassen herangezogen wurden. In der Sommersituation wurde davon ausgegangen, dass während der gesamten Unterrichtszeit ein Fenster gekippt bleibt und in den Pausen zusätzlich durch vollständig geöffnete Fenster gelüftet wird. Dadurch war es möglich, die CO₂-Konzentration im Wesentlichen im hygienisch erforderlichen Bereich von maximal 1000 bis 1500 ppm zu belassen. Als Lüftungsregime während der Pausen führten in dicht belegten Klassen gekippte Fenster allein zu einem stetigen Ansteigen der CO₂-Konzentration.

Für typische Wintersituationen lieferte das Modell wesentlich ungünstigere Ergebnisse, da die während der Unterrichtseinheiten geschlossenen Fenstern einen starken Anstieg der CO₂-Konzentration zur Folge haben. Bereits in der ersten Stunde wird der Hygienebereich deutlich überschritten. Intensives Querlüften in den Pausen führt zu einer deutlichen Absenkung der Konzentrationen an CO₂. Trotz dieser Maßnahmen gelingt es nur kurzzeitig, vor allem bei den stärker belegten Klassen den Hygienebereich wieder zu erreichen. Je nachdem, ob das Lüften in den Pausen bei gekippten Fenstern bzw. mit oder ohne Querlüften erfolgt, wird nach fünf Unterrichtseinheiten der CO₂-Hygienebereich um das mehrfache überschritten.

Die Modellberechnung mit einmaligem Lüften während der Unterrichtsstunden und konsequentem Querlüften in den Pausen zeigt, dass es auch hier zu Überschreitungen des Hygienebereiches kommt, dies jedoch nur über kurze Zeiträume.

Ein weiteres Szenario (Rechenmodell) behandelt die Situation von Schulklassen, in denen eine kontrollierte Raumbelüftungsanlage installiert ist. Durch den deutlich höheren Luftwechsel zeigen sich wesentlich günstigere Situationen in Bezug auf CO₂. Bei stärker belegten Klassen ist jedoch auch hier eine Lüftung in den Pausen erforderlich. Unter der Voraussetzung, dass zumindest in der großen Pause gut gelüftet wird, bleiben die Konzentrationen im großen und ganzen im CO₂-Hygienebereich von unter 1500 ppm.

7 Maßnahmen

Durch wirkungsvolles und konsequentes Lüften in den Pausen wird eine wesentliche Verbesserung der hygienischen Situation erzielt. Folgende Maßnahmen sind dabei zu beachten:

- Die Belüftung der Klassenzimmer und anderen Aufenthaltsräume sollte zumindest in den Pausen, bei dicht belegten Klassen womöglich auch einmalig während der Stunde vorgenommen werden.
- Die am weitesten verbreitete Lüftungsart, gekippte Fenster, führt zu größeren Energieverlusten als bei der Quer- und Stoßlüftung. Die Auskühlung der Räume und Inneneinrichtungen erhöht außerdem die Wahrscheinlichkeit der

Feuchtigkeitsbildung durch Kondensation. Zur Dauerlüftung ist diese Kippstellung nur von Mai bis September geeignet.

- Soll die Raumluft energiesparend in kurzer Zeit komplett ausgetauscht werden, ist die geeignetste Lüftungsmethode die Querlüftung. Im Raum muss ein Durchzug möglich sein. Bei weit geöffneten Fenstern und Türen gegenüberliegender Räume zieht eine kräftige Luftbewegung auch Luftpolster aus Nischen und Ecken ab.
- Die Dauer der Belüftung richtet sich nach der Außentemperatur. Der Belüftungsvorgang sollte 5 bis 15 Minuten andauern.

Manuelles Lüften stellt eine wirkungsvolle und notwendige, jedoch nicht in allen Fällen hinreichende Maßnahme dar. Auch konsequentes Lüften in den Pausen reicht vor allem bei mittel bis stark belegten Klassen und dichten Fenstern nicht aus, die erforderliche Frischluftmenge sicherzustellen.

In diesen Fällen ist zur Gewährleistung ausreichender Frischluftzufuhr bzw. zur Vermeidung maßgeblicher Überschreitungen des hygienisch erforderlichen CO₂-Zielbereichs ein zusätzliches Lüften während der Unterrichtszeiten oder der Einbau von kontrollierten Raumlüftungsanlagen erforderlich.

Bei zukünftigen Schulneubauten kann eine kontrollierte Raumlüftungsanlage zur automatisierten Sicherstellung eines ausreichenden Luftaustausches und Abfuhr des ausgeatmeten CO₂ und zur Reduktion der Lärmbelastung von außen beitragen. Diese Maßnahme sollte in messtechnisch begleiteten Pilotprojekten praktisch erprobt werden.

Eine weitere wesentliche Einflußgröße ist die Klassenschülerhöchstzahl. Dort wo sich wesentlich weniger Schüler pro Klasse aufhalten, werden kaum Situationen auftreten, die eine Lüftungsanlage erfordern.

8 Literatur

Brandl A, Tappler P, Twardik F, Damberger B (2001) Untersuchungen raumlufthygienischer Parameter in oberösterreichischen Schulen, 6. AGÖF Fachkongress Nürnberg 20.-21.09.2001: Umwelt, Gebäude & Gesundheit, S. 355 – 366

- Bundes-Bedienstetenschutzgesetz (1979) B-BSG und Änderung des Beamten-Dienstrechtsgesetzes, des Vertragsbedienstetengesetzes 1948, des Richterdienstgesetzes, des Bundes-Personalvertretungsgesetzes, des Mutterschutzgesetzes 1979 und des ArbeitnehmerInnenschutzgesetzes; BGBl. I Nr. 70/1999
- DGH (1993) Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, Richtlinie zur Durchführung von Formaldehydmessungen in Häusern aus Holz und Holzwerkstoffen
- IWU (2001) Lüftung im Wohngebäude, Institut für Wohnen und Umwelt, Ausgabe 02/99, Überarbeitung 12/01, Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten
- Luftqualität in Innenräumen (1997) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287
- Müller-Limroth (1977), Gertis et al. (1979) zit. in Luftqualität in Innenräumen (1997) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 287
- Oberösterreichisches Gemeindebediensteten-Schutzgesetz (1999) Landesgesetz über den Schutz des Lebens und der Gesundheit der in den Dienststellen der Gemeinden und Gemeindeverbände beschäftigten Bediensteten, LGBl. Nr. 15/ 2000
- Oberösterreichisches Landesbediensteten-Schutzgesetz (1998) Landesgesetz über den Schutz des Lebens und der Gesundheit der in den Dienststellen des Landes beschäftigten Bediensteten, LGBl. Nr. 13/ 1998
- ÖISS (1999) Richtlinien für den Schulbau, erstellt durch den Arbeitskreis „Schulraum“ im Österreichischen Institut für Schul- und Sportstättenbau
- ÖNORM H 6000 Teil 3 (1989) Lüftungstechnische Anlagen, Grundregeln, Hygienische und physiologische Anforderungen für den Aufenthaltsbereich von Personen
- Recknagel, Sprenger, Schramek (1999) Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; Herausgegeben von Ernst Rudolf Schramek, 69. Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien
- Rietschel (1994) Raumklimatechnik – 16. Auflage Band 1 Grundlagen, herausgegeben von Horst Esdorn, Springer-Verlag Berlin
- Umweltbundesamt (2000) Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden, erarbeitet von der Innenraumlufthygiene-Kommision des Umweltbundesamtes, Berlin

- VDI 1946-2 (1994) Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- VDI 4300 Bl. 7 (2001) Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, Juli 2001
- Wargotzki P et al. (2000) The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity, Indoor Air Vol 10, No. 4: pp. 222-236
- Witthauer, Horn, Bischof (1993): Raumlufqualität - Belastung, Bewertung, Beeinflussung; Verlag C,F. Müller, Karlsruhe