



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**



Amt für Hochbauten der Stadt Zürich  
Hochbauamt des Kanton Zürich



# **CO<sub>2</sub>-GESTEUERTE LÜFTUNGEN IN SCHULEN**

## **ENERGIEEINSPARUNGEN DURCH CO<sub>2</sub>-GESTEUERTE LÜFTUNGEN**

### **Schlussbericht**

Ausgearbeitet durch

**Werner Hässig,  
hässig sustech gmbh**

Strickstr. 1, CH-8610 Uster, haessig@sustech.ch, www.sustech.ch

**Alex Primas, Petra Karlström, Martina Leonarz, Michèle Marti,  
Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG**

Forchstrasse 395, CH-8032 Zürich, basler-hofmann@bhz.ch, www.bhz.ch

## **Impressum**

Datum: 12. März 2008

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie, des AHB Zürich und des Kantons Zürich**

### **Mitglieder der Begleitgruppe:**

Charles Filleux	Bundesamt für Energie c/o Basler & Hofmann
Christoph Gmür	AWEL, Abteilung Energie
Heinrich Gugerli	Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Thomas Kessler	Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Herbert Lutz	Hochbauamt Kanton Zürich
Bernhard Stucki	ZHAW, Verwaltungsdirektion Logistik
Beat Wüthrich	Hochbauamt Kanton Zürich

Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Projektnummer: 101714

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für Inhalt und Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren des Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	5
2. Ausgangslage, Ziel und Vorgehen.....	7
2.1. Ausgangslage .....	7
2.2. Ziel .....	7
2.3. Vorgehen.....	7
2.3.1 Messungen .....	7
2.3.2 Benutzerzufriedenheit.....	8
2.3.3 Kosten / Nutzen .....	8
3. Stadt Zürich: Schulhaus Birch.....	8
3.1. Gebäude-Situationsbeschreibung .....	8
3.1.1 Situation / Ausgangslage .....	9
3.2. Beschrieb Messungen .....	11
3.3. Messergebnisse inkl. Nutzerprotokolle.....	12
3.3.1 Luftmengenmessungen .....	12
3.3.2 Raumlufzustandsmessungen .....	13
<b>3.3.3 Resultate Messungen Sommer 2006</b> .....	14
<b>3.3.4 Resultate Messungen Winter 2006</b> .....	18
<b>3.3.5 Vergleich reine CO<sub>2</sub>-Steuerung mit Präsenz Steuerung</b> .....	23
3.4. Befragung Schulhaus im Birch .....	24
3.4.1 Beschrieb Befragung .....	24
3.4.2 Ergebnisse Befragung, Vergleich Sommer / Winter .....	24
3.4.3 Interpretation Befragung Schulhaus im Birch.....	25
3.4.4 Vergleich des Energiebedarfs zwischen den Steuerungsvarianten .....	26
3.4.5 Wirtschaftlichkeit der CO <sub>2</sub> - und präsenzgesteuerten Anlage .....	28
3.5. Synthese Schulhaus Birch.....	31
4. Kantonsschule Wetzikon, KZO .....	32
4.1. Kantonsschule Wetzikon, KZO – Beschrieb.....	32
4.2. KZO – Messungen .....	34
4.3. Messergebnisse.....	35
4.3.1 Luftmengenmessungen .....	36
4.3.2 Raumlufzustandsmessungen .....	36
4.3.3 Zimmer ME03 .....	37
4.3.4 Zimmer ME04 .....	38
4.3.5 Klassenzimmer 61 .....	41
4.3.6 Einfluss der Visualisierung – Zimmer 61 .....	42
4.3.7 Klassenzimmer 67 .....	44
4.3.8 Einfluss der Visualisierung – Zimmer 67 .....	45
4.4. Befragungen in der KZO .....	46
4.4.1 Beschrieb Befragung .....	46
4.4.2 Resultate Befragung Luftqualitäts-Visualisierung.....	46

4.4.3	Interpretation Befragung Schulhaus Wetzikon .....	47
4.5.	Synthese Schule KZO.....	47
5.	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Schulhaus Mäander, Winterthur.....	48
5.1.	Beschrieb .....	48
5.2.	Mäander – Messungen .....	51
5.2.1	Luftmengenmessungen .....	51
5.3.	Mäander – Messergebnisse .....	51
5.3.1	Zimmer O1.05 .....	51
5.3.2	Zimmer O1.11 .....	52
5.3.3	Zimmer O1.17 .....	53
5.4.	Mäander – Befragungen .....	55
5.4.1	Beschrieb Befragung .....	55
5.4.2	Interpretation Befragung Schulhaus Mäander.....	55
5.5.	Mäander – Synthese.....	55
6.	Ergebnisse der Befragung .....	56
6.1.	Vorgehensweise .....	56
6.2.	Die drei Schulhäuser im Vergleich.....	56
7.	Erfahrungen aus weiteren Schulanlagen .....	61
7.1.	Universität Zürich .....	61
7.2.	Schulanlagen in Luxemburg .....	62
8.	Synthese .....	65
8.1.	Energie.....	65
8.2.	Wirtschaftlichkeit .....	66
9.	Schlussfolgerungen über alle Objekte .....	68
9.1.	Mögliche Strategie für Schulraumlüftungsanlagen .....	69
9.2.	Empfehlungen des Projektteams:.....	73
9.2.1	Erläuterungen zu den Empfehlungen .....	73
9.2.2	Übergangslösung: Sensibilisierungsaktion .....	74
10.	Literaturverzeichnis .....	75

## Anhang

## **Dank**

Wir bedanken uns bei allen Projektbeteiligten für den Auftrag und die gute Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die Begleitgruppe mit den Vertretern aus der Stadt Zürich, Herrn Gugerli und Herrn Kessler; den Vertretern aus dem Kanton Zürich, den Herren Wüthrich, Gmür, Stucki und Lutz sowie dem Bundesamt für Energie, vertreten durch Herrn Filleux.

Speziell danken wir auch den vielen Schulleitungen, Hausdiensten und Lehrerinnen und Lehrer, welche wir für diese Untersuchung beanspruchen durften.

Das Autorenteam

## 1. Zusammenfassung

Da in Unterrichtszimmern immer höhere Leistung und Arbeitskonzentration erwartet wird, zeichnet sich für die kommenden Jahre eine starke Zunahme der mechanischen Lüftungen in Schulen ab. Die Tatsache, dass viel frische Luft die Leistungsfähigkeit der Menschen verbessert, ist in zahlreichen Studien belegt.

Diese Arbeit behandelte vor allem die optimale Steuerung von Lüftungen in Unterrichtszimmern. Zweckmässig Lüftungseinrichtungen und deren Steuerung ist in Klassenzimmern wegen starken Schwankungen der Luftbelastung keine einfache Sache. Zuviel lüften bewirkt einen erheblichen unnötigen Energiemehrverbrauch und führt zudem zu trockenen Räumen. Intelligenterere Steuerungsmöglichkeiten bringen bei Lüftungen deshalb gleich mehrfache Vorteile.

In drei Schulanlagen, einer Primarschule, einer Kantonsschule und einer Fachhochschule wurden insgesamt 10 Unterrichtszimmer mit und ohne Lüftung im realen Betrieb während verschiedener Wochen innerhalb eines Jahres analysiert. Im Zentrum standen Messungen von CO<sub>2</sub>, Raumtemperatur und Raumluftfeuchtigkeit. Ferner wurden verschiedene Befragungen durchgeführt.

### Ergebnisse

Ein wichtiges Ergebnis ist die Bestätigung, dass mechanisch gelüftete Schulräume bei richtigem Betrieb tatsächlich in der Lage sind, optimale Lernbedingungen bei minimalem Energieverbrauch zu gewährleisten. Auf der anderen Seite wurde nochmals sehr deutlich, dass in vielen heutigen Schulräumen tatsächlich oft „dicke“ Luft herrscht.

Leider sind aber noch viele Betriebsprobleme bei den heutigen Lüftungsanlagen zu finden, welche zu einer mittleren bis grossen Unzufriedenheit führen. Damit das System „Bedarfslüftung mit Wärmerückgewinnung“ nicht Gefahr läuft generell aus den Schulhäusern vertrieben zu werden, müssen dringend wichtige grundsätzliche Festlegungen getroffen und durchgesetzt werden. So zeigte beispielsweise die Umfrage, dass wenn ein Kriterium an einer Lüftungsanlage stört (z.B. Geräusentwicklung), schnell auch das ganze System abgelehnt wird.

Als ein Ergebnis wurden die Anforderungen an die Raumluftqualität geprüft. Diese können wie folgt zusammengefasst werden: (gestützt auf die neue SIA-Norm 382/1, 2007)

- CO<sub>2</sub>-Pegel max. 1350 ppm (als Mittelwert über eine Lektion)
- spezifische Auslegungskriterien für Schulen:
  - Schulzimmer ohne unterstützende Fensterlüftung: 30 m<sup>3</sup>/h (pro Person)
  - Schulzimmer mit unterstützende Fensterlüftung: 25 m<sup>3</sup>/h (pro Person)

Wichtig ist, dass der maximale CO<sub>2</sub>-Wert von 1350 ppm als Mittelwert über eine Lektion verstanden wird. Bei guter Vorlüftung, d.h. CO<sub>2</sub>-Wert ist zu Lektionsbeginn unter 600 ppm, können auch manuell gelüftete Klassenzimmer in bestimmten Fällen (nicht allzu grosse Belegungsdichte) diese Anforderung erfüllen.

Eine CO<sub>2</sub>-Steuerung für die Schulzimmer ist vor allem für Räume mit stark variierender Belegung von Bedeutung, wo eine reine Präsenzsteuerung zu hohen Laufzeiten der Lüftung führen würde. In den gemessenen Zimmern des Schulhauses Birch war dies zwar nicht ausgeprägt der Fall. Durch eine CO<sub>2</sub>-Steuerung könnte jedoch der Lüftungsbetrieb in den Zimmern um ca. 20% reduziert werden. Im Vergleich zu einer Zeitsteuerung beträgt die Reduktion des Lüftungsbetriebs in den Zimmern sogar etwa 40%. Die CO<sub>2</sub>-Steuerung würde auch im Schulhaus Mäander (Fachhochschule der ZHAW) Vorteile bringen, da die Räume nicht selten nur schwach belegt sind und dadurch ein „Überlüften“ mit den negativen Folgen von trockener Luft stattfindet.

Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Massnahme ist stark vom gewählten Konzept abhängig und welche Anforderungen wirklich an die Raumbedingungen gestellt werden (z.B. Befeuchtung).

Ein weiteres Ergebnis ist die Erkenntnis, dass Schulraum nicht gleich Schulraum ist, was die Lüftung anbelangt. Obwohl Schülerzahlen in einer Primarschule ähnlich jenen einer Kantonsschule sind, sind die Anforderungen an ein Lüftungssystem zu differenzieren. Im 9. Kapitel wird dazu ein Vorschlag gezeigt.

<i>Typ</i>	<i>Schultyp</i>	<i>Empfehlung</i>	<i>Hauptgrund</i>
A	Primarschule und Sek.- schule	<b>1. Pilotanlagen mit Lüftungsklappe</b> <b>2. Zeitgesteuerte mechanische Lüftung</b> <b>3. Einzelgerät pro Schulzimmer</b>	Günstige Kosten/Nutzen mittlere Kosten, WRG Verständnis, Wartung
B	Gymnasium und Fachhoch- schulen	<b>1. Einzelgerät pro Schulzimmer</b> <b>2. CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftung</b>	Flexibel, hohe Anforderung Anforderungen hoch

Ferner wird als Übergangslösung eine Sensibilisierungsaktion mit Lüftungswarn-Einrichtungen vorgeschlagen. Eine dauernde Installation von Lüftungswarn-Einrichtungen wird als wenig gewinnbringend erachtet.

Weitere konkrete Hinweise:

- Glasarchitektur ohne gute, aussenliegende (möglichst fixe) Beschattungseinrichtungen ist für ein Schulhaus ungünstig; generell ist der Glasanteil der Fassade sorgfältig zu prüfen
- Eine „Spülzeit“ (der Raumluft) ist oft unnötig und benötigt viel Energie; höchstens am Morgen kurz vor Unterrichtsbeginn, falls ein Bedarf ausgemacht wird.
- Eine Raumluftbefeuchtung ist bei richtiger Auslegung und Betriebsweise unnötig
- Anlagen sind so zu bestellen, zu bauen, abzunehmen und zu betreiben, wie dies tatsächlich beabsichtigt ist; zahlreiche Mängel lassen auf Probleme mit der Umsetzung schliessen

## 2. Ausgangslage, Ziel und Vorgehen

### 2.1. AUSGANGSLAGE

Die Lüftung von Unterrichtszimmern wird immer wichtiger, da hohe Leistungen und Arbeitskonzentration erwartet werden. Für die kommenden Jahre zeichnet sich eine starke Zunahme der mechanischen Lüftungen in Schulen ab. Manuell gelüftete Klassenzimmer führen sehr oft zu schlecht gelüfteten Arbeitsräumen, was den Leistungsanforderungen zuwiderläuft. Diese Zusammenhänge sind bereits intensiv untersucht worden.

Noch wenige Kenntnisse liegen zur optimalen Steuerung von Unterrichtszimmerlüftungen vor. Die Luftbelastung ist in Klassenzimmern durch starke Schwankungen im zeitlichen Verlauf geprägt. Die notwendigen Luftmengen müssten demnach in einem weiten Bereich reguliert werden können (z.B. 30 – 100%). Heute wird diese Art von Anlagen häufig konstant oder mit Zeitschaltuhr gesteuert. Seit jüngerer Zeit sind auch Infrarot-Präsenzsensoren und ganz selten auch Steuerungen mit CO<sub>2</sub>-Sensoren im Einsatz. Steuerungen mit CO<sub>2</sub>-Sensoren sind weitgehend anerkannt, als optimale Steuerung für Räume, welche überwiegend durch menschliche Aktivitäten belastet sind. Bislang war das Steuern über CO<sub>2</sub>-Sensoren meist zu kostspielig und wurde daher nur für grosse Räume wie Hörsäle und Theater eingesetzt. In den letzten Jahren ist diese Technik deutlich günstiger geworden.

Die Anforderungen an die Raumluftqualität werden in der neu überarbeiteten SIA 382/1 (Ausgabe 2007) wie folgt definiert: (Schulräume mit unterstützender Fensterlüftung) Raumlufttemperatur (Sommer/Winter) 26°/21°; relative Raumluftfeuchte 60% / 30%; Aussenluftvolumenstrom pro Person 25 m<sup>3</sup>/h. Der CO<sub>2</sub>-Pegel soll maximal 1350 ppm erreichen (RAL 3 nach EN 13779; als Durchschnitt über eine Schullektion).

### 2.2. ZIEL

Zuviel lüften bewirkt einen erheblichen unnötigen Energiemehrverbrauch und führt zudem zu trockenen Räumen. Intelligenteren Steuerungsmöglichkeiten bringen bei Lüftungen deshalb gleich mehrfache Vorteile.

Neue, kostengünstige CO<sub>2</sub>-Sensoren, welche speziell für solche Anwendungen entwickelt wurden, zeigen, dass dieses Messprinzip sehr genau die Anwesenheit von Personen und damit die Belastungen erfasst und für die Lüftungssteuerung geeignet ist.

Die Bedarfssteuerung von Lüftungen in Schulbauten mittels CO<sub>2</sub>-Sensoren soll untersucht und mit Referenzanlagen verglichen werden.

Im Einzelnen werden folgende Ziele verfolgt:

- Praktische Ausmessung an einem Schulhaus mit CO<sub>2</sub>-gesteuerter Lüftung (Anlage ist bereits mit CO<sub>2</sub>-Sensoren ausgerüstet und in Betrieb).
- Praktische Messungen an einem Schulhaus ohne CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftungsanlage, welches konventionell mit Stufenwahlschalter und/oder Zeitschaltuhr gesteuert ist.
- Einfluss und Nutzen einer Visualisierung der Raumluftqualität auf das Lüftungsverhalten für manuell gelüftete Schulräume. Untersuchung in zwei, manuell gelüfteten Klassenzimmern.
- Begleitende Nutzer- und Betreiberbefragung zur Zufriedenheit mit dem Raumklima und den Systemen.
- Energetische Auswirkungen der verschiedenen Lüftungsbetriebsstrategien.
- Analyse der eingesetzten Anlagentechnik und deren Eignung für die Schulraumbelüftung. Aufzeigen von Optimierungsmöglichkeiten.
- Analyse der Mehrkosten für eine Ausrüstung mit CO<sub>2</sub>-Sensoren zur Lüftungsteuerung (Lebenszykluskosten).

### 2.3. VORGEHEN

#### 2.3.1 Messungen

Als Basis für die Analysen wurden Messungen in einem Schulhaus mit CO<sub>2</sub>-gesteuerter Lüftung und in zwei Schulen ohne CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftung vorgenommen. Dazu wurden in mehreren

Unterrichtszimmern die CO<sub>2</sub>-, Temperatur- und Feuchtwerte erfasst. Im Weiteren wurden der Betriebszustand der Lüftung sowie die Aussenkonditionen (nur grob) sowie teilweise der Energieverbrauch der Anlage erfasst. Im Weiteren wurde anhand der Zimmerbelegung und der Angaben durch den Hauswart ein Nutzer- und Betreiberprotokoll geführt. Zudem wurden durch Luftmengenmessungen die Planungswerte überprüft.

Die Messungen erfolgten in charakteristischen Zeitperioden im Sommer sowie im Winter (je über ca. 2 Wochen). Dabei werden sowohl Zeiten mit wie auch ohne Belegung (Unterrichtsfreie Zeit) erfasst. Die Messwerterfassung erfolgte mit mobilen Datenloggern (5 min. Messintervall).

Die Untersuchung wurde in den folgenden Schulhäusern durchgeführt:

- Schulhaus Birch, Zürich-Oerlikon: Minergie-Neubau; Lüftung mit CO<sub>2</sub>-Steuerung ausgerüstet
- Kantonsschule Wetzikon (4 Klassenzimmer über Mensa): Minergie-Neubau mit konventioneller Lüftungssteuerung (Zeitschaltuhr)
- Schulhaus Mäander der ZHW in Winterthur: Neubau mit Lüftungssteuerung über Präsenz und Zeitschaltuhr

### 2.3.2 Benutzerzufriedenheit

Es wurde eine Nutzerbefragung zur Lüftungsqualität und den Komfortbedingungen in den messtechnisch untersuchten Schulhäusern durchgeführt. Dazu wurden die Lehrpersonen über ihre Erfahrungen und Beurteilung zu verschiedenen Komfort und Luftqualitätsparameter befragt. Die Befragung erfolgte schriftlich mit einem Fragebogen.

Ziel war die Klärung der Frage, ob mit einer bedarfsgerechten Lüftung ein guter (besserer) Komfort für die NutzerInnen erreichbar ist als mit anderen Lüftungsstrategien.

Im Weiteren sollte herausgeschält werden, was die wichtigsten Punkte für eine gute Akzeptanz der Lüftungsanlage sind bzw. welches die Hauptkritikpunkte aus Nutzersicht bzw. zu verbessernden Schwachstellen solcher Anlagen sind. Der letztgenannte Punkt ist vor allem auch in Bezug auf die Erfolgskontrolle der Gebäude von Bedeutung.

### 2.3.3 Kosten / Nutzen

Ein wichtiger Punkt für die Realisierung einer CO<sub>2</sub>-gesteuerten Lüftung sind auch die Kosten. Mit den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen wird versucht die Lebenszykluskosten für eine Ausrüstung mit einer CO<sub>2</sub>-gesteuerten Lüftung zu ermitteln und diese den Kosten einer Lüftung mit konventioneller Steuerung gegenüberzustellen.

## 3. Stadt Zürich: Schulhaus Birch

### 3.1. GEBÄUDE-SITUATIONSBESCHRIEB

Das 2004 eingeweihte Schulhaus Im Birch ist mit einem Angebot für 800 Kinder in 36 Klassen, vom Kindergarten bis zur Sekundarstufe das grösste der Stadt Zürich. Ausser Unterrichtszimmern und Gruppenräumen sind im Trakt A ein Kindergarten, im Trakt B eine Mensa und ein Mehrzweckraum und im Trakt C die Dreifachturnhalle mit 700 Zuschauerplätzen enthalten.

Die Messungen wurden im Trakt A durchgeführt, die Umfrage im gesamten Schulhaus.

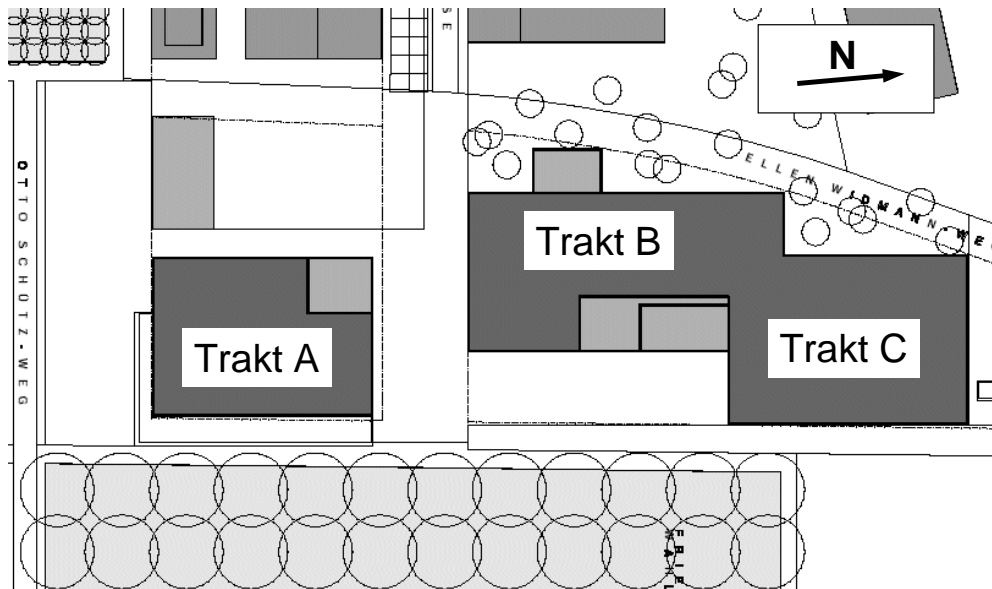


Abbildung 3.1 Gebäudesituation Schulhaus Birch

### 3.1.1 Situation / Ausgangslage

Im Oberstufentrakt (Trakt A) sind drei oder vier Klassenzimmer zu Gruppen zusammengefasst. In ihrer Mitte liegt nicht ein Korridor, sondern ein geräumiger Vorraum, der sich für den klassenübergreifenden Unterricht eignet (siehe Abbildung 3.2).

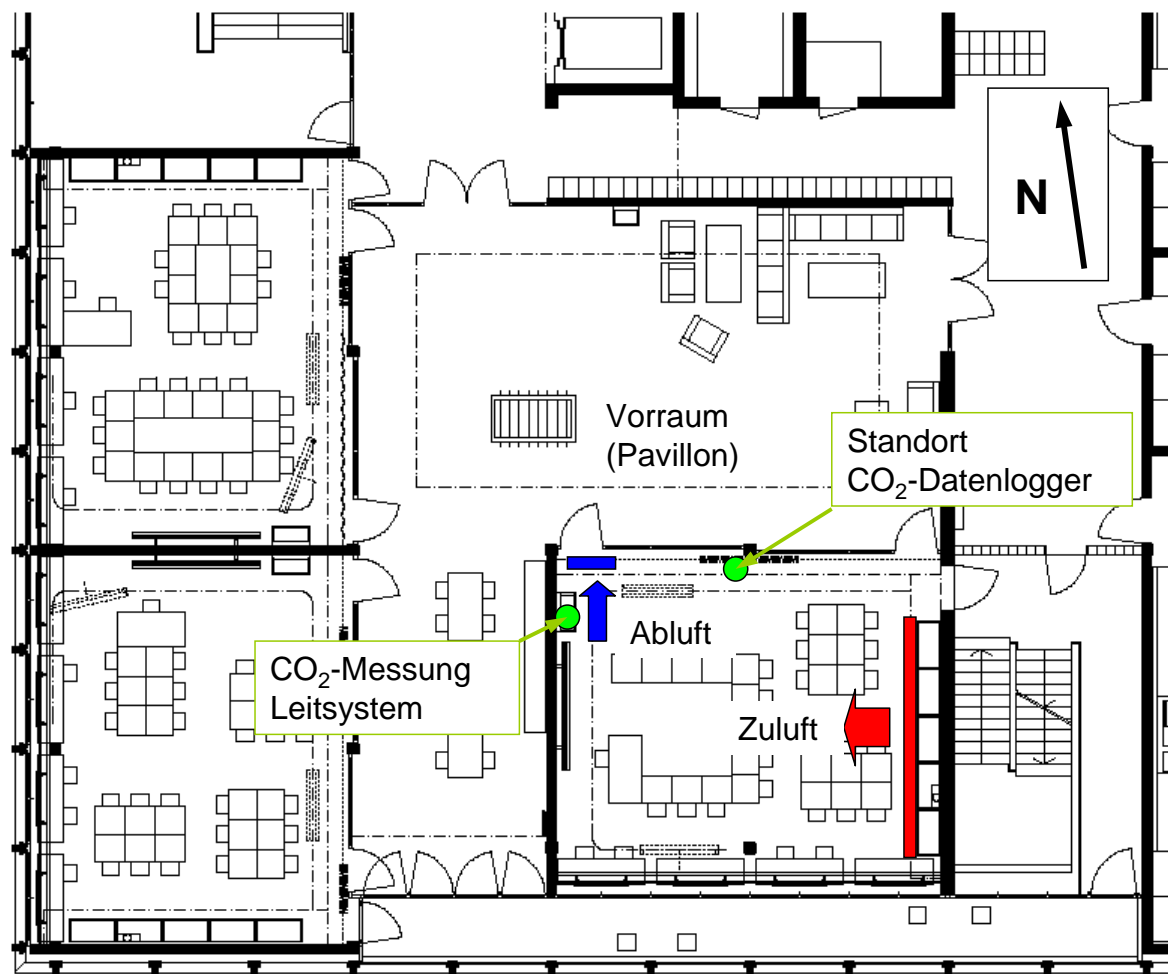


Abbildung 3.2 Grundriss Klassenverband, Schulhaus Birch Trakt A (Oberstufe)

Die Unterrichtsräume werden über Durchlässe im Sockelbereich der fest eingebauten Schrankmöbel mit Zuluft versorgt. Die Abluft wird oberhalb der Eingangstüre des Zimmers abgesogen. Die Zimmer sind mit Präsenz und CO<sub>2</sub>-Sensoren ausgerüstet, welche über eine motorische Klappe die Lüftung regulieren (nur Aus / Ein, keine variable Luftmenge). Der Planungswert für die Zu- und Abluftmenge pro Zimmer liegt bei 375 m<sup>3</sup>/h.

Die Lüftungssteuerung der Unterrichtszimmer ist im Schulhaus Birch sowohl über die Präsenzsteuerung (Einschaltkriterium) wie auch über den CO<sub>2</sub>-Messwert (Ausschaltkriterium) gesteuert. Um den Nutzen der CO<sub>2</sub>-Steuerung prüfen zu können musste die Präsenzsteuerung in zwei den zu messenden Zimmern entkoppelt werden. (reine CO<sub>2</sub>-Steuerung).

Die raumhohen Fenster in den Unterrichtszimmern bestehen aus einer Festverglasung und einem Kipplügel, der elektrisch geöffnet werden kann. Die Storensteuerung erfolgt ebenfalls über Taster durch den Benutzer.



Abbildung 3.3 Aussenansicht Fassade, Schulhaus Birch Trakt A (Oberstufe), Süd- und Ostfassade

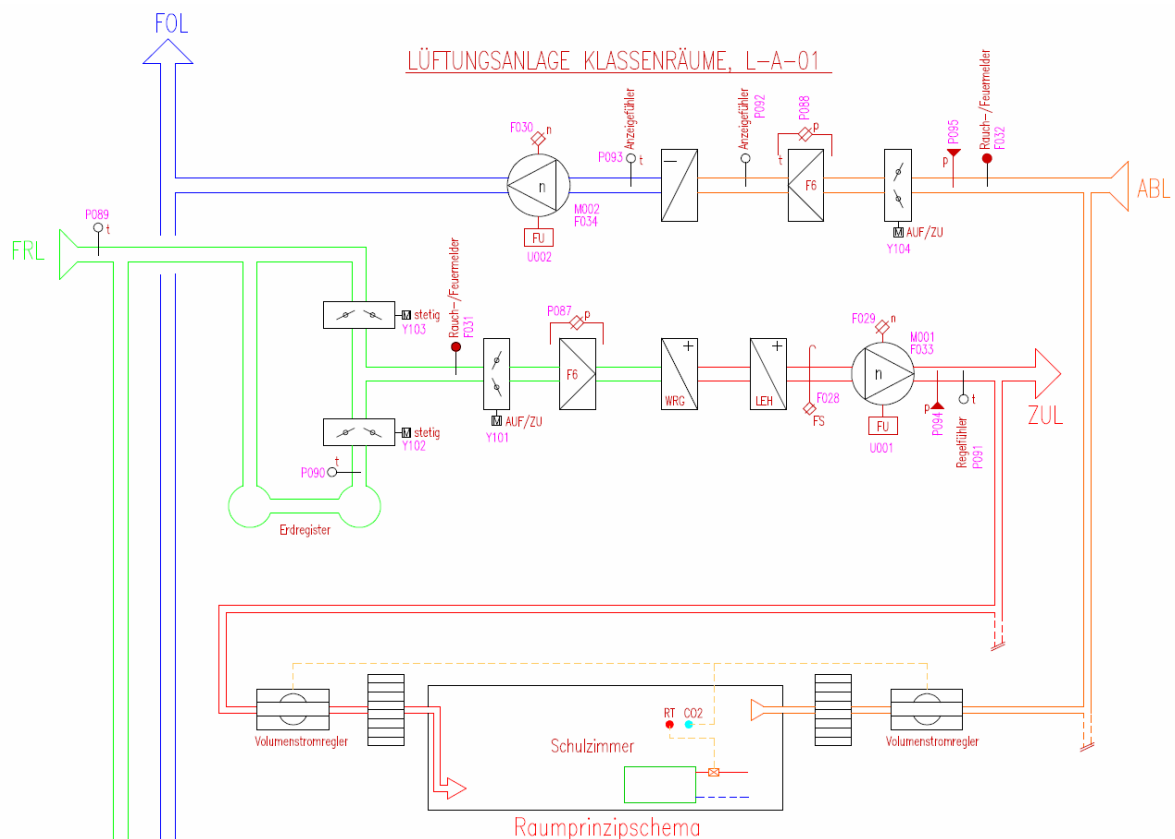


Abbildung 3.4 Prinzipschema der Lüftungsanlage Klassenräume, Enplan AG Herisau

Die Lüftungsanlage hat einen Lufterhitzer und eine KVS-Wärmerückgewinnung (Wasser/Glykol). Die Aussenluft wird über ein Erdregister temperiert.

### 3.2. BESCHRIEB MESSUNGEN

Damit die Messungen mit den anderen Schulhäusern vergleichbar sind, wurden für die Messungen insgesamt 3 Unterrichtszimmer im 2. Stock des Oberstufentraktes (Trakt A) gewählt. Die Unterrichtszimmer im 1. und 3. Stock eignen sich aufgrund des dort angewendeten Unterrichtskonzeptes wenig für aussagekräftige Vergleiche zu den anderen Messobjekten (Belegung nur zum Teil in den Unterrichtszimmern; grösserer Teil des Unterrichtes im gemeinsamen Vorraum).

Die Lüftungssteuerung der Unterrichtszimmer ist im Schulhaus Birch sowohl über die Präsenzsteuerung (Einschaltkriterium) wie auch über den CO<sub>2</sub>-Messwert (Ausschaltkriterium) gesteuert. Um den Nutzen der CO<sub>2</sub>-Steuerung prüfen zu können wurde die Präsenzsteuerung in zwei der drei zu messenden Zimmern entkoppelt (reine CO<sub>2</sub>-Steuerung).

Es wurde je ein Zimmer auf der N-Seite (Zimmer A-2.33) sowie auf der SW-Seite (Zimmer A-2.51) gemessen. Damit wird sowohl ein kritisches Zimmer für den Sommer wie auch für den Winterfall gewählt. In diesen beiden Zimmern wurde die Lüftung alleine über den CO<sub>2</sub> Pegel gesteuert. Als Vergleichsreferenz wurde ein weiteres Zimmer (A-2.53, S-W Seite) mit CO<sub>2</sub>-Präsenz-Steuerung gemessen.

Für die Festlegung des Messstandortes der CO<sub>2</sub>-Datenlogger im Unterrichtszimmer wurde im Zimmer A-2.51 eine Testmessung während drei Tagen mit drei Datenloggern an unterschiedlichen Standorten durchgeführt. Aufgrund diese Messungen wurde für den CO<sub>2</sub>-Datenlogger ein Standort auf einer Höhe von 1.6 - 2 m an der Glastrennwand zum Pavillon (gemeinsamer Vorraum für ca. 3-4 Unterrichtszimmer) (Höhe ca. 1.6 m) gewählt (siehe Abbildung 3.5). Dieser Standort ist gut geschützt vor Sonneneinstrahlung und eine Beeinflussung durch eine offene Türe konnte ebenfalls nicht beobachtet werden.

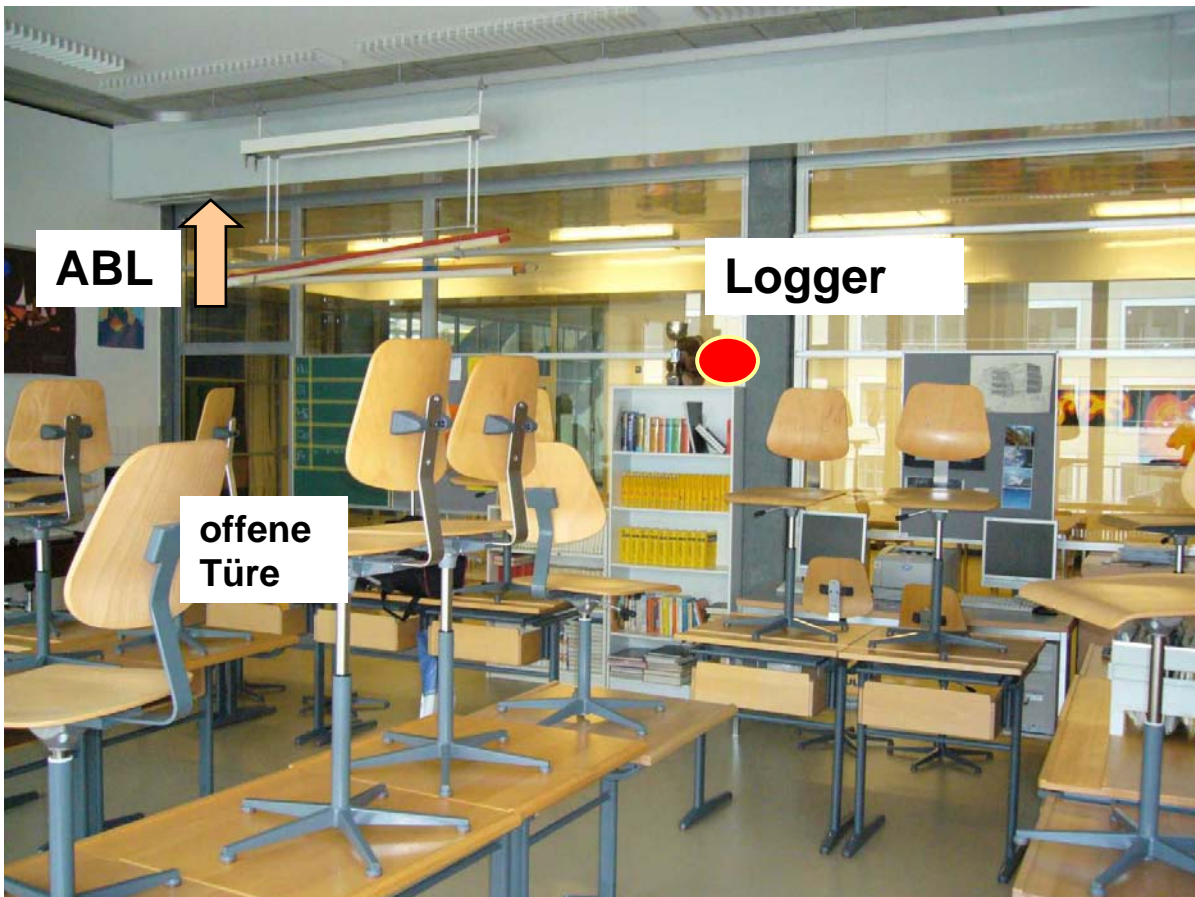


Abbildung 3.5 Messstandort der CO<sub>2</sub>-Datenlogger (Bild Zimmer A 2-51)

Für die Interpretation der Messresultate wurde von den Lehrpersonen in den untersuchten Zimmern ein Nutzerprotokoll geführt, welches Auskunft über die anwesenden Personen gibt. Im Weiteren wurden Zeiten in denen die Fenster oder die Türe zum Pavillon offen standen grob erfasst. Die Fensteröffnungen konnten zudem über das Leitsystem aufgezeichnet werden (Fensterkontakte).

### 3.3. MESSERGEBNISSE INKL. NUTZERPROTOKOLLE

#### 3.3.1 Luftmengenmessungen

Um eine korrekte Interpretation der Messresultate vornehmen zu können wurden im Vorfeld der ersten Messperiode im Juli 2006 Luftmengenmessungen in den untersuchten Unterrichtszimmern vorgenommen. Die Messungen zeigten in zwei Zimmern grössere Abweichungen zu den Sollwerten der Luftmengen.

Zu den Resultaten in Abbildung 3.6 ist jedoch anzumerken, dass die Luftmengenmessungen mit Unsicherheiten von 20-30% des Messwertes behaftet sind. Trotzdem kann festgestellt werden, dass im Zimmer A-2.51 die Zuluftmenge nur etwa 50% des Sollwertes beträgt und zudem ein Unterdruck herrscht. Dies konnte mit einer Rauchprobe auch nachgewiesen werden. Der Grund für die zu tiefe Luftmengen im Zimmer A-2.51 lag am falsch eingestellten Volumenstromregler. Für die Wintermessungen (Dez. 2006) wurde der Luftvolumenstrom in diesem Zimmer korrekt eingestellt.

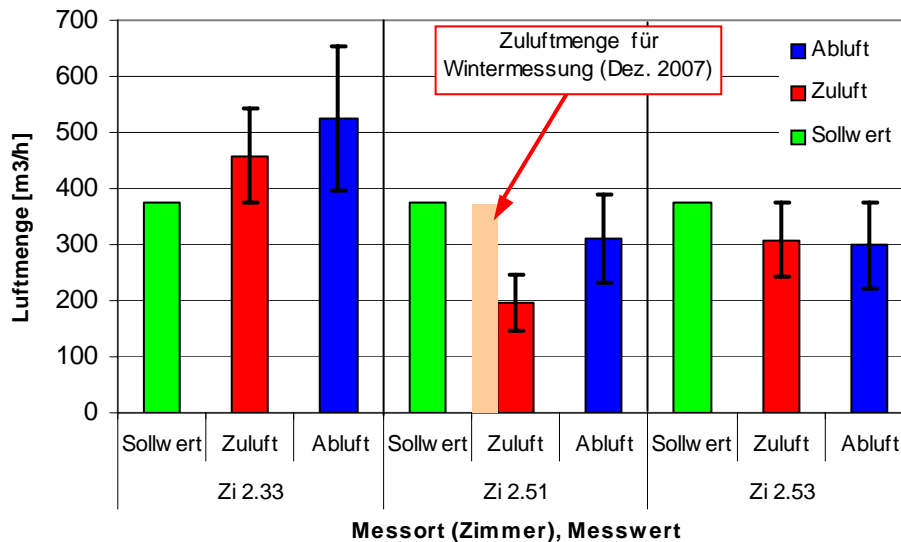


Abbildung 3.6 Messwerte Luftmengenmessung, Unterrichtszimmer

### 3.3.2 Raumlufzustandsmessungen

In den drei untersuchten Räumen wurden CO<sub>2</sub>-Gehalt sowie Raumlufttemperatur und relative Feuchte mittels Datenlogger erfasst. Vom Leitsystem wurden die aufgezeichnete Präsenz, Fenster Auf/Zu, Lüftung Ein/Aus, sowie der CO<sub>2</sub>-Gehalt für die Interpretation der Ergebnisse verwendet. Beim Vergleich der beiden CO<sub>2</sub>-Messungen, Abbildung 3.7, wurden relativ grosse Unterschiede zwischen den Messwerten ersichtlich. Es stellte sich heraus, dass in zwei Zimmern der CO<sub>2</sub>-Raumfühler defekt (Zimmer A-2.33) war oder einen Offset hatte (Zimmer A-2.33). Für die Auswertung wurden die Daten von den Datenloggern benutzt. Bei unstimmgigen Messergebnissen wurde für die Resultatinterpretation auf das Nutzerprotokoll der Lehrpersonen zurückgegriffen. Für die zweite Messperiode im Winter (Dez. 2007) wurden die betroffenen CO<sub>2</sub>-Raumfühler ersetzt.

Die im Schulhaus eingesetzten CO<sub>2</sub>-Sensoren (Sensortec, Typ. a-sense) haben einen Messbereich von 0...2000 ppm und liefern als Ausgangssignal ein 0-10 V Signal für die Verarbeitung im Leitsystem.

Der Sensor besitzt eine Autotuningfunktion, welche auftretende Messwertdrifts kompensieren soll. Typischerweise wird bei dem Verfahren aus den 14-Tage-Werte mit Konzentrationstiefwerten allfällige Drifts automatisch gegenüber einem Hintergrundniveauwert von 400 ppm korrigiert. Dadurch soll der Sensor ein Unterhaltsintervall von 5 Jahren aufweisen.

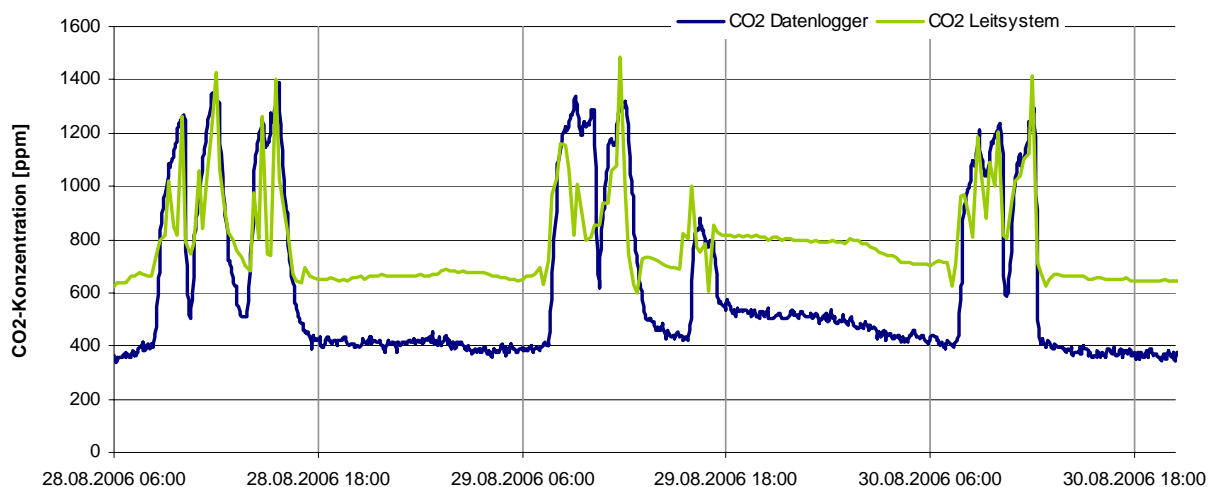


Abbildung 3.7 Vergleich der CO<sub>2</sub>-Werte vom Datenlogger und Leitsystem (am Beispiel Zimmer A-2.33, Sommermessung)

Als Referenz wurde die Aussentemperatur an zwei Orten gemessen.

Im Anhang dieses Berichtes werden die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, sowie Temperatur und relative Feuchte für jedes Zimmer über die ganze Periode dargestellt.

Tabelle 3.1 Genauigkeit der Datenlogger

Mosway Datenlogger	CO <sub>2</sub>	Temperatur	Relative Feuchte
Unsicherheit	5% des Messwertes +/- 150 ppm	+/- 0.5 °C	+/- 3.5 %

Tabelle 3.2 Verwendete Logger und deren Platzierung

Messung (Grössen)	Bezeichnung	Platzierung
Aussenluft (T)	T03	
Aussenluft (T/RF)	TF22	
Zuluft (T/RF)	TF20	Zi. A-2.53
Zuluft (T/RF)	TF21	Zi. A-2.33
Zuluft (T/RF)	TF25	Zi. A-2.53
Zuluft (T/RF)	TF27	Zi. A-2.51
Datenlogger (CO <sub>2</sub> /T/RF)	EN42-1 (B+H1)	Zi. A-2.33
Datenlogger (CO <sub>2</sub> /T/RF)	EN42-2 (B+H2)	Zi. A-2.53
Datenlogger (CO <sub>2</sub> /T/RF)	MG2 hss	Zi. A-2.51

Für die Auswertung haben wir uns entschieden die CO<sub>2</sub>-Messwerte in 4 Kategorien zu gruppieren und grundsätzlich nach „Personenpräsenz“ zu unterscheiden:

- |              |                            |                 |
|--------------|----------------------------|-----------------|
| 1. Kategorie | Luftqualität „sehr gut“    | < 800 ppm       |
| 2. Kategorie | Luftqualität „gut“         | 800 - 1000 ppm  |
| 3. Kategorie | Luftqualität „mässig“      | 1000 - 1400 ppm |
| 4. Kategorie | Luftqualität „abgestanden“ | > 1400 ppm      |

(„Grenzwert“ nach SIA 382/1 (2007) bei 1350 ppm)

### 3.3.3 Resultate Messungen Sommer 2006

Die Messperiode dauerte vom 23.08.06 bis 08.09.06, gemessen wurde in 5 Min-Intervall. Der Logger im Zimmer A-2.33 zeichnete aus unerklärlichen Gründen nur Daten bis 05.08.06 auf. Die Leitsystemdaten werden im Viertelstunden-Intervall erfasst.

Der höchst gemessene Wert der Aussenlufttemperatur war 29.2°C, am Nachmittag des 5. Septembers. Der Mittelwert der Aussentemperatur über die ganze Periode betrug 18.2°C.

#### Bemerkungen

Bei der Interpretation der Resultate ist zu beachten, dass in den auf reine CO<sub>2</sub>-Steuerung umgerüsteten Zimmern (A-2.33, A-2.51) während den Messungen kein Spülbetrieb in der Nacht (1:00-4:00) und am Morgen (6:00-7.00) stattfand.

#### Zimmer A-2.33

Dieses Zimmer ist nach Norden ausgerichtet. Die Lüftung ist rein CO<sub>2</sub>-gesteuert und die Personenbelegung lag zwischen 18 und 24, im Mittel 22 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa 21 m<sup>3</sup>/h. Die Zulufttemperatur variierte zwischen 19.1 und 22.7°C. Der Mittelwert lag bei 20.5°C.

Das Klassenzimmer wird, gemäss dem Nutzerprotokoll, hauptsächlich am Vormittag benutzt. Je nach Lehrperson wird unterschiedlich über die Fenster gelüftet. Zwischen dem 28.8. und 1.9. wurde konsequent in der Pause zwischen Lektion 3 und 4 gelüftet. Hingegen wurde nur eine Fensterlüftung zwischen 4.9 - 8.9 protokolliert.

Abbildung 3.8 zeigt einerseits wie häufig die CO<sub>2</sub>-Werte im jeweiligen Bereich gemessen wurde (während Präsenzzeit), andererseits wie häufig dann auch gelüftet wurde. Der Raum wurde ca. ein Viertel der Zeit benutzt. Die Steuerung der Lüftung scheint hier ziemlich gut zu funktionieren bei mittleren bis hohen CO<sub>2</sub>-Werten. Ab 800 ppm wird vorwiegend gelüftet. Die relativ häufige Lüftung bei Werten unter 800 ppm lässt sich dadurch erklären, dass die CO<sub>2</sub>-Werte vom Leitsystem grundsätzlich höher liegen als unsere Messungen. Vergleichsmessungen zeigten einen Offset des Raumfühlers von 100-200 ppm (zu hoch). Für die Wintermessungen wurde der Fühler in diesem Raum ersetzt.

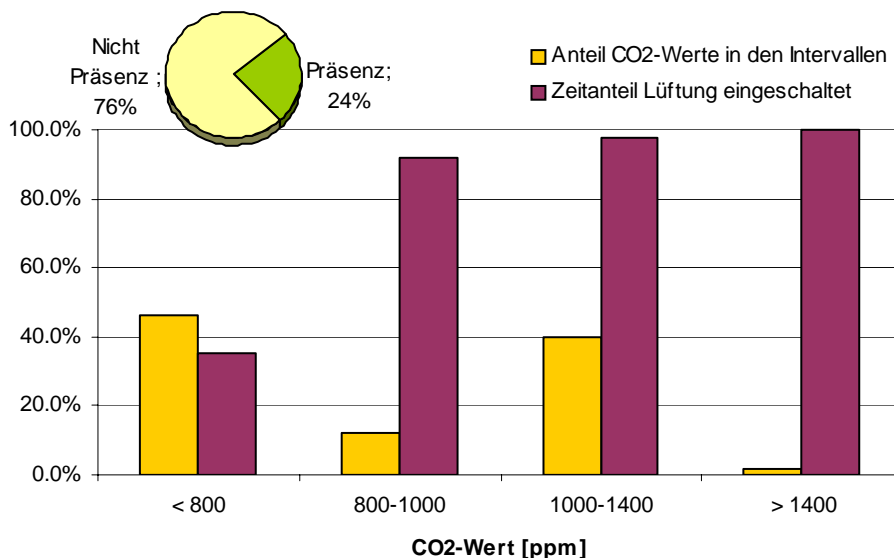


Abbildung 3.8. Zi. A-2.33 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit und wie häufig in den jeweiligen Kategorien das auch gelüftet wurde.

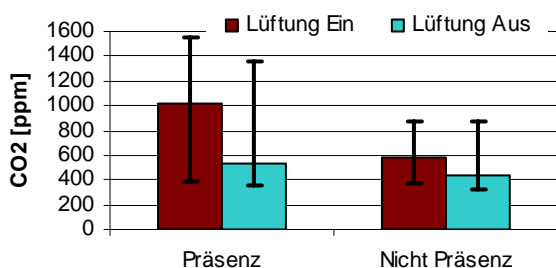


Abbildung 3.9. Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

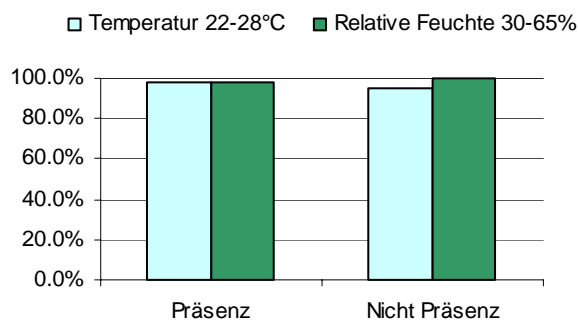


Abbildung 3.10. Einhaltung der Betriebsbereich für Temperatur und Feuchte gemäss SIA V 382/2 1992

Wie Abbildung 3.9 zeigt wurde auch der erstrebte Präsenzmittelwert von 1000 ppm knapp eingehalten.

In der Umfrage wird das Zimmer als klar zu warm und ein wenig zu feucht beurteilt. Im Vergleich aber zur geltenden SIA Empfehlung V382/2 1992, Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen, werden die Grenzwerte für "Sommerbetrieb" bei Präsenz vorwiegend eingehalten.

### Zimmer A-2.51

Dieses Zimmer ist nach Süd-West ausgerichtet. Die Lüftung ist rein CO<sub>2</sub>-gesteuert und die Personenbelegung während der Messperiode lag zwischen 19 und 21 Personen. Gemäss den

Luftmengenmessungen (siehe Kap. 3.5.1) ergibt dies eine Zuluftmenge von ca. 10 m<sup>3</sup>/hP, etwa 15 m<sup>3</sup>/h weniger als empfohlen. Die Zulufttemperatur betrug zwischen 21.1 und 24.2°C, mit einem Mittelwert von 22.7°C.

Vom 28.08.06 bis 01.09.06 war die Klasse im Klassenlager. Diese Woche wurde von den Auswertungen ausgeschlossen.

Als Folge der niedrigen Luftmenge treten CO<sub>2</sub>-Werte über 1400 ppm in ca. 13 % der Zeit auf, Abbildung 3.11. Wie Abbildung 3.12 zeigt wird auch der Sollwert von 1000 ppm nicht erreicht. Der Präsenz-Mittelwert liegt bei ca. 1200 ppm. Hier wird gemäss Nutzerprotokoll auch häufig manuell gelüftet, entweder über die Fenster oder über die Tür zum Vorraum. Da die Fenster sich nur über Kippflügel öffnen lassen, können die CO<sub>2</sub>-Werte nicht tiefer gesenkt werden.

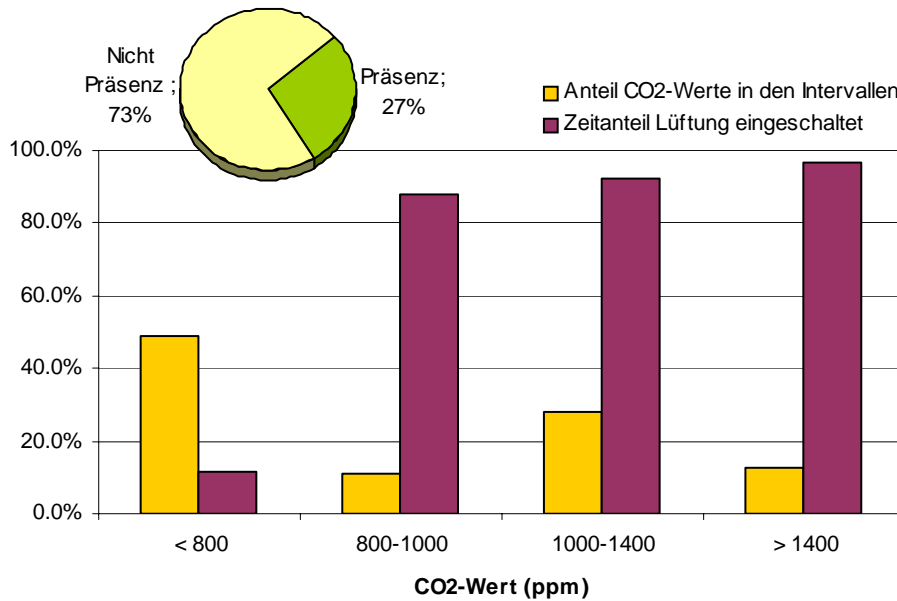


Abbildung 3.11 Zi. A-2.51 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit und wie häufig in den jeweiligen Kategorien das auch gelüftet wurde.

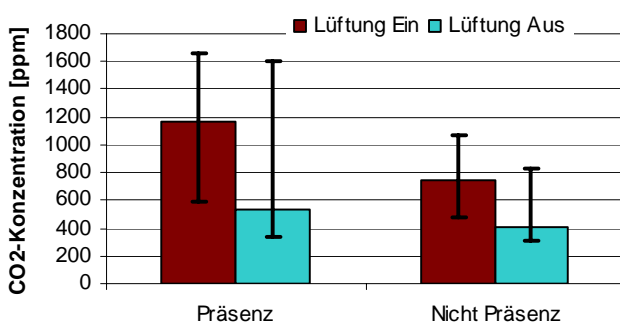


Abbildung 3.12. Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

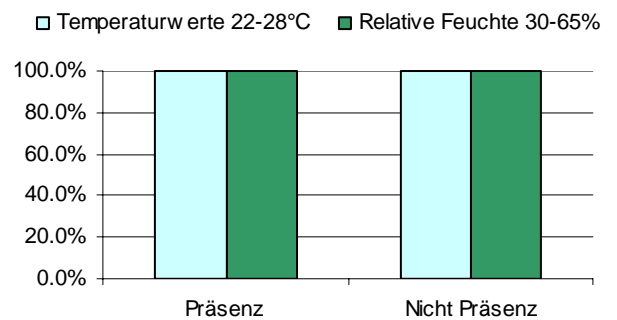


Abbildung 3.13. Einhaltung der Betriebsbereich für Temperatur und Feuchte gemäss SIA V 382/2 1992

Auch dieses Zimmer wird in der Umfrage als klar zu warm und ein wenig zu feucht beurteilt. In Abbildung 3.13 wird gezeigt dass die Werte sich aber innerhalb den SIA Grenzen halten. Zu bemerken ist dass die Luftqualität am Nachmittag in den Zimmern A-2.33 und A-2.51 als etwa gleich schlecht beurteilt wird. Dies obwohl die Luftmenge pro Person in A-2.33 ca. das Zweifache der Luftmenge in A-2.51 ist.

## Zimmer A-2.53

Dieses Zimmer ist, wie A-2.51, nach Süd-West ausgerichtet. Die Lüftung wird über Präsenz und CO<sub>2</sub>-Gehalt gesteuert. Die Belegung ist am schwächsten aller untersuchten Räume: 11-14 Personen. Die Zuluftmenge pro Person betrug 22 bis 28 m<sup>3</sup>/h. Die Zulufttemperatur variierte zwischen 20.1 und 25.3°C. Der Mittelwert lag bei 22.6°C.

Wie Abbildung 3.14 andeutet ist die Lüftung in diesem Zimmer fast dauernd eingeschaltet. Der Grund liegt im defekten CO<sub>2</sub>-Fühler des Leitsystems. Dieser zeigt selten Werte unter 800 ppm, das Ausschaltkriterium der Lüftung ist ein CO<sub>2</sub>-Wert unter 600 ppm. Vergleichsmessungen zeigten einen Offset des Raumfühlers mehr als 400 ppm (zu hoch). Für die Wintermessungen wurde der Fühler in diesem Raum ersetzt.

Trotz der hohen Luftmengen wird in diesem Raum sehr häufig auch über die Fenster gelüftet, oft die ganze Lektion. Die ständige Lüftung zeigt sich in den tiefen CO<sub>2</sub>-Werten. 73% der Präsenzzeit ist die Konzentration unter 800 ppm, gerade 9 % der Zeit werden Werte über 1000 ppm erreicht. Insgesamt entsprechen die gemessenen Werte daher einer Dauerlüftung während der gesamten Betriebszeit (6:00-18:00 sowie 01:00-04:00).

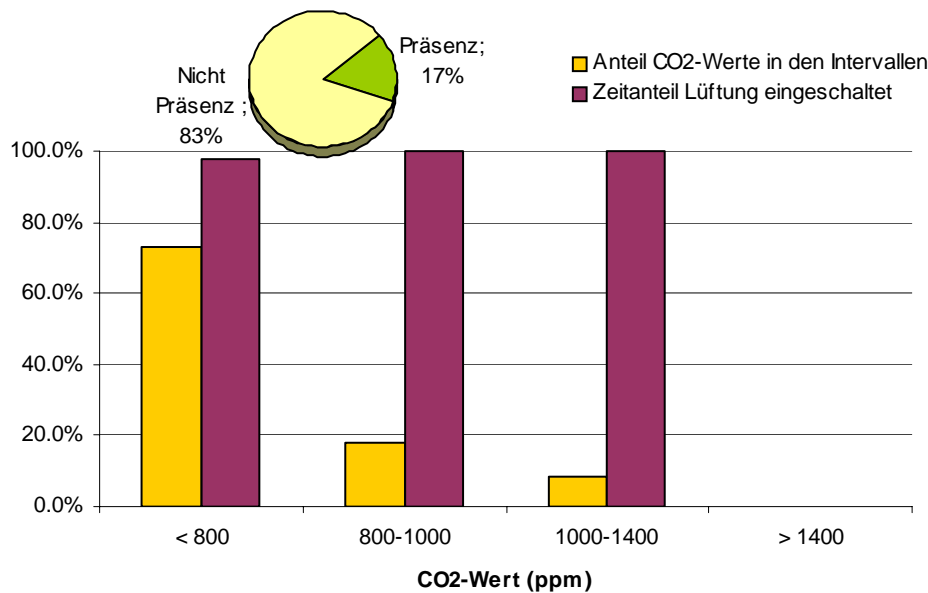


Abbildung 3.14 . Zi. A-2.53 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit und wie häufig in den jeweiligen Kategorien das auch gelüftet wurde.

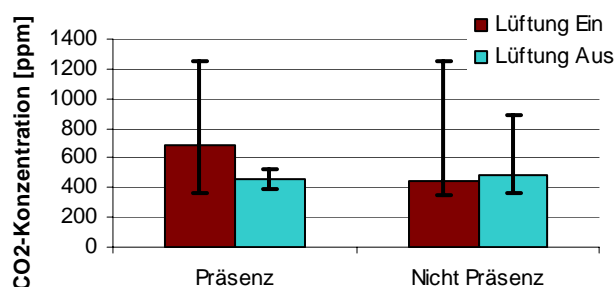


Abbildung 3.15. Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

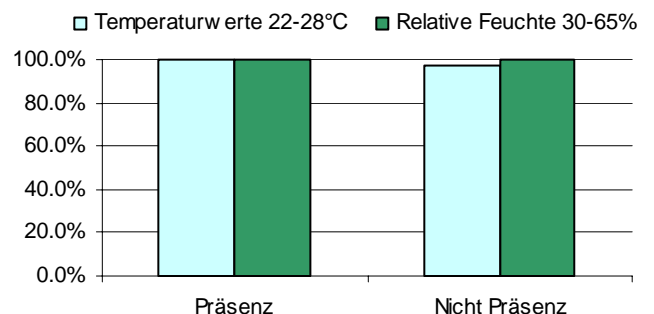


Abbildung 3.16. Einhaltung der Betriebsbereich für Temperatur und Feuchte gemäss SIA V 382/2 1992

Wie Abbildung 3.15 zeigt sind auch die Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Werte tief und erreichen bei Präsenz ca. 700 ppm. Eine Aussage über die Empfindung von der Luftqualität und der Temperatur kann nicht gemacht werden, da dieser Fragebogen anonym abgegeben wurde.

### 3.3.4 Resultate Messungen Winter 2006

Die Messperiode dauerte vom 6.12.06 bis 20.12.06, gemessen wurde in 5 Min-Intervall. Die Leitsystemdaten werden im Viertelstunden-Intervall erfasst.

Der tiefste gemessene Wert der Aussenlufttemperatur war  $-2.6^{\circ}\text{C}$ , am frühen Morgen des 16. Dezembers. Der höchste gemessene Wert der Aussenlufttemperatur war  $11.3^{\circ}\text{C}$ , am Nachmittag des 8. Dezembers. Der Mittelwert der Aussentemperatur über die ganze Periode betrug  $5.1^{\circ}\text{C}$ . Der Mittelwert der Aussenluftfeuchte über die ganze Periode betrug 80% r.F.

#### Zimmer A-2.33

Dieses Zimmer ist nach Norden ausgerichtet. Die Lüftung ist rein  $\text{CO}_2$ -gesteuert und die Personenbelegung lag in der Messperiode zwischen 5 und 24, im Mittel 20 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa  $22 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Zulufttemperatur variierte zwischen  $16.5$  und  $20.1^{\circ}\text{C}$ . Der Mittelwert lag bei  $18.3^{\circ}\text{C}$ .

Das Klassenzimmer wird, gemäss dem Nutzerprotokoll, hauptsächlich am Vormittag benutzt. Gemäss dem Nutzerprotokoll wurde in der gesamten Messperiode nicht über die Fenster gelüftet. Die Auswertung der Leitsystemdaten zeigt ebenfalls nur am 11. Dezember nachmittags ein offenes Fenster an.

Abbildung 3.17 zeigt einerseits wie häufig die  $\text{CO}_2$ -Werte im jeweiligen Bereich gemessen wurde (während Präsenzzeit), andererseits wie häufig er dann auch mechanisch belüftet wurde. Der Raum wurde ca. ein Viertel der Zeit benutzt. Die Steuerung der Lüftung scheint hier ziemlich gut zu funktionieren bei mittleren  $\text{CO}_2$ -Werten. Gegenüber den Sommermessungen wurde durch den Ersatz des  $\text{CO}_2$ -Raumfühlers nun bei tiefen  $\text{CO}_2$ -Werten deutlich seltener belüftet. Wie Abbildung 3.17. und Abbildung 3.20 zeigen ist der sinkende Zeitanteil mit Lüftungsbetrieb bei hohen  $\text{CO}_2$ -Werten ( $>1400$  ppm) sehr wahrscheinlich auf die festgestellten starken Schwankungen in der Messung des  $\text{CO}_2$ -Raumfühlers zurückzuführen. Dies deutet darauf hin, das mit den verwendeten Fühlern nach wie vor Qualitätsprobleme bestehen.

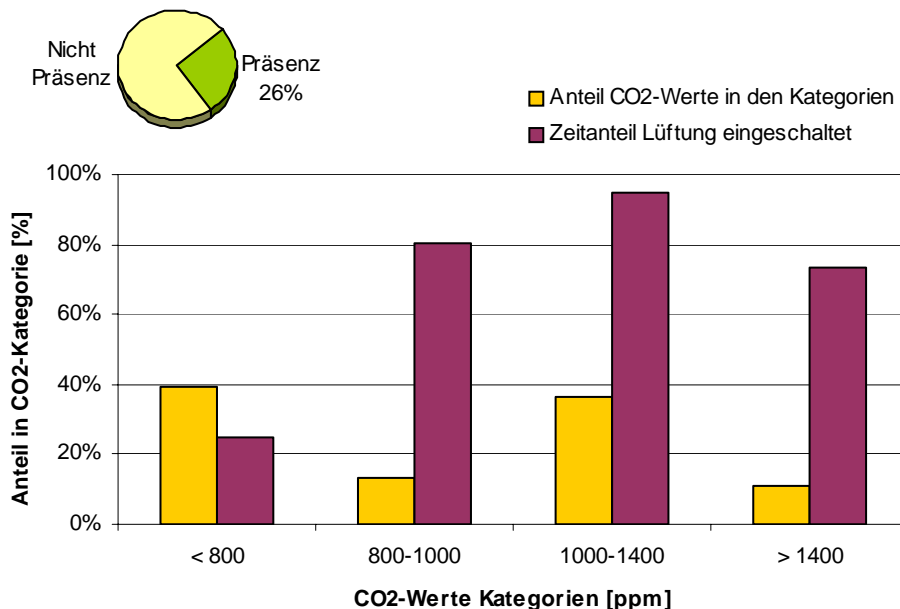


Abbildung 3.17. Zi. A-2.33 Gemessene  $\text{CO}_2$ -Werte während der Präsenzzeit und wie häufig in den jeweiligen Kategorien das auch gelüftet wurde.

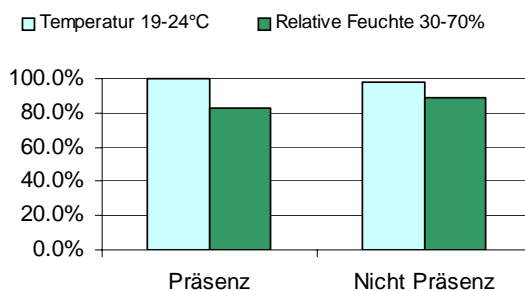
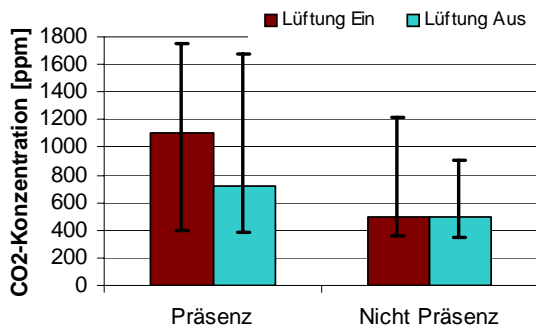


Abbildung 3.18. Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

Abbildung 3.19. Einhaltung der Betriebsbereich für Temperatur und Feuchte gemäss SIA 180 (1999)

Wie Abbildung 3.18 zeigt wurde der erstrebte Präsenzmittelwert von 1000 ppm nur leicht überschritten.

In der Umfrage wird das Zimmer als klar zu kalt und ein wenig zu trocken beurteilt. Im Vergleich zur geltenden SIA Norm 180 1999, werden die Grenzwerte für "Heizbetrieb" bei Präsenz jedoch für die Temperatur immer und für die Feuchte in 80% der Zeit eingehalten. Vermutlich wird durch die nordseitige Lage des Zimmers die vor allem an kalten Tagen frühmorgens teilweise unter 20°C liegende Raumtemperatur in diesem Zimmer als klar zu tief empfunden. Auch sind die Zulufttemperaturen in diesem Raum deutlich tiefer als im Zimmer A-2.51. Im Mittel lag die Raumtemperatur während der Präsenzzeit bei 21°C.

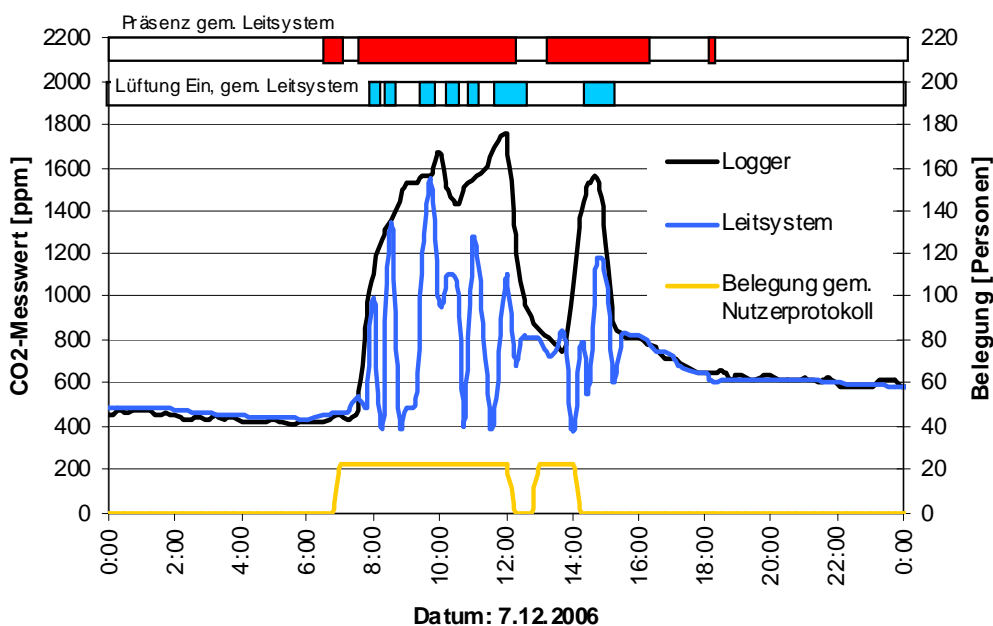


Abbildung 3.20 Zi. A-2.33 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während einem ausgewählten Messtag (7. Dez.), inkl. Präsenz und Lüftung gemäss Leitsystem sowie Belegung gemäss Nutzerprotokoll.

### Zimmer A-2.51

Dieses Zimmer ist nach Süd-West ausgerichtet. Die Lüftung ist rein CO<sub>2</sub>-gesteuert und die Personenbelegung während der Messperiode lag zwischen 4 und 22, im Mittel 20 Personen. Durch die Korrektur des Volumenstromreglers wurde nun eine Zuluftmenge von ca. 18 m<sup>3</sup>/hP, erreicht. Die Zulufttemperatur betrug zwischen 19.3 und 21.1°C, mit einem Mittelwert von 20.4°C.

Mit der gegenüber der Sommermessung deutlich erhöhten Luftmenge treten CO<sub>2</sub>-Werte (Logger) über 1400 ppm mit 1.1 % der Zeit nur noch selten auf (siehe Abbildung 3.21). Wie Abbildung 3.22 zeigt wird nun auch der Sollwert von 1000 ppm im Durchschnitt unterschritten. Der Präsenz-Mittelwert liegt bei ca. 900 ppm. In diesem Zimmer wurde gemäss Nutzerprotokoll regelmässig in der 10:00 Pause

manuell gelüftet. Die Wirkung dieser Fensterlüftung zeigt sich in Abbildung 3.24 insbesondere in der 10-Uhr Pause im CO<sub>2</sub>-Verlauf.

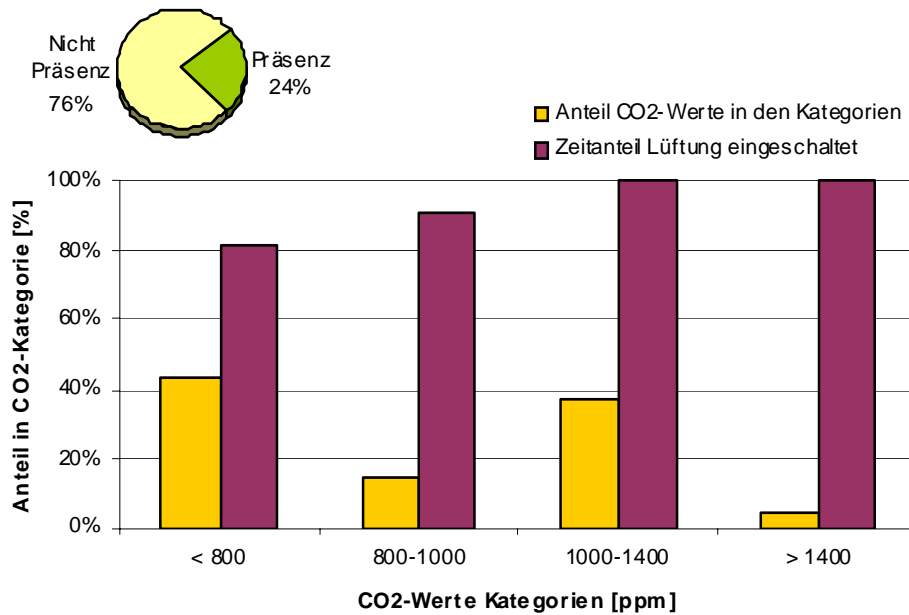


Abbildung 3.21 Zi. A-2.51 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit und wie häufig in den jeweiligen Kategorien das auch gelüftet wurde.

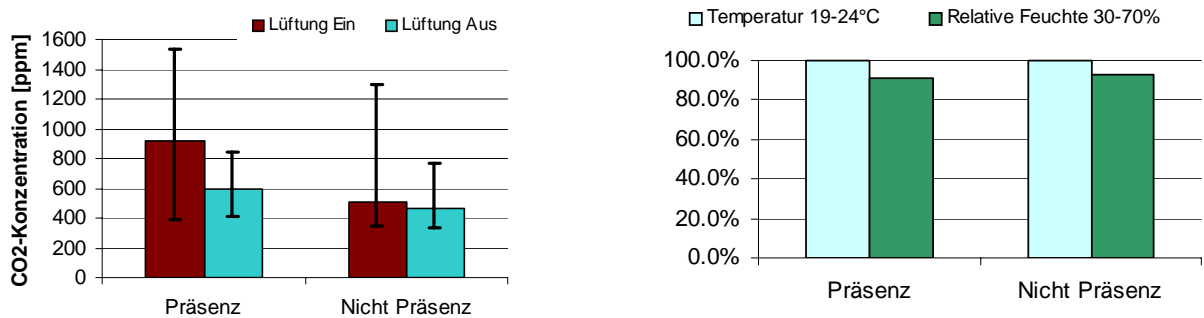


Abbildung 3.22. Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

Abbildung 3.23. Einhaltung der Betriebsbereich für Temperatur und Feuchte gemäss SIA 180 (1999)

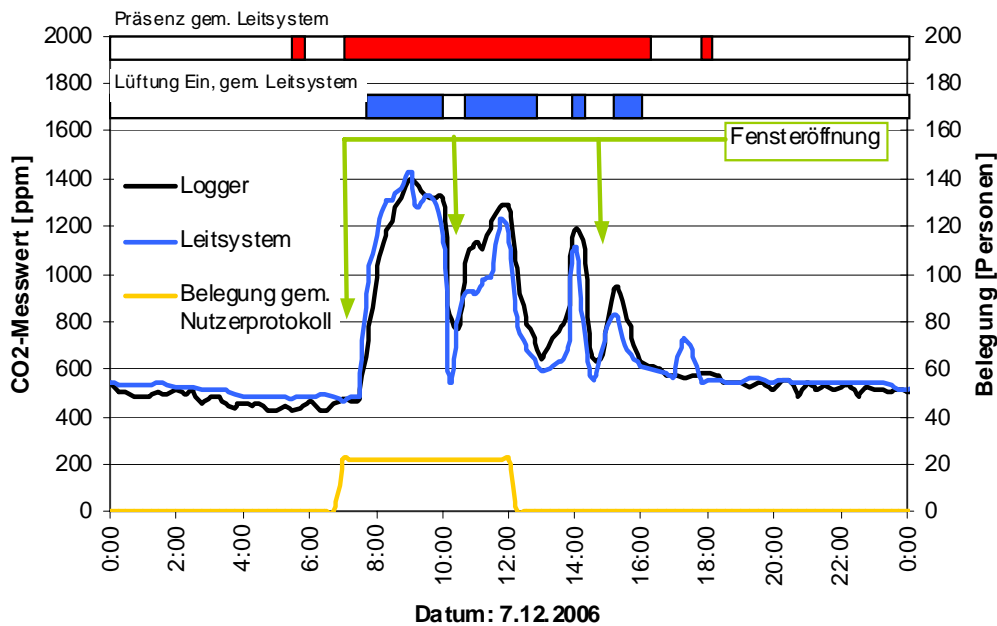


Abbildung 3.24 Zi. A-2.51 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während einem ausgewählten Messtag (7. Dez.), inkl. Präsenz und Lüftung gemäss Leitsystem sowie Belegung gemäss Nutzerprotokoll.

In diesem Zimmer wurden von der Lehrperson sowohl die Temperatur wie auch die Luftfeuchte in der Messperiode als gerade richtig beurteilt. Dies ist in Übereinstimmung mit Abbildung 3.23, welche zeigt, dass die Werte sich innerhalb den SIA Grenzen befinden. Im Gegensatz zum Zimmer A-2.33 wurde in diesem Zimmer die Raumtemperatur trotz vergleichbaren Werten (Minimal- und Mittelwert) als gerade richtig beurteilt. Die Luftqualität wurde in diesem Zimmer im Vergleich zu der Befragung im Sommer deutlich besser beurteilt. Dies dürfte mit den nun höheren Luftmengen zusammenhängen.

### Zimmer A-2.53

Dieses Zimmer ist, wie A-2.51, nach Süd-West ausgerichtet. Die Lüftung wird über Präsenz und CO<sub>2</sub>-Gehalt gesteuert. Die Belegung ist mit 11-12 Personen am schwächsten aller untersuchten Räume. Die Zuluftmenge pro Person betrug vom etwa 25 m<sup>3</sup>/h. Die Zulufttemperatur variierte zwischen 17.3 und 20.1°C. Der Mittelwert lag bei 18.8°C.

Wie Abbildung 3.25 andeutet ist die Lüftung in diesem Zimmer bei CO<sub>2</sub> Werten unter 1000 ppm deutlich häufiger eingeschaltet als in den anderen beiden Zimmer. Da dieser Raum im Gegensatz zu den anderen beiden, rein CO<sub>2</sub>-gesteuerten Räumen über den Präsenzmelder eingeschaltet wird ist die höhere Laufzeit erklärbar. Infolge der deutlich höheren Luftmengen pro Person wurden in diesem Zimmer keine CO<sub>2</sub>-Werte über 1400 ppm gemessen.

Trotz der hohen Luftmengen wird in diesem Raum regelmässig in den Pausen auch über die Fenster gelüftet. Dies könnte auch der Grund sein, dass in diesem Zimmer die tiefsten Raumlufffeuchten gemessen wurden.

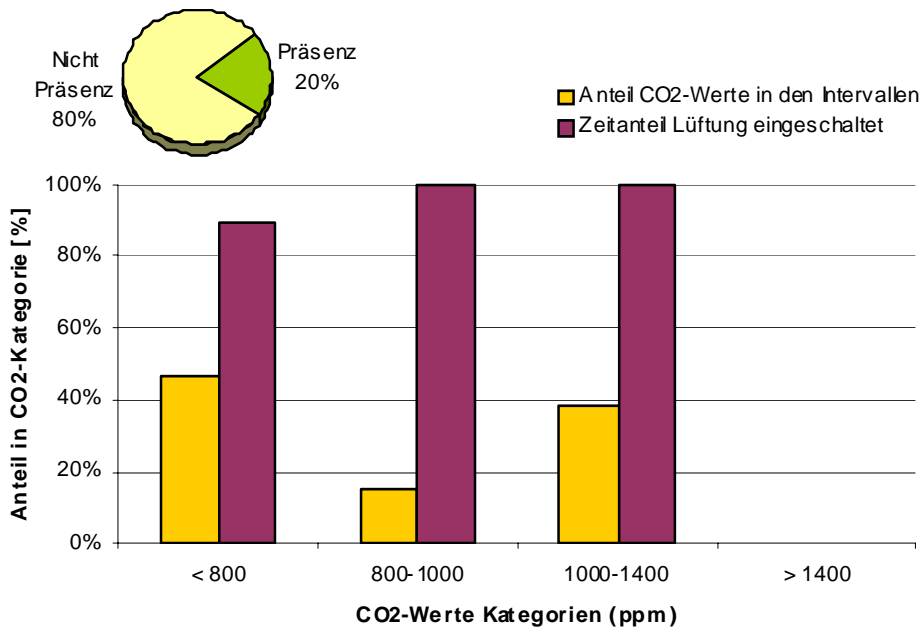


Abbildung 3.25 Zi. A-2.53 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit und wie häufig in den jeweiligen Kategorien das auch gelüftet wurde.

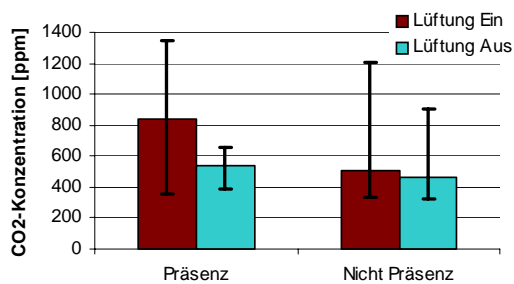


Abbildung 3.26. Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

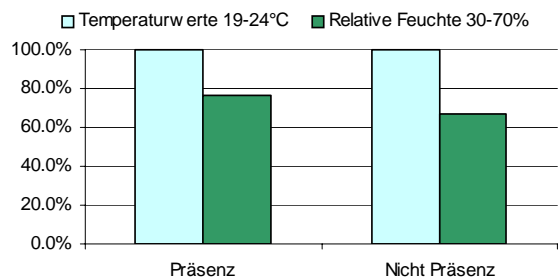


Abbildung 3.27. Einhaltung der Betriebsbereich für Temperatur und Feuchte gemäss SIA 180

Wie Abbildung 3.26 zeigt sind die Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration, bei Präsenz mit ca. 700 ppm sehr tief. Trotz der tiefen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, der deutlich höheren Luftmengen und dem Dauerbetrieb bei Personenpräsenz wurde die Luftqualität von der Lehrperson nur als mittelmässig beurteilt. Dies dürfte auch der Grund für das regelmässige Lüften in den Pausen sein.

Die Temperatur wurde als ein wenig zu kalt und die Luftfeuchte als gerade richtig beurteilt. Im Mittel lag die Raumtemperatur in der Präsenzzeit bei 21.2°C (Bereich: 20.0-21.8 °C) und die Raumfeuchte bei 31.5% (Bereich: 29-35%).

Wie Abbildung 3.28 zeigt, ist im Zimmer A-2.53 durch die andere Steuerungsart die Laufzeit der Lüftung länger als die Präsenzzeit. Dies im Gegensatz zu den rein CO<sub>2</sub> gesteuerten Zimmern. Auch hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Fensterlüftung in der 10-Uhr Pause. Ebenfalls auffallend ist der trotz Fühlerersatz nach wie vor unplausible Verlauf der CO<sub>2</sub>-Raummessung.

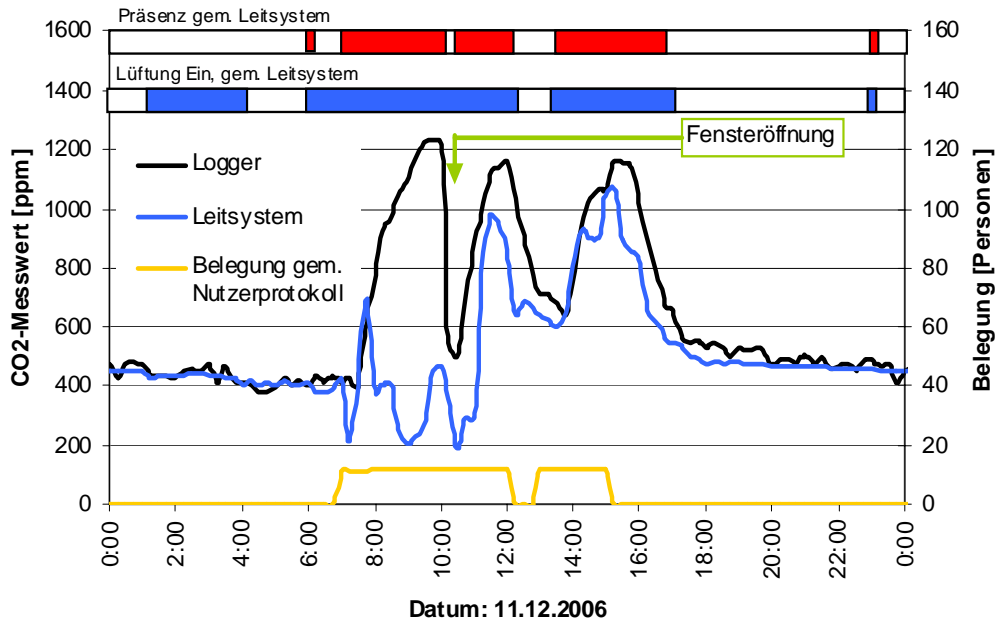


Abbildung 3.28 Zi. A-2.53 Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während einem ausgewählten Messtag (11. Dez.), inkl. Präsenz und Lüftung gemäss Leitsystem sowie Belegung gemäss Nutzerprotokoll

### 3.3.5 Vergleich reine CO<sub>2</sub>-Steuerung mit Präsenz Steuerung

Da im Schulhaus Birch Zimmer mit unterschiedlicher Lüftungssteuerung ausgemessen wurden, kann ein Vergleich der Anteile der Betriebszustände der Lüftung erfolgen. Wie Abbildung 3.29 zeigt, wurde bei präsenz-gesteuertem Lüftungsbetrieb eine höhere Laufzeit der Lüftung als bei CO<sub>2</sub>-gesteuertem Betrieb festgestellt. In den CO<sub>2</sub>-gesteuerten Zimmern war die Lüftung im Mittel während 34% der Messdauer (Tag und Nacht) in Betrieb (inkl. Spülungen). Im Präsenz-gesteuerten Zimmer dagegen lief die Lüftung während 40% der Messdauer. Da die Präsenzzeit in den CO<sub>2</sub>-gesteuerten Zimmern mit 26% der Messdauer leicht höher war als im Präsenz gesteuerten Zimmer (20%), ist die effektive Reduktion durch die CO<sub>2</sub>-Steuerung noch leicht höher. In Bezug auf die Präsenzzeit betrug die Laufzeit der Lüftung bei den CO<sub>2</sub>-gesteuerten Zimmern etwa 150% der Präsenzzeit. Beim präsenz-gesteuerten Zimmer lag die Lüftungslaufzeit dagegen bei knapp 200% der Präsenzzeit. **Durch die CO<sub>2</sub>-Steuerung könnte daher (bei Annahme gleicher Präsenzzeit) die Laufzeit der Lüftung um etwa 2 Stunden pro Tag oder 20% der Laufzeit verringert werden.**

Derzeit ist die Betriebsdauer für die Spülung mit mehr als 30% der Betriebszeit relativ hoch. Es wäre zu prüfen, ob die Spülzeit nachts (derzeit 01:00-04:00) nicht reduziert oder ganz weggelassen werden kann ohne die Luftqualität morgens zu verschlechtern.

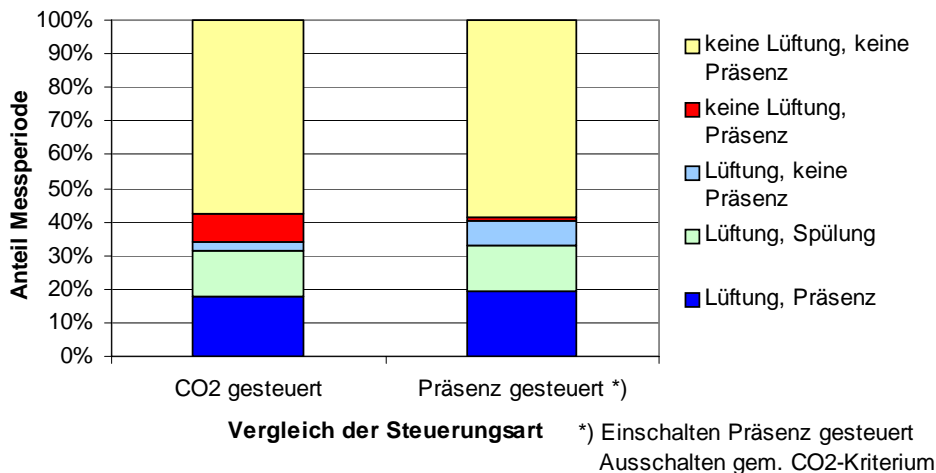


Abbildung 3.29 Vergleich der Lüftungssteuerungen

### 3.4. BEFRAGUNG SCHULHAUS IM BIRCH

#### 3.4.1 Beschrieb Befragung

In die Befragung wurden einerseits die Hauptlehrer, welche ständig im Schulhaus unterrichten (ca. 35 Personen) einbezogen und andererseits auch Lehrpersonen, die nur Teilpensen unterrichten. Insgesamt wurden 73 Lehrer in die Umfrage einbezogen. Die Erhebung wurde schriftlich mit einem Fragebogen durchgeführt (Fragebogen siehe Anhang). Die Abgabe der Fragebogen erfolgte über die Schulleitung.

Je eine Umfrage erfolgt im Sommer und eine im Winter. Die Lehrpersonen sollten im Fragebogen ihre Beurteilung der Verhältnisse in den 2 Wochen vor dem Umfragetermin machen. Da die Umfrage direkt nach den Messungen verteilt wurde, soll dadurch ein Rückschluss für die Interpretation ermöglicht werden.

Bei den Antworten vermischen sich natürlich Einflüsse der Lüftungsanlage mit den Einflüssen aus der Gebäudearchitektur (SH Birch hat grosse Glasflächen und neigt daher eher zur Überhitzung im Sommer als „normale“ Gebäude, zudem ist das Haus „hochtechnisiert“ d.h. die Fenster und Storen sind nur elektrisch bedienbar). Dies ist bei der Interpretation (v.A. im Vergleich mit den beiden anderen Schulhäusern zu berücksichtigen).

Von den 73 an die Lehrpersonen abgegebenen Fragebogen wurden 48 Fragebogen retourniert. Es wurde somit ein Rücklauf von 66% erreicht.

Die Resultate der Auswertung der 48 Fragebogen ist in Kapitel 6 für alle drei untersuchten Schulhäuser gemeinsam dargestellt. In dieser Auswertung wurden aus den insgesamt 30 Fragen 9 Fragen ausgewählt wurden, welche als besonders relevant für die Beantwortung der Forschungsfrage erschienen. Die Resultate zu allen gestellten Fragen sind im Anhang in tabellarischer Form enthalten.

Im Folgenden wird daher vor allem auf die Interpretation der Befragungsergebnisse eingegangen sowie die Unterschiede zwischen der Befragung im Sommer und im Winter.

#### 3.4.2 Ergebnisse Befragung, Vergleich Sommer / Winter

Im Schulhaus Birch wurden als einziges zwei Messungen und Befragungen durchgeführt. Aus diesem Grund soll nachfolgend auf einige starke Abweichungen zwischen der Befragung im Sommer und im Winter eingegangen werden.

Ein sehr grosser Unterschied zeigt die nachfolgende Grafik bezüglich der wahrgenommenen Temperatur in den Sommer- und Wintermonaten. Während im Winter 50% der Befragten die Temperatur für zu kalt empfinden, sind es im Sommer mit 48.9% fast ebenso viele, welche die Temperatur als zu warm wahrnehmen. Solche Nutzeräusserungen sind für stark verglaste Gebäude typisch.

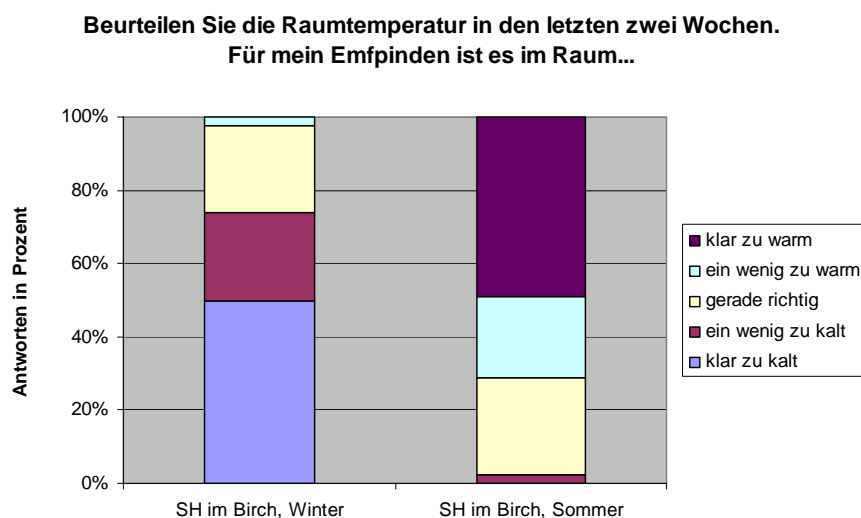


Abbildung 3.30 Raumtemperatur Birch Sommer / Winter

Ein ähnliches Bild zeigt die nachfolgende Abbildung, welcher zu entnehmen ist, dass die Luftqualität im Sommer von lediglich 28.9% als eher gut bis sehr gut eingestuft wird, während es im Winter mit 48.8% deutlich mehr sind.

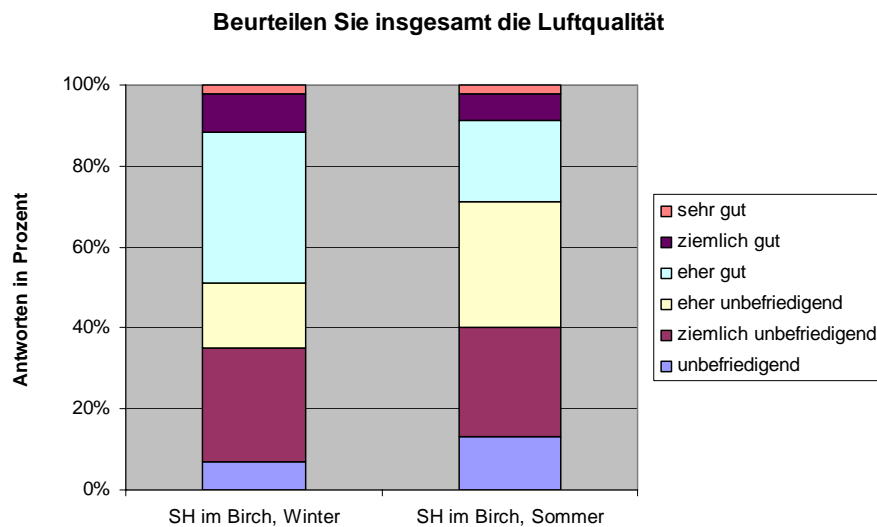


Abbildung 3.31 Gesamtnote Lüftungssystem Birch Sommer / Winter

Diese unterschiedlichen Bewertungen wirken sich entsprechend auf die Gesamtnote aus, wobei im Sommer 12% weniger die Lüftungsanlage als eher gut bis sehr gut bewerten.

### 3.4.3 Interpretation Befragung Schulhaus im Birch

Betrachtet man als erstes die Unterschiede zwischen der Befragung im Sommer und Winter so wird ersichtlich, dass die Zufriedenheit im Sommer massiv tiefer liegt. Die Gründe dafür sind unter Umständen in den grossen Glasfronten des Schulhauses zu suchen, auf welche sich eine starke Erwärmung der Räumlichkeiten im Sommer zurückführen lässt, wenn die Beschattungseinrichtung nicht konsequent genutzt wird.

Eine weitere Besonderheit des Schulhauses, welche im Vergleich mit den Schulhäusern Mäander und Wetzikon ersichtlich wurde ist, dass die Luftqualität am Nachmittag als deutlich schlechter wahrgenommen wird, als in den anderen zwei. Diese drastische Abnahme, könnte bis zu einem gewissen Grad mit der Steuerung der Lüftungsanlage zusammenhängen, da die Anlage über die Mittagspause ausschaltet wenn der CO<sub>2</sub>-Wert unter 600 ppm sinkt. Nach der Rückkehr aus der Mittagspause kann es daher sein, dass die Luftqualität als schlechter als am Morgen beurteilt wird. Grundsätzlich liegen aber in den gemessenen Zimmern am Nachmittag die CO<sub>2</sub>-Maxima nicht höher (tendenziell tiefer) als am Morgen.

Wie der Gesamtnote zudem zu entnehmen ist, sind die Lehrpersonen im Schulhaus Birch mit ihrer Lüftungsanlage am unzufriedensten. Nur 48.6% schätzen die Lüftungsanlage als genügend bis gut ein. Dies mag unter anderem an der Geräuschkulisse der Lüftung liegen, welche einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtbewertung hatte,  $F(20.850/44.75)=2.70$ ,  $p=0.04$ . Demnach sind Personen, welche die Geräusche der Lüftung als störend wahrnehmen auch deutlich unzufriedener mit der ganzen Lüftungsanlage. Auch die schlechte Einschätzung der Luftqualität wirkt sich direkt auf die Gesamtbenotung aus. Personen, welche die Raumluftqualität als schlecht beurteilen, benoten das gesamte Lüftungssystem signifikant schlechter,  $F(34.77/23.1)=8.97$ ,  $p=0.001$ . Interessanterweise hat aber die Dauer des Aufenthalts in einem Raum sowie die Häufigkeit mit der die Fenster geöffnet werden keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtbewertung.

### 3.4.4 Vergleich des Energiebedarfs zwischen den Steuerungsvarianten

Aus den Messdaten des Schulhauses im Birch (Wintermessung) lässt sich eine tägliche Laufzeit der Lüftung bei CO<sub>2</sub>-Steuerung von im Mittel 7.5 h bestimmen (Mittelwert inkl. Wochenende). Zusätzlich zeigte sich in den drei untersuchten Schulzimmern eine Gleichzeitigkeit des Lüftungsbetriebes von 80%. Daraus wurde für die Gesamtanlage eine mittlere Laufzeit (mit 100% Leistung) von 6 h pro Tag angenommen. Bei der präsenzgesteuerten Anlage liegt die mittlere Laufzeit (mit 100% Leistung) dagegen bereits bei 8 h pro Tag. Im Vergleich dazu läge die Laufzeit bei einer vergleichbaren rein zeitgesteuerten Anlage bei 11.5 h pro Tag (Mo-Fr: 06:00-18:00, sowie tägliche Spülung 01:00-04:00).

Energetische Kenndaten der Anlage im Schulhaus Birch (Trakt A):

Im Schulhaus Birch verfügt die Anlage über ein Erdregister und ein Kreislaufverbundsystem (KVS) zur Wärmerückgewinnung. Durch das Erdregister wird die Aussenluft vorgewärmt. Dadurch sinkt der Nachwärmbedarf. Gemäss den Messdaten weist das KVS-System einen Temperaturänderungsgrad von ca. 57% auf. Dieser Wert liegt deutlich tiefer als bei Kreuzgegenstromwärmetauschern (ca. 75%), ist aber typisch für diese Systemart. Dadurch erhöht sich der Nachwärmbedarf.

Die Anlage liegt mit gut 1600 Pa Gesamtdruckverlusten (Zu- und Abluft) deutlich über den neuen SIA Grenzwerten (700-1100 Pa). Dadurch ist der Leistungsbedarf für die Ventilatoren mit etwa 0.64 W/(m<sup>3</sup>/h) entsprechend erhöht.

Insbesondere durch die täglich zwischen 01:00-04:00 Nachts durchgeführte Spülung wird ein grösserer Wärme- und Strombedarf verursacht. Der Mehrverbrauch für die ganze Anlage (je 16400 m<sup>3</sup>/h Zuluft und Abluft) wird auf ca. 9.3 MWh Strom und 25.7 MWh Wärme pro Jahr geschätzt.

Energetische Kenndaten einer typischen, optimierten Anlage:

Um die Unterschiede zur Anlage im Schulhaus im Birch aufzuzeigen, wurde zusätzlich eine typische Anlage mit gutem Wärmerückgewinnungsgrad (75%) sowie deutlich niedrigeren Druckverlusten von 1000 Pa Gesamtdruckverlusten (Zu- und Abluft) gerechnet. Dies führt zu einem Leistungsbedarf für die Ventilatoren von etwa 0.4 W/(m<sup>3</sup>/h). Es wurde weiter angenommen, dass die Anlage ohne Erdregister betrieben wird und keine nächtliche Spülung erfolgt.

Vergleich der Steuerungsvarianten:

Die präsenzgesteuerte Anlage unterscheidet sich bezüglich Energie wie folgt von einem Lüftungsbetrieb rein nach einer Zeitsteuerung (Referenzanlage):

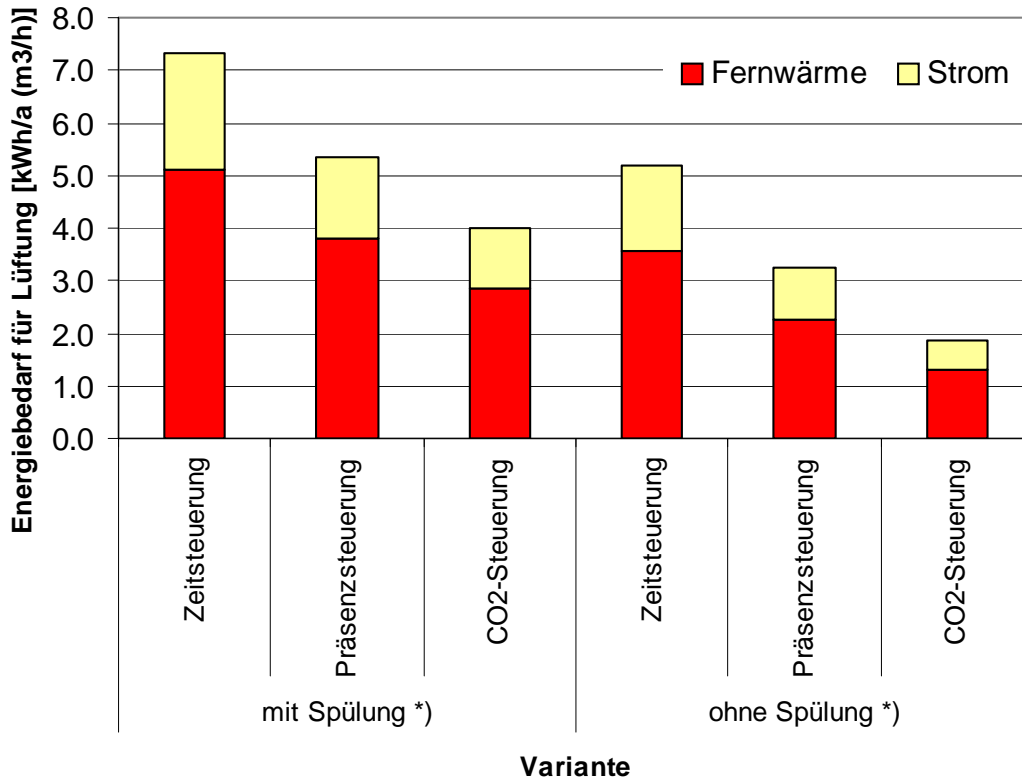
- **Anlage wie im Schulhaus Birch (Trakt A) vorhanden:** Verbrauchsreduktion für Elektrizität (29%) und Heizwärme (26%) durch die Präsenzsteuerung gegenüber der Referenzanlage. Dies entspricht für den Standort Zürich einer Verbrauchsreduktion von 0.6 kWh Strom sowie 1.3 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung gegenüber der Referenzanlage
- **Typische Anlage, optimiert:** Verbrauchsreduktion für Elektrizität (39%) und Heizwärme (37%) durch die Präsenzsteuerung gegenüber der Referenzanlage. Dies entspricht für den Standort Zürich einer Verbrauchsreduktion von 0.4 kWh Strom sowie 1.0 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung gegenüber der Referenzanlage

Die CO<sub>2</sub>-gesteuerte Anlage unterscheidet sich bezüglich Energie wie folgt von einem Lüftungsbetrieb rein nach einer Zeitsteuerung:

- **Anlage wie im Schulhaus Birch (Trakt A) vorhanden:** Verbrauchsreduktion für Elektrizität (48%) und Heizwärme (44%) durch die Präsenzsteuerung gegenüber der Referenzanlage. Dies entspricht für den Standort Zürich einer Verbrauchsreduktion von 1.0 kWh Strom sowie 2.3 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung gegenüber der Referenzanlage
- **Typische Anlage, optimiert:** Verbrauchsreduktion für Elektrizität (64%) und Heizwärme (64%) durch die Präsenzsteuerung gegenüber der Referenzanlage. Dies entspricht für den Standort Zürich einer Verbrauchsreduktion von 0.6 kWh Strom sowie 1.8 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung gegenüber der Referenzanlage

Abbildung 3.29 zeigt den spezifischen Energiebedarf für die verschiedenen Steuerungsvarianten für die Anlage wie sie im Schulhaus Birch (Trakt A) vorhanden ist (KVS-System und Erdregister). Im Schulhaus Birch ist derzeit mit einer täglichen Spülung zwischen 1:00 und 4:00 programmiert. Würde

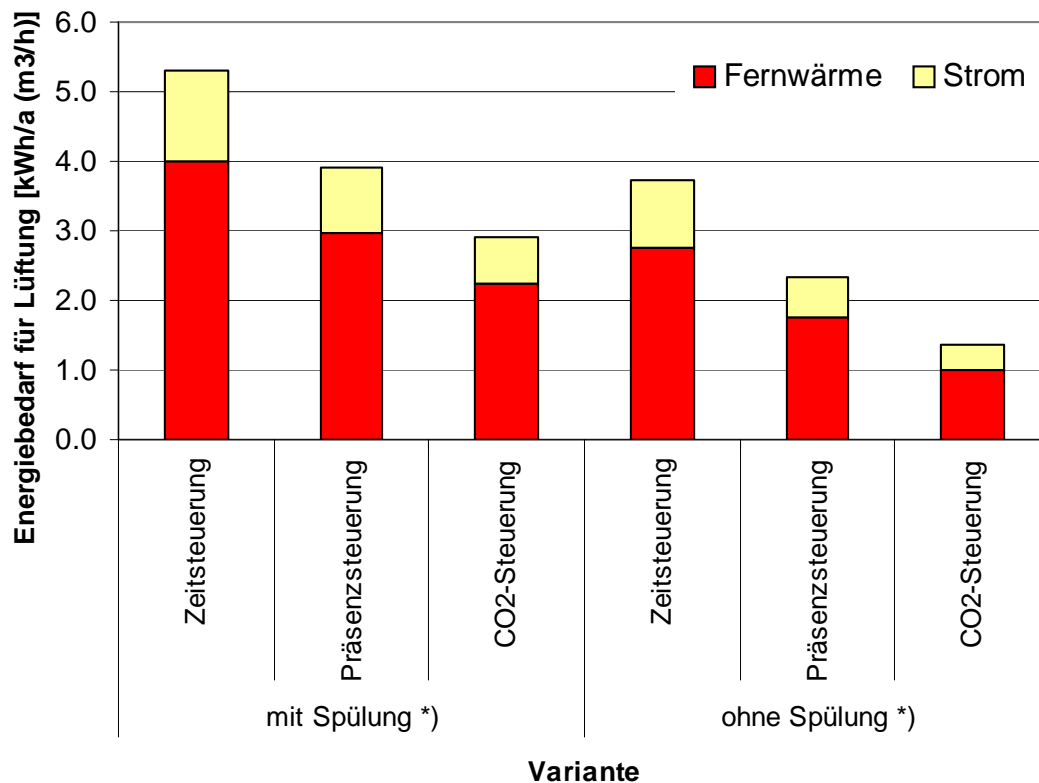
auf diese nächtliche Spülung verzichtet, so könnte der Energiebedarf der Anlage um 30% (Zeitsteuerung) bis 50% (CO<sub>2</sub>-Steuerung) reduziert werden. Die nächtliche Spülung ist für die Lüfterneuerung vor Schulbeginn nicht notwendig. Dazu reicht eine Betriebsaufnahme 1h vor Schulbeginn. Zumindest in der Heizperiode ist diese Spülung also kontraproduktiv und führt nur zu einem Energiemehrverbrauch ohne Nutzen.



\*) Spülung in der Nacht zwischen 1:00 und 4:00

Abbildung 3.32 Vergleich des spezifischen Energiebedarfs für Zeit- Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung. Lüftung mit 57% Wärmerückgewinnungsgrad und einem spezifischen Leistungsbedarf von 0.64 W/(m<sup>3</sup>/h)

Abbildung 3.33 zeigt den spezifischen Energiebedarf für die verschiedenen Steuerungsvarianten für die optimierte Anlage (geringere Druckverluste, guter Wärmerückgewinnungsgrad, kein Erdregister). Auch hier zeigt sich, dass der Verzicht auf die nächtliche Spülung zu deutlichen Reduktionen beim Energiebedarf führt. Ein zusätzliches Erdregister könnte den Wärmebedarf deutlich reduzieren (knapp 20% tieferer Energiebedarf).



\*) Spülung in der Nacht zwischen 1:00 und 4:00

Abbildung 3.33 Vergleich des spezifischen Energiebedarfs für Zeit-, Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung. Lüftung mit 75% Wärmerückgewinnungsgrad und einem spezifischen Strombedarf von 0.4 W/(m<sup>3</sup>/h)

### 3.4.5 Wirtschaftlichkeit der CO<sub>2</sub>- und präsenzgesteuerten Anlage

Wird die Wirtschaftlichkeit einer CO<sub>2</sub>-gesteuerten Anlage und einer präsenzgesteuerten Anlage mit einer rein zeitgesteuerten Anlage verglichen, so ist zuerst die zeitgesteuerte Referenzanlage genauer zu definieren. Die nachfolgenden Betrachtungen gehen bei der Referenzanlage von dem in der Stadt Zürich üblichen Raummodul für Schulraumlüftungsanlagen aus. Die Anlage kann wie folgt charakterisiert werden:

- Jeder Raum verfügt über mechanisch einstellbare Volumenstromregler in der Zuluft und Abluft, welche die Sollluftmenge sicherstellen. Durch die fixe Einstellung ist keine Reduktion der Luftmenge bei Teilbelegung möglich
- Die Anlage wird zentral über ein Zeitprogramm gesteuert. Die Betriebszeiten sind für alle Schulräume identisch

Die präsenzgesteuerte Anlage unterscheidet sich wie folgt von der Referenzanlage:

- Jeder Raum verfügt über motorisch angesteuerte Volumenstromregler in der Zuluft und Abluft
- Der Präsenzmelder (PIR-Sensor) wird als vorhanden angenommen (für Beleuchtung). Zusätzlich wird nur die Ansteuerung des Volumenstromreglers (ein /aus) einbezogen (Verkabelung, Regler)
- Verbrauchsreduktion von 0.4 bis 0.6 kWh Strom sowie 1.0 bis 1.3 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung gegenüber der Referenzanlage. Die Bandbreite ist abhängig von der Anlagenkonzeption und den Leistungswerten der Anlage (siehe Kapitel 3.4.4).

Die CO<sub>2</sub>-gesteuerte Anlage unterscheidet sich wie folgt von der Referenzanlage:

- Jeder Raum verfügt über motorisch angesteuerte Volumenstromregler in der Zuluft und Abluft
- Für jeden Raum wird ein CO<sub>2</sub>-Sensor benötigt. Zusätzlich muss die Ansteuerung und Regelung des Volumenstromreglers (0-100%) einbezogen (Verkabelung, Regler) werden
- Verbrauchsreduktion von 0.6 bis 1.0 kWh Strom sowie 1.8 bis 2.3 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung gegenüber der Referenzanlage. Die Bandbreite ist abhängig von der Anlagenkonzeption und den Leistungswerten der Anlage (siehe Kapitel 3.4.4).

Für die Berechnung der Jahreskosten in Abbildung 3.34 wurde das Berechnungstool aus dem Projekts LUKRETIA I verwendet. Die dargestellten Jahreskosten basieren auf der in Tabelle 3.3 dargestellten Konstanten und Preissteigerungen Berechnungsbasis:

Tabelle 3.3 Für Berechnung verwendete Konstanten und Preissteigerungen

Konstanten		
Nutzungsdauer des Gebäudes	a	77
Kapitalzinssatz	%/a	2.50
Jährliche Preissteigerung Arbeit	%/a	0.50
Jährliche Preissteigerung Energie (Wärme)	%/a	1.25
Jährliche Preissteigerung Energie (Strom)	%/a	1.00
Verwaltungskosten Immo (in % der Bauteilinvestitionskosten)	%	2.30
Gebäudeversicherungskosten (in % der Bauteilinvestitionskosten)	%	0.40
Interne Leistungsverrechnung	%	0.40

In Tabelle 3.2 sind die in der Berechnung verwendete heutige Kosten, Energiepreise und Energiemengen dargestellt. Die Daten beziehen sich auf einen Raum mit einer Luftmenge von 500 m<sup>3</sup>/h. Für die Berechnung der Energiemengen wurde von einem Wärmerückgewinnungsgrad von 57% und einem spezifischen Strombedarf von 0.64 W/(m<sup>3</sup>/h) ausgegangen. Zudem wurde ein Erdregister und täglich ein Spülvorgang zwischen 01:00 und 04:00 einbezogen.

Tabelle 3.2 Anlage „im Birch“; Für Berechnung verwendete heutige Kosten, Energiepreise und Energiemengen

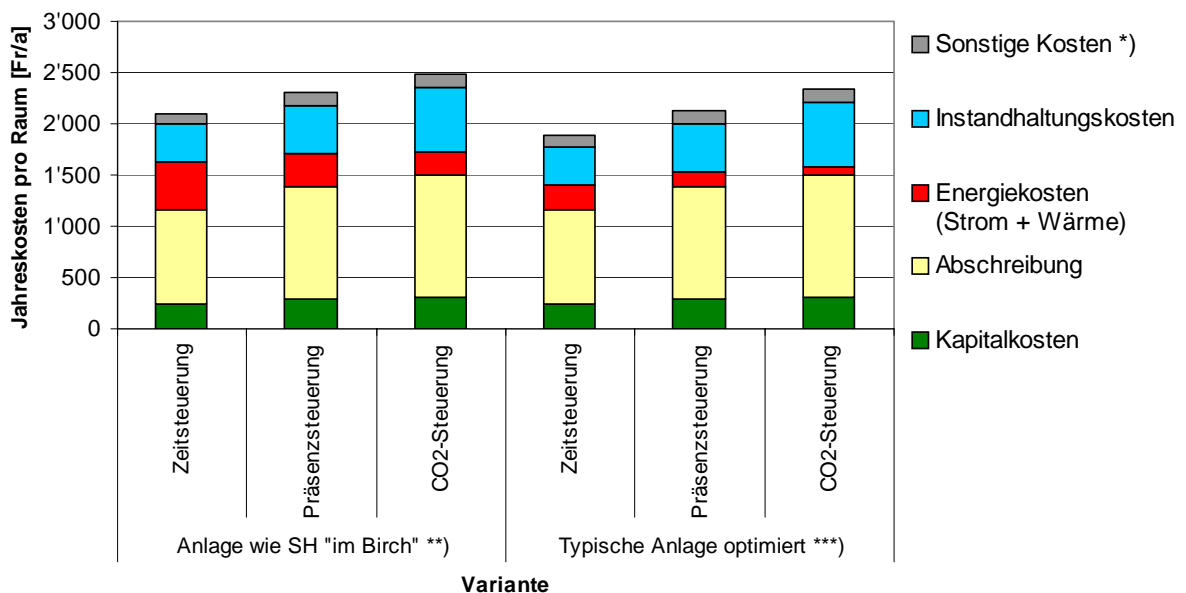
Objektdaten				
Objektbezeichnung:	Lüftungssteuerung Schulräume; Anlage wie SH "im Birch"			
Untersuchtes Bauteil:	Schulzimmer mit 500 m <sup>3</sup> /h Luftmenge; WRG 57%, Leistung 0.64 W/(m <sup>3</sup> /h), mit Spülung Nachts, mit Erdregister			
Eingabegrößen		Zeitsteuerung	Präsenzsteuerung	CO <sub>2</sub> -Steuerung
Nutzungsdauer des Bauteils	a	20	20	20
Investitionskosten	CHF	17'000	20'100	21'800
Instandhaltungskosten pro Intervall	CHF	330	420	550
Energiekosten (Wärme)	CHF/a	188	139	104
Energiekosten (Strom)	CHF/a	135	90	62
Energiekosten Fernwärme	Rp/kWh	7.3	7.3	7.3
Energiekosten Strom HT	Rp/kWh	14.0	14.0	14.0
Energiekosten Strom NT	Rp/kWh	7.4	7.4	7.4
Anteil Strom NT (v.A. Spülung)	%	26%	37%	49%
Energiemenge Fernwärme	kWh/a	2'564	1'903	1'427
Energiemenge Strom	kWh/a	1'095	780	574

In Tabelle 3.4 sind die in der Berechnung verwendete heutige Kosten, Energiepreise und Energiemengen dargestellt. Die Daten beziehen sich auf einen Raum mit einer Luftmenge von 500 m<sup>3</sup>/h. Für die Berechnung der Energiemengen wurde von einem Wärmerückgewinnungsgrad von 75% und einem spezifischen Strombedarf von 0.4 W/(m<sup>3</sup>/h) ausgegangen. Hier wurde kein Erdregister und auch kein Spülvorgang einbezogen.

Tabelle 3.4 Optimierte Anlage; Für Berechnung verwendete heutige Kosten, Energiepreise und Energiemengen

Objektbezeichnung: Lüftungssteuerung Schulräume, Typische Anlage optimiert				
Untersuchtes Bauteil: Schulzimmer mit 500 m <sup>3</sup> /h Luftmenge; WRG 75%, Leistung 0.4 W/(m <sup>3</sup> /h), ohne Spülung Nachts, ohne Erdregister				
Eingabegrößen		Zeitsteuerung	Präsenzsteuerung	CO <sub>2</sub> -Steuerung
Nutzungsdauer des Bauteils	a	20	20	20
Investitionskosten	CHF	17'000	20'100	21'800
Instandhaltungskosten pro Intervall	CHF	330	420	550
Energiekosten (Wärme)	CHF/a	101	64	37
Energiekosten (Strom)	CHF/a	68	41	24
Energiekosten Fernwärme	Rp/kWh	7.3	7.3	7.3
Energiekosten Strom HT	Rp/kWh	14.0	14.0	14.0
Energiekosten Strom NT	Rp/kWh	7.4	7.4	7.4
Anteil Strom NT (keine Spülung)	%	0%	2%	0%
Energiemenge Fernwärme	kWh/a	1'384	873	500
Energiemenge Strom	kWh/a	486	297	174

Wie Abbildung 3.34 zeigt, sind die Jahreskosten für die CO<sub>2</sub>-Steuerung trotz einer Energieeinsparung von über 40% gegenüber der Zeitsteuerung deutlich höher (18-24%). Der Grund dafür liegt vor allem in den deutlich höheren Instandhaltungskosten aber auch in den höheren Investitionskosten. Vergleichbares gilt auch für die Präsenzsteuerung. In diesem Fall sind die Energieeinsparung geringer (knapp 30%) aber auch die Mehrkosten gegenüber der Zeitsteuerung (10-13%).



\*) Verwaltungskosten, Gebäudeversicherungskosten, Interne Leistungsverrechnung

\*\*) Anlage mit Erdregister, Spülung Nachts 1:00-4:00, KVS-System mit 57% WRG, Ventilatorleistung: 0.64 W/(m<sup>3</sup>/h)

\*\*\*) Anlage ohne Erdregister, keine Spülung Nachts, Wärmetauscher mit 75% WRG, Ventilatorleistung: 0.4 W/(m<sup>3</sup>/h)

Abbildung 3.34 Vergleich der Jahreskosten für Zeit- Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung. Raum mit 500 m<sup>3</sup>/h Luftmenge

Je grösser die Auslegungsluftmenge des Raums, desto geringer sind die prozentualen Mehrkosten. Eine CO<sub>2</sub>-Steuerung ist also vor allem für grössere Räume von Interesse und insbesondere dann wenn im Raum sehr unterschiedliche Belegungen vorkommen.

Abbildung 3.34 zeigt zudem, dass deutliche Reduktionen in den Jahreskosten auch durch eine effiziente Anlage (Druckverluste, Wärmerückgewinnungsgrad) und die Optimierung der Betriebszeiten erzielt werden kann. Für diese „optimierte Anlage“ sind die prozentualen Einsparungen durch die bedarfsgerechte Steuerung höher, was sich aber aufgrund der bereits tiefen Energiekosten nicht wesentlich auf die Differenzkosten zwischen den Steuerungsvarianten auswirkt.

### 3.5. SYNTHESE SCHULHAUS BIRCH

Im Schulhaus Birch zeigen sich verschiedene kritische Punkte, welche die Beurteilung der Lüftungsanlage durch die Nutzer beeinflussen:

- Die grossen Glasflächen am Gebäude verschärfen die Problematik des thermischen Raumkomforts (Überhitzung im Sommer, Kaltluftabfall im Winter). Entstehende Komfortprobleme beeinflussen die Beurteilung der Lüftungsanlage (Erwartungshaltung).
- Die zur Verfügung stehenden Luftmengen pro Schüler sind knapp bemessen. Dadurch kann die Lüftungsanlage bei Vollbelegung die Luftqualität nicht immer gewährleisten, was sich auf die Beurteilung der Lüftungsanlage durch die Nutzer auswirkt.
- Die Anlage wurde ursprünglich für eine kontinuierliche Regelung der Luftmenge pro Zimmer (entsprechend dem CO<sub>2</sub>-Gehalt) geplant. Aus Kostengründen wurde die Regelung vereinfacht und funktioniert heute im Prinzip als Präsenzsteuerung mit (CO<sub>2</sub>-gesteuertem) Nachlauf. Dadurch wurden für ein an sich einfaches Regelungskonzept teure Komponenten (kontinuierlich regelbare Volumenstromregler) eingebaut.

Die Regelung der einzelnen Zimmern mit Volumenstromreglern, welche jedoch nur im Ein-/ Aus Betrieb angesteuert werden ist aufwändig und erlaubt trotzdem keine wirklich bedarfsgerechte Luftmengensteuerung. Daher ist in diesem Fall der Aufwand gross für die erzielte Energiereduktion. Im Weiteren wurden folgende Punkte festgestellt, welche eine korrekte Regelung erschweren:

- Die Messungen zeigten, dass die eingesetzten CO<sub>2</sub>-Fühler Qualitätsprobleme aufweisen. Teilweise wurden starke Messwertschwankungen und Offsets der Messfühler festgestellt. In der derzeit eingesetzten Regelungsart (Präsenzsteuerung) hat dies nur einen geringen Einfluss (im schlechten Fall wird zuviel gelüftet).
- Für eine Umsetzung eines rein CO<sub>2</sub>-gesteuerten Betriebs ist eine hohe Zuverlässigkeit der Messaufnehmer von grosser Bedeutung.
- CO<sub>2</sub>- Fühler des Leitsystems sind nicht optimal platziert. Es besteht ein erhebliches Risiko für Fühlerbeschädigung. Der heutige Standort ist aufgrund der möglichen Luftströmung bei offenem Fenster und offener Türe gegen den Gemeinschaftsraum nicht optimal. Dies muss bei der Wahl des Standortes unbedingt berücksichtigt werden, da die Fühler empfindlich sind und an einem durch Fenster- oder Türöffnung möglichst wenig beeinflussten Standort eingesetzt werden sollten.

Eine CO<sub>2</sub>-Steuerung für die Schulzimmer ist vor allem für Räume mit stark variierender Belegung von Bedeutung, wo eine reine Präsenzsteuerung zu zu hohen Laufzeiten der Lüftung führen würde. In den gemessenen Zimmern des Schulhauses Birch war dies zwar nicht ausgeprägt der Fall. Durch eine CO<sub>2</sub>-Steuerung könnte jedoch der Lüftungsbetrieb in den Zimmern um ca. 20% reduziert werden. Im Vergleich zu einer Zeitsteuerung beträgt die Reduktion des Lüftungsbetriebs in den Zimmern sogar etwa 40%.

Die Mehrkosten für eine CO<sub>2</sub>-Steuerung aber auch für eine Präsenzsteuerung sind durch die für jedes Zimmer notwendige Zusatzausrüstung (Volumenstromregler, Steuersignal, etc.) beträchtlich. Dadurch können die Mehrkosten nicht durch die über die Lebensdauer eingesparten Energiekosten kompensiert werden.

Dies gilt zumindest für dieses untersuchte Primarschulhaus. Für Schulhäuser mit stärker variierender Belegung wie Gymnasien / Fachhochschulen sowie grösseren Räumen, könnte die Wirtschaftlichkeit der CO<sub>2</sub>-Steuerung durchaus gegeben sein (vgl. auch Kapitel 8.2).

## 4. Kantonsschule Wetzikon, KZO

### 4.1. KANTONSSCHULE WETZIKON, KZO – BESCHRIEB

Die KZO liegt in Fussdistanz zum Bahnhof Wetzikon und wurde 1955 als erste Land-Mittelschule des Kantons gebaut. Heute besuchen rund 1200 Schülerinnen und Schüler die Schule. 170 Lehrerinnen und Lehrer unterrichten sie in allen gymnasialen Fächern in über 50 Klassen. Insgesamt umfasst die Schulanlage 84 Unterrichtszimmer in der grossen Schulanlage.

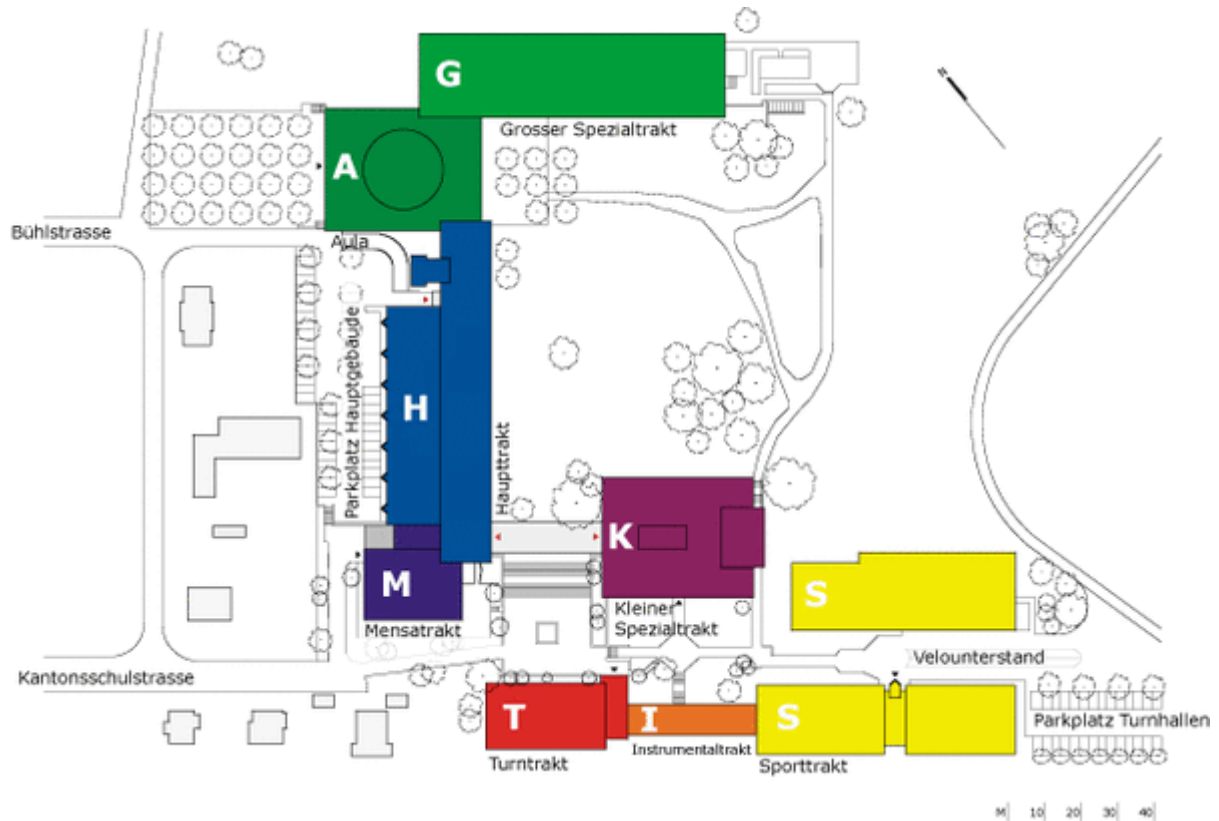


Abbildung 4.1 Gebäudesituation Schulanlage KZO

Die drei Schulräume mit einer mechanischen Lüftung befinden sich im Mensatrakt M. Im Trakt K wurden die Messungen zu den manuell gelüfteten Räumen durchgeführt.



Abbildung 4.2 KZO: Mensatrakt mit den Unterrichtszimmern im Obergeschoss; im Hintergrund der Trakt K (links neben der Strassenlampe ist der Luftansaug im Obergeschoss erkennbar)

Die Unterrichtsräume werden über Luft-Durchlässe im Deckenbereich entlang der Innenwand versorgt. Die Abluft wird direkt unterhalb der Zuluft-Durchlässe über ein Wandgitter abgesogen. Die Zimmer haben einen Handschalter für die Lüftung (nur Aus / Ein, keine variable Luftmenge) sowie eine Zeitschaltuhrfunktion. Der Planungswert für die Zu- und Abluftmenge pro Zimmer liegt bei 650 m<sup>3</sup>/h. Gemäss Inbetriebsetzungsprotokollen stimmt diese Luftmenge weitgehend (-5% im Zimmer ME03). Die eigenen Messungen mit fünf Messpunkten über das Lüftungsgitter zeigen allerdings eine deutlich geringere Luftmenge (vgl. Abbildung 4.8).

Die Fenster in den Unterrichtszimmern können grossflächig geöffnet werden (Schiebefenster).

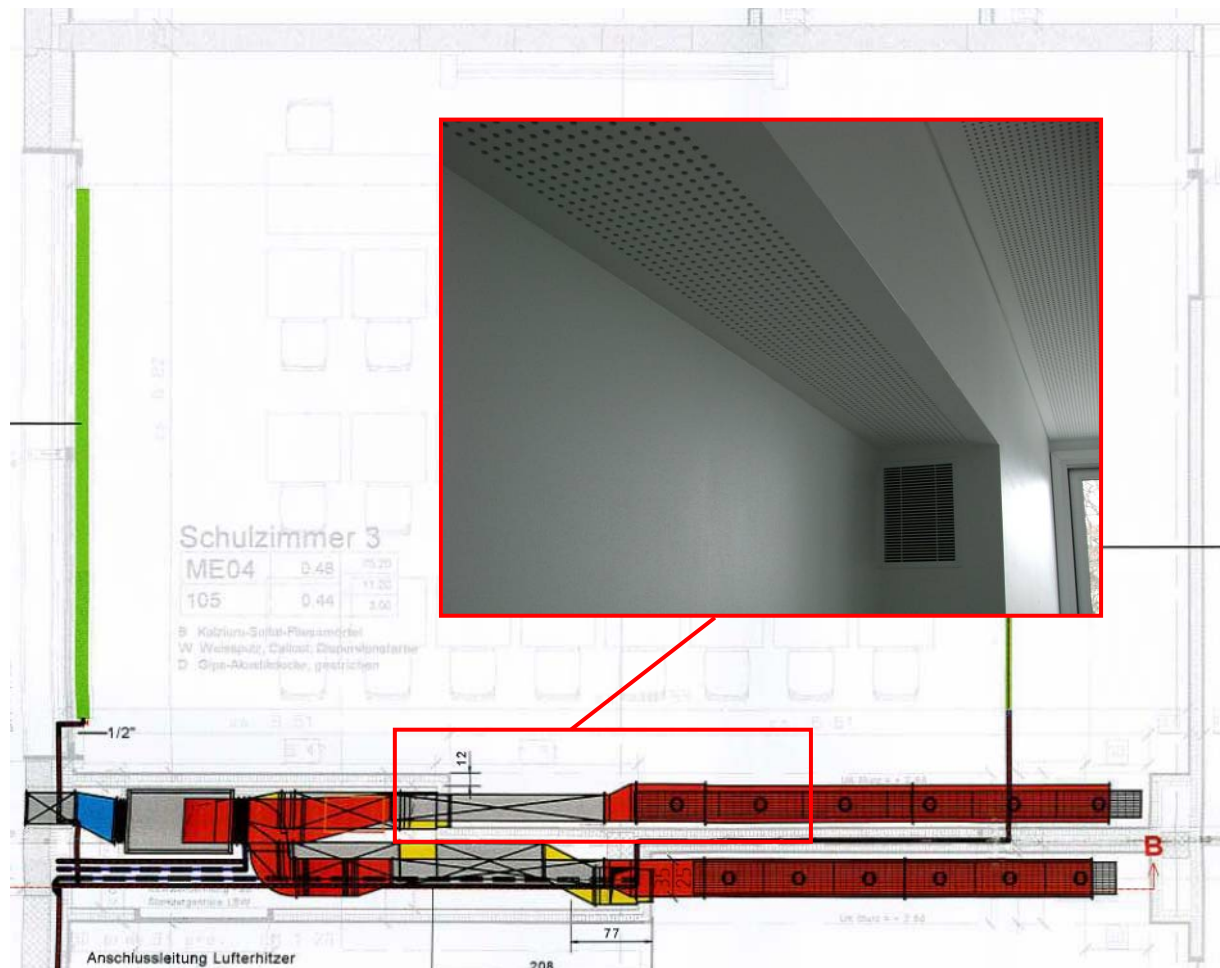
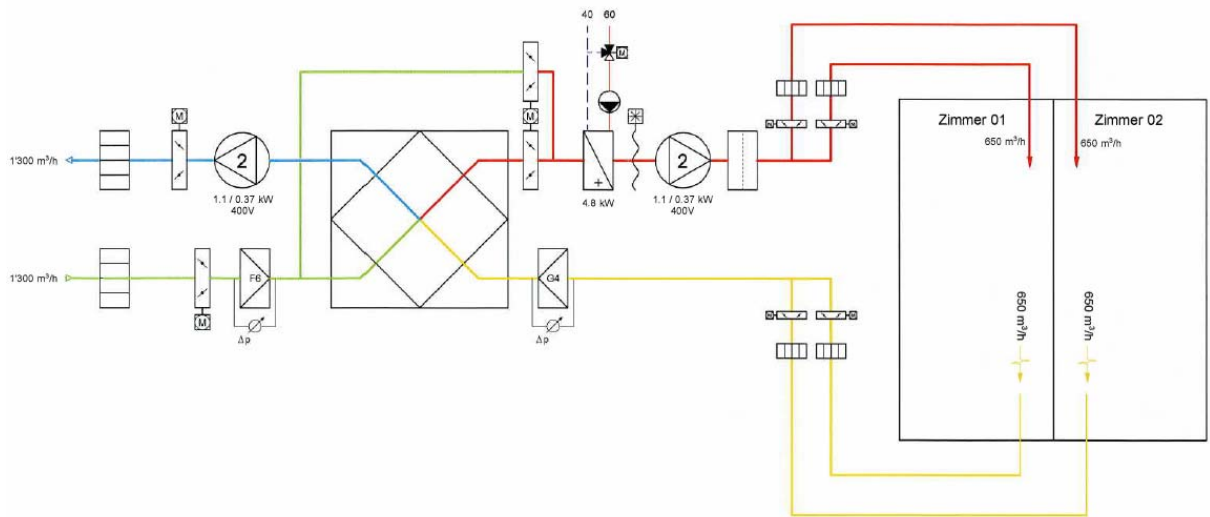
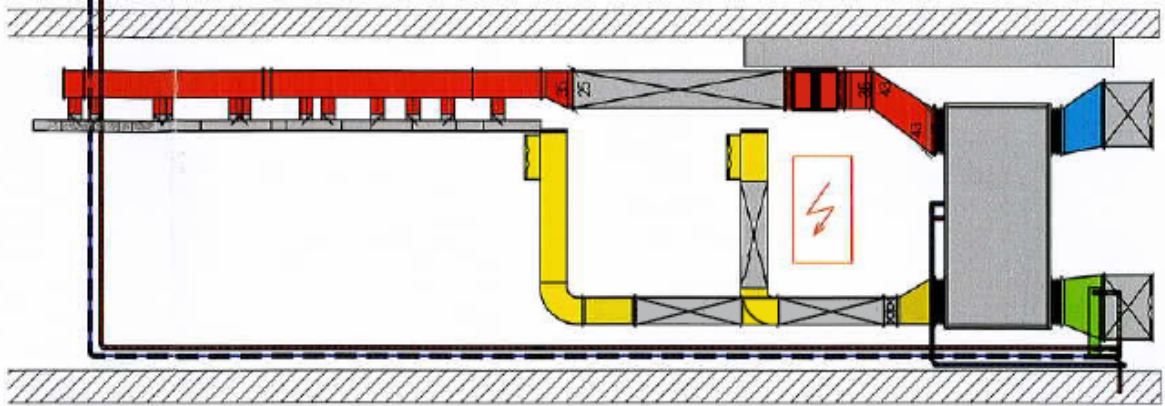


Abbildung 4.3 KZO: Grundriss des Unterrichtszimmers ME04 mit fotografischer Ansicht der Nische mit Zu- und Abluft; ganz unten die Luftverteilung des angrenzenden Unterrichtszimmers ME03



**Schnitt A - A**



**Schnitt B - B**

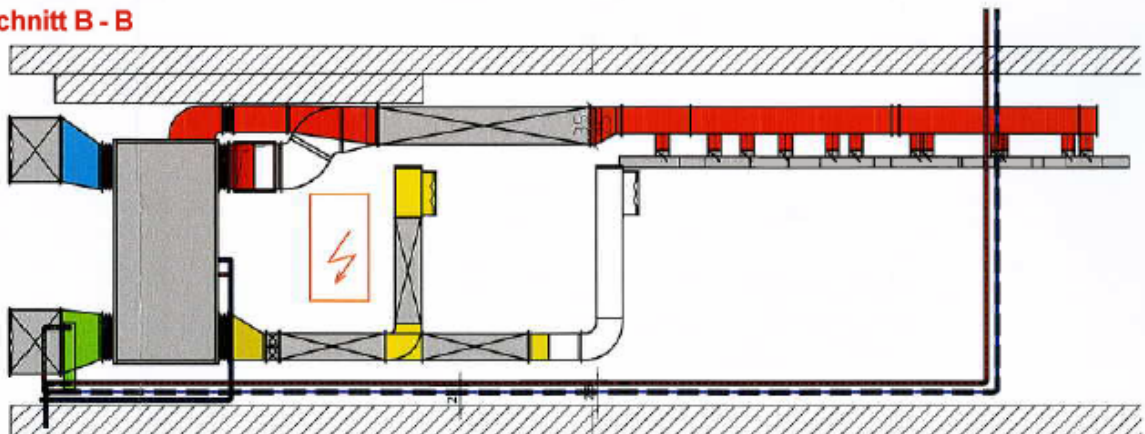


Abbildung 4.4 KZO: Schema und Schnitt der Lüftungsanlage

## 4.2. KZO – MESSUNGEN

Die Messstellen wurden im Bereich der Brüstung sowie bei der Wandtafel angebracht. Bei den fenstergelüfteten Räumen wurde ganz hinten und im Bereich der Innenwand gemessen. Die Lehrkräfte und Schüler wurden über die Visualisierung der Luftqualität ausführlich schriftlich informiert.

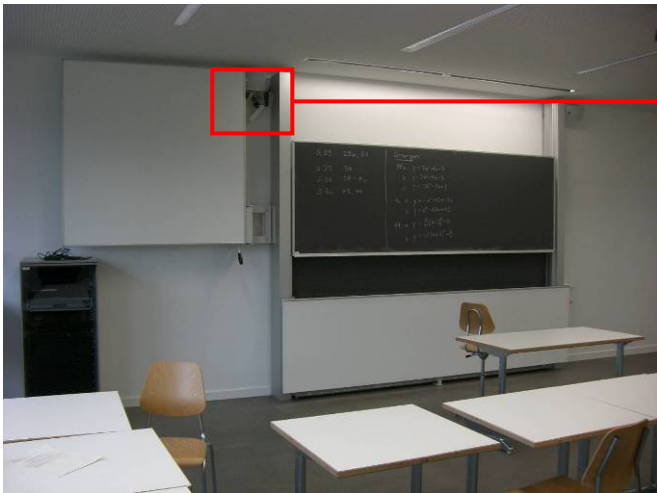


Abbildung 4.5 KZO: Platzierung des Messgerätes

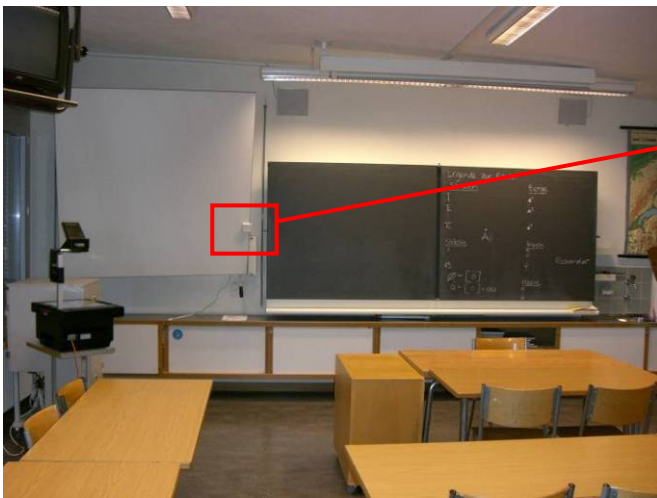


Abbildung 4.6 KZO: Visualisierung der Luftqualität

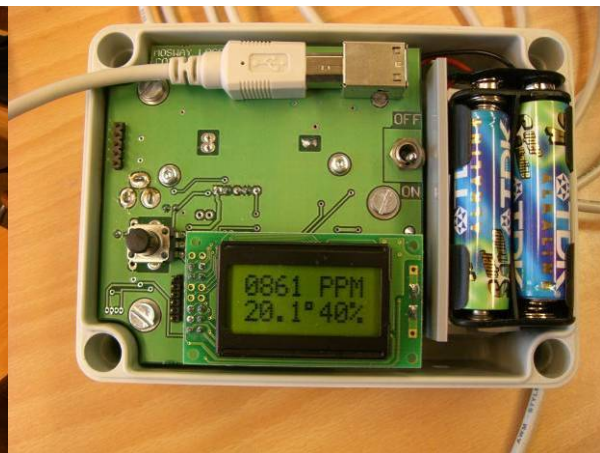
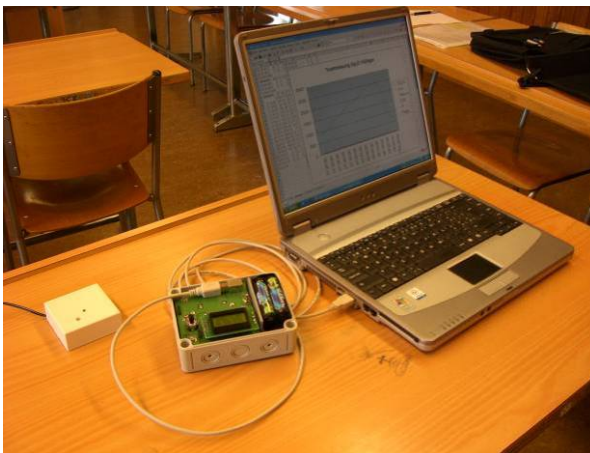


Abbildung 4.7 KZO: Messgerät und Auslesung auf PC

### 4.3. MESSERGEBNISSE

In diesem Schulhaus wurden nur im Winter Messungen durchgeführt, da davon ausgegangen wird, dass wegen der ruhigen Lage, im Sommer die Fenster sehr oft offen stehen.

### 4.3.1 Luftmengenmessungen

Um eine korrekte Interpretation der Messresultate vornehmen zu können wurden Luftmengenmessungen in den untersuchten Unterrichtszimmern vorgenommen. Die Messungen zeigten in zwei Zimmern grössere Abweichungen zu den Sollwerten der Luftmengen.

Zu den Resultaten in Abbildung 4.8 ist anzumerken, dass die Luftmengenmessungen mit Unsicherheiten von etwa 20% des Messwertes behaftet sind. Trotzdem kann festgestellt werden, dass in allen Räumen die SOLL-Luftmengen nicht erreicht sind. Die Sichtung der Abnahme-Messprotokolle lässt zudem grosse Zweifel aufkommen, ob die Luftmengen jemals höher waren.

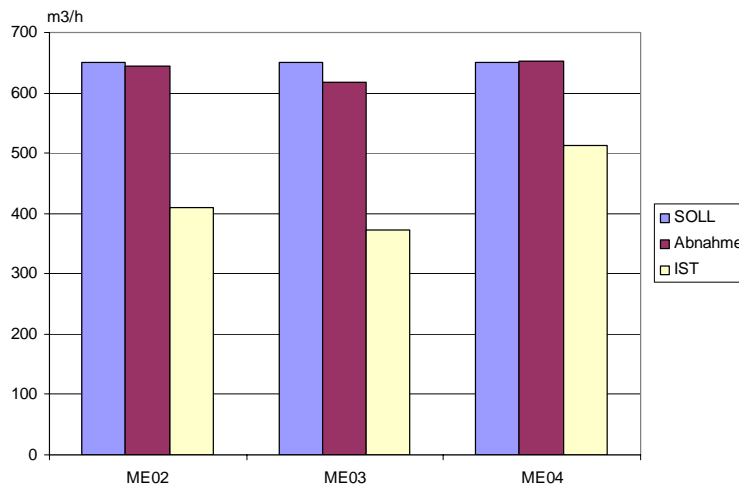


Abbildung 4.8 Luftmengenmessung, Abluftgitter der Unterrichtszimmer

### 4.3.2 Raumluftzustandsmessungen

In den drei untersuchten Räumen wurden CO<sub>2</sub>-Gehalt sowie Raumlufttemperatur und relative Feuchte mittels Datenlogger erfasst. Aus den Nutzerprotokollen wurden die aufgezeichnete Präsenz, sowie spezielle Fensterlüftungen erfasst.

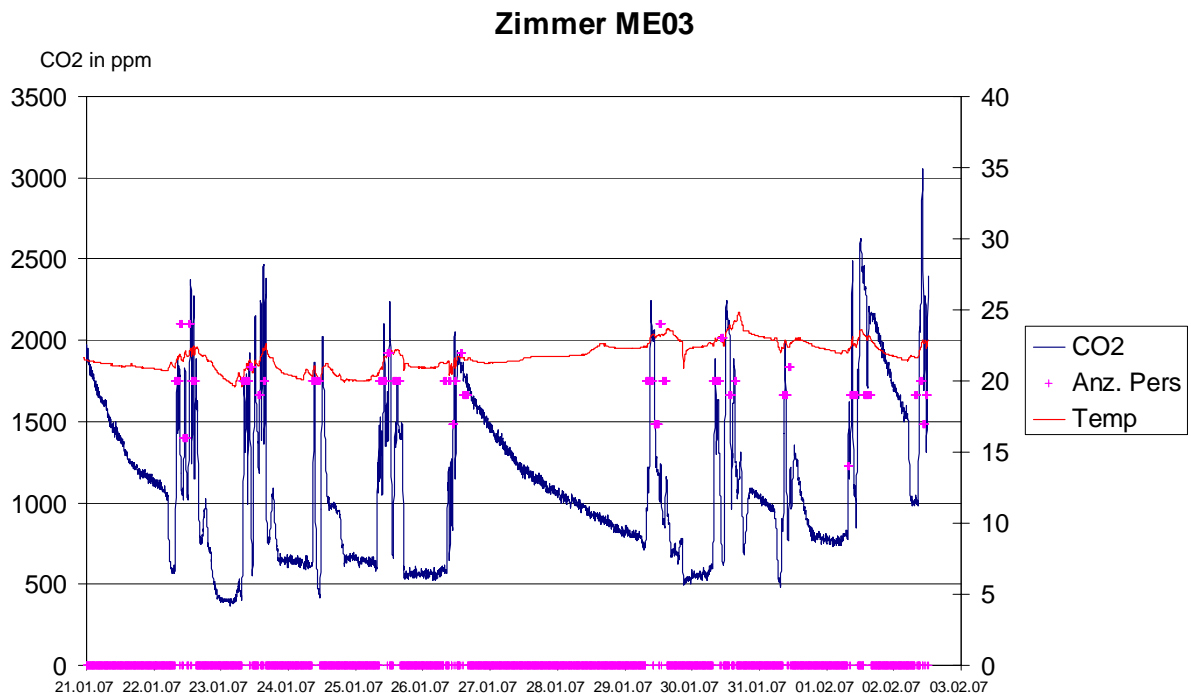


Abbildung 4.9 Zimmer ME03: CO<sub>2</sub>-Werte, Raumlufttemperatur und Personenpräsenz über ganze Messperiode Winter

## Zimmer ME04

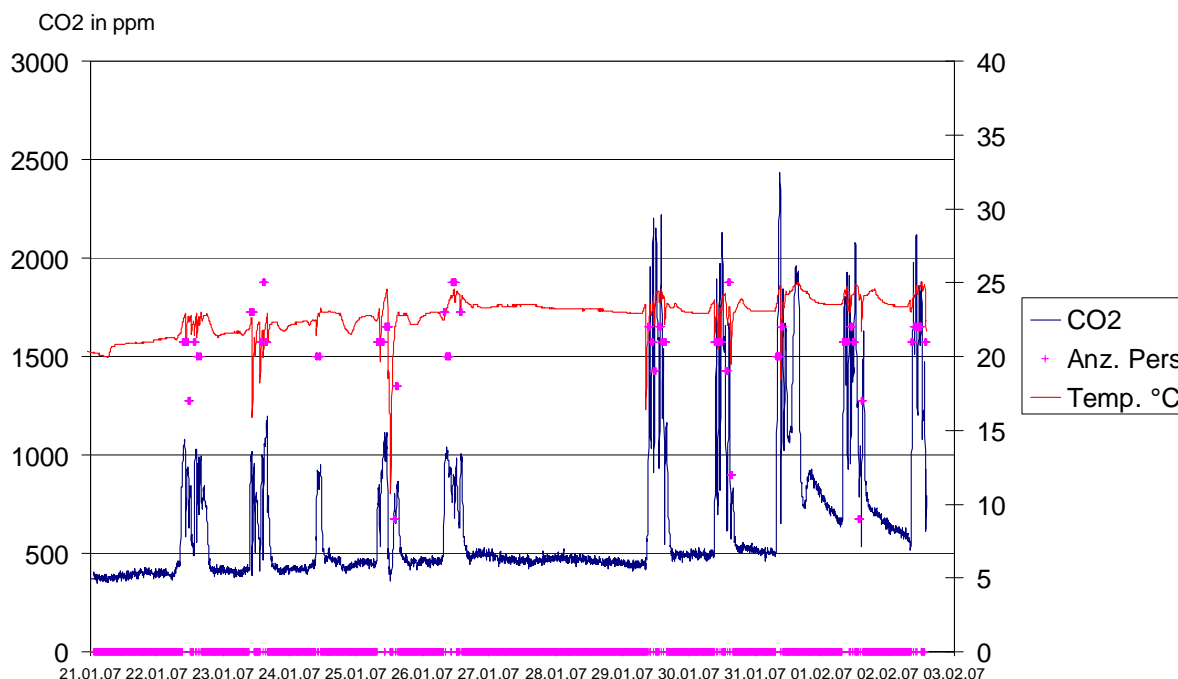


Abbildung 4.10 Zimmer ME04: CO<sub>2</sub>-Werte, Raumlufttemperatur und Personenpräsenz über ganze Messperiode Winter

Die Messperiode dauerte vom 21.01.07 bis 03.02.07, gemessen wurde in 5 Min-Intervall.

Zur Genauigkeit der Datenlogger vgl. Kapitel 3.

Für die Auswertung wurden die CO<sub>2</sub>-Messwerte in 4 Kategorien gruppiert und grundsätzlich nach „Personenpräsenz“ unterschieden:

(Präsenz = alle 5 Min-Intervalle während denen Schüler gemäss Stundenplan anwesend sind)

1. Kategorie	Luftqualität „sehr gut“	< 800 ppm
2. Kategorie	Luftqualität „gut“	800 - 1000 ppm
3. Kategorie	Luftqualität „mässig“	1000 - 1400 ppm
4. Kategorie	Luftqualität „abgestanden“	> 1400 ppm

### 4.3.3 Zimmer ME03

Dieses Zimmer ist nach Süd-West ausgerichtet. Die Lüftung sollte eigentlich tagsüber konstant in Betrieb sein. Die Personenbelegung lag zwischen 17 und 24, im Mittel 21 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa 18 m<sup>3</sup>/h (gesamt: 373 m<sup>3</sup>/h). Die Raumlufttemperatur variierte zwischen 19.6 und 24.8°C. Der Mittelwert lag bei 21.7°C. Für die relative Luftfeuchtigkeit lagen die Werte zwischen 26 und 54, im Mittel bei 39%.

Das Klassenzimmer wird, gemäss dem Nutzerprotokoll, hauptsächlich am Vormittag benutzt. Je nach Lehrperson wird unterschiedlich oft zusätzlich über die Fenster gelüftet.

Abbildung 4.11 zeigt wie häufig die CO<sub>2</sub>-Werte im jeweiligen Bereich gemessen wurden (während Präsenzzeit). Der Raum wurde nur 14 % der Zeit benutzt. Die Lüftung arbeitet hier insgesamt zu wenig wirksam, was zu hohen CO<sub>2</sub>-Werten führt.

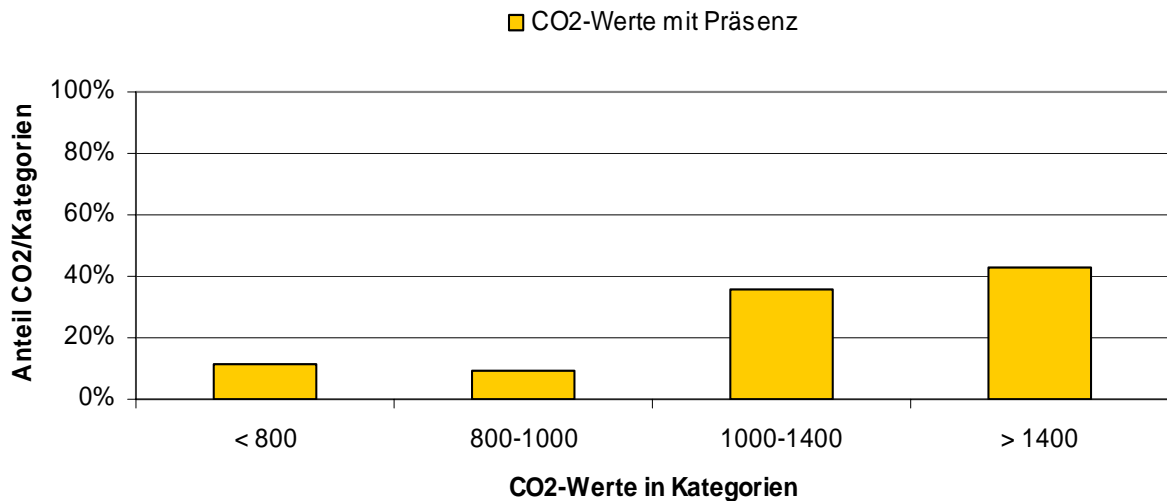


Abbildung 4.11 Zimmer ME03: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (=14%)

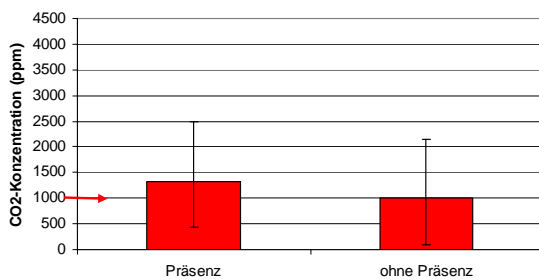


Abbildung 4.12 Zimmer ME03: Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

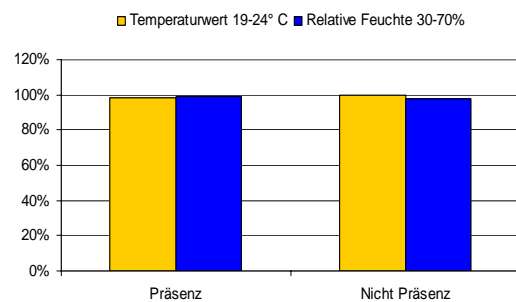


Abbildung 4.13 Zimmer ME03: Die Komfortbereiche sind für Raumtemperatur und Feuchtigkeit gut eingehalten

Abbildung 4.12 zeigt, dass der angestrebte Präsenzmittelwert von 1000 ppm klar überschritten ist.

#### 4.3.4 Zimmer ME04

Dieses Zimmer ist nach Nord-West ausgerichtet. Die Lüftung sollte eigentlich tagsüber konstant in Betrieb sein. Die Personenbelegung lag zwischen 9 und 25, im Mittel 21 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa 25 m<sup>3</sup>/h (gesamt: 513 m<sup>3</sup>/h). Die Raumlufttemperatur variierte zwischen 10.7 und 25.1°C. Der Mittelwert lag bei 22.7°C. Für die relative Luftfeuchtigkeit lagen die Werte zwischen 17 und 43 %, im Mittel bei 27 %. Wie aus Abbildung 4.10 hervorgeht, wurde aber in den beiden Wochen sehr unterschiedlich gelüftet.

Das Klassenzimmer wird, gemäss dem Nutzerprotokoll, hauptsächlich am Vormittag benutzt. Je nach Lehrperson wird unterschiedlich oft zusätzlich über die Fenster gelüftet.

Abbildung 4.14 zeigt wie häufig die CO<sub>2</sub>-Werte im jeweiligen Bereich gemessen wurden (während Präsenzzeit). Der Raum wurde 14 % der Zeit benutzt.

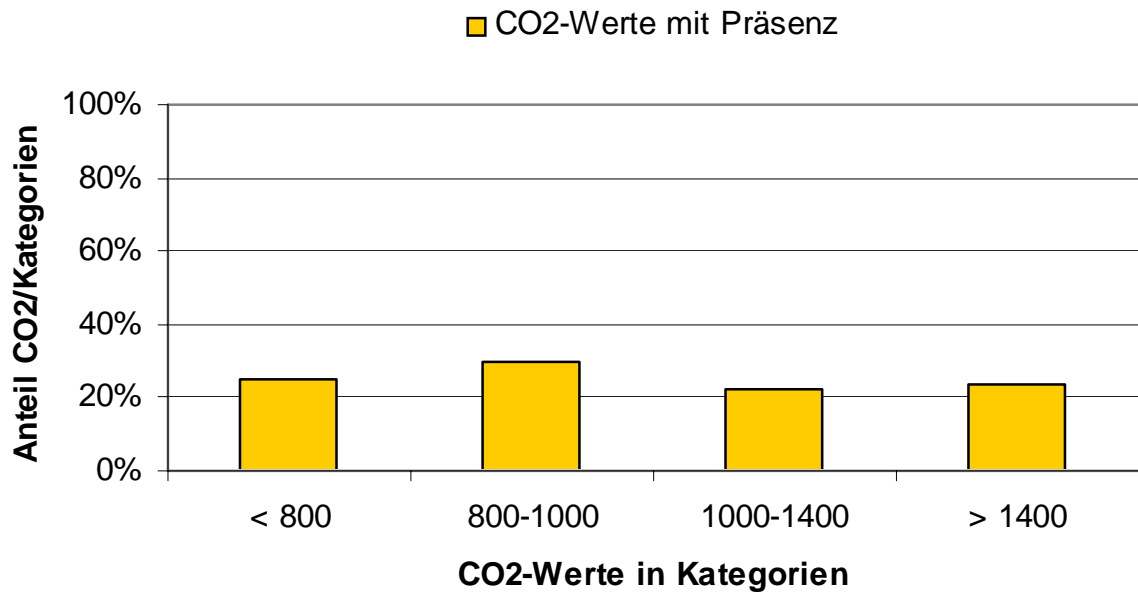


Abbildung 4.14 Zimmer ME04: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (= 14%)

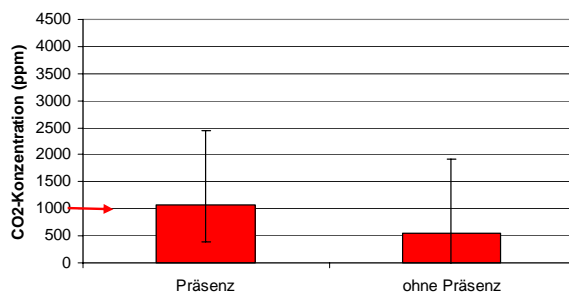


Abbildung 4.15 Zimmer ME04: Mittelwerte, Min- und Maxwerte der CO<sub>2</sub>-Gehalt

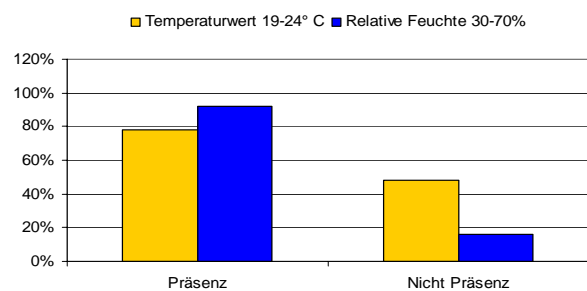


Abbildung 4.16 Zimmer ME04: Die Komfortbereiche sind für Raumtemperatur und Feuchtigkeit schlecht eingehalten

Diese gemittelten Werte sagen für diese Messperiode nicht viel aus, da in den beiden Wochen sehr unterschiedliche Verhältnisse herrschten. Ein Blick auf den Messverlauf (Abbildung 4.10) zeigt: Die Lüftung arbeitet hier vor allem in der ersten Woche wirksam, was zu guten CO<sub>2</sub>-Werten führt. In der zweiten Woche funktionierte die Lüftung offensichtlich nicht. In beiden Wochen werden aber immer auch die Fenster kurzzeitig geöffnet, was in den tiefen Temperaturschlägen sichtbar wird.

Wird die Anordnung des Zuluft- und Abluftdurchlass betrachtet (z.B. im Schema Abbildung 4.4) so stellt sich auch die Frage, ob bei einer solchen Nischenanordnung auch wirklich eine genügende Lüftungswirksamkeit erreicht wird.

Diesem sonderbaren Lüftungsverhältnissen versuchte man mit einer zweiten Messung an einem Vormittag nochmals auf die Spur zu kommen. Während dieser Lektionen wurde darauf geachtet, dass die Fenster nicht geöffnet wurden (nur in den Pausen). Gemäss Hausdienst war die Lüftung immer in Betrieb; d.h. die Luftmengen gemäss Abbildung 4.8 sollten vorhanden sein.

Etwas Unerklärliches hat sich dann zwischen der zweiten und dritten Lektion ereignet: Das schlecht gelüftete Klassenzimmer ME03 wird nun plötzlich richtig gelüftet, während nun ME04 nicht mehr gelüftet wird (=steiler Anstieg des CO<sub>2</sub>). Obwohl uns angegeben wurde, dass hier konstanter Betrieb herrsche, ist dies mitnichten der Fall. Wenn man solche Zustände antrifft wundert es niemanden, wenn die Nutzer unzufrieden sind und die Fenster öffnen.

## Zimmer ME02,03,04

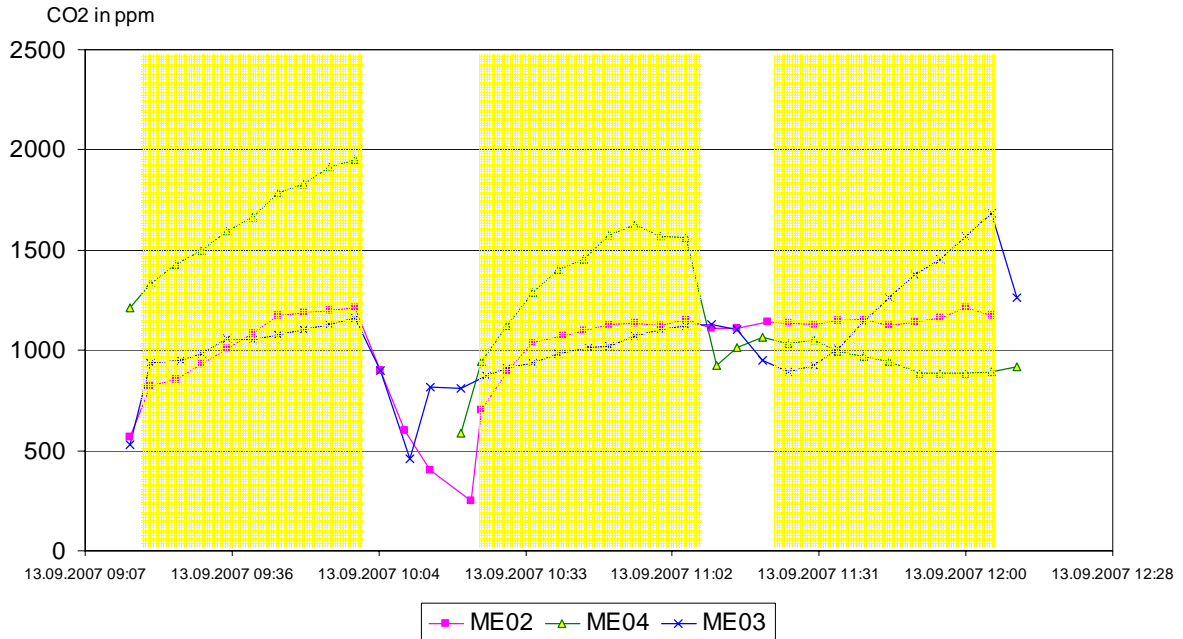


Abbildung 4.17 Zimmer ME02, ME03 und ME04: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während dreier Lektionen (13.9.07); (die gelb schraffierte Fläche zeigt die 3 Schullektionen; Die Raumtemperatur lag bei 22.6 °C die relative Feuchtigkeit bei 49%)

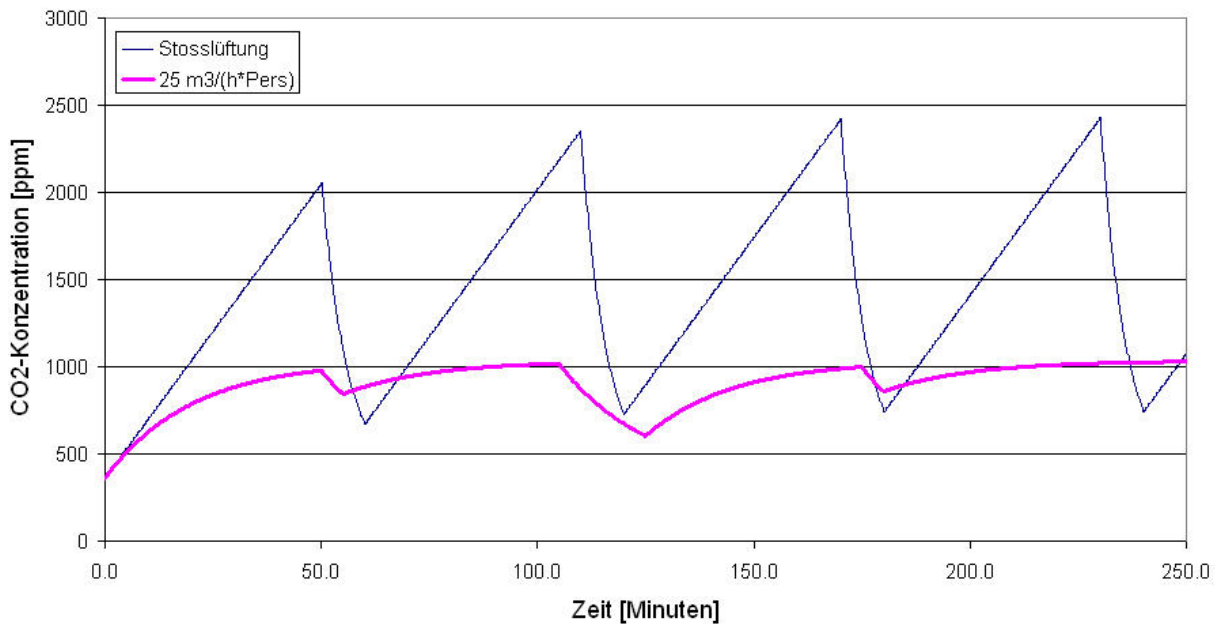


Abbildung 4.18 Rechenmodell zur CO<sub>2</sub>-Belastung in einem gleich grossen Schulraum, auch mit 25 Personen belegt; Mit Lüftung erreicht die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei rund 1000 ppm einen Plafond; bei geschlossenen Räumen steigt der CO<sub>2</sub>-Pegel über die gesamte Lektion an (Rechenmodell von Ch. Gmür, AWEL Zürich)

Damit diese Messkurven gut interpretiert werden können sei an dieser Stelle auch das Bild gezeigt, welches sich auf Grund der Physik beim Lüften ergibt. In einem ungelüfteten Schulraum mit einer üblichen Belegung von 25 Personen steigt der CO<sub>2</sub>-Pegel in 50 Min. um rund 1500 ppm an. Im Falle der KZO beträgt der Anstieg während einer 45-Minuten-Lektion zwischen 800 und 900 ppm. Somit hat die Lüftung wohl während allen Lektionen einen Beitrag geleistet, aber klar ungenügend.

#### 4.3.5 Klassenzimmer 61

Dieses Zimmer ist nach Süd-West ausgerichtet. Der rund 70 m<sup>2</sup> grosse Raum wird nur über Fenster gelüftet. Die Personenbelegung lag zwischen 9 und 27, im Mittel 19 Personen. Die Raumlufttemperatur variierte – während den Schülerpräsenzen - zwischen 17.2 und 21.2 °C. Der Mittelwert lag bei 19.4 °C. Für die relative Luftfeuchtigkeit wurden Werte zwischen 36 und 61, im Mittel bei 50% registriert.

Das Klassenzimmer wird, gemäss dem Nutzerprotokoll, immer wieder durch Halbklassen benutzt. Die Fenster werden in den Pausen praktisch immer und während den Lektionen, je nach Aussenklima ebenfalls geöffnet. Die relativ ruhige Lage erlaubt einen Schulbetrieb auch bei geöffnetem Fenster. Je nach Lehrperson wird unterschiedlich oft zusätzlich über die Fenster gelüftet.

Abbildung 4.19 zeigt den Verlauf der Messwerte CO<sub>2</sub> und Temperatur über die ganzen zwei Messwochen im Januar 2007. Im Vergleich mit den gelüfteten Räumen zeigt sich hier nun ein praktisch senkrechtes Ansteigen der CO<sub>2</sub>-Pegel bis zu Werten über 3000 ppm. Die Fensterlüftungsphasen werden an den steilen Abnahmen der CO<sub>2</sub>-Werte erkannt. Sehr schön ist die sehr langsame Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration über das Wochenende erkennbar.

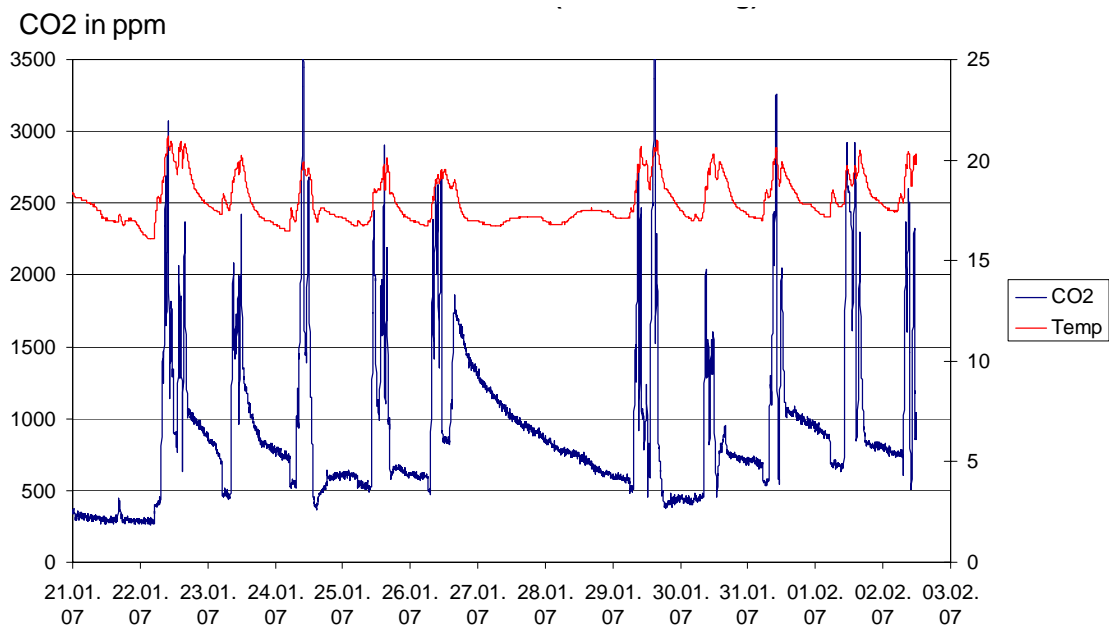


Abbildung 4.19 Zimmer 61: Verlauf der CO<sub>2</sub>- und Raumtemperatur-Werte während der Messperiode

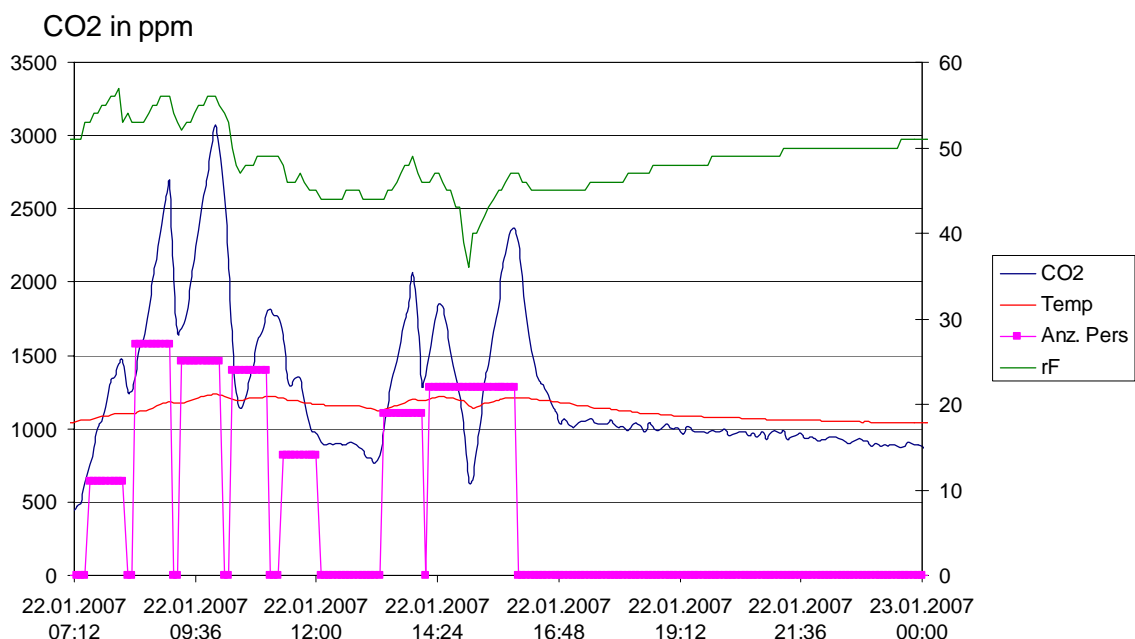


Abbildung 4.20 Zimmer 61: Die Zusammenhänge zwischen den Messwerten und den Personenpräsenzen sind an diesem einen Schultag (Montag, 22.1.07) sehr schön erkennbar

Abbildung 4.21 zeigt wie häufig die CO<sub>2</sub>-Werte im jeweiligen Bereich gemessen wurden (während Präsenzzeit). Der Raum wurde nur 11 % der Zeit benutzt. Die Lüftung arbeitet hier insgesamt zu wenig wirksam, was zu hohen CO<sub>2</sub>-Werten führt.

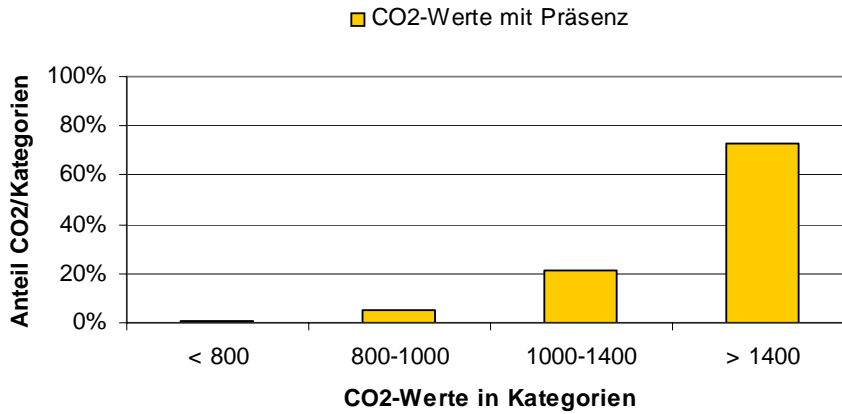


Abbildung 4.21 Zimmer 61: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (= 11%)

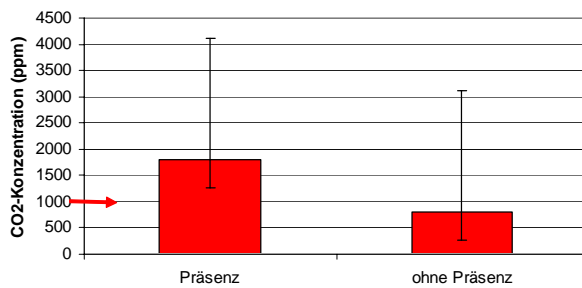


Abbildung 4.22 Zimmer 61: Mittelwerte, Min- und Maxwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts

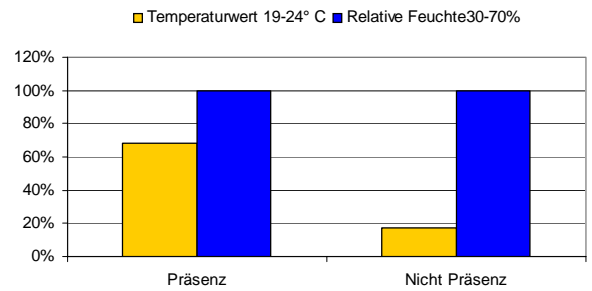


Abbildung 4.23 Zimmer 61: Die Komfortbereiche sind für die Raumtemperatur schlecht eingehalten

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte liegen während den Präsenzzeiten mit 1830 ppm sehr hoch. Die Raumlufttemperaturen waren insgesamt ungewöhnlich tief. Entsprechend sehr vorteilhaft zeigten sich die Feuchtigkeitswerte

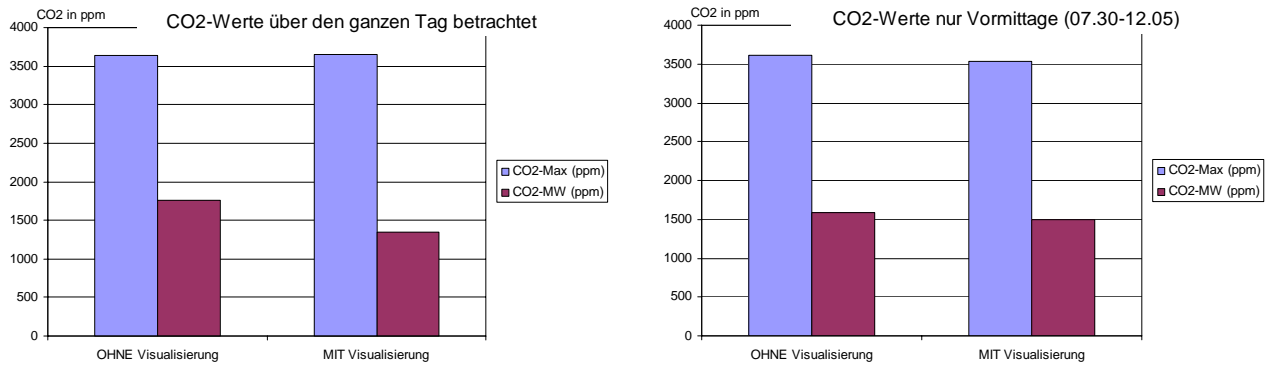
#### 4.3.6 Einfluss der Visualisierung – Zimmer 61

Ohne die Benutzer der Schulräume zu instruieren wurden die Verhältnisse auch eine Woche früher aufgezeichnet, um damit den Einfluss einer Visualisierung der Luftqualität sichtbar zu machen.

Obwohl die Lehrerschaft verschiedentlich ein „Aha-Erlebnis“ aussagten, verbesserten sich die Messwerte nicht wirklich nachhaltig. Die ausgewerteten CO<sub>2</sub>-Werte sehen wie folgt aus:

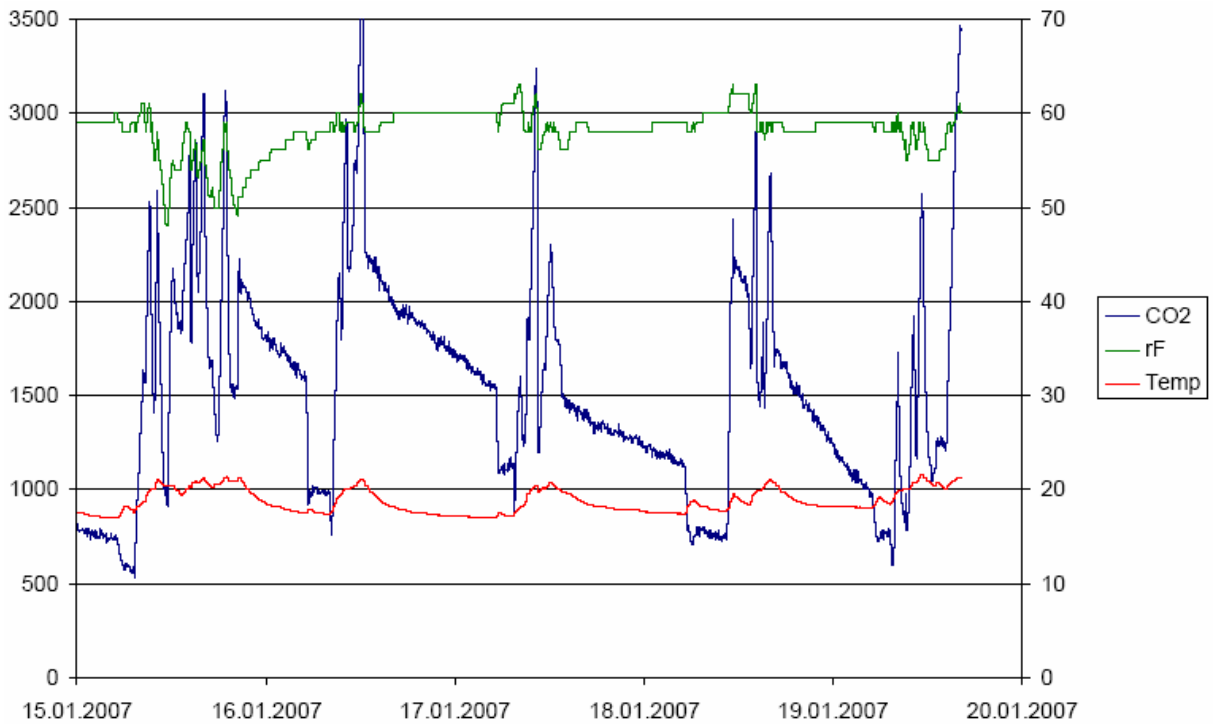
	CO <sub>2</sub> -Max (ppm)	CO <sub>2</sub> -MW (ppm)	Änderung 2 Wochen	Nur 1.Wo.	Nur 2.Wo.
OHNE Visualisierung	<b>3642</b>	<b>1759</b>			
MIT Visualisierung	<b>3656</b>	<b>1340</b>	<b>- 23.8%</b>	- 24.2%	- 23.4%
<i>Bei Betrachtung nur der Vormittagswerte:</i>					
OHNE Visualisierung	<b>3612</b>	<b>1583</b>			
MIT Visualisierung	<b>3535</b>	<b>1503</b>	<b>- 5%</b>		

**Tabelle 4.24** Zimmer 61: Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte (jeweils von 07.30 bis 17.40 Uhr, inkl. aller Pausen) reduzierten sich in den ersten zwei Wochen ab Einführung der Visualisierung um rund ein Viertel; werden nur die Vormittage erfasst, dann ist die mittlere Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Werte nur noch 5 %



**Abbildung 4.25** Zimmer 61: über den ganzen Tag betrachtet verbessern sich die Mittelwerte um 24%, aber nicht die Maximalwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts

**Abbildung 4.26** Zimmer 61: Werden nur die Vormittage betrachtet, verbessern sich die Mittelwerte um 5%, aber nicht die Maximalwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts



**Abbildung 4.27** Zimmer 61: OHNE Visualisierung sind die CO<sub>2</sub>-Werte vor allem in den ungenutzten Zeiten sehr hoch; d.h. kaum je auf unter 1000 ppm abgesunken

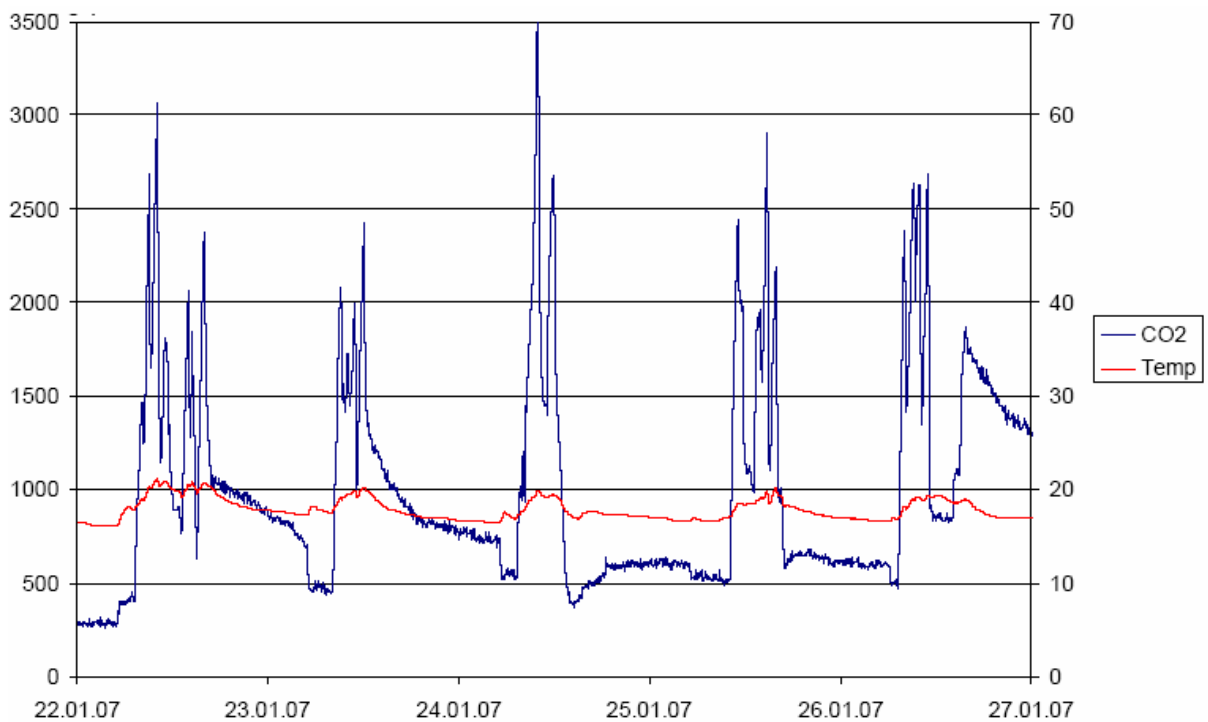


Abbildung 4.28 Zimmer 61: Die CO<sub>2</sub>-Werte MIT Visualisierung

#### 4.3.7 Klassenzimmer 67

Dieses Zimmer ist nach Nord-Ost ausgerichtet. Der rund 70 m<sup>2</sup> grosse Raum wird nur über Fenster gelüftet. Die Personenbelegung lag zwischen 10 und 26, im Mittel 20.5 Personen. Die Raumlufttemperatur variierte – während den Schülerpräsenzen - zwischen 19.6 und 24.8 °C. Der Mittelwert lag bei 21.7 °C. Für die relative Luftfeuchtigkeit wurden Werte zwischen 26 und 52%, im Mittel bei 39% registriert.

Das Klassenzimmer wird, gemäss dem Nutzerprotokoll, immer wieder durch Halbklassen benutzt. Die Fenster werden in den Pausen praktisch immer und während den Lektionen, je nach Aussenklima ebenfalls geöffnet. Die relativ ruhige Lage erlaubt einen Schulbetrieb auch bei geöffnetem Fenster. Je nach Lehrperson wird unterschiedlich oft zusätzlich über die Fenster gelüftet.

Abbildung 4.29 zeigt wie häufig die CO<sub>2</sub>-Werte im jeweiligen Bereich gemessen wurden (während Präsenzzeit). Der Raum wurde nur 13 % der Zeit benutzt. Die Lüftung arbeitet hier insgesamt zu wenig wirksam, was zu hohen CO<sub>2</sub>-Werten führt.

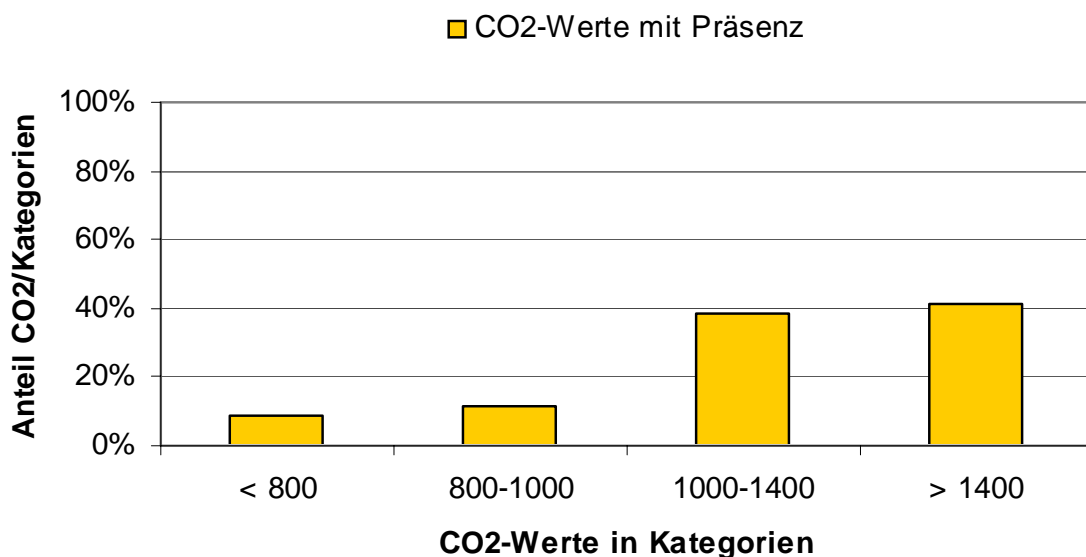


Abbildung 4.29 Zimmer 67: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (= 13%)

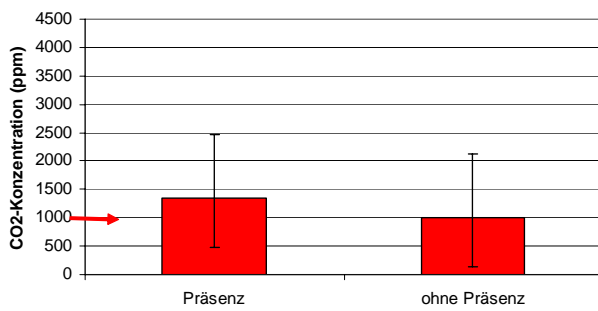


Abbildung 4.30 Zimmer 67: Mittelwerte, Min- und Maxwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts

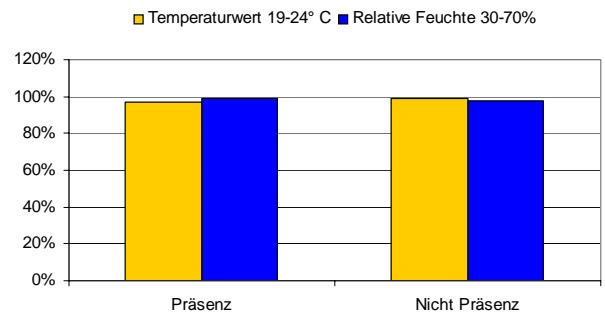


Abbildung 4.31 Zimmer 67: Die Komfortbereiche sind für die Raumtemperatur und Feuchte gut eingehalten

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte liegen während den Präsenzzeiten mit 1349 ppm hoch. Die Raumlufttemperaturen wie auch die Feuchtigkeitswerte waren in einem optimalen Bereich.

#### 4.3.8 Einfluss der Visualisierung – Zimmer 67

Ohne die Benutzer der Schulräume zu instruieren wurden die Verhältnisse auch eine Woche früher aufgezeichnet, um damit den Einfluss einer Visualisierung der Luftqualität sichtbar zu machen.

Obwohl die Lehrerschaft verschiedentlich ein „Aha-Erlebnis“ aussagten, verbesserten sich die Messwerte nicht wirklich nachhaltig. Die ausgewerteten CO<sub>2</sub>-Werte sehen wie folgt aus:

	CO <sub>2</sub> -Max (ppm)	CO <sub>2</sub> -MW (ppm)	Änderung in 1. Wo.	Änderung in 2. Wo.
OHNE Visualisierung	3835	1744		
MIT Visualisierung	2462	1266	<b>- 27.4%</b>	- 19%
<i>Bei Betrachtung nur der Vormittagswerte:</i>				
OHNE Visualisierung	3201	1400		
MIT Visualisierung	2140	1187	<b>- 15.2%</b>	- 0.2%

Tabelle 4.32 Zimmer 67: Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte (jeweils von 07.30 bis 17.40 Uhr, inkl. aller Pausen) reduzierten sich in den ersten zwei Wochen ab Einführung der Visualisierung um rund ein Viertel; werden nur die Vormittage erfasst, dann ist die mittlere Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Werte in der ersten Woche noch 15 %

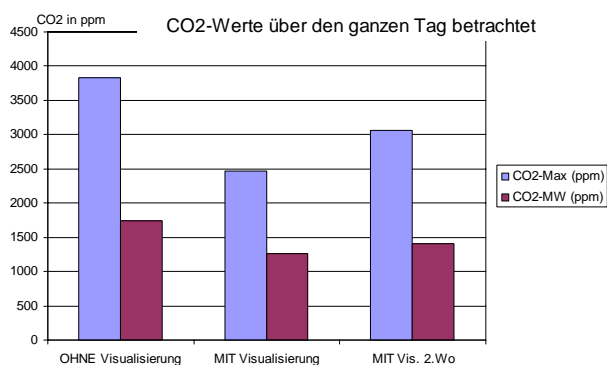


Abbildung 4.33 Zimmer 67: in diesem Raum haben sich auch die Maximalwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts verbessert

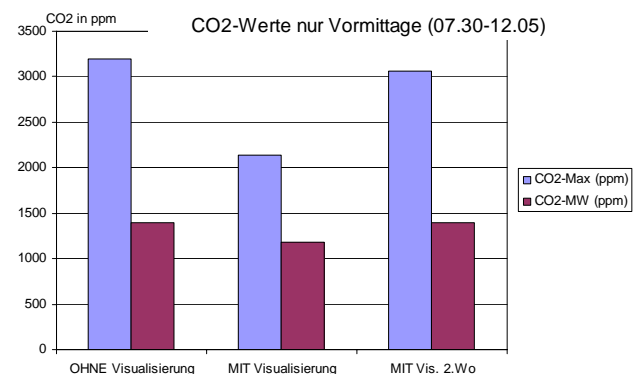


Abbildung 4.34 Zimmer 67: Werden nur die Vormittage betrachtet, sind die Verbesserungen des CO<sub>2</sub>-Gehalts dank der Visualisierung auch in diesem Zimmer weniger deutlich

## 4.4. BEFRAGUNGEN IN DER KZO

### 4.4.1 Beschrieb Befragung

In die Befragung wurden einerseits die Hauptlehrer, welche ständig im Schulhaus unterrichten einbezogen und andererseits auch Lehrpersonen, die nur Teilpensen unterrichten. Insgesamt wurden 35 Lehrer in die Umfrage einbezogen. Die Erhebung wurde schriftlich mit einem Fragebogen durchgeführt (Fragebogen siehe Anhang). Die Abgabe der Fragebogen erfolgte über die Schulleitung.

Die Umfrage erfolgte im Winter (Januar 2007). Die Lehrpersonen sollten im Fragebogen ihre Beurteilung der Verhältnisse in den zwei Wochen vor dem Umfragetermin machen. Da die Umfrage direkt nach den Messungen verteilt wurde, soll dadurch deren Interpretation ermöglicht werden.

Von den 35 an die Lehrpersonen abgegebenen Fragebogen wurden 20 Fragebogen retourniert. Es wurde somit ein Rücklauf von 57% erreicht.

Die Resultate der Auswertung der 20 Fragebogen sind in Kapitel 5 für alle drei untersuchten Schulhäuser gemeinsam dargestellt. In dieser Auswertung wurden aus den insgesamt 30 Fragen 9 Fragen ausgewählt, welche als besonders relevant für die Beantwortung der Forschungsfrage erschienen. Die Resultate zu allen gestellten Fragen sind im Anhang in tabellarischer Form enthalten.

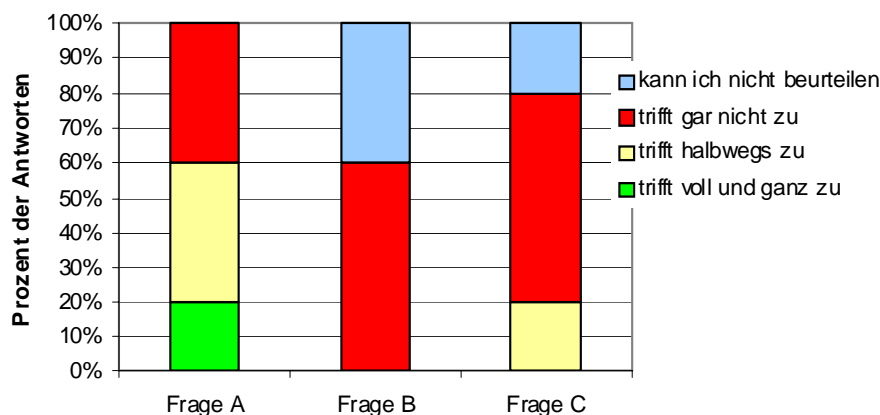
Im Weiteren wurden im Schulhaus einige Lehrpersonen befragt, die in den Klassenzimmern mit Luftqualitäts-Visualisierung (Gg 61 und 67) unterrichten. Ziel dieser zusätzlichen Befragung war, die Reaktionen und den Nutzen solcher Geräte aus Sicht der Lehrer zu eruieren. Im Folgenden wird daher vor allem auf die Interpretation der Befragungsergebnisse eingegangen sowie die Befragung von fünf Lehrpersonen zur Luftqualitäts-Visualisierung.

Die Resultate der Auswertung der 19 Fragebogen sind in Kapitel 6 für alle drei untersuchten Schulhäuser gemeinsam dargestellt. In dieser Auswertung wurden aus den insgesamt 30 Fragen 9 Fragen ausgewählt, welche als besonders relevant für die Beantwortung der Forschungsfrage erschienen. Die Resultate zu allen gestellten Fragen sind im Anhang in tabellarischer Form enthalten.

Im Folgenden wird daher vor allem auf die Interpretation der Befragungsergebnisse eingegangen sowie die Befragung von fünf Lehrpersonen zur Luftqualitäts-Visualisierung.

### 4.4.2 Resultate Befragung Luftqualitäts-Visualisierung

Die Lehrpersonen, welche in den Räumen mit Luftqualitäts-Visualisierung unterrichtet wurden bezüglich Ihrer Beurteilung bezüglich der Raumluftqualität sowie dem Einfluss auf die Konzentration befragt. Da diese Auswertung nur fünf Antworten beinhaltet, können daraus keine allgemeinen Schlüsse auf deren Wirkung gezogen werden.



#### **Vergleich mit dem Schulzimmer ohne Luftqualitäts-Visualisierung (vor 19.1.07):**

- A) Ist die Raumluftqualität im Schulzimmer besser geworden
- B) Meine Konzentration im Verlaufe eines Halbtages stabiler.
- C) Die Schülerinnen und Schüler sind im Verlaufe eines Halbtages konzentrierter.

Abbildung 4.35 Luftqualitäts-Visualisierung

Während die Frage nach der Verbesserung der Luftqualität im Raum durch das System von 3 der 5 Antwortenden eher positiv beurteilt wurde, zeigen die Antworten zur Verbesserung der Konzentration kaum einen Einfluss.

Die Frage ob Sie ein Klassenzimmer mit Luftqualitäts-Visualisierung wählen würden, wurde daher auch recht unterschiedlich beantwortet (1 Ja, 2 Nein, 2 Egal).

#### 4.4.3 Interpretation Befragung Schulhaus Wetzikon

Die Bewertung des Lüftungssystems ist in Wetzikon mit Abstand am Besten. Was vielleicht etwas zu erstaunen vermag ist, dass sich trotz der guten Gesamtbewertung lediglich 29.4% der Befragten für eine Lüftungsanlage entscheiden würden, wenn sie die Wahl hätten. Daraus lässt sich schliessen, dass zwar die Zufriedenheit sehr hoch ist, jedoch nicht zwingend mehr Komfort bietet, als eine Lüftung über die Fenster. Dies hängt sicher auch mit der ruhigen Lage und das somit problemlose Öffnen der Fenster zusammen. Dennoch wird die Qualität der Luft als sehr hoch angesehen, was ebenfalls für die Zufriedenheit mit der Lüftungsanlage spricht.

#### 4.5. SYNTHESE SCHULE KZO

Die vier Schulräume mit mechanischer Lüftung zeigen enttäuschende Ergebnisse bezogen auf die Luftqualität. Die Steuerung dieser Anlage wird von niemandem so richtig verstanden, obwohl sie grundsätzlich einfach ist (zweistufig mit Handschalter und Zeitschaltuhr). Aber allein schon für das Einstellen der Zeitschaltuhr musste ein Elektriker aufgeboten werden.

Zudem wird die Lüftungswirksamkeit durch die ungünstige Platzierung der Zu- und Abluftdurchlässe reduziert. Es ist deutlich zu spüren: die Nutzer haben kein Vertrauen in diese Anlage und öffnen daher immer wieder auch die Fenster. Diese Anlage ist dringend zu überprüfen und die Steuerung zu vereinfachen. Ein Betrieb nach CO<sub>2</sub> oder Präsenz wäre dann grundsätzlich zu prüfen, da viele Voraussetzungen hierzu gegeben sind.

Die Visualisierung vermag eine gewisse Besserung der Luftqualitäten zu bringen, löst das Problem aber nicht. Die CO<sub>2</sub>-Werte während den Lektionen sind spätestens nach einer gewissen Gewöhnungsperiode wieder wie früher. Zielführender wäre aus unserer Sicht die Automatisierung der Fensterflügel zur Lüftung in den Pausen. – Trotzdem sollte die Visualisierung als sehr kostengünstige Massnahme an einigen Pilotobjekten weiter ausgetestet werden. Das Ganze wäre sicher noch zu optimieren, z.B. durch eine vergrösserte Anzeige und durch eine professionelle Information.

## 5. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Schulhaus Mäander, Winterthur

### 5.1. BESCHRIEB

Das Schulgebäude Mäander liegt in Gehdistanz zum Bahnhof Winterthur und beheimatet das Departement Angewandte Linguistik. Es handelt sich um ein modernes, neues Gebäude, welches von den Architekten Burkard und Meyer für die Bellevue Bau AG geplant wurde. Das Gebäude wird vom Kanton Zürich gemietet und umfasst eine Mietfläche von 10'200 m<sup>2</sup>. Es wurde im Herbst 2005 bezogen. An dieser Schule werden rund 800 Bachelor-Studierenden und über 1'700 WeiterbildungsabsolventInnen von gegen 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unterrichtet.



Abbildung 5.1 Gebäudesituation Schulanlagen der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) im Raum St. Georgenplatz; das untersuchte Gebäude Mäander ist mit SM bezeichnet

Die drei Unterrichtsräume, welche gemessen wurden, befinden sich im 1.OG und tragen die Bezeichnung O1.05, O1.11 und O1.17. Die Räume sind für 25 Personen konzipiert.



Abbildung 5.2 Mäander: Ansicht von der Hofseite; kleines Bild: Fensterflügel öffnet nur gegen eine zweite Glasschicht

Die Unterrichtsräume werden über Luft-Dralldurchlässe über die Decke verteilt belüftet. Die Abluft wird über ein Wandgitter oberhalb der Türe abgesogen. Die Lüftung wird über Präsenzscharter (nur Aus / Ein, keine variable Luftmenge) sowie eine Zeitschaltuhrfunktion betrieben. Die Fenster in den Unterrichtszimmern können mit einzelnen Lüftungsflügeln geöffnet werden.



Abbildung 5.3 Mäander: Blick in ein Unterrichtszimmer



Abbildung 5.4 Mäander: Abluft- (links) und Zuluft-Durchlass in einem Unterrichtszimmer

Die Bereitstellung der Luft erfolgt in einer grossen Zentralen (15'000 m<sup>3</sup>/h, drehzahlreguliert über Differenzdruck), welche die Luft über Schächte (vgl. Abbildung 5.5) zu den Schulräumen bringt. Die Anlage kann als Ganzes nicht mit weniger als 30% betrieben werden. Die Temperatur wird über die WRG und einen Lufterhitzer geregelt.

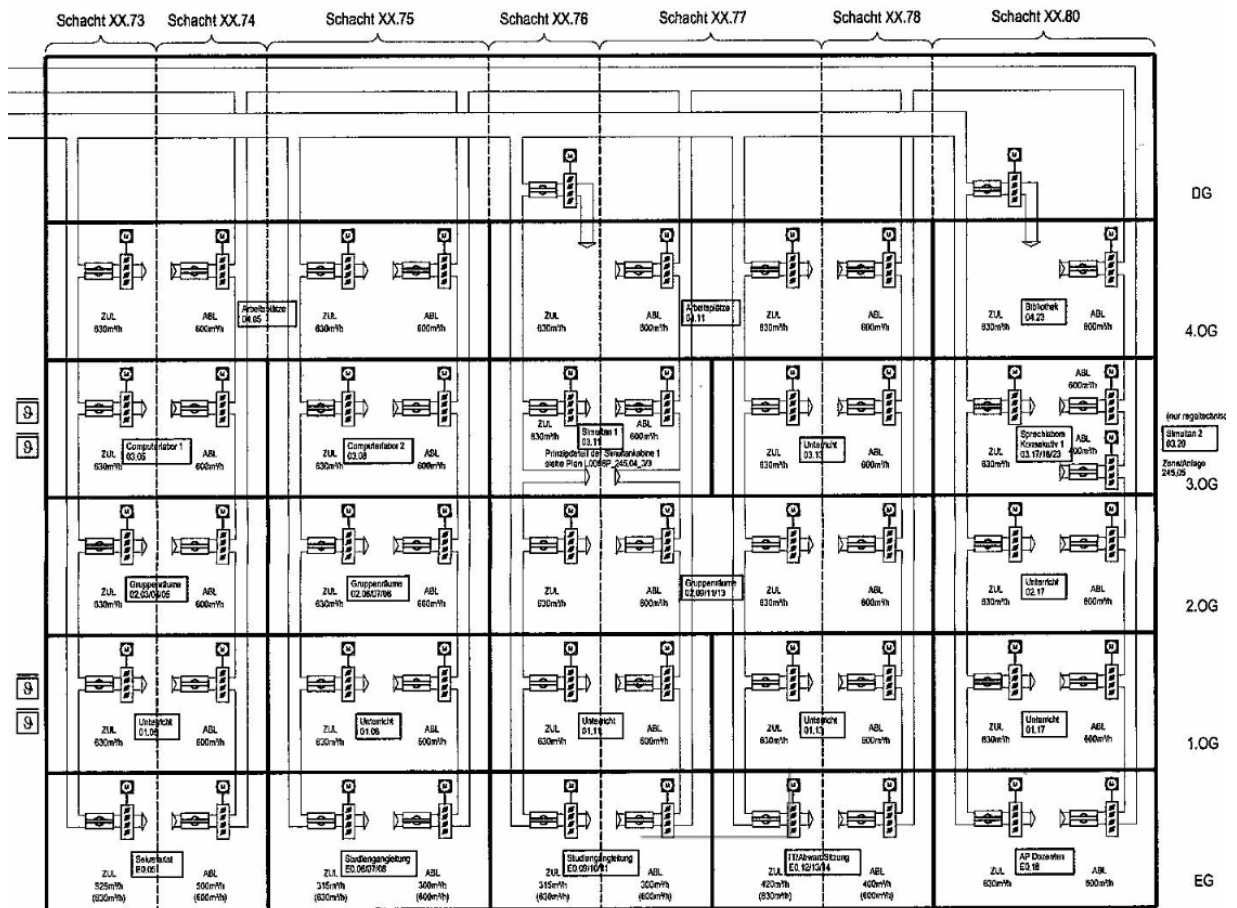


Abbildung 5.5 Mäander: Das zentrale Lüftungsgerät bringt 15'000 m<sup>3</sup>/h ins Gebäude. Die gemessenen Räume befinden sich im 1.OG

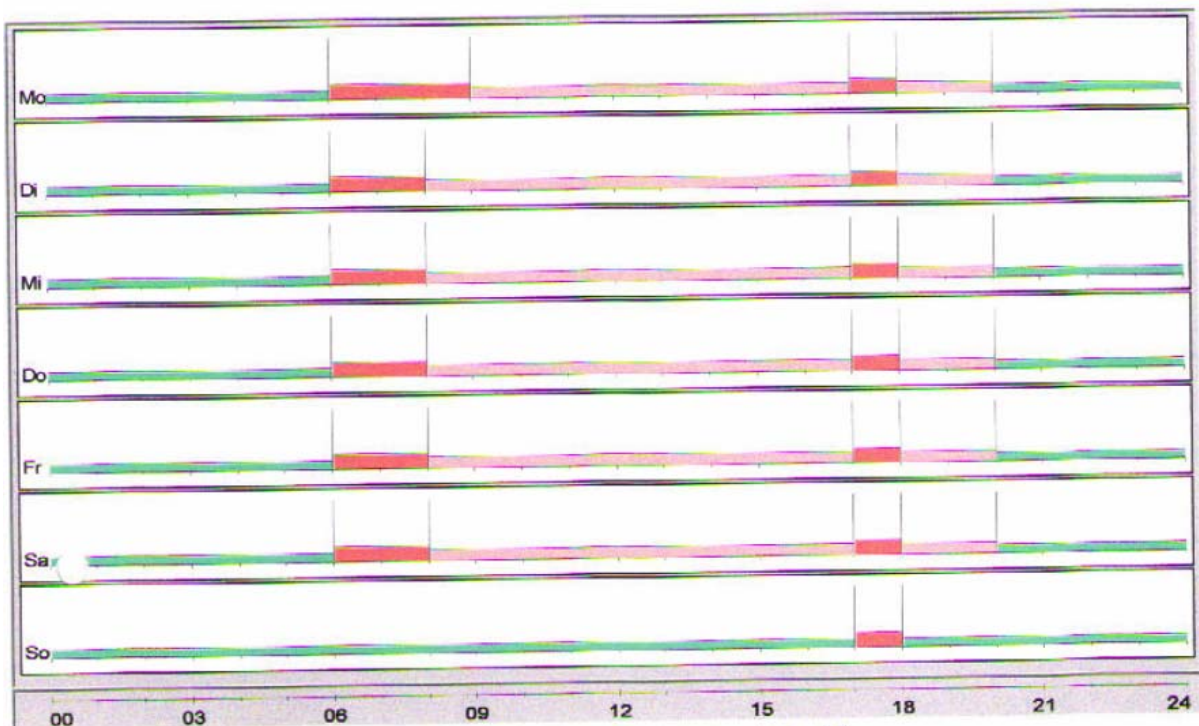


Abbildung 5.6 Mäander: Zeitschaltprogramm der zentralen Lüftung: grün = AUS; rot = EIN; rosa = Lüftung in Bereitschaft; Aktivierung mittels Präsenzmeldern in den Räumen plus 15 Min. Nachlauf

## 5.2. MÄANDER – MESSUNGEN

### 5.2.1 Luftmengenmessungen

Um eine korrekte Interpretation der Messresultate vornehmen zu können wurden Luftmengenmessungen in den untersuchten Unterrichtszimmern vorgenommen. Die Messungen zeigten in zwei Zimmern grössere Abweichungen zu den Sollwerten der Luftmengen. Der Planungswert für die Zu- und Abluftmenge pro Zimmer liegt bei 600 m<sup>3</sup>/h.

Die Luftmengenmessungen erfolgten mit fünf Messpunkten am Abluftgitter des Raumes. Im Raum 01.17 war die Luftmenge mit 410 m<sup>3</sup>/h rund 30% unter dem Sollwert, während die beiden anderen Räume mit 470 m<sup>3</sup>/h nur 22% unter dem Sollwert waren. Somit sind auch hier in allen Räumen die SOLL-Luftmengen nicht erreicht.

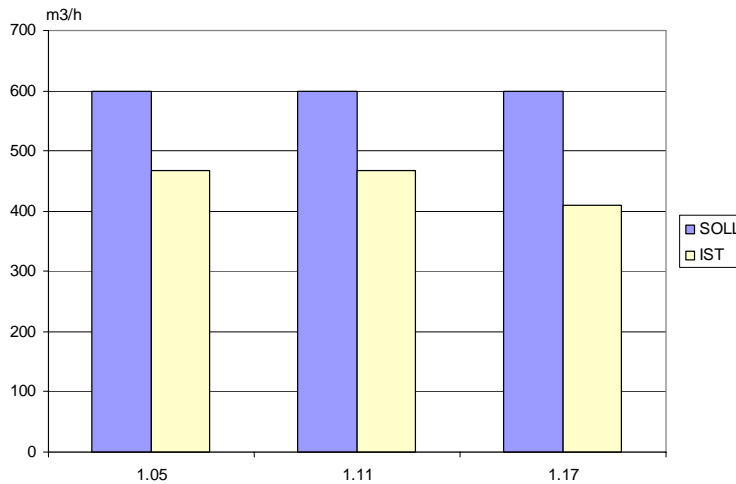


Abbildung 5.7 Luftmengenmessung am Abluftgitter der Unterrichtszimmer



Abbildung 5.8 Mäander: Das Messgerät auf der Rückseite der Leinwand

## 5.3. MÄANDER – MESSERGEBNISSE

In den drei untersuchten Räumen wurden CO<sub>2</sub>-Gehalt sowie Raumlufttemperatur und relative Feuchte mittels Datenlogger erfasst. Aus den Nutzerprotokollen wurden die aufgezeichnete Präsenz, sowie spezielle Fensterlüftungen erfasst.

### 5.3.1 Zimmer O1.05

Die Personenbelegung lag zwischen 5 und 17, im Mittel 12 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa 40 m<sup>3</sup>/h (gesamt: 470 m<sup>3</sup>/h). Die Raumlufttemperatur variierte zwischen 13.4 und 26.3°C. Der Mittelwert lag bei 21.6°C. Für die relative Luftfeuchtigkeit lagen die Werte zwischen 23 und 42 %, im Mittel bei 29 %.

In diesem Unterrichtszimmer kann wegen dem Bahnlärm das Fenster kaum je länger geöffnet werden (direkt neben dem Bahnhof Winterthur).

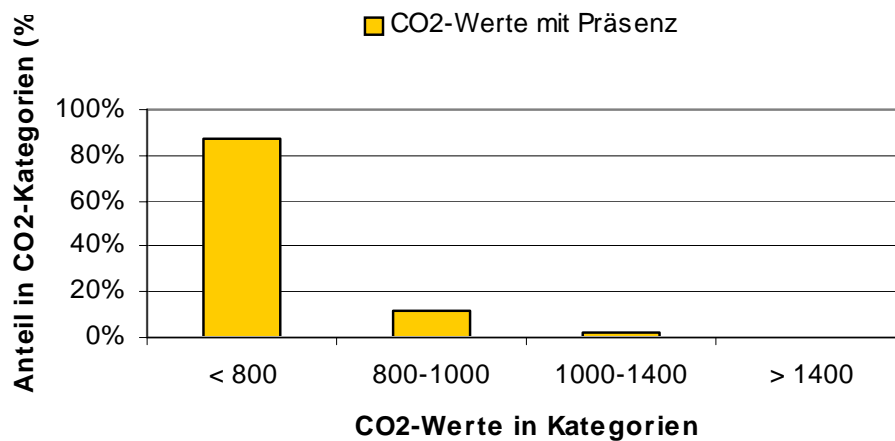


Abbildung 5.9 Zimmer O1.05: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (= 13%)

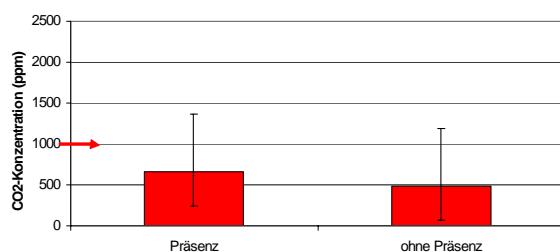


Abbildung 5.10 Zimmer O1.05: Mittelwerte, Min- und Maxwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts

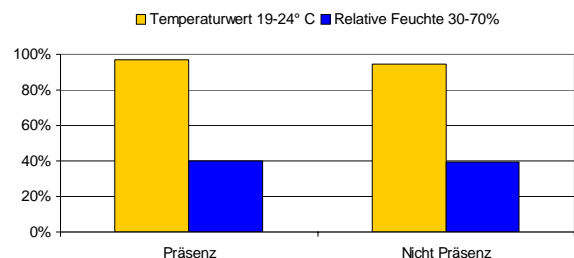


Abbildung 5.11 Zimmer O1.05: Die Komfortbereiche sind für die Raumfeuchtigkeit schlecht eingehalten

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte liegen während den Präsenzzeiten (= 13 %) mit 672 ppm sehr tief. Die Lüftung funktioniert hier gut, wie sich dies in tiefen CO<sub>2</sub>-Werten ausdrückt. Es wird tendenziell eher zu stark gelüftet. Die Raumlufttemperaturen waren insgesamt durchschnittlich optimal (von einigen Ausreißern nach unten, infolge offener Fenster, abgesehen). Nur 40% der Feuchtigkeits-Messwerte liegen im optimalen Bereich: d.h. es ist oft zu trocken.

### 5.3.2 Zimmer O1.11

Die Personenbelegung lag zwischen 5 und 17, im Mittel 12 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa 39 m<sup>3</sup>/h (gesamt: 470 m<sup>3</sup>/h). Die Raumlufttemperatur variierte zwischen 14.4 und 26.4°C. Der Mittelwert lag bei 22.7°C. Für die relative Luftfeuchtigkeit lagen die Werte zwischen 17 und 37 %, im Mittel bei 27 %.

In diesem Unterrichtszimmer kann wegen dem Bahnlärm das Fenster kaum je länger geöffnet werden (direkt neben dem Bahnhof Winterthur).

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte liegen während den Präsenzzeiten (= 17 %) mit 657 ppm sehr tief. Es wird tendenziell zu stark gelüftet. Die Raumlufttemperaturen waren durchschnittlich zudem zu warm, so dass nur gut 60% der Werte im Komfortband liegen. Eine logische Folge von zu hohen Luftwechseln und zu hohen Raumtemperaturen sind: trockene Raumluft. Dies zeigt sich hier sehr deutlich: Nur gerade gut 20% der Messwerte liegen über dem Soll-Wert von 30% r.F.

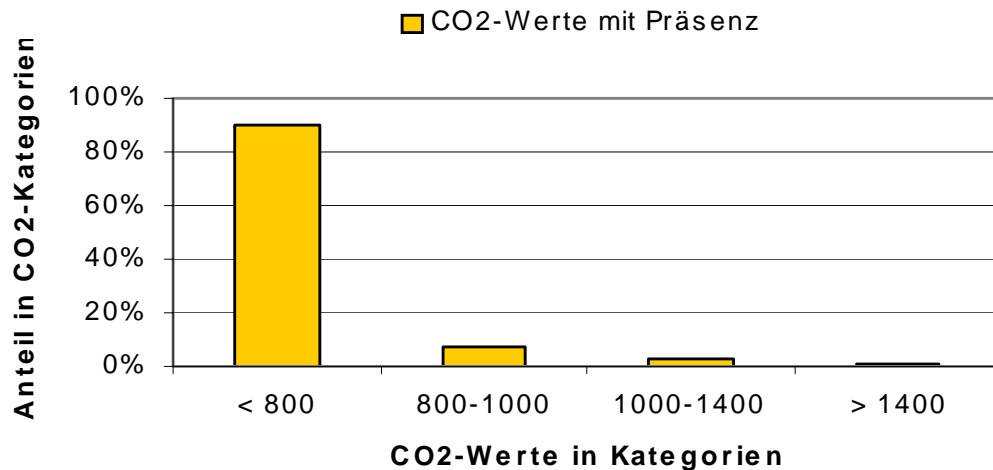


Abbildung 5.12 Zimmer O1.11: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (= 17%)

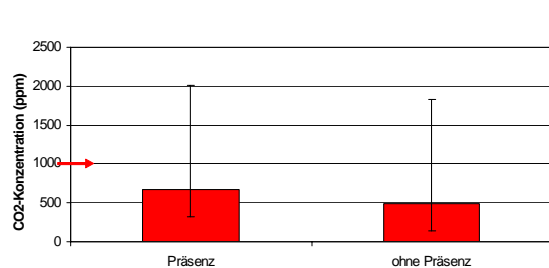


Abbildung 5.13 Zimmer O1.11: Mittelwerte, Min- und Maxwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts

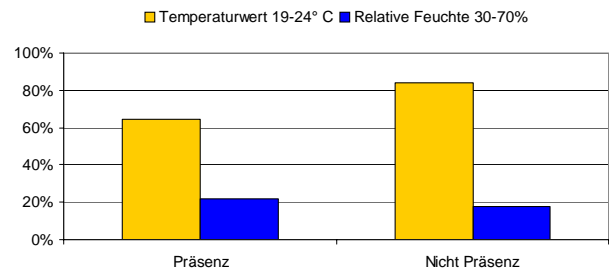


Abbildung 5.14 Zimmer O1.11: Die Komfortbereiche sind für die Raumfeuchtigkeit und Temperatur schlecht eingehalten

### 5.3.3 Zimmer O1.17

Die Personenbelegung lag zwischen 4 und 20, im Mittel 13 Personen. Die Zuluftmenge pro Person beträgt etwa 32 m<sup>3</sup>/h (gesamt: 410 m<sup>3</sup>/h). Die Raumlufthtemperatur variierte zwischen 19.1 und 25.5°C. Der Mittelwert lag bei 22.1°C. Für die relative Luftfeuchtigkeit lagen die Werte zwischen 22 und 35 %, im Mittel bei 27 %.

In diesem Unterrichtszimmer kann wegen dem Bahnlärm das Fenster kaum je länger geöffnet werden (direkt neben dem Bahnhof Winterthur).

Die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte liegen während den Präsenzzeiten (= 13 %) mit 661 ppm sehr tief. Es wird tendenziell zu stark gelüftet, obwohl hier der durchschnittliche Pro-Kopf-Volumenstrom tiefer gemessen wurde. (Es kann allerdings sein, dass zuluftseitig auch deutlich mehr Luft dem Raum zugeführt wird.). Die Raumlufthtemperaturen waren durchschnittlich etwas zu warm, so dass nur 85% der Werte im Komfortband liegen. Eine logische Folge von zu hohen Luftwechseln und zu hohen Raumtemperaturen sind: trockene Raumlufth. Dies zeigt sich hier sehr deutlich: Weniger als 20% der Messwerte liegen über dem Soll-Wert von 30% r.F.

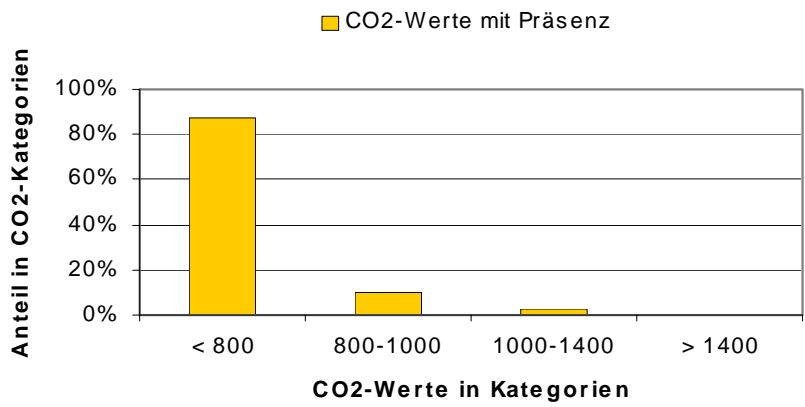


Abbildung 5.15 Zimmer O1.17: Gemessene CO<sub>2</sub>-Werte während der Präsenzzeit (= 13%)

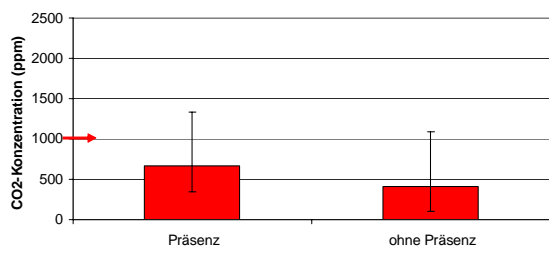


Abbildung 5.16 Zimmer O1.11: Mittelwerte, Min- und Maxwerte des CO<sub>2</sub>-Gehalts

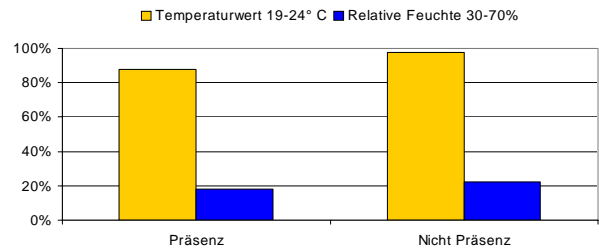


Abbildung 5.17 Zimmer O1.11: Die Komfortbereiche sind für die Raumfeuchtigkeit schlecht eingehalten

Einen Vergleich der verschiedenen Feuchtigkeiten der drei Unterrichtszimmer zeigt Abbildung 5.18.

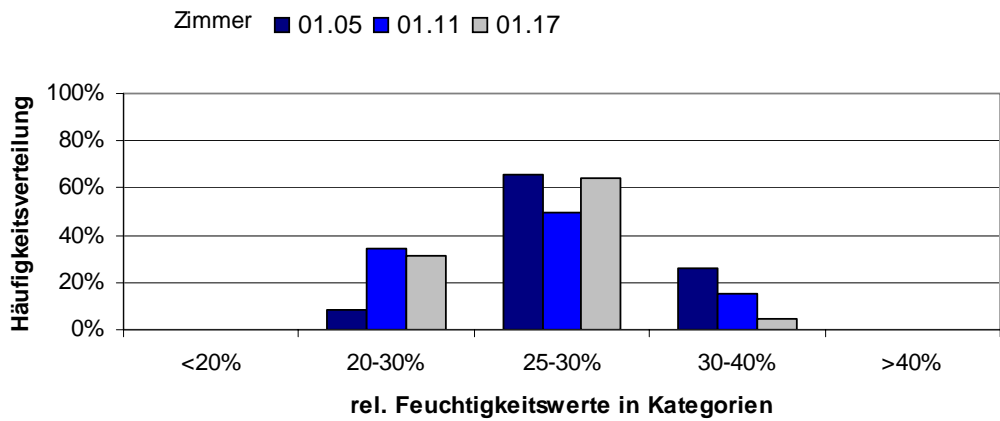


Abbildung 5.18 Zimmer O1.05, O1.11 und O1.17: Gemessene Feuchtigkeitswerte während den zwei Messwochen im März 2007

## **5.4. MÄANDER – BEFRAGUNGEN**

### **5.4.1 Beschrieb Befragung**

In die Befragung wurden einerseits die Hauptlehrer, welche ständig im Schulhaus unterrichten einbezogen und andererseits auch Lehrpersonen, die nur Teilpensen unterrichten. Insgesamt wurden 47 Lehrer in die Umfrage einbezogen. Die Erhebung wurde schriftlich mit einem Fragebogen durchgeführt (Fragebogen siehe Anhang). Die Abgabe der Fragebogen erfolgte über die Schulleitung.

Die Umfrage erfolgte im Winter (April 2007). Die Lehrpersonen sollten im Fragebogen ihre Beurteilung der Verhältnisse in den 2 Wochen vor dem Umfragetermin machen. Da die Umfrage direkt nach den Messungen verteilt wurde soll dadurch ein Rückschluss für die Interpretation ermöglicht werden.

Von den 47 an die Lehrpersonen abgegebenen Fragebogen wurden nur 10 Fragebogen retourniert. Es wurde somit ein Rücklauf von 21% erreicht. Die Resultate für dieses Schulhaus sind aufgrund der geringen Fallzahl daher Vorbehalt zu betrachten.

Die Resultate der Auswertung der 10 Fragebogen sind in Kapitel 6 für alle drei untersuchten Schulhäuser gemeinsam dargestellt. In dieser Auswertung wurden aus den insgesamt 30 Fragen 9 Fragen ausgewählt, welche als besonders relevant für die Beantwortung der Forschungsfrage erschienen. Die Resultate zu allen gestellten Fragen sind im Anhang in tabellarischer Form enthalten.

Im Folgenden wird daher vor allem auf die Interpretation der Befragungsergebnisse eingegangen.

### **5.4.2 Interpretation Befragung Schulhaus Mäander**

Obwohl im Schulhaus Mäander die einzelnen Urteile auf den ersten Blick positiver ausfielen als im Schulhaus Birch, geben die Befragten dem Gesamtsystem nur eine geringfügig bessere Gesamtnote. Erwähnenswert ist aber sicher die Tatsache, dass sich in diesem Schulhaus 85.7% der befragten Lehrpersonen für eine Lüftungsanlage aussprechen und keine einzige Person dagegen.

## **5.5. MÄANDER – SYNTHESE**

Die in diesem Schulhaus vorhandene Lüftung erscheint konzeptionell und betrieblich grundsätzlich zu funktionieren. Überzeugt hat vor allem die geräuschlose, völlig zufreie Einbringung über Decken-Drall-Durchlässe. Trotzdem wirft natürlich die Tatsache, dass eigentlich alle drei Räume überlüftet werden Fragen auf. Kann es sein, dass die Präsenzsensoren nicht richtig funktionieren und die Räume einfach immer gelüftet werden. Diesbezüglich fehlt die Kontrolle völlig. Eine einfache Kontrolllampe, die Auskunft über die Stellung der Volumenstromklappen gibt, wäre eine einfache Abhilfe. Da doch öfters auch nur Kleinklassen unterrichtet werden, wäre in diesem Schulhaus ein Ersatz der Präsenzmelder durch CO<sub>2</sub>-Fühler durchaus zu prüfen. Selbst wenn diese nur EIN/AUS steuern würden, kann mit einer beträchtlichen Lufterparnis und in der Folge auch besseren Feuchtigkeitswerten gerechnet werden (vgl. dazu die Untersuchungen in Kapitel 3.3.5).

Die relative langen „Spülungsintervalle“ morgens und abends sind unter den vorliegenden Erkenntnissen ebenfalls zu überdenken und möglichst zu reduzieren.

## 6. Ergebnisse der Befragung

### 6.1. VORGEHENSWEISE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Umfragen in den Schulhäusern Birch, Wetzikon und Mäander gemeinsam untersucht. Dies dient dem direkten Vergleich der Benutzerzufriedenheit in den drei Schulhäusern. Als Basis für die Auswertung dienten die im Winter 2006/07 durchgeführten Umfragen in den drei Schulhäusern. Die Resultate der im Sommer 2006 durchgeführten Umfrage im Schulhaus Birch sind in Kapitel 3.4 zu finden. Während im Schulhaus Birch 46 beantwortete Fragebogen verwendet werden konnten, sind es im Schulhaus Wetzikon 20 (nur Fragebögen für Zimmer mit mechanischer Lüftung) und im Schulhaus Mäander lediglich 10. Die daraus gewonnenen Ergebnisse zu den drei Schulhäusern werden nachfolgend noch interpretiert, wobei die Resultate aufgrund der geringen Fallzahl mit Vorbehalt zu betrachten sind.

Dies gilt vorwiegend auch für die Auswertungen im nachfolgenden Teil, wo die Besonderheiten der einzelnen Schulhäuser interpretiert werden. Für diesen Teil wurde zudem noch eine Varianzanalyse durchgeführt, welche vorwiegend für das Schulhaus Birch signifikante Zusammenhänge aufzeigt. Für die anderen Schulhäuser kann auch von starken Zusammenhängen ausgegangen werden, welche sich aufgrund der geringen Fallzahl statistisch jedoch nicht nachweisen lassen.

### 6.2. DIE DREI SCHULHÄUSER IM VERGLEICH

Als erstes soll auf das Lüftungsverhalten während den Wintermonaten eingegangen werden. Die Frage dazu lautete: „Welche Antwort entspricht am ehesten dem Lüftungsverhalten von Ihnen und Ihren SchülerInnen in den Wintermonaten?“. Bei der Interpretation gilt es zu beachten, dass ein vielfaches Öffnen der Fenster als negatives Zeichen für die automatische Lüftung angesehen werden kann (schlechte Luftqualität) aber auch durch „Gewohnheit“ beeinflusst werden kann.

Der nachfolgenden Grafik ist zu entnehmen, dass die Fenster in den Schulhäusern Birch und Mäander vorwiegend bei stickiger Luft geöffnet werden (56.8%/60%) und im Schulhaus Wetzikon meist in jeder Pause (52.6%).

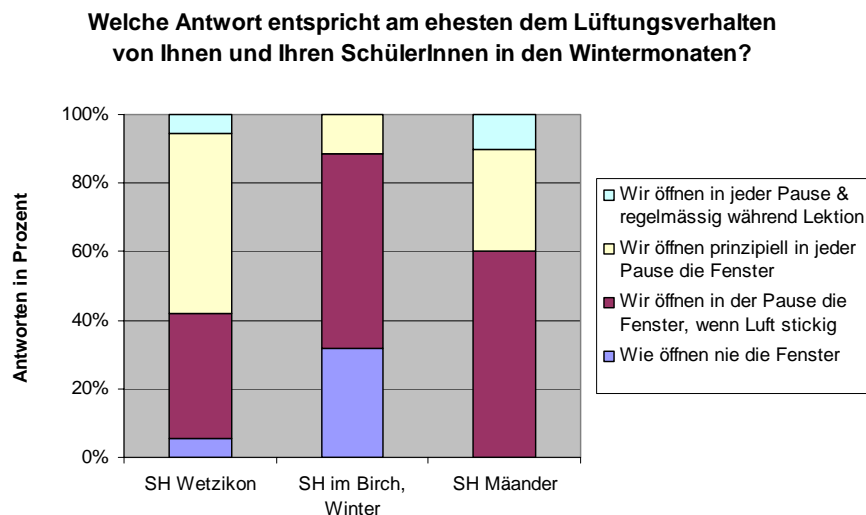


Abbildung 6.1 Lüftungsverhalten

Eine weitere Frage widmete sich der Zufriedenheit bezogen auf die wahrgenommene Luftfeuchtigkeit, welche vorwiegend in den Wintermonaten oft als zu tief angesehen wird. Der untenstehenden Grafik lässt sich entnehmen, dass die Luftfeuchtigkeit grösstenteils als gerade richtig oder ein wenig zu trocken empfunden wird.

**Beurteilen Sie die Luftfeuchtigkeit in den letzten zwei Wochen.  
Für mein Empfinden ist es im Raum..**

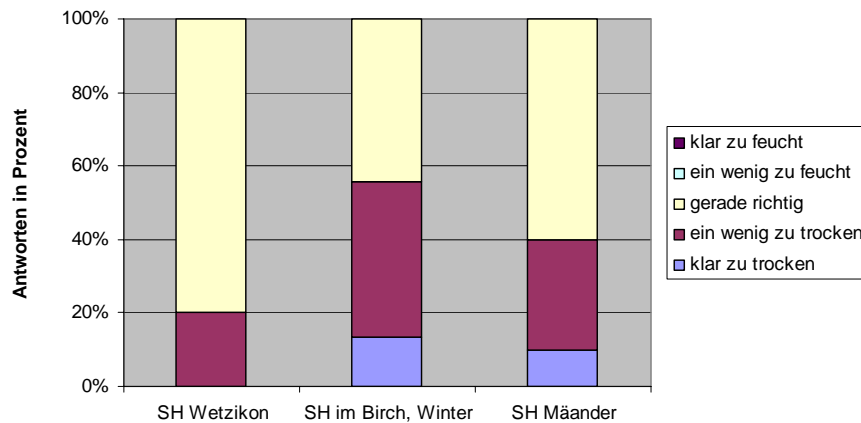


Abbildung 6.2 Luftfeuchtigkeit

Des Weiteren wurden die Lehrpersonen dazu angehalten, die Luftqualität in verschiedenster Weise zu beurteilen. Dazu diente in erster Linie die Frage, wie die Luftqualität im Allgemeinen bewertet wird. Während im Schulhaus Wetzikon (77.9%) und im Schulhaus Mäander (60%) deutlich über die Hälfte der Befragten angaben, die Luftqualität insgesamt als eher gut bis sehr gut einzustufen, waren es im Schulhaus Birch lediglich 48.8%.

**Wie beurteilen Sie die Luftqualität insgesamt?**

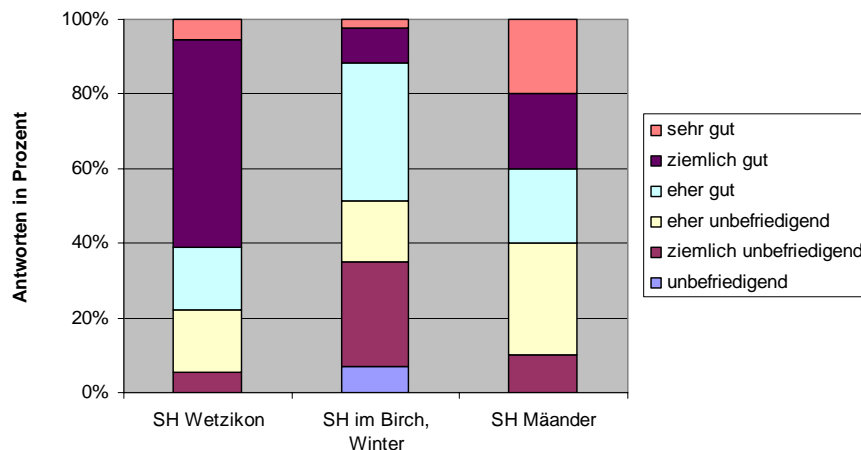


Abbildung 6.3 Luftqualität insgesamt

Zur Erklärung der Ergebnisse könnten unter Umständen die Antworten zur Luftqualität am Morgen und am Nachmittag beitragen. In der nachfolgenden Tabelle wird ersichtlich, dass die Mehrheit der Befragten in allen Schulhäusern die Luft als eher oder ziemlich frisch einstuft. Interessanterweise wird jedoch in keinem Schulhaus die Luft morgens als sehr frisch wahrgenommen.

**Beurteilen Sie die Luftqualität, wenn Sie am Morgen den Unterricht beginnen.**

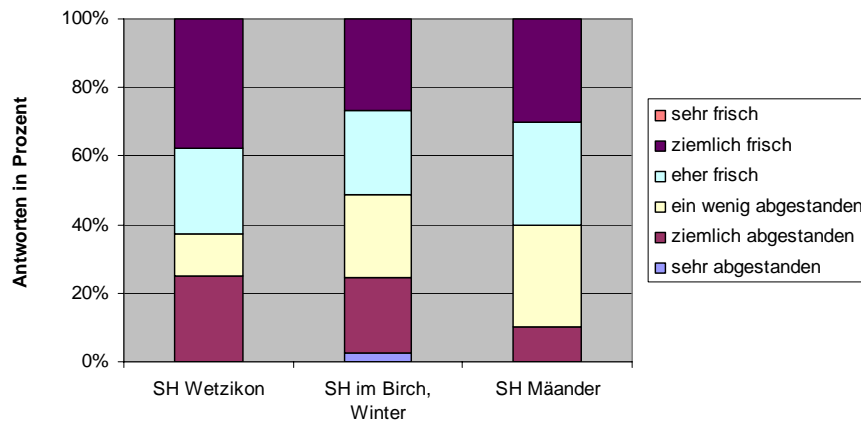


Abbildung 6.4 Luftqualität morgens

Betrachtet man die Grafik zu den Antworten bezüglich der Luftqualität am Nachmittag, so stellt man ein neues Bild fest. Während in den Schulhäusern Wetzikon (50%) und Mäander (60%) nach wie vor die Hälfte der Befragten mit der Qualität der Luft eher oder ziemlich zufrieden ist, sind es im Schulhaus Birch nur noch 19.5%.

**Beurteilen Sie die Luftqualität am späten Nachmittag bei üblicher Belegung während den Lektionen.**

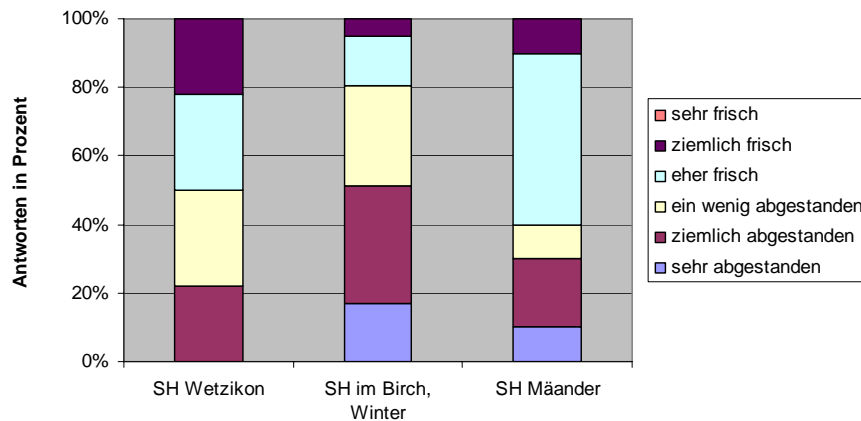


Abbildung 6.5 Luftqualität nachmittags

Des Weiteren wurden die Lehrpersonen gefragt, ob sie in Zimmern mit oder ohne Lüftungsanlage die Luftqualität als besser einschätzen. Während im Schulhaus Wetzikon der grösste Teil der Befragten (47.1%) darüber keine Auskunft geben konnte, gaben im Schulhaus Mäander 62.5% an, dass sich die Qualität der Luft ist einer Lüftungsanlage deutlich verbesserte. Im Schulhaus Birch gaben demgegenüber 72.5% der Befragten an, dass die Luftqualität gar nicht oder nur halbwegs besser sei als in Zimmern, welche über die Fenster gelüftet werden.

**Ich beurteile die Raumluftqualität hier besser als in Schulzimmern mit Fensterlüftung (ohne Lüftungsanlage)**



Abbildung 6.6 Raumluftqualität im Vergleich

In einem nächsten Schritt wurden die Befragten vor die Wahl gestellt, ob sie ein Zimmer mit oder ohne Lüftungsanlage bevorzugen würden. Während es den Lehrpersonen im Schulhaus Wetzikon grösstenteils keine Rolle spielt, wie ein Zimmer gelüftet wird (58.8%), wünschen sich jene aus dem Schulhaus Birch mehrheitlich (69.2%), die Räume wieder über die Fenster lüften zu können währenddessen die Befragten im Schulhaus Mäander die Lüftungsanlage deutlich favorisieren (85.7%).

**Falls Sie wählen könnten, würden Sie ein Klassenzimmer mit oder ohne Lüftungsanlage bevorzugen?**

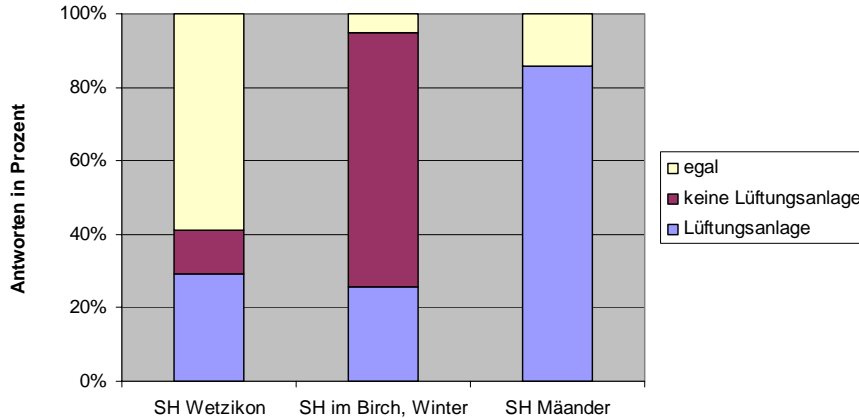


Abbildung 6.7 Luftqualität insgesamt

Bei der Entscheidung für oder gegen eine Lüftungsanlage könnten unter anderem auch die Geräusche, welche durch die Lüftung verursacht werden, einen Einfluss haben. Aus der nachfolgenden Tabelle wird ersichtlich, dass in den Schulhäusern Mäandern und Wetzikon die Befragten zu zwei Dritteln die Geräusche der Lüftung als nicht oder nur sehr bedingt vorhanden einstufen (90% / 88.3%). Dies im Gegensatz zum Schulhaus Birch, wo die Geräusche der Lüftung deutlich als störender bewertet wurden, empfanden doch lediglich 46.6% der Befragten den Lärm als gering oder nicht hörbar.

Abbildung 6.8 Luftqualität insgesamt

**Wie stark bewerten Sie die Geräusche, welche von der Lüftung her stammen?**

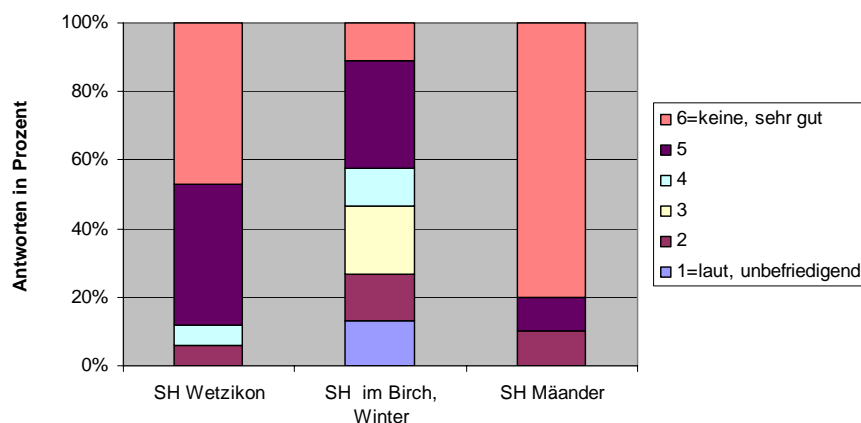


Abbildung 6.9 Lärmbelastung durch die Lüftungsanlage

Abschliessend wurde noch nach einer Gesamtnote für das Lüftungssystem gefragt. Geht man davon aus, dass ab einer Bewertung von 4 die Leistungen der Lüftungsanlage als genügend angesehen werden können, so ergibt sich folgendes Bild: Im Schulhaus Wetzikon schätzen 88.3% die Lüftungsanlage als genügend bis gut ein. Im Schulhaus Mäander sind es nur noch 50%, welche die Lüftungsanlage zwischen genügend und sehr gut bewerten und im Schulhaus Birch sind es mit 48.6% sogar noch weniger.

Indikatoren für diese unterschiedlichen Bewertungen lassen sich aus den obenstehenden Grafiken ableiten und werden in den Unterkapiteln zu den einzelnen Schulhäusern näher thematisiert.

**Gesamtnote Lüftungssystem**

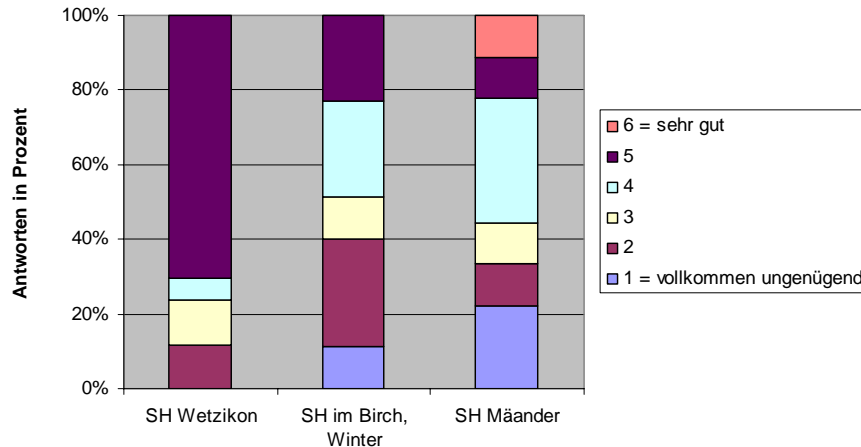


Abbildung 6.10 Gesamtnote Lüftungssystem

## 7. Erfahrungen aus weiteren Schulanlagen

### 7.1. UNIVERSITÄT ZÜRICH

Als praktisches Beispiel darf die Universität Zürich in Sachen Gebäudelüftung nicht unerwähnt bleiben. An der Universität ist schon sehr früh erkannt worden, dass ein ausgeklügeltes Lüftungssystem für einen effizienten Lernbetrieb eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt.

Schon vor knapp 20 Jahren wurden in einer ersten Etappe sämtliche Hörsäle im Irchel unter Leitung von Bernhard Brechbühl mit modernen Lüftungsanlagen ausgestattet. Man kam damals zum Schluss, dass eine manuelle Steuerung der Lüftung auf Grund der unregelmässigen Betriebszeiten kaum planbar ist. Zusätzlich schwanken die Belegungszahlen damals wie heute zwischen 5-100 %. Die Lüftung mit Schaltuhr oder gar konstant mit 100 % Leistung laufen zu lassen, konnte längerfristig ökonomisch und ökologisch nicht toleriert werden. Eine CO<sub>2</sub>-gesteuerte Anlage schien die ideale Lösung. Im Gegensatz zu anderen Methoden ist mit den CO<sub>2</sub>-Luftqualitätsfühlern eine Steuerung nach einem zweckmässigen Luftqualitätssensor möglich. Die Messwerte von 0-2000 ppm sind leicht interpretierbar. Die Wartungskosten sind gering. Temperatur und Feuchte beeinflussen die Messmethode nicht. Ausserdem lassen sich mit einem Fühler von rund CHF 1000.- Anschaffungskosten bis zu 300 m<sup>2</sup> Raum abdecken. Selbst in Räumen mit Raucheranteil können entsprechende Messungen durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass dazu ein spezieller Fühler mit Mischsignal CO<sub>2</sub>/VOC (volatile organic components) zu verwenden ist. Ein VOC als alleinige Messgrösse ist allerdings nicht geeignet, da eine zu starke Drift in Kauf genommen werden muss.

Bis heute wurden 53 Hörsäle, 106 Seminarräume, etliche Bibliotheken, Museen, Restaurants, EDV-Räume und Sporthallen mit modernen Lüftungsanlagen ausgerüstet. Die Gebäude und Räume werden grundsätzlich nach einem einheitlichen Schema belüftet. So schalten die Lüftungen bei einem CO<sub>2</sub>-Wert von >850 ppm ein (vgl. Tabelle 4.1). Um ein häufiges Ein- und Ausschalten von CO<sub>2</sub>-Werten im Grenzbereich zu unterbinden, bedient man sich einer Hysterese. Die Lüftung wird demnach bei den erwähnten >850 ppm eingeschaltet, aber erst nach Unterschreitung von 800 ppm wieder ausgeschaltet. Bei höherer CO<sub>2</sub>-Konzentration (>1100 ppm) schaltet das System auf Lüftungsstufe 2. Somit ist auch bei hoher Belegungszahl ein optimaler CO<sub>2</sub>-Pegel in nützlicher Frist erzielbar. Zusätzlich zu den CO<sub>2</sub>-Messungen wird die Temperatur überwacht. Damit wird sichergestellt, dass bei unangenehm hoher Raumtemperatur und gleichzeitigem CO<sub>2</sub>-Wert von unter 850 ppm trotzdem die Lüftung arbeitet. Vor allem in Sommermonaten erwärmen sich die Räume häufig auch bei tiefer Belegungszahl z.B. durch direkte Sonneneinstrahlung. Um unnötigen Energieverlust bei der Belüftung von unbelegten Räumen mit zu hoher Temperatur vorzubeugen, sind sämtliche Anlagen zusätzlich mit einem infrarotgesteuerten Präsenzmelder ausgerüstet. Dieser hat nebst der Luftqualitätsmessung, die Aufgabe das Licht in unbesetzten Räumen auszuschalten und so weitere wertvolle Energie zu sparen. In der Nacht, vor allem in den Sommermonaten, wird häufig Frischluft in die Hörsäle befördert um die aufgewärmten Mauern energiesparend für den nächsten Tag abzukühlen (Nachtauskühlung)

In Neubauten empfiehlt Herr Brechbühl den Einsatz einer frequenzgesteuerten Lüftung. Diese kann stufenlos das Luftvolumen variieren. Die Mehrkosten im Vergleich mit der zwei- oder mehrstufigen Variante sind vernachlässigbar. Die Steuerung sieht dann vor, dass bei >850 ppm die Anlage einschaltet und mit ca. 30% läuft. Ein weiterer Anstieg des CO<sub>2</sub>-Pegels bewirkt eine kontinuierliche Steigerung der Lüfterleistung bis diese bei 1200 ppm und mehr auf 100% läuft.

Im Gespräch mit dem damaligen und heutigen Verantwortlichen Bernhard Brechbühl stellte sich heraus, dass die vor gut zwei Jahrzehnten installierten CO<sub>2</sub>-Fühler immer noch tadellos funktionieren. Er ist der Meinung, dass ein marktüblicher CO<sub>2</sub>-Fühler problemlos 20-30 Jahre seine Leistung bringe. Die Fühler werden alle fünf bis sechs Jahre vom Betriebspersonal der Universität mit Hilfe von Eichgas selbstständig geeicht. Damit konnten die Betriebskosten über die Jahre konstant tief gehalten werden.

Ende 80er war es den Raumbenutzern an der Universität nicht möglich manuell die Steuerung der Lüftungsanlage zu beeinflussen. Dies wurde in den periodischen Befragungen zum Lüftungssystem entsprechend kritisiert. So ergänzte man die Anlage um einen sogenannten ‚Handtaster‘. Somit kann der Dozent willkürlich eine halbstündige ‚Raumspülung‘ veranlassen. Erfahrungsgemäss werden diese tendenziell zu Beginn des Tages betätigt.

Die wichtigsten Komponenten eines Lüftungssystems stellen zweifellos die CO<sub>2</sub>-Fühler dar. So nannte

Herr Brechbühl als persönliche Favoriten die Modelle den ‚Airox‘ von Honeywell (Aritron-Messfühler), den QPA63.1 von Siemens, den WRF04 von Thermokon und den Datenlogger von Mosway. Sämtliche genannten Geräte wurden als tauglich betitelt. Speziell zu erwähnen ist der WRF04 von Thermokon und QPA63.1. Mosway, eine Schweizer Jungfirma, bietet Geräte mit einem sehr guten PreisLeistungsverhältnis an. Ausserdem ist auch das Produkt von Siemens empfehlenswert. Als Schwachpunkt dieses Gerätes ist der nicht integrierte Temperaturmesser zu nennen. Dies hat in der Vergangenheit zu Messwertverfälschungen geführt. So wurde aus Unwissenheit das Temperaturmessgerät direkt über dem CO<sub>2</sub>-Fühler installiert, was eine Beeinflussung durch Wärmeabstrahlung zur Folge hatte. Die Kosten der verschiedenen Typen belaufen sich in etwa im selben Rahmen. VOC-basierte Fühler haben sich nicht bewährt, da das Signal von Feuchte und Temperatur beeinflusst sei. Zudem drifteten die Signale über die Zeit.

Die Fühler werden immer in den Räumen platziert. (Da man auch ohne Betrieb der Lüftung sinnvolle Messwerte haben will, eignet sich die Platzierung in der Abluft nicht.)

Heute werden auch Sporthallen und Mensen mit CO<sub>2</sub>-Fühlern gesteuert.

CO <sub>2</sub> -Anteil	Anteilsdefinition
380 ppm	Normaler Pegel Aussenluft
850 ppm	Lüftung Stufe 1 Ein
800 ppm	Lüftung Stufe 1 Aus
1100 ppm	Lüftung Stufe 2 Ein
1050 ppm	Lüftung Stufe 2 Aus

Tabelle 5.1 Schaltwerte CO<sub>2</sub> (Universität Zürich)

Dank den bedarfsgesteuerten Lüftungsanlagen kann die Uni Zürich seit Jahren auf die Befeuchtung verzichten (jedoch werden immer Rotationswärmetauscher eingesetzt), was beträchtliche Kosten einspart.

Angesprochen auf sinnvolle Steuerungsmöglichkeiten für Klassenzimmer mit 25 Schülern (650 m<sup>3</sup>/h Luft) schlägt Herr Brechbühl vor, in jedem Fall frequenzgesteuerte Anlagen einzusetzen. Er ist gegen eine dauernde Grundlüftung (unnötig und energieverwendend). Ein CO<sub>2</sub>-Raumfühler soll die Anlage bei >850 ppm mit 30% Leistung in Betrieb nehmen und dann kontinuierlich hochfahren.

Damit nicht überall Volumenstromregler eingebaut werden müssen und damit die Anlagen sehr teuer würden, schlägt er vor das zentrale Lüftungsgerät mit einem „Maximal-Stufen-Relais“ zu steuern: Der CO<sub>2</sub>-Gehalt würde in jedem Unterrichtszimmer gemessen. Der höchste gemessene Wert diktiert die Lüfterleistung.

## 7.2. SCHULANLAGEN IN LUXEMBURG

In Luxemburg wurden in den letzten 5 Jahren rund 10 staatliche Schulen mit je 1500-1800 Schülern neu geplant und gebaut. Erste Anlagen sind dieses Jahr (2007) in Betrieb gekommen. Die Planung der Haustechnik wurde dem Schweizer Ingenieur Beat Kegel übertragen, welcher uns freundlicherweise die hier beschriebenen Angaben machte.

Bei den dort verwirklichten Konzepten handelt es sich um Lüftungen über automatisierte Lüftungsklappen in den Fassaden. Das Konzept „automatisierte Lüftungsklappen“ sieht wie folgt aus:

Ziel: Gute Luftqualität, kostengünstig und mit minimalem Energieverbrauch

Funktionsbeschreibung: Die Lüftung wird über schmale, raumhohe Lüftungsklappen, welche mit einem motorischen Antrieb aufgefahen und geschlossen werden, sichergestellt. Durch die möglichst raumhohen Lüftungsöffnungen entsteht, thermisch bedingt ein effektiver Luftaustausch zwischen Innen und Aussen. Um Unbehaglichkeit zu vermeiden werden die Klappen nur in den Pausen (zeitprogrammiert) betätigt. Falls keine Personen präsent sind (Präsenzsensoren, welcher primär für die Lichtausschaltung installiert ist), wird nicht gelüftet. Je nach

Aussentemperatur werden die Lüftungsflügel kürzer oder länger offen gehalten. Typische Werte: bei  $-10^{\circ}$  ca. 2 Minuten offen, bei  $0^{\circ}$  ca. 3-4 Minuten offen.

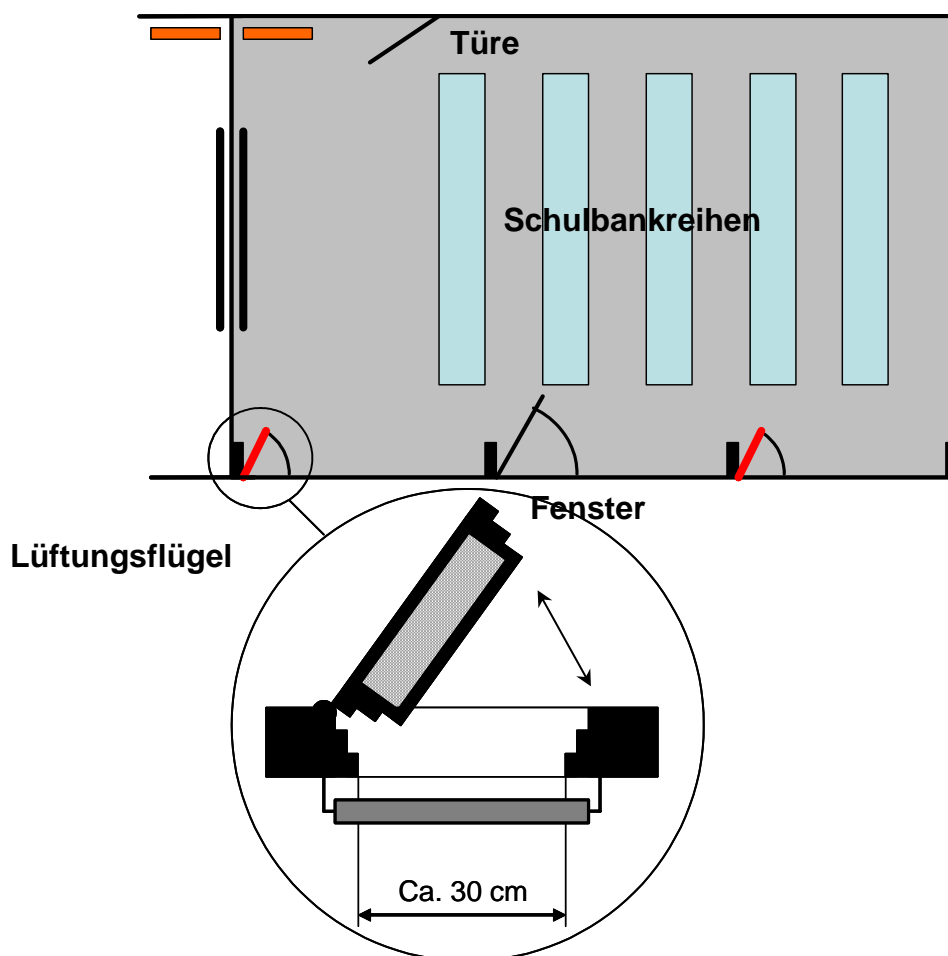


Abbildung 7.1 Grundriss eines Unterrichtszimmers und Vergrößerung des Lüftungsflügels mit Wetterchutzlamellen davor

- Nachtauskühlung:** Das System erlaubt auch eine effiziente Nachtauskühlung im Sommer, indem die Lüftungsflügel wiederum über das Kriterium „Aussentemperatur“ freigegeben werden.
- Sicherheit:** Die elektrischen Antriebe sind mit einem Einklemmschutz ausgerüstet. Als Witterungs- und Einstiegsschutz ist Aussen ein gestaltbares Gitter-/Lamellengebilde angebracht. Bei Regen und/oder Wind wird nicht automatisch gelüftet (Sensor, welcher auch für Storen genutzt wird)
- Regulierung:** Winter: über eine Zeitschaltuhr wird in jeder Pause die Öffnung freigegeben, sofern Präsenz=ja und Witterungssensor = ok; Der Schliessbefehl erfolgt aufgrund einer voreingestellten, von der Aussentemperatur abhängigen, Zeitdauer. In der Übergangszeit, kann es vorkommen, dass auch über die Pause hinaus die Lüftungsflügel geöffnet bleiben.  
Sommer: Freigabe über das Kriterium „Aussentemperatur“.
- Manueller Einfluss:** Die Lehrer können die Automatik für kurze Zeit auch manuell übersteuern. Zusätzlich steht mindestens ein öffentlicher Fensterflügel zur Verfügung.
- Heizsystem:** An den **Innenwänden** liegende, thermostatgesteuerte Radiatoren. (ausenliegende Radiatoren würden durch den entstehenden Kaltluftabfall zu schnell aktiviert; zudem senken innenliegende Radiatoren die Kosten)
- Gebäudehülle:** Sehr gute Wärmedämmung der Brüstung und der Fenster (3-fach-Verglasung)

- Wichtig:** Die Lüftungsflügel müssen wirklich hoch sein. Die Flügel müssen einen grossen Öffnungs-Querschnitt ermöglichen (z.B. mindestens 60° öffnen bei einem 30 cm breiten Flügel). Der Flügelantrieb muss weitgehend geräuschlos arbeiten (Akzeptanz).
- Voraussetzung:** Schulhaus liegt eher an einer ruhigen Lage. Unfiltrierte Zuluft wird akzeptiert
- Kosten:** Die Investitionskosten sind minimal: Lüftungsflügel (=günstiger als Fenster); elektrischer Antrieb; Regulierung mit weitgehend bereits vorhandenen Signalen. Die Betriebskosten dürften ebenfalls sehr interessant sein, da der Energieverbrauch und vor allem der Wartungsaufwand klein sind.
- Energie:** Die Tatsache, dass der Luftwechsel auf das hygienisch notwendige Minimum beschränkt bleibt und dass praktisch keine elektrische Energie benötigt wird, lässt dieses System trotz fehlender Wärmerückgewinnung energetisch als ebenbürtig zu einer mechanischen Lüftungsanlage erscheinen.
- Diskussion:** Die Einfachheit des Systems überzeugt grundsätzlich. Problematisch ist sicher, dass in vollbesetzten, relativ kleinen Schulräumen (ca. 3 m<sup>2</sup> pro Person) die CO<sub>2</sub>-Konzentration nach 50 Minuten auf 2000 ppm steigt, und somit im letzten Drittel der Lektion über dem zulässigen Wert von 1500 ppm zu liegen kommt.



Abbildung 7.2 Ein Objekt mit ähnlichen Lüftungsflügeln, hingegen nach Aussen öffnend wurde kürzlich in Genf fertig gestellt (Cycle d'orientation Cayla, photo: Susanna Fritscher)

## 8. Synthese

Die Untersuchungen zeigen, dass die Anforderung „gute Luftqualität, kostengünstig und mit minimalem Energieverbrauch“ nicht einfach zu erfüllen ist.

Das Ziel dieser Arbeit bestand unter anderem in der Erfassung und Darstellung von Raumluftparametern für drei verschiedenartig gelüftete Unterrichtszimmer. In den vorangegangenen Kapiteln konnte gezeigt werden, wie sich die Verhältnisse in CO<sub>2</sub>-gesteuerten, zeitgesteuerten und manuell gelüfteten Unterrichtsräumen präsentieren.

Über das Ganze betrachtet ist festzustellen, dass eigentlich kein einziger Schulraum wirklich optimal im Sinne der erwähnten Hauptanforderung belüftet wird. Ganz klar bessere Luftqualität weisen jedoch die mechanisch belüfteten Schulräume auf. Es kommt aber vor, dass auch Anlagen mit hochwertigen Steuerungseinrichtungen mit CO<sub>2</sub>-, Präsenz- und Zeitsteuerung ungenügende Ergebnisse erbringen, wenn wichtige Einflussgrössen nicht optimal einbezogen sind.

Solche Einflussgrössen gibt es zahlreiche und deren Bedeutung wird häufig unterschätzt:

- Gestaltung und Grösse der Fenster
- Wirksame Beschattung
- Aussenlärmsituation
- Art des Schulunterrichts (Primar-, Sekundar- und Mittelschulen/Fachhochschulen unterscheiden sich stark)
- Luftvolumenstrom

Bei der Anlage im Birch beispielsweise sind es die grossen Verglasungen, welche sich nur ungenügend öffnen lassen und auch generell zuviel Wärme ins Schulhaus eindringen lassen sowie der knapp bemessene Luftwechsel, welche zusammen für ein unbefriedigendes Klima sorgen. Im Weiteren zeigte sich, dass die Lüftungssteuerung über den CO<sub>2</sub>-Gehalt ein robustes Regelkonzept und zuverlässige Sensoren erfordert. Ist dies nicht gegeben oder ist die Platzierung der Sensoren nicht an geeigneten Orten möglich (vor Beschädigung und Querströmungen geschützt) so wirkt sich dies stark nachteilig auf die Luftqualität bzw. Energieeinsparung aus.

Bei der Kantonsschule Wetzikon (KZO) werden die rein fenstergelüfteten Räume leider nicht in jeder Pause genügend gelüftet, so dass häufig „dicke Luft“ entsteht. Die Sensibilisierung (mit einem elektronischen Lüftungswarner) bringt wohl etwas Verbesserung, aber trotzdem wird die Handhabung der Fenster häufig vergessen.

Die mechanischen Lüftungen in demselben Schulhaus verfügen über eine ungünstige Luftführung (Kurzschlussströme) und eine unzuverlässige Steuerung, welche niemand so richtig versteht. In der Folge kommt es auch hier häufig zu „dicker Luft“ und/oder die Fenster stehen zu häufig unnötig offen (Energieverluste und auch betriebliche Aufwände des Personals).

Im Mäander (Fachhochschule) wird klar zuviel gelüftet, was zu sehr trockener Luft im Winter und zu höherem Energieverbrauch führt. Im Grossen und Ganzen scheinen die Nutzer in dieser Schule jedoch recht zufrieden mit der Anlage.

Ein grundlegendes Problem in mehreren Schulhäusern scheint die korrekte Einregulierung der Luftmengen zu sein. Dies ist jedoch für die korrekte Funktion jeglicher Regelkonzepte von grosser Bedeutung. Die Lüftungskonzepte sind daher einfach zu halten und die Luftverteilung sollte so geplant werden, dass keine aufwändigen Luftmengenabgleiche nötig sind, d.h. eine Druckabfallberechnung ist durchzuführen.

### 8.1. ENERGIE

Durch eine **Präsenzsteuerung** kann gegenüber einer einfachen Zeitsteuerung (Referenzanlage) eine Verbrauchsreduktion von 0.4-0.6 kWh Strom sowie 1.0-1.3 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung erzielt werden. Je nach Anlage kann diese Einsparung knapp 30% bis etwa 40% des Energiebedarfs der Anlage entsprechen (Strom und Wärme).

Durch eine **CO<sub>2</sub>-Steuerung** kann gegenüber der Zeitsteuerung (Referenzanlage) eine Verbrauchsreduktion von 0.6-1.0 kWh Strom sowie 1.8-2.3 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung erzielt werden. Je nach Anlage kann diese Einsparung etwa 40% bis über 60% des Energiebedarfs der Anlage entsprechen (Strom und Wärme).

Zudem zeigte sich, dass die Betriebszeiten für Spülungen (= Lüftungsbetrieb bevor eine Belegung stattfindet) kritisch hinterfragt werden müssen. Wenn immer möglich sollten solche Spülzeiten sehr kurz gehalten oder ganz weggelassen werden, um grosse Energieverluste zu vermeiden..

Für das untersuchte Schulhaus Birch wird geschätzt, dass durch den Verzicht auf diesen Spülvorgang der Energiebedarf der Anlage um 30% oder knapp 0.6 kWh Strom sowie 1.5 kWh Heizwärme pro m<sup>3</sup>/h Auslegungsluftleistung reduziert werden könnte. Bei Anlagen mit einer CO<sub>2</sub>-Steuerung kann die prozentuale Reduktion noch deutlich höher sein (absolute Reduktion identisch). Zumindest in der Heizperiode sollte auf diese Spülvorgänge verzichtet werden.

Ist ein Erdregister in der Anlage vorhanden, so wird ein Teil der Heizwärme anstatt durch die Wärmerückgewinnung und die Nachwärmung durch die Vorwärmung im Erdregister erbracht. Dadurch reduziert sich das Einsparpotential, welches durch eine bedarfsgerechte Steuerung erzielt werden kann vor allem in Bezug auf die Wärme.

**Insgesamt ist anzumerken, dass in erster Priorität das Ziel eine energieeffiziente Anlage mit geringen Druckverlusten und einer guten Wärmerückgewinnung sein muss.**

## 8.2. WIRTSCHAFTLICHKEIT

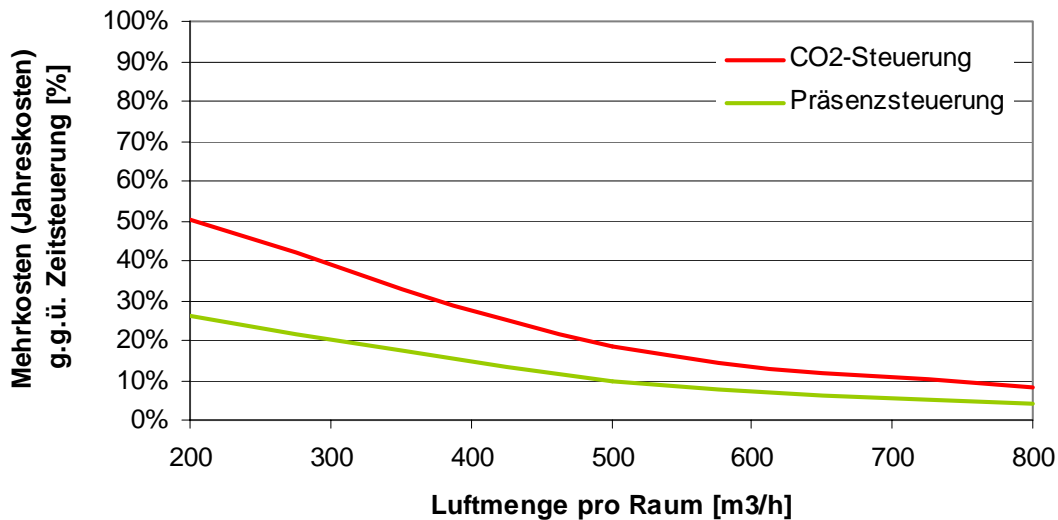
Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 zeigen die Mehrkosten (in %) für die Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung gegenüber der Zeitsteuerung für unterschiedliche Luftmengen (Raumgrössen) und Anlagentypen. Zum einen wird in Abbildung 8.1 die Anlage dargestellt, wie sie im Schulhaus Birch realisiert wurde (mit Kreislaufverbundsystem und Erdregister) und zum andern in Abbildung 8.2 eine typische Anlage mit gutem Wärmerückgewinnungsgrad und optimiertem Stromverbrauch (tiefe Druckverluste, günstiges Betriebsregime, jedoch kein Erdregister).

Je kleiner die Auslegungsluftmenge des Raums ist, desto höher sind die prozentualen Mehrkosten. Bedarfsabhängige Steuerungen sind also vor allem für grössere Räume von Interesse und insbesondere wenn sehr unterschiedliche Belegungen oder lange Betriebszeiten der Anlage vorkommen.

Im weiteren zeigen die Berechnungen, dass bei energieeffizienten Anlagen die prozentualen Mehrkosten ansteigen. Dies hängt vor allem mit der dadurch geringeren Einsparung bei den Energiekosten zusammen. Mit Blick auf die absoluten Jahreskosten ist der Einsatz einer energieeffizienten Anlage (hoher Wärmerückgewinnungsgrad, tiefe Druckverluste) in jedem Fall lohnend. Müssen aus technischen Gründen Abstriche bei der Energieeffizienz gemacht werden, so drängt sich der Einsatz einer bedarfsabhängigen Steuerung stärker auf (z.B. bei Kreislaufverbund-Systemen bzw. Anlagen mit erhöhten Druckverlusten).

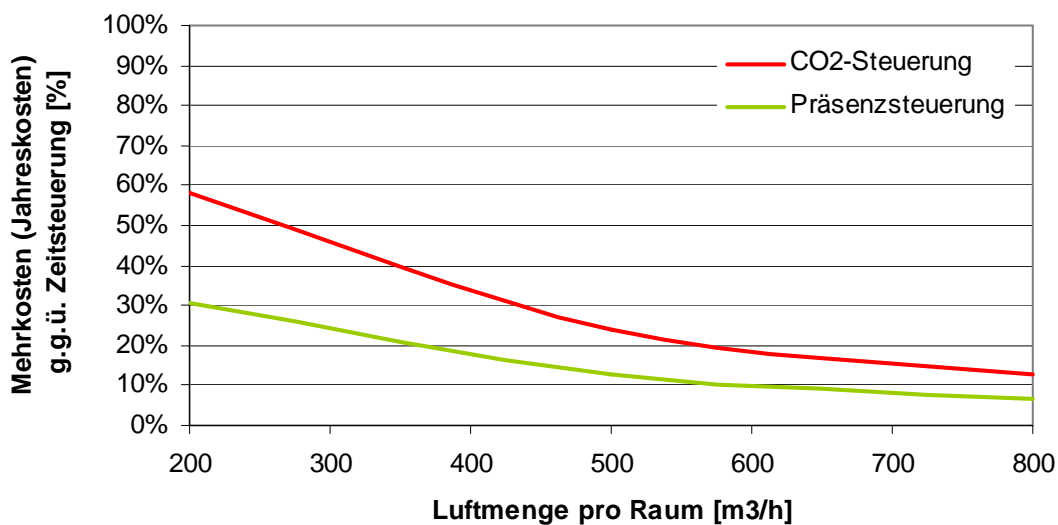
Wie in Kapitel 3.4.5, Abbildung 3.34 gezeigt, sind vor allem die Instandhaltungskosten für die Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung überproportional hoch. Hinzu kommen relativ hohe Investitionskosten. Dies hängt nicht zuletzt mit den gewählten Anlagenkonzepten zusammen. Im Kapitel 9.1 werden diese daher noch genauer betrachtet.

Eine CO<sub>2</sub>-Steuerung (evtl. Präsenzsteuerung) könnte hingegen in einem Gymnasium oder in einer Fachhochschule (wie KZO und Mäander) durchaus wirtschaftlich sein, da dort (vor allem im Mäander) längere Betriebszeiten und grössere Schwankungen in der Belegungsdichte existieren. Hinzu kommen die Vorteile eines höheren Komforts, wenn die Luftleistung dem Bedarf angepasst wird (weniger Austrocknung der Raumluft im Winter). Es würde sich demnach empfehlen in diesen Schulhaustypen mit CO<sub>2</sub>-Steuerung erste Unterrichtsräume auszurüsten (wie dies auch die Universität Zürich in ihrem Energieleitbild vorsieht).



Jahreskosten bestehend aus Amortisation, Kapitalkosten, Energiekosten, Instandhaltungskosten und div. Kosten (Versicherungen etc.). Relative Differenz der Jahreskosten zu einer Anlage mit Zeitsteuerung.  
 Anlage mit Erdregister, Spülung Nachts 1:00-4:00, KVS-System mit 57% WRG, Ventilatorleistung: 0.64 W/(m³/h)

Abbildung 8.1 Vergleich der Jahreskosten für Zeit- Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung. Raum mit 500 m³/h Luftmenge Lüftung mit 57% Wärmerückgewinnungsgrad und einem spezifischen Leistungsbedarf von 0.64 W/(m³/h)



Jahreskosten bestehend aus Amortisation, Kapitalkosten, Energiekosten, Instandhaltungskosten und div. Kosten (Versicherungen etc.). Relative Differenz der Jahreskosten zu einer Anlage mit Zeitsteuerung.  
 Anlage ohne Erdregister, keine Spülung Nachts, Wärmetauscher mit 75% WRG, Ventilatorleistung: 0.4 W/(m³/h)

Abbildung 8.2 Vergleich der Jahreskosten für Zeit- Präsenz- und CO<sub>2</sub>-Steuerung. Raum mit 500 m³/h Luftmenge Lüftung mit 75% Wärmerückgewinnungsgrad und einem spezifischen Strombedarf von 0.4 W/(m³/h)

## 9. Schlussfolgerungen über alle Objekte

Eine abschliessende Aussage zu der Art wie nun verschiedene Unterrichtsräume zu lüften sind, lässt sich aus den gefundenen Ergebnissen sicher noch nicht ableiten. Zu vielfältig erscheinen die Probleme und Ansprüche gegenwärtig.

Als erstes sind sicher die Anforderungen genauer zu klären. Wie viel CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind wirklich zulässig und über welche Zeiträume.

Die **neue SIA-Norm 382/1** (seit 1.7.07 in Kraft) legt folgende Luftqualitätswerte fest:

- Luft in Räumen, die dem Aufenthalt von Menschen dienen; CO<sub>2</sub>-Pegel 950 bis 1350 ppm, Lüftrate 22 bis 36 m<sup>3</sup>/h (pro Person); als RAL 3 = Räume mit mittlerer Luftqualität (typische Wohn- und Büroräume) bezeichnet
- Und spezifische Auslegungskriterien für Schulen:
  - Schulzimmer ohne unterstützende Fensterlüftung: 30 m<sup>3</sup>/h (pro Person)
  - Schulzimmer mit unterstützende Fensterlüftung: 25 m<sup>3</sup>/h (pro Person)
  - Lehrerzimmer: 36 m<sup>3</sup>/h (pro Person)

Leider sagt die SIA-Norm 382/1 nichts über die Zeitdauer der Exposition aus. Eine Rückfrage beim Kommissionspräsidenten bestätigte, dass diese Werte als Mittelwerte über eine Schullektion zu verstehen sind. (Damit wird zugelassen, dass am Ende einer Lektion die CO<sub>2</sub>-Konzentration deutlich über 1350 ppm sein kann)

Die **Stadt Zürich** verlangt zur Zeit maximale CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 1000 ppm.

Die **Universität Zürich** hält in ihrem Energieleitbild (2003-2012) keine CO<sub>2</sub>-Pegel fest, aber dass die Luftmenge pro Arbeitsplatz auf max. 30 m<sup>3</sup>/h zu begrenzen ist und dass die Lüftung in Unterrichtsräumen zusätzlich mit CO<sub>2</sub>-Sensoren zu regeln ist.

Die **österreichische Akademie der Wissenschaften** hat zusammen mit dem Umweltministerium anfangs 2006 folgende Richtwerte für CO<sub>2</sub>-Gehalte herausgegeben:

- 601 – 1000 ppm dCO<sub>2</sub>-Gehalt\*) für RAL 3 (in Anlehnung an EN 13779) = mittlere Raumluftqualität; als Mindestvorgabe wurde < 1000 ppm dCO<sub>2</sub>-Gehalt\*) definiert, wobei dies auf einen gleitender Stunden-Mittelwert bezogen wird. (Achtung: \*) bei diesen Werten handelt es sich um Differenzwerte zum Aussenklima!)

Interessant ist, dass man hier den gleitenden Stunden-Mittelwert eingeführt hat. Nimmt man den Mittelwert über eine Schullektion, so sind diese Werte weitgehend deckungsgleich mit denjenigen der neuen SIA-Norm 382/1.

Eine breit abgestützte **Arbeitsgruppe des Kantons Genf** hat kürzlich dazu folgende Richtwerte herausgegeben:

- der **mittlere** CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft **während einer Lektion** darf 1500 ppm nicht überschreiten (damit wird zugelassen, dass am Ende einer Lektion der CO<sub>2</sub>-Gehalt deutlich über 1500 ppm sein kann)
- Am Anfang der Lektion und ohne Anwesenheit von Nutzern soll der CO<sub>2</sub>-Gehalt deutlich unter 1000 ppm liegen

Der Kanton Genf begründet diese relativ laschen Anforderungen einerseits mit den relativ kurzen Expositionszeiten in höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Schulen (kurze Pause nach jeder Lektion) und andererseits auch mit der Gesamtpräsenz von etwa 1300 h pro Jahr (im Gegensatz zu Büros von etwa 2100 h/a).

**Wir sind der Meinung, dass eine Schullektion (45-50 Min.) als Bezugsgrösse an sinnvollsten ist. Wird die Anforderung bei 1000 ppm (Stadt Zürich) gelegt, dann fallen sämtliche Lösungen mit Fensterflügeln weitgehend ausser Betracht. Wird der Grenzwert hingegen bei 1350 ppm (SIA) festgelegt, dann können - bei guter Vorlüftung, d.h. der Startpegel muss bei unter 600 ppm liegen – auch manuell gelüftete Klassenzimmer in bestimmten Fällen (nicht allzu grosse Belegungsdichte) die Anforderung erfüllen.**

## 9.1. MÖGLICHE STRATEGIE FÜR SCHULRAUMLÜFTUNGSANLAGEN

Von Bedeutung ist, dass die Betrachtungen nach verschiedenen Schultypen und Nutzungsarten unterschieden werden:

Tabelle 9.1 Unterschiedene Nutzungsarten der Schulzimmer

Typ	Beschrieb	Schultyp	Nutzungsart	Belegungs-dichte	Auslastung
A	Lehrkraft ist in den (kleinen) Pausen im Raum; Lehrkraft hat einen Bezug zum Schulraum	Primarschule / Sek.-Schule	fixe Stundenpläne ohne Nutzung an Wochenenden Ferien	Gering, konstant	tief (ca. 25%)
B	In Pausen oft niemand im Raum; Schulräume anonym und ohne Bezug zur Lehrkraft	Gymnasium / Fachhochschulen	teilweise auch Nutzung am Abend / in den Ferien	mittel bis hoch; sehr variabel	mittel bis hoch (ca. 30-40%)

Im Folgenden werden fünf verschiedene Lüftungsvarianten kurz vorgestellt und in Tabelle 9.2 bezüglich ihrer Eignung für die unterschiedenen Nutzungsarten und Schultypen bewertet.

### Lüftungsvariante 1:

#### Anlage ohne mechanische Lüftung

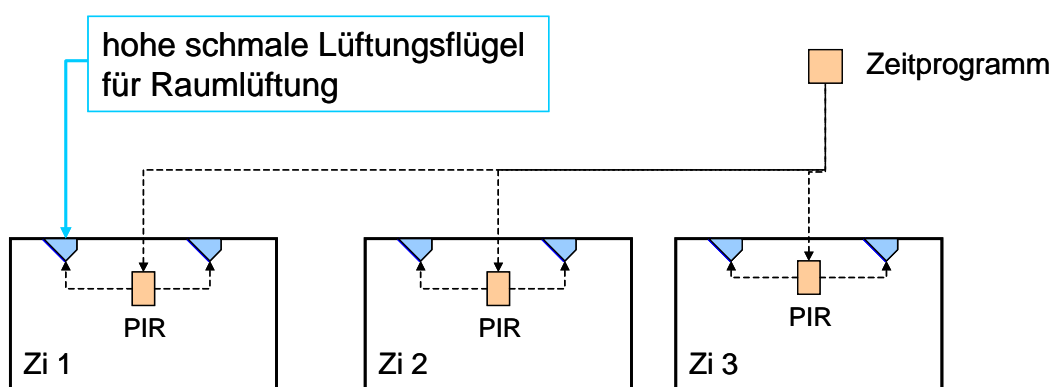


Abbildung 9.1 Lüftungsvariante 1: Gebäude ohne mechanische Lüftung. Lüftung über schmale Festerflügel

#### Funktion:

Steuerung der Lüftungsflügel über Zeitprogramm und Präsenzmelder. Handübersteuerung mit Taster im Raum (Ein/ Aus).

#### Eignung:

- Ähnliche Präsenzzeiten in den einzelnen Räumen (ähnlicher Stundenplan)
- Personenzahl im Raum während der Präsenzzeit meist konstant (Klasse)
- Ruhige Umgebung (Aussenlärm) und keine hohen Belegungsdichten

(Hinweis: Es kann davon ausgegangen werden, dass Präsenzsensoren ohnehin für die Lichtsteuerung vorhanden sind. Eine zusätzliche Regelung nach der Raumtemperatur empfiehlt sich immer dort wo auch der Überhitzungsgefahr über die Lüftung begegnet werden soll)

### Lüftungsvariante 2:

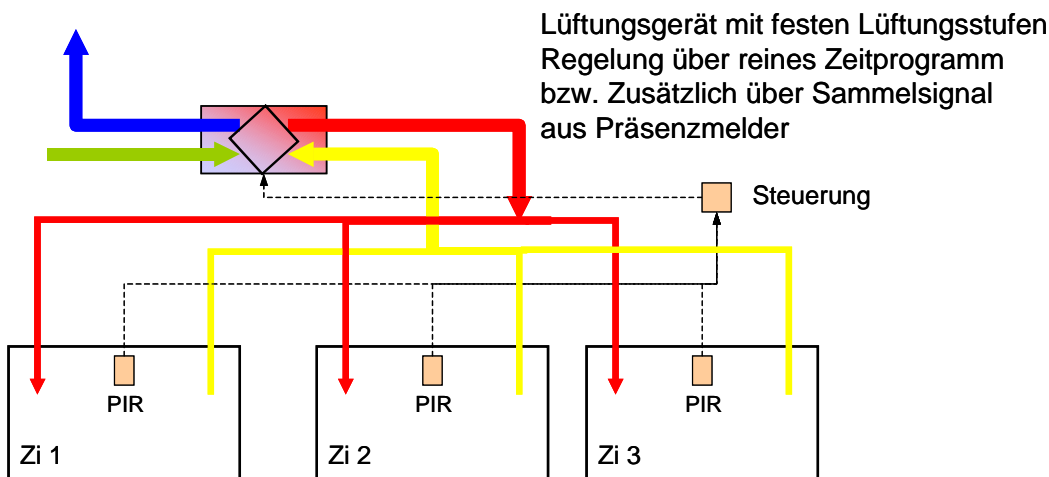


Abbildung 9.2 Lüftungsvariante 2: Mechanische Lüftung mit einfacher Regelung, identisch für alle angeschlossenen Räume

#### Funktion:

Regelung über reines Zeitprogramm bzw. zusätzlich über Sammelsignal aus Präsenzmelder aller Zimmer (Alle Zimmer gleichzeitig Ein/ Aus).

#### Eignung:

- Ähnliche Präsenzzeiten in den einzelnen Räumen (ähnlicher Stundenplan)
- Personenzahl im Raum während der Präsenzzeit meist konstant (Klasse)

### Lüftungsvariante 3:

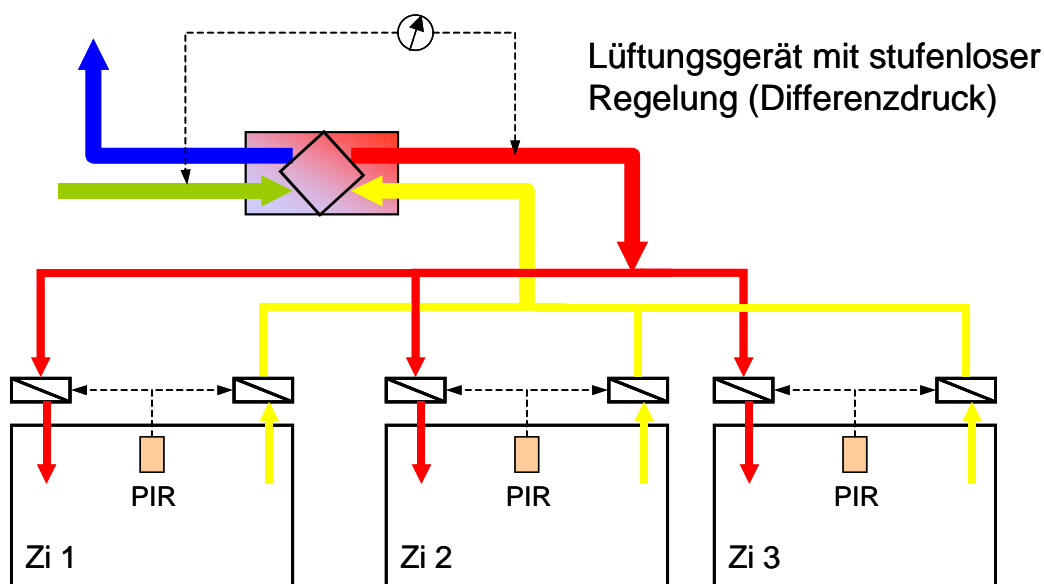


Abbildung 9.3 Lüftungsvariante 3: Mechanische Lüftung mit individueller Präsenzregelung für jeden Raum

#### Funktion:

Regelung pro Zimmer über Präsenzmelder und motorische Klappen. Luftmenge pro Zimmer 0% oder 100% (Auf / Zu).

#### Eignung:

- Unterschiedliche Präsenzzeiten in den einzelnen Räumen (Stundenpan flexibel)
- Personenzahl im Raum während der Präsenzzeit meist konstant (Klasse)

#### Lüftungsvariante 4:

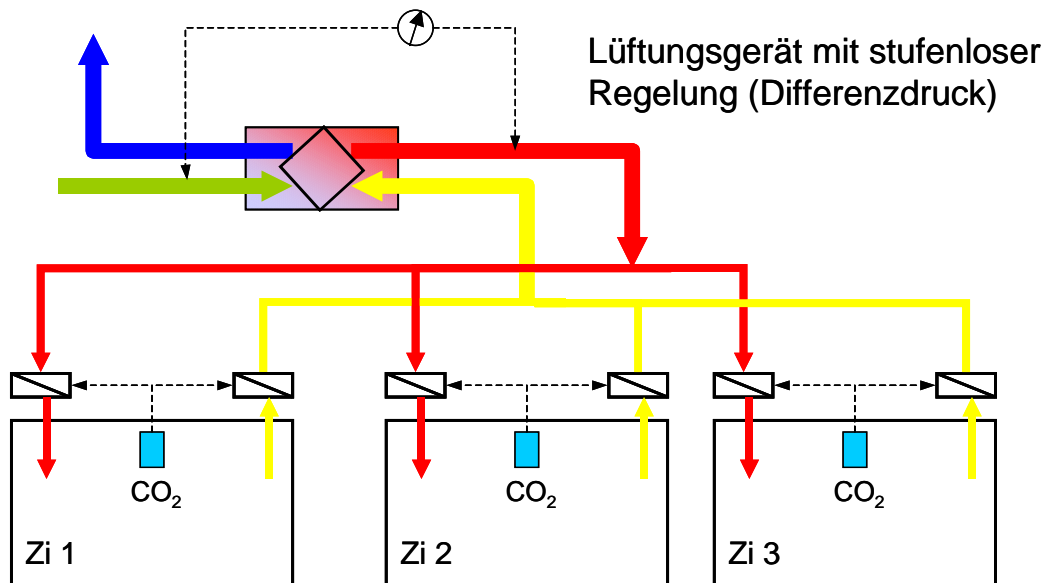


Abbildung 9.4 Lüftungsvariante 4: Mechanische Lüftung mit individueller CO<sub>2</sub>-Regelung für jeden Raum

#### Funktion:

Regelung pro Zimmer über CO<sub>2</sub>-Sensor und motorische Klappen. Luftmenge pro Zimmer 0% oder 100% (Auf / Zu). Ev. CO<sub>2</sub>-Sammelsignal für zusätzliche Stufung der Luftmenge pro Raum

#### Eignung:

- Sehr unterschiedliche Präsenzzeiten in den einzelnen Räumen
- Lange Betriebsdauer der Anlage (häufig Abendveranstaltungen)
- Personenzahl im Raum während der Präsenzzeit stark variabel

#### Lüftungsvariante 5:

#### separates Lüftungsgerät pro Zimmer

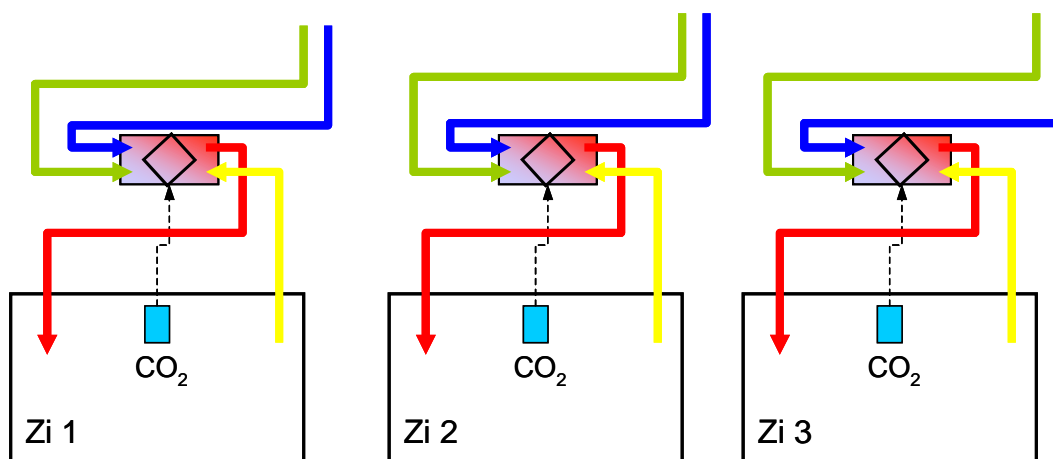


Abbildung 9.5 Lüftungsvariante 5 Mechanische Lüftung mit individueller CO<sub>2</sub>-Regelung und Anlagen je Raum

#### Funktion:

Regelung pro Zimmer über CO<sub>2</sub>-Sensor separate Lüftungsgeräte. Luftmenge pro Zimmer in mehreren Stufen oder stufenlos regulierbar.

#### Eignung:

- Sehr unterschiedliche Präsenzzeiten in den einzelnen Räumen
- Personenzahl im Raum während der Präsenzzeit stark variabel
- Platzverhältnisse lassen Einzelanlagen zu (AUL / FOL Führung)

## Lüftungsvariante 6:

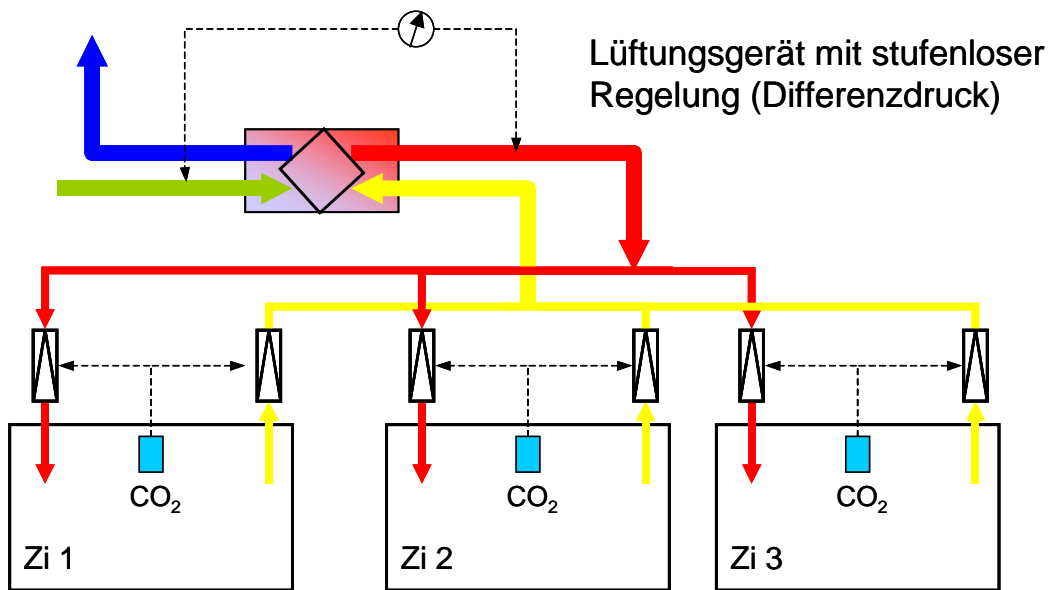


Abbildung 9.6 Lüftungsvariante 6 Mechanische Lüftung mit individueller CO<sub>2</sub>-Regelung und zentraler Anlage

### Funktion:

Regelung pro Zimmer über CO<sub>2</sub>-Sensor und Volumenstromregler. Luftmenge pro Zimmer variabel (0-100%).

### Eignung:

- Sehr unterschiedliche Präsenzzeiten in den einzelnen Räumen
- Personenzahl im Raum während der Präsenzzeit stark variabel
- Platzverhältnisse lassen keine Einzelanlagen zu (AUL / FOL Führung)

Nachfolgende Tabelle zeigt die Eignung der verschiedenen Lüftungsvarianten zusammengefasst auf. Je nach Schulanlage ist es sinnvoll von der Nutzung her stark unterschiedliche Bereiche mit separaten Anlagen zu betreiben.

Tabelle 9.2 Vorgeschlagene optimierte Lüftungsstrategien

Var.	Lüftungsart	Steuerung	Kosten	Schulhaus-Typ
1	Optimierte Lüftungsklappe (vgl. Kapitel 7.2) *)	Genaues Zeitprogramm (exakt auf Pausen abgestimmt) zusätzlich Präsenz (AUS) und Handsteuerung (Übersteuerung)	tief	<b>A</b> **)
2	Mechanische Lüftung Zeitsteuerung für alle Zimmer identisch	Zeitschaltprogramm gemäss Stundenplan	tief-mittel	<b>A</b> evtl. B
3	Mechanische Lüftung Präsenzsteuerung Ein/Aus pro Zimmer	Zeitschaltprogramm gemäss Stundenplan Präsenz für AUS	mittel	<b>A</b> evtl. B
4	Mechanische Lüftung CO <sub>2</sub> -Steuerung Ein/Aus pro Zimmer	CO <sub>2</sub> -Sensor (EIN: 850 ppm; AUS: 800 ppm)	mittel-hoch	<b>B</b> evtl. A
5	Mechanische Lüftung mit Einzelgeräten pro Zimmer CO <sub>2</sub> -Steuerung (Stufen)	CO <sub>2</sub> -Sensor (EIN: 850 ppm; AUS: 800 ppm; bzw. 1100 ppm / 900 ppm für Stufe 2) Handsteuerung durch Lehrkraft	mittel-hoch	<b>B</b> evtl. A
6	Mechanische Lüftung mit stufenloser CO <sub>2</sub> -Steuerung	CO <sub>2</sub> -Sensor (EIN: 850 ppm; AUS: 800 ppm; stufenlos hochfahren) Handsteuerung durch Lehrkraft	mittel-hoch	<b>B</b> evtl. A

\*) Die bereits gebauten Objekte in Luxemburg sollen analysiert werden und zusätzlich erste Pilotobjekte in der Schweiz gebaut werden. Nach einer Probephase sind die Ergebnisse auszuwerten.

\*\*) Für Umgebungsbedingungen mit hoher Schadstoff oder Lärmbelastung nicht geeignet

## 9.2. EMPFEHLUNGEN DES PROJEKTTEAMS:

Typ	Schultyp	Empfehlung	Variante	Hauptgrund
A	Primarschule und Sek.-schule	<b>1. Pilotanlagen mit Lüftungsklappe</b> <b>2. Zeitgesteuerte Mech. Lüftung</b> <b>3. Einzelgerät pro Schulzimmer</b>	<b>1</b> <b>2</b> <b>5</b>	Günstige Kosten/Nutzen mittlere Kosten, WRG Verständnis, Wartung
B	Gymnasium und Fachhochschulen	<b>1. Einzelgerät pro Schulzimmer</b> <b>2. CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftung</b>	<b>5</b> <b>6</b>	Flexibel, hohe Anforderung Anforderungen hoch

### 9.2.1 Erläuterungen zu den Empfehlungen

#### A. für Primar- und Sekundarschulen

- Das System mit Lüftungsklappe (Variante 1) ist möglichst in 2 bis 3 Objekten im Sinne von Pilotinstallationen zu testen. Als grösste Herausforderung sehen wir die Akzeptanz durch die Benutzer. Bereits vorgängig könnten die Erfahrungen aus Luxemburg ausgewertet werden. Als einfache, kostengünstige Lüftungslösung ist bei diesem Schulhaustyp bei entsprechend ruhiger Lage und wiederholter Sensibilisierung der Lehrkräfte auch weiterhin eine klassische Fensterlüftung denkbar.
- Eine zeitgesteuerte, zentrale Lüftungsanlage (Variante 2) ist für diesen Schulhaustyp ein guter Kompromiss zwischen Investitionskosten, Wartungsaufwand und Lüftungscomfort.

3. Dezentrale (pro Unterrichtszimmer) Lüftungsanlagen (Variante 5) erscheinen uns für die Zukunft die beste Lösung. Kompaktgeräte, welche bereits komplett konfiguriert und in einem schallfesten Gehäuse platzsparend und doch wartungsfreundlich untergebracht sind, werden zunehmend auf dem Markt kostengünstig angeboten. Diese Geräte können sehr vielfältig angesteuert werden und lassen sich auch erst zu einem späteren Zeitpunkt mit speziellen Regelsystemen (z.B. CO<sub>2</sub>) ausrüsten. Vor allem Schulen mit zeitlich stark unterschiedlich belegten Klassenzimmern sollten diese Lösung bereits heute favorisieren.

## **B. für Gymnasien und Fachhochschulen**

### Vorbemerkung

In Schulen ohne KlassenlehrerIn mit fix zugeteilten Klassenzimmern, sind Fensterlüftungen klar ungenügend zuverlässig. Höhere Schulen sind zudem vielfach sehr städtisch-zentral gelegen, so dass automatische Fensterklappen (Variante 1) aus Immissionsgründen nicht mehr in Frage kommen. In Schulen mit älteren Schülern und höheren Anforderungen an Komfort und Arbeitsleistungen sind heute sicher mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung vorzusehen.

1. Dezentrale (pro Unterrichtszimmer) Lüftungsanlagen (Variante 5) erscheinen uns die beste Lösung. Kompaktgeräte, welche bereits komplett konfiguriert und in einem schallfesten Gehäuse platzsparend und doch wartungsfreundlich untergebracht sind, werden zunehmend auf dem Markt kostengünstig angeboten. Diese Geräte können sehr vielfältig angesteuert werden und lassen sich auch erst zu einem späteren Zeitpunkt mit speziellen Regelsystemen (z.B. CO<sub>2</sub>) ausrüsten. Vor allem Schulen mit zeitlich stark unterschiedlich belegten Klassenzimmern sollten diese Lösung bereits heute favorisieren. Der Platzbedarf und Energieverbrauch dürfte insgesamt gegenüber Variante 6 auch eher kleiner sein, da viel weniger Luft über weite Distanzen zu fördern ist.
2. Falls eine dezentrale Lösung nicht in Frage kommt, so kann die Lüftung zentral erfolgen (Variante 6). Um die vielfältigen Bedürfnisse zu befriedigen, soll die Anlage als vollwertige CO<sub>2</sub>-gesteuerte Anlage konzipiert werden. Um die Investitionskosten zu reduzieren, können allenfalls einige Unterrichtszimmer zusammengefasst belüftet werden (z.B. wie in Kapitel 7.1 am Schluss beschrieben).

### 9.2.2 Übergangslösung: Sensibilisierungsaktion

Für alle Schulräume, die in den nächsten 5-10 Jahren nicht mit einer optimierten Lüftung ausgerüstet werden, sollte eine Sensibilisierungsaktion geplant und durchgeführt werden. Eine solche Aktion soll einen Informationsteil und eine Lüftungswarnanzeige (Visualisierung/Lüftungssampel) umfassen.

Wir schlagen vor ein solches Sensibilisierungsteam als feste Institution zu schaffen, welches in einem Tournus alle Schulhäuser regelmässig aufsucht. Wir erwarten davon namhafte Energieeinsparungen bei gleichzeitig besseren Luftverhältnissen in den Unterrichtsräumen.

Das Pflichtenheft des Sensibilisierungsteams wäre noch genauer zu erarbeiten, aber sicher müssten auch Hauswarte und Schulleitungen sinnvoll einbezogen werden. Ein solches Team könnte auch fundierte Berichte über den Sanierungsbedarf einzelner Anlagen zuhanden der Entscheidungsträger liefern.

Grundsätzlich soll jedoch am Ziel - Gute Luftqualität mit minimalem Energieaufwand - festgehalten werden. Und dies ohne die Lehrkräfte mit ständigen Gedanken an Lüftungsmassnahmen zu belasten.

### **Zu Bedenken**

In den nächsten Jahren ist vor allem in städtischen Verhältnissen - aber auch auf dem Land - von einem erhöhten CO<sub>2</sub>-Pegel in der Aussenluft auszugehen. Ein solcher Anstieg wird weltweit, aber besonders stark in dichtbesiedelten Agglomerationen beobachtet. Dies führt dazu, dass generell mehr Luft ausgetauscht werden muss, um die gleichen Qualitäten im Innenbereich erzielen zu können.

Das Thema der Schulraumlüftung ist weit komplexer, als dass man aufgrund von anderen Bauten annehmen würde. In diesem Sinn verstehen wir diese Schlussfolgerung vielmehr als Basis für weitere praktische Untersuchungen und Pilotanlagen, denn als Schlussstrich.

## 10. Literaturverzeichnis

- Kessler, Th., Richtlinie Lüftungsanlagen und Richtlinie Raummodul Klassenzimmer – Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2005 [http://www.stadt-zuerich.ch/internet/hbd/home/beraten/fachstellen/energie\\_gebaeudetechnik.html](http://www.stadt-zuerich.ch/internet/hbd/home/beraten/fachstellen/energie_gebaeudetechnik.html)
- SIA 382/1 (2007), Lüftungs- und Klimaanlageanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, 2007; Bezug unter SIA, Postfach, 8027 Zürich
- STIPI, Genève; RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL INTERDEPARTEMENTAL RELATIF A LA DIRECTIVE "RENOUVELLEMENT D'AIR DANS LES CLASSES", 2007
- Tappeler P., Twrdik F., Damberger B., Raumluftqualität in österreichischen Schulen, 2006
- Hässig, W., Primas, A., Sommerauer H.J., CO<sub>2</sub>-basierte Lüftungssteuerung für einen Wohnbau, Basler & Hofmann AG im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2004; [www.bhz.ch/publikationen](http://www.bhz.ch/publikationen)
- Koschenz, M., Weber A., Simulationsberechnungen zum Projekt: Planungshilfsmittel und Checklisten für Lüftungsanlagen von Schulhäusern, EMPA im Auftrag des Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2003.
- Hässig, W., Lalive d'Épinay, A., Fotsch, P., Steinle, P., Gesundheitliche Aspekte der Komfortlüftungen im Wohnbereich, Eine Praxisnahe Untersuchung mit Hinweisen zu Planung und Bau von Wohnungslüftungsanlagen, Basler & Hofmann AG im Auftrag verschiedener Bundesämter, 2003; Bezug unter [www.bhz.ch/publikationen](http://www.bhz.ch/publikationen)
- Hässig, W., A. Primas, A., Ökologische Aspekte der Komfortlüftungen im Wohnbereich, Eine Praxisnahe Untersuchung mit Hinweisen zu Planung und Bau von Wohnungslüftungsanlagen, Basler & Hofmann AG im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2004; [www.bhz.ch/publikationen](http://www.bhz.ch/publikationen)
- Lemon Consult GmbH, Erfolgskontrolle Schulhaus Kugeliloo, im Auftrag des Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2004