

**Abteilung 175  
Energiesysteme/Haustechnik**

**Bericht  
Nr. 429'680**

**Simulationsberechnungen zum Projekt:  
Planungshilfsmittel und Checklisten für  
Lüftungsanlagen von Schulhäusern**

*w i r f o r s c h e n u n d p r ü f e n f ü r s i e*

**im Auftrag des**

**Amt für Hochbauten der Stadt Zürich  
Lindenhofstrasse 21  
8021 Zürich**

**Projektentwicklung über das**

**building and renewable energies network of technology  
brenet  
Technikumstrasse 21  
6048 Horw**

---

**Dübendorf, 12. Juni 2003**

Dübendorf, 12. Juni 2003

Projektleiter / Sachbearbeitung

Andreas Weber

Leiter Abteilung 175  
Energiesysteme/Haustechnik

Markus Koschenz

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
1 Zusammenfassung und Interpretation.....	4
2 Ausgangslage.....	5
3 Zielsetzung .....	5
4 Vorgehen .....	5
5 Randbedingungen der Simulationsberechnungen .....	5
5.1 Varianten:.....	6
6 Verwendetes Modell.....	6
6.1 Luftqualität.....	6
6.2 Luftvolumenstrom.....	7
6.2.1 Mechanische Lüftung.....	7
6.2.2 Natürliche Fensterlüftung.....	7
7 Vergleich mit Messungen .....	8
8 Resultate.....	9
8.1 Typischer Tagesverlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	9
8.2 Resultatübersicht.....	10
8.2.1 CO <sub>2</sub> Konzentration.....	10
8.2.2 Relative Luftfeuchtigkeit.....	10
8.3 Summenhäufigkeiten.....	10
8.3.1 CO <sub>2</sub> Konzentration.....	11
8.3.2 Relative Luftfeuchtigkeit.....	12
9 Beurteilung der Simulationsresultate gegenüber internationalen Standards.....	14
9.1 prEN 13779 Ventilation for Buildings – Performance Requirements for Ventilation and Air Conditioning Systems.....	14
9.2 CR 1752 Ventilation for Buildings – Design criteria for the indoor environment.....	15
9.3 FiSIAQ 2000 Classification of indoor Climate .....	15
9.4 Klassierung der Simulationsresultate.....	16
10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	16
10.1 Empfehlungen für neue Anlagen.....	16
10.2 Empfehlungen für bestehende Anlagen.....	17
10.3 Ausserhalb der Heizperiode .....	18
11 Hinweise auf Planungsunterlagen natürliche Lüftung.....	18
12 Formelzeichen .....	18
13 Referenzen .....	19
Anhang.....	20

## 1 Zusammenfassung und Interpretation

Die Lüftung von Schulräumen mit mechanischen Lüftungssystemen soll einerseits eine Luftqualität garantieren, die den hygienischen Anforderungen genügt und andererseits den Lüftungsheizenergieverlust dank WRG so gering wie möglich halten. Die Empfehlung SIA 382/1 „Technische Anforderungen an lüftungstechnische Anlagen“ [1] wird gegenwärtig einem Revisionsprozess unterworfen. In der momentan noch aktuellen Fassung von 1992 wird ein minimaler Luftvolumenstrom von 12 -15 m<sup>3</sup>/h/Person auf der Basis eines CO<sub>2</sub>-Grenzwertes von 1500 ppm empfohlen. Neuere Erkenntnisse der Lufthygiene weisen darauf hin, dass diese Anforderung ungenügend ist. Dies wird auch bereits in der neuen CEN Norm prEN 13779 [2] mit höheren Luftvolumenströmen berücksichtigt. Auch die neue Fassung der SIA 382/1, die auf der prEN 13779 basiert, wird wahrscheinlich höhere Volumenströme fordern. Auch die Stadt Zürich setzt diese Erkenntnisse in Ihren „Zielvereinbarungen Raumluftqualität“ um und fordert einen maximalen Tagesmittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm und erlaubt 1500 ppm nur als Spitzenwert.

In diesem Auftrag wurde mittels Simulationsberechnungen die CO<sub>2</sub> Konzentration für ein Schulzimmer mit 20 Personen unter verschiedenen Randbedingungen bestimmt. Die Resultate haben folgendes gezeigt:

- 1) Die Anforderungen bezüglich CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Zielvereinbarung Raumluftqualität können mit einem Volumenstrom von 25 m<sup>3</sup>/h/Person knapp eingehalten werden.
- 2) Bei bestehenden Anlagen, die noch mit dem tiefen Volumenstrom von 15 m<sup>3</sup>/h/Person ausgeführt wurden, kann mit einer zusätzlichen konsequenten einseitigen Stosslüftung während den Pausen mit 3 Drehfenstern von 0.6 m x 2.1 m freiem Querschnitt je Schulzimmer (20 Personen) diese Bedingungen an 97 % der Tage während der Heizperiode eingehalten werden. Andererseits reichen 4 Kippfenster von 1 m Breite, 2.9 m Höhe und einer Öffnungsweite an der Oberkante von 21 cm nicht aus, um den Tagesmittelwert unter 1000 ppm zu bringen. In diesem Fall müssten zusätzlich während dem Unterricht die Fenster geöffnet werden oder die Pausenlüftung müsste durch Querlüftung verstärkt werden.

Durch einen höheren Volumenstrom, sei er nun mechanisch oder mit zusätzlicher Fensterlüftung während den Pausen erzeugt, wird aber nicht nur der Lüftungsverlust der Heizenergie vergrößert, sondern auch die minimale Raumluftfeuchtigkeit herabgesetzt. Nach der SIA382/1, wie auch nach der neuen prEN 13779, darf die relative Feuchtigkeit der Raumluft die minimal geforderten 30 % nur während kurzer Zeit unterschreiten. Dabei wird nicht genauer definiert, wie kurz diese Zeit sein darf. Die Simulationsberechnungen der vorliegenden Untersuchung bestätigten die in der Praxis gemessenen sehr tiefen Raumluftfeuchten. Um gemäss aktuellen Anforderungen gerade noch eine genügende Raumluftqualität zu erreichen, ist ein Volumenstrom von mindestens 25 m<sup>3</sup>/h/Person notwendig. Damit werden laut Simulationsergebnisse an 10 % der Tage während der Heizperiode die minimal geforderten 30% relative Luftfeuchtigkeit unterschritten. Ein Kompromiss zwischen diesen widersprüchlichen Anforderungen könnte erreicht werden, wenn an den Tagen mit den tiefsten Aussentemperaturen der Volumenstrom reduziert würde, dadurch könnte auf Kosten der Raumluftqualität an diesen Tagen die Luftfeuchtigkeit etwas höher gehalten werden.

Das Problem der zu trockenen Raumluft in der kalten Jahreszeit verschärft sich zusätzlich durch eine Unterbelegung der Räume. Da oft in Halbklassen unterrichtet wird, ist diese Situation auch in Schulhäusern anzutreffen. Deshalb wird für neue Anlagen dringend eine Bedarfsregelung mittels z.B. CO<sub>2</sub>-Sensoren empfohlen. Auch eine WRG mit Feuchteübertragung würde die Situation verbessern.

## 2 Ausgangslage

Die Stadt Zürich setzt auf umwelt- und energiegerechtes Bauen. Dabei spielt die Raumluftqualität eine sehr wichtige Rolle, welche immer wieder Fragen aufwirft. Besonders in öffentlichen Bauten wie Schulhäusern, welche nach Minergie-Standard gebaut oder saniert werden oder worden sind, ist es wichtig, dass eine gute Raumluftqualität vorhanden ist. In zwei nach Minergie-Standard sanierten Schulhäusern wurden Konzentrationsmessungen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass einerseits die Schadstoffkonzentrationen je nach Zimmer stark variieren und andererseits die Lüftungsanlagen zum Teil nicht richtig funktionieren respektive nicht einreguliert worden sind. Zudem waren die Raumluftfeuchtigkeiten im Winter mit 15-25% relativer Feuchte sehr gering. Mit den neuen CEN-Normen, welche auch von der Schweiz übernommen werden, wird die Aussenluft pro Person höher sein als bis anhin. Somit wird sich die Behaglichkeit in den Schulzimmern bezüglich Raumluftfeuchtigkeit noch mehr verschlechtern.

## 3 Zielsetzung

Damit die oben genannten Probleme zukünftig vermieden werden können, sind Empfehlungen für die Planung neuer Anlagen und den Betrieb bestehender und neuer Anlagen auszuarbeiten. Ziel dieses Auftrages ist es, Grundlagen für solche Empfehlungen zu schaffen.

## 4 Vorgehen

Mittels Simulationsberechnungen wird für ein Schulzimmer die Luftqualität in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Luftfeuchtigkeit unter verschiedenen Randbedingungen bestimmt. Dabei soll der Einfluss des Volumenstroms der mechanischen Lüftung, der Anwesenheit der Schüler während der Pausen und der zusätzlichen natürlichen Fensterlüftung während den Pausen aufgezeigt werden. Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage für die Ausarbeitung von Empfehlungen für die Planung neuer Anlagen und den Betrieb bestehender und neuer Anlagen.

## 5 Randbedingungen der Simulationsberechnungen

Die Simulationsberechnungen werden für eine Heizperiode für ein typisches Schulzimmer mit einer Belegung gemäss Normstundenplan durchgeführt. Vereinfacht wird angenommen, dass kein Feuchteaustausch zwischen den Wänden und der Luft stattfindet. Für die natürliche Fensterlüftung während den Pausen wird eine einseitige Lüftung angenommen. D.h. der Luftaustausch wird ausschliesslich durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen angetrieben. Die Luft wird durch die gleichen Fenster wieder abgeführt durch die sie von aussen in den Raum einströmt. Der Wind hat bei dieser Luftführung keinen Einfluss.

Raumvolumen	205 m <sup>3</sup>
Raumtemperatur	20 °C
Heizperiode	1. Oktober bis 30. April
Wetterdaten	DRY Datensatz Zürich SMA mit Meteonorm auf 430 m ü. M. extrapoliert
CO <sub>2</sub> Aussenluft	400 ppm
CO <sub>2</sub> Produktion	27.8 g/h/Person (≙ 15 l/h/Person)
Feuchteproduktion	52 g/h/Person
Anzahl Personen	20
Grenzwerte	CO <sub>2</sub> : Maximalwert: 1500 ppm Maximaler Tagesmittelwert: 1000 ppm  Feuchtigkeit: Minimaler Tagesmittelwert 30% relative Feuchtigkeit

Belegungszeit	07:30 – 11:55 und 13:45 – 17:15 Freitage und Ferien werden nicht berücksichtigt
Pausen	gemäss Normstundenplan (siehe Anhang)
mechanische Lüftung	15 m <sup>3</sup> /h; 25 m <sup>3</sup> /h 20°C 07:30 bis 19:00
Kippfenster	1 m x 2.9 m; Spalt oben: 0.21 m
Drehfenster	0.6 m x 2.1 m

Tab. 1: Randbedingen für die Simulationsberechnungen

## 5.1 Varianten:

- A - Zuluft: 15 m<sup>3</sup>/h/Person  
- Personen während der ganzen Belegungszeit anwesend  
- Fenster in den Pausen geschlossen
- B - Zuluft: 15 m<sup>3</sup>/h/Person  
- Personen während 2 grossen Pausen abwesend:  
Vormittag 15 Min; Nachmittag 10 Min  
- Fenster in den Pausen geschlossen
- C - Zuluft: 15 m<sup>3</sup>/h/Person  
- Personen während 2 grossen Pausen abwesend:  
Vormittag 15 Min; Nachmittag 10 Min  
- 4 Kippfenster in allen Pausen geöffnet
- D - Zuluft: 25 m<sup>3</sup>/h/Person  
- Personen während der ganzen Belegungszeit anwesend  
- Fenster in den Pausen geschlossen
- E - Zuluft: 15 m<sup>3</sup>/h/Person  
- Personen während 2 grossen Pausen abwesend:  
Vormittag 15 Min; Nachmittag 10 Min  
- 3 Drehfenster in allen Pausen geöffnet

## 6 Verwendetes Modell

Die Simulationsberechnungen wurden mit dem Programm COMIS3.1 [3] durchgeführt. COMIS ist ein Rechenprogramm für die Bestimmung des Luft- und Verunreinigungstransportes in mehrzonigen Gebäuden.

### 6.1 Luftqualität

Für die Schadstoffkonzentration in einem Raum gilt folgende Differentialgleichung:

$$dC_i \cdot V = dt \cdot (S - \dot{V} \cdot (C_i - C_a)) \quad (1)$$

Bei einem konstanten Volumenstrom stellt sich nach der Einschwingzeit eine stationäre CO<sub>2</sub>-Konzentration ein:

$$C_i(\infty) = C_a + \frac{S}{\dot{V}} \quad (2)$$

Daraus ergeben sich für die Grenzwerte von 1000 ppm resp. 1500 ppm CO<sub>2</sub> und die angenommene Ausenluftkonzentration und Quellenstärke folgende minimale Volumenströme:

$$\text{Für 1000 ppm: } \dot{V} = \frac{S}{C_i - C_a} = \frac{15 \cdot 10^3}{1000 - 400} \text{ m}^3 / \text{h} / \text{Pers.} = 25 \text{ m}^3 / \text{h} / \text{Pers.} \quad (3)$$

$$\text{Für 1500 ppm: } \dot{V} = \frac{S}{C_i - C_a} = \frac{15 \cdot 10^3}{1500 - 400} \text{ m}^3 / \text{h} / \text{Pers.} = 13.6 \text{ m}^3 / \text{h} / \text{Pers}$$

Dies entspricht den in der SIA 382/1 empfohlenen Werten von 12 - 15 m<sup>3</sup>/h/Pers. für 1500 ppm und 25 - 30 m<sup>3</sup>/h/Pers. für 1000 ppm.

Während der Einschwingzeit entspricht der Konzentrationsverlauf folgender Gleichung:

$$C_i(t) = C_i(\infty) - (C_i(\infty) - C_i(0)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad ; \quad \tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad (4)$$

Der resultierende Konzentrationsverlauf wird während der Belegungszeit auf der Basis eines 5-Minuten Zeitschrittes ausgewertet. Als statistische Kennwerte werden die Mittelwerte der gesamten Periode und für die CO<sub>2</sub> Konzentration der Maximalwert und der maximale Tagesmittelwert und für die Luftfeuchtigkeit der Minimalwert und der minimale Tagesmittelwert ermittelt. Ausserdem werden Summenhäufigkeitsdiagramme der Momentanwerte und der Tagesmittelwerte erstellt.

## 6.2 Luftvolumenstrom

### 6.2.1 Mechanische Lüftung

Für die mechanische Lüftung wird ein System mit konstanten Zu- und Abluftraten angenommen. Eine geringfügige Variation kommt dennoch durch die Abhängigkeit der Ventilator-Fördermenge von der Luftdichte zu Stande. Die Zu- und Abluftraten sind im Gleichgewicht, d.h. im Raum besteht keine Druckdifferenz gegenüber aussen. Dadurch werden die Zu- und Abluftraten auch bei offenen Fenstern nicht verändert.

### 6.2.2 Natürliche Fensterlüftung

Der Luftvolumenstrom durch ein Fenster bei einseitiger Lüftung ist abhängig von der Geometrie der Öffnungsfläche und der Differenz zwischen der Raumlufttemperatur und der Aussenlufttemperatur. Durch eine rechteckige Öffnungsfläche kann dieser Volumenstrom mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\dot{V}_\square = 3600 \cdot C_d \cdot H \cdot W \cdot \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\Delta\vartheta}{T_a} \cdot g \cdot H} \quad (5)$$

Der Dischargekoeffizient  $C_d$  beschreibt die Effekte der Strömungseinschnürung und der Reibung an den Öffnungskanten. Er ist abhängig von der Beschaffenheit der Kanten und den Verhältnissen der Öffnungs- und Raumabmessungen. Für ein Fenster kann der Wert 0.6 eingesetzt werden. Bei einem Kippfenster wird die Öffnungsfläche in zwei seitliche Dreiecke und eine Rechteckfläche an der Oberkante des Flügels aufgeteilt. Im Programm COMIS werden diese Flächen weiter in viele kleine übereinander liegende Rechteckflächen gleicher Höhe aber unterschiedlicher Breite aufgeteilt. Für die Handrechnung kann der Volumenstrom durch ein Kippfenster nach den Gleichungen (6) und (7) berechnet werden [4], [5], [6]:

$$\dot{V}_k(\alpha) = \dot{V}_\square \cdot C_k(\alpha) \quad (6)$$

Wobei für den Kippfensterkoeffizient  $C_k(\alpha)$  eine Polynomapproximation für den Gültigkeitsbereich von  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  verwendet werden kann:

$$C_k(\alpha) = 1.86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha - 1.19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 2.60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 \quad (7)$$

Folgende Effekte wurden bei den Simulationsberechnungen der natürlichen Fensterlüftung nicht berücksichtigt:

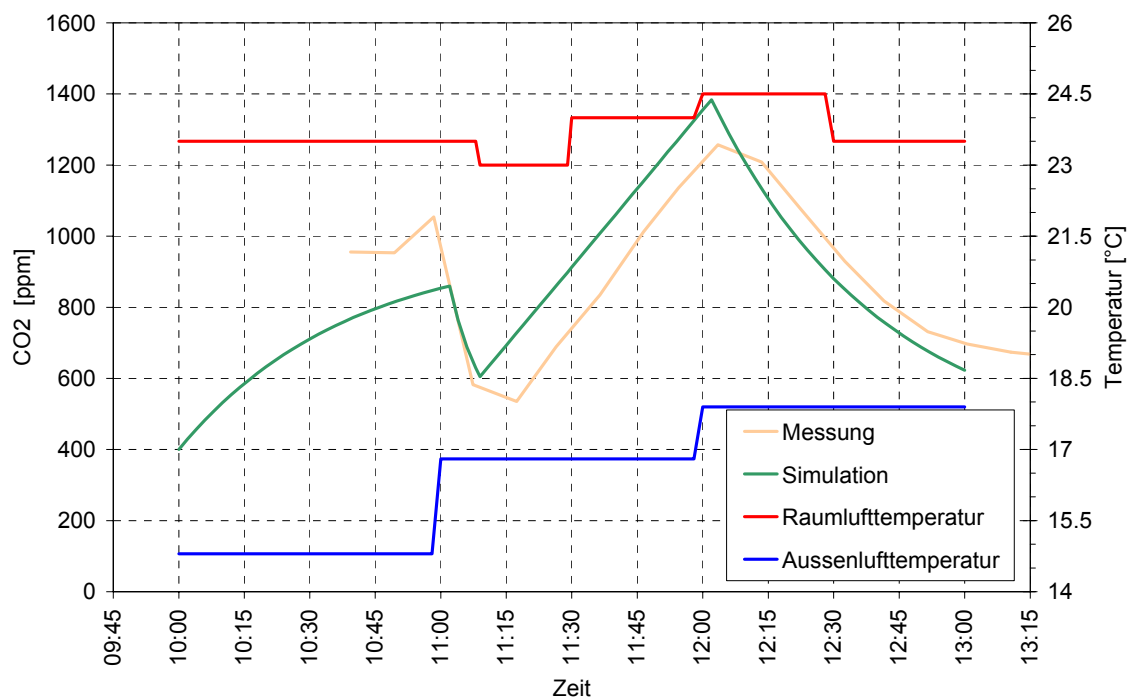
- Windeffekte, die in der Realität durch Turbulenzen auch bei einseitiger Lüftung einen gewissen Einfluss haben.
- Auskühlung der Raumluft bei der Stosslüftung und dadurch eine Verminderung der Temperaturdifferenz.
- Geringe Querlüftung auch bei geschlossenen Türen z.B. durch Türspalten oder durch kurzzeitiges Öffnen der Zimmertüren.
- Vorzeitiges schliessen der Fenster aus Komfortgründen bei starker Auskühlung wegen sehr tiefen Aussentemperaturen.

## 7 Vergleich mit Messungen

Am 30.04 2003 wurden im Schulzimmer B3.03 des Schulhauses Kügellioo in Zürich SF<sub>6</sub>-Spurengas- und CO<sub>2</sub>-Messungen unter definierten Randbedingungen durchgeführt. Die Figur 1 zeigt den Verlauf der gemessenen und der berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die in der Simulation definierten Aussen- und Raumlufttemperaturen sind ebenfalls im Diagramm eingezeichnet. Die Fahrpläne wurden für die Simulation gemäss Tabelle 2 definiert. Der Volumenstrom der mechanischen Lüftung war 365 m<sup>3</sup>/h in der Abluft und 301 m<sup>3</sup>/h in der Zuluft.

Zeit	Personenbelegung	Mechanische Lüftung	Fensterlüftung
10:00 - 11:02	9 Kinder, 4 Erwachsene	Ein	Nein
11:02 - 11:09	0 Kinder, 2 Erwachsene	Aus	3 Drehfenster
11:09 - 12:02	9 Kinder, 4 Erwachsene	Aus	Nein
12:02 - 13:00	0 Kinder, 0 Erwachsene	Ein	Nein

Tab. 2: Fahrpläne für die Simulation



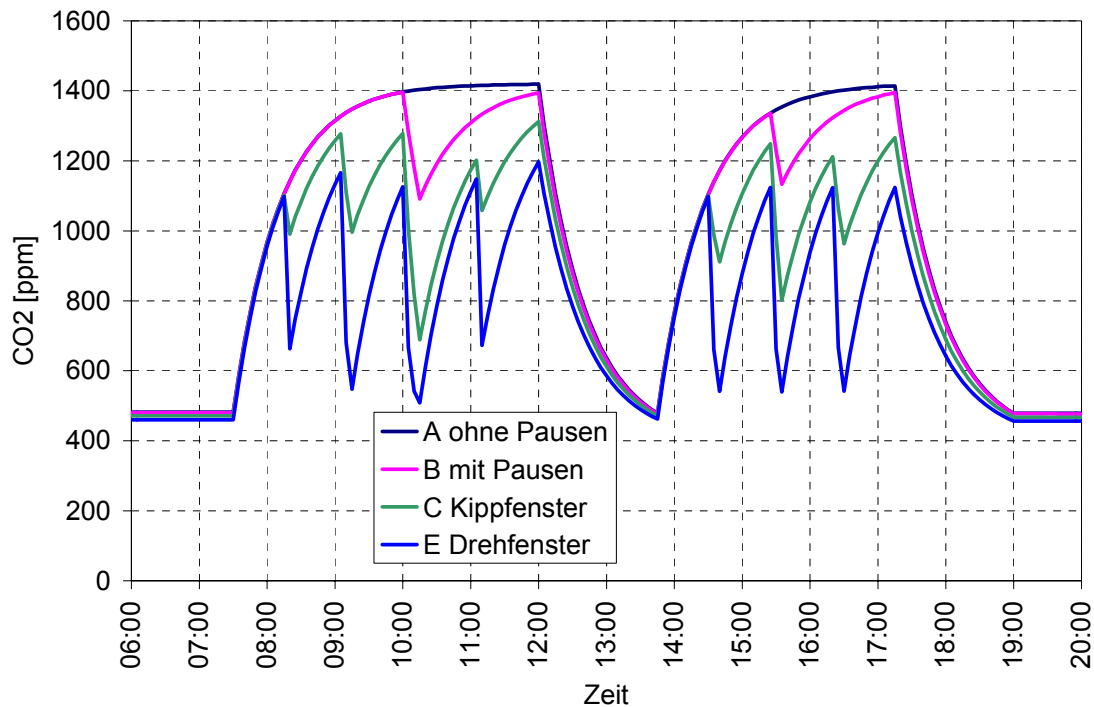
Figur 1 : Vergleich des CO<sub>2</sub> - Verlaufs zwischen Messung und Simulation

Die Abweichungen lassen auf einen etwas grösseren Volumenstrom der mechanischen und einen kleineren der Fensterlüftung in der Simulation schliessen. Die CO<sub>2</sub>-Quellenstärken stimmen überein.

## 8 Resultate

### 8.1 Typischer Tagesverlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die Figur 2 zeigt einen typischen Tagesverlauf der CO<sub>2</sub> Konzentrationen für die Fälle mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person mechanisch gelüftet. Wie weit die Konzentrationen in den Pausen in den Fällen C und E mit zusätzlicher Pausenlüftung abfallen, ist abhängig vom Luftvolumenstrom durch die Fenster und damit von der Aussentemperatur. D.h. die Verläufe sind in diesen beiden Fällen von Tag zu Tag unterschiedlich. Am gezeigten Tag liegt die Aussentemperatur zwischen 3 und 4°C. Die zusätzlich durch die Fensterlüftung erzeugte momentane raumvolumenbezogene Luftwechselrate liegt beim Kippfenster an diesem Tag bei ca. 3 1/h und beim Drehfenster bei ca. 14 1/h, während der Luftwechsel der mechanische Lüftung alleine 1.5 1/h beträgt.



Figur 2: Ein typischer Tagesverlauf der CO<sub>2</sub> Konzentration für die Fälle mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person mechanisch gelüftet

Gemäss Stundenplan ergibt sich je Stunde Unterrichtszeit im Mittel eine Pausendauer von ca. 8 Min.

Die durch die mechanische Lüftung erzeugte Zeitkonstante des Raumes liegt bei diesem Volumenstrom in der Grössenordnung von einer Lektion. Der Konzentrationsanstieg während der Lektion weicht also noch nicht sehr stark von einem linearen Verlauf ab. Daher ist die arithmetische Mittelwertbildung der erzielten Volumenströme über die ganze Belegungszeit zulässig, um aus diesem mittleren Volumenstrom auf die mittlere Raumluftqualität zu schliessen.

Demzufolge wird an diesem Tag der mittlere Luftwechsel durch die Pausenlüftung mit den Kippfenstern um ca. 0.4 1/h und mit den Drehfenstern um ca. 1.9 1/h erhöht. Mit anderen Worten: Die mittlere Lüfrate wird von den mechanisch erzeugten 15 m<sup>3</sup>/h/Person durch die Kippfenster auf ca. 19 m<sup>3</sup>/h/Person und mit den Drehfenstern auf ca. 34 m<sup>3</sup>/h/Person erhöht.

## 8.2 Resultatübersicht

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Simulationsresultate. Es wurde ausschliesslich die Belegungszeit ausgewertet und zwar: Die Mittelwerte der ganzen Simulationsperiode, für die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Maximalwert und der maximale Tagesmittelwert und für die Luftfeuchtigkeit der Minimalwert und der minimale Tagesmittelwert.

Variante	CO <sub>2</sub> [ppm]			Relative Feuchtigkeit [%]		
	Max	Max Tagesmittel	Mittel 1.10 – 30.4	Min	Min Tagesmittel	Mittel 1.10 – 30.4
A	1478	1310	1273	12	24	47
B	1456	1260	1225	12	24	47
C	1439	1190	1087	12	20	44
D	1050	980	959	11	19	42
E	1409	1070	902	10	17	41
Zuluft	400	400	400	8.6	8.6	31

Tab 3: Übersicht der Simulationsresultate

### 8.2.1 CO<sub>2</sub> Konzentration

Wie erwartet, entsprechen die Maxima bei den rein mechanisch gelüfteten Fällen A und D etwa den Grenzwerten 1000 resp. 1500 ppm, die der Auslegung zu Grunde liegen. Der maximale Tagesmittelwert weicht in diesen beiden Fällen nur wenig vom Mittelwert der ganzen Periode ab. d. h. alle Tagesgänge sind mehr oder weniger identisch. (Variation nur durch die erwähnte Abhängigkeit der Ventilator Fördermenge von der Luftdichte).

Der Grenzwert von 1500 ppm für den Momentanwert wird in sämtlichen Fällen eingehalten.

Die 1000 ppm für den Tagesmittelwert können nur mit mechanisch 25 m<sup>3</sup>/h/Person eingehalten werden. Mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person und Stosslüftung mit 3 Drehfenstern während den Pausen (Fall E) wird dieser Wert nur geringfügig überschritten.

Mechanische Lüftung mit 15m<sup>3</sup>/h/Person und Pausenlüftung mit 4 Kippfenster (Fall C) reichen nicht für die Einhaltung dieses Kriteriums. Unter der Voraussetzung, dass die akustischen Randbedingungen es zulassen, müssten in diesem Fall zusätzlich zeitweise die Kippfenster auch während den Unterrichtsstunden geöffnet werden. Eine andere Möglichkeit wäre, die Wirksamkeit der Fensterlüftung in den Pausen durch gleichzeitiges Öffnen der Zimmertüren zu erhöhen (Querlüftung).

### 8.2.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Der minimale Tagesmittelwert von 30% wird in keinem einzigen Fall eingehalten.

## 8.3 Summenhäufigkeiten

In den folgenden Summenhäufigkeitsdiagrammen stellen die Kurven der Momentanwerte den Prozentsatz der Belegungszeit dar, während dem eine bestimmte CO<sub>2</sub>-Konzentration oder relative Luftfeuchtigkeit nicht überschritten wird. Die Kurven der Tagesmittelwerte zeigen den Prozentsatz der Anzahl Betriebstage an, während deren der Tagesmittelwert eine bestimmte Konzentration nicht überschreitet.

Ablesebeispiel:

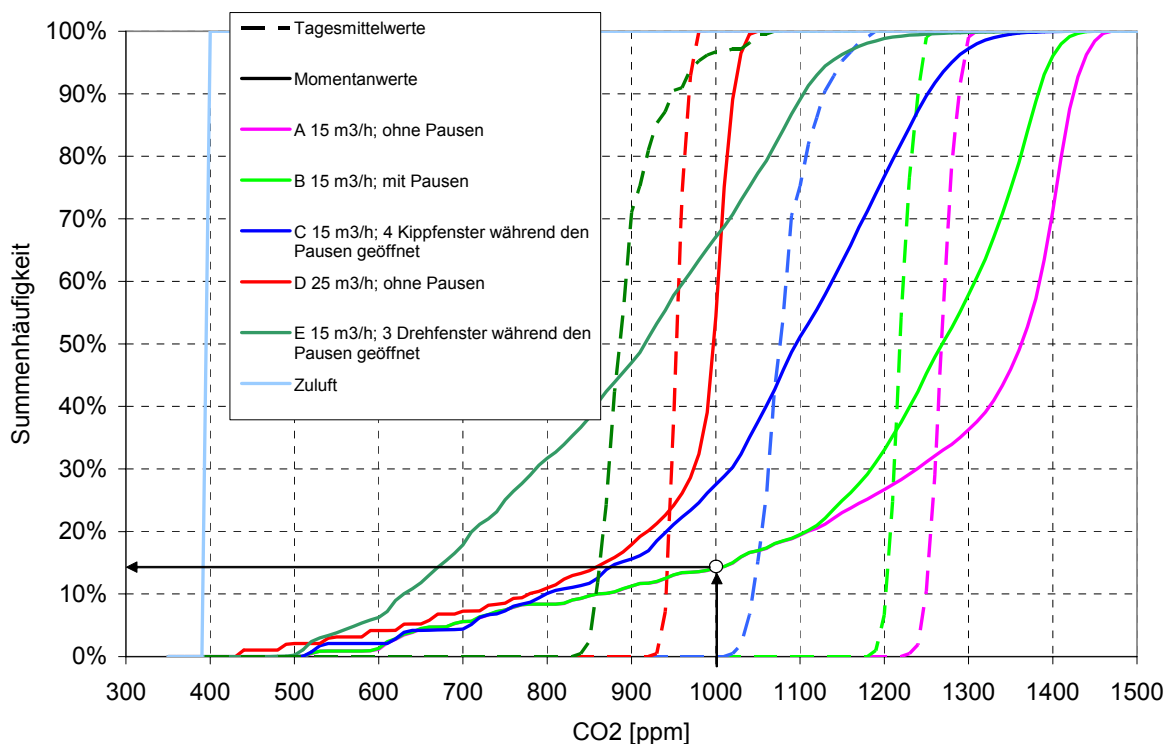
Der Wert von 1000 ppm wird vom Momentanwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration bei rein mechanischer Lüftung mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person während 14 % der Belegungszeit nicht überschritten.

### 8.3.1 CO<sub>2</sub> Konzentration

Das Rechteckprofil der Summenhäufigkeitskurve der Zuluft wird durch die Anwesenheit der Personen im Raum nach rechts verschoben und mehr oder weniger verzerrt. Die Rechtsverschiebung jedes einzelnen Punktes aller Kurven ist proportional zur Anzahl Personen. Im obigen Ablesebeispiel beträgt die Rechtsverschiebung 600 ppm. Wenn nun ständig 25 anstatt 20 Personen anwesend wären, betrüge die Rechtsverschiebung also 750 ppm, d.h. in diesem Fall würden 1150 ppm während 14% der Belegungszeit nicht überschritten.

Die Kurven der Momentanwerte bei rein mechanischer Lüftung weisen eine sehr grosse Streuung im unteren Bereich der Konzentrationen während ca. 20 bis 30% der Belegungszeit auf (flacher Teil der Kurven). Dies entspricht der Zeit während dem Anstieg der Konzentration zu Beginn des Unterrichts am Morgen und am Nachmittag. Im Bereich der höheren Konzentrationen nimmt die Streuung ab (steiler Teil der Kurven). Dies entspricht der Zeit während der die Endkonzentration erreicht ist. Durch die zusätzliche Pausenlüftung werden die Häufigkeiten gleichmässiger verteilt.

Die Kurven der Tagesmittelwerte bei rein mechanischer Lüftung weisen immer noch ein annäherndes Rechteckprofil auf. D.h. die Tagesmittelwerte haben in diesen Fällen nur eine geringe Streuung.



Figur 3: Summenhäufigkeitsdiagramm der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Durch die Pausenlüftung wird die Kurve der Tagesmittelwerte weniger weit nach rechts verschoben, dafür etwas stärker verzerrt. Die Werte weisen also eine grössere Streuung auf als bei der rein mechanischen Lüftung. Vor allem im Bereich der höheren Konzentrationen nimmt diese Streuung zu. Dadurch wird der maximale Tagesmittelwert gegenüber der rein mechanischen Lüftung weniger stark reduziert als der Mittelwert der ganzen Periode. Dies zeigt sich vor allem im Fall E (Pausenlüftung mit Drehfenster). Hier wird während 3% der Tage der Grenzwert von 1000 ppm für den Tagesmittelwert nicht eingehalten. Dies ist auf die wenigen Tage während der Simulationsperiode zurückzuführen, an denen die Aussentemperatur in der Nähe der Raumtemperatur liegt. An diesen Tagen verliert die einseitige Fensterlüftung gemäss dem theoretischen Modell weitgehend ihre Wirksamkeit. Um eine Überschreitung auch an diesen Tagen zu verhindern, müssten die Fenster zusätzlich zumindest zeitweise während der Unterrichtszeit geöffnet werden, oder es könnte an diesen Tagen durch Öffnen der Zimmertüren und Treppenhausfenster die Wirksamkeit

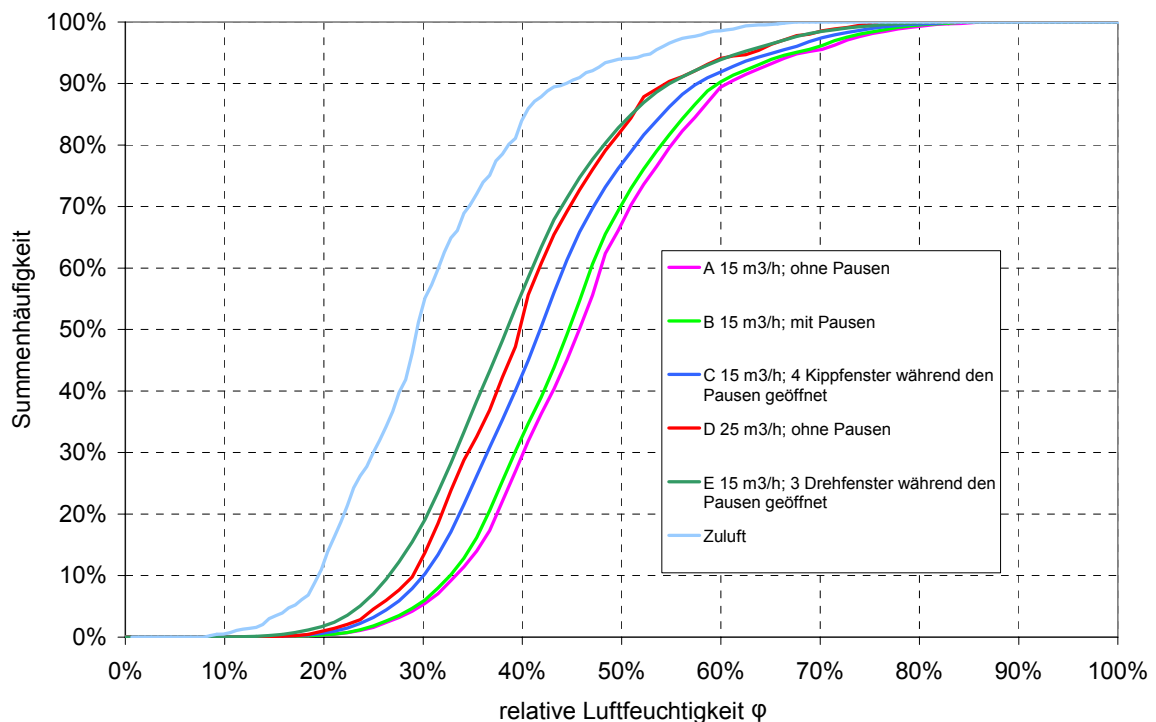
der Pausenlüftung durch Querlüftung erhöht werden. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass bei kleiner Temperaturdifferenz der Luftaustausch in der Realität etwas grösser ist als der mit dem Modell berechnete. Dies ist auf die immer vorhandenen Turbulenzen zurückzuführen, die im Modell nicht berücksichtigt werden.

Die Kurve des Falles C ( $15\text{m}^3/\text{h}/\text{Person}$  + Kipfenster) zeigt, dass hier der geforderte Tagesmittelwert von 1000 ppm gar nie eingehalten wird. In diesem Fall müsste während der ganzen Periode zusätzlich während der Unterrichtszeit mit den Fenstern gelüftet werden, oder die Wirksamkeit der Pausenlüftung durch Querlüftung erhöht werden.

### 8.3.2 Relative Luftfeuchtigkeit

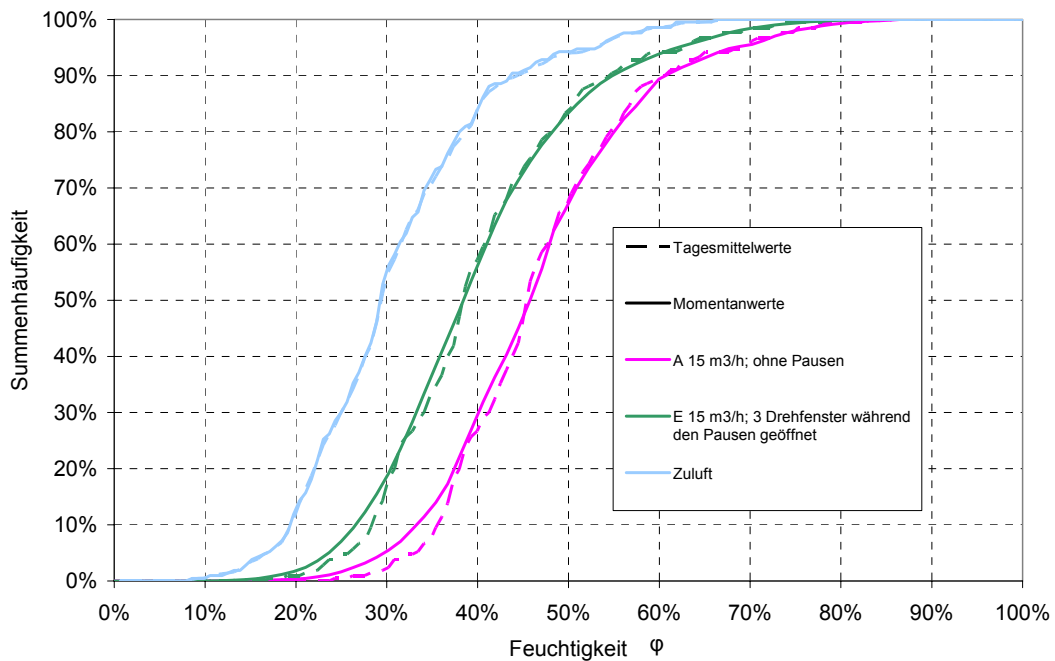
Die relative Luftfeuchtigkeit der Zuluft entspricht der auf  $20\text{ }^\circ\text{C}$  aufgeheizten Aussenluft.

Auch bei der Luftfeuchtigkeit wird die Summenhäufigkeitskurve der Zuluft durch die Anwesenheit der Personen im Raum nach rechts verschoben. Die Form der Kurven bleibt aber annähernd beibehalten. Die Variation der Werte ist also in erster Linie Wetter bedingt. Auch hier ist der Betrag der Rechtsverschiebung in jedem Punkt proportional zur Anzahl Personen.

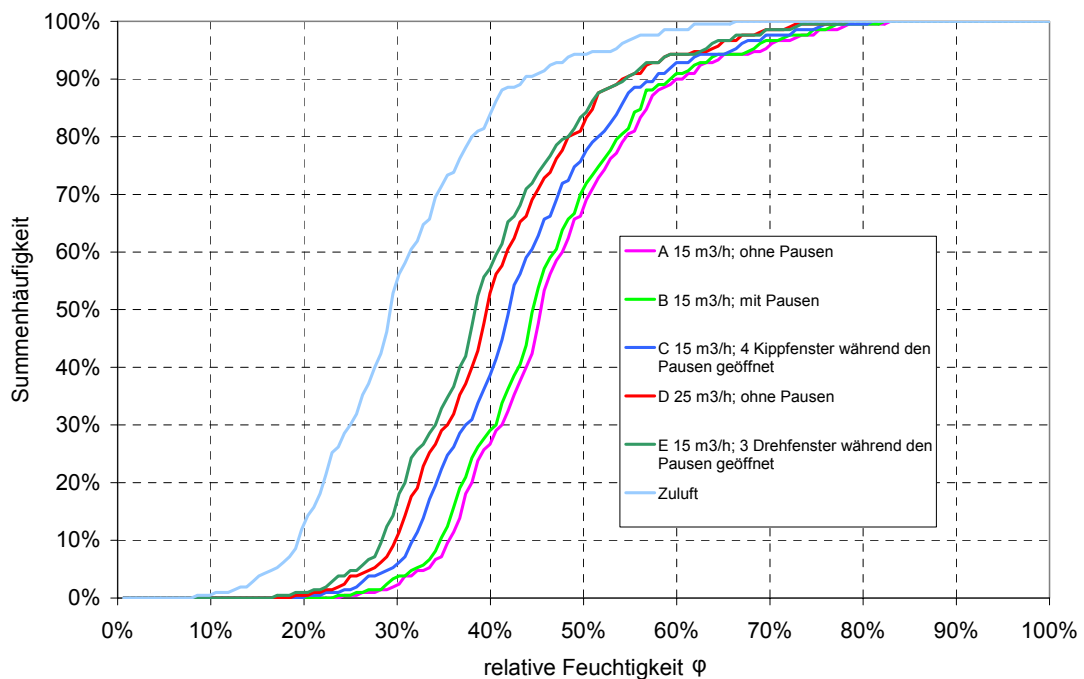


Figur 4: Summenhäufigkeitsdiagramm der momentanen relativen Luftfeuchten

Die Figur 5 zeigt den Vergleich zwischen der Summenhäufigkeit der Momentanwerte und derjenigen der Tagesmittelwerte für die Zuluft und für die beiden Fälle A und E mit den höchsten resp. tiefsten Feuchtigkeitswerten. Die nahezu identischen beiden Kurven der Zuluft bedeuten, dass sich die absolute Feuchte der Aussenluft innerhalb eines Tages nur wenig ändert. Die Häufigkeit der tiefen Raumlufffeuchtigkeitswerte wird durch die Bildung der Tagesmittelwerte etwas reduziert. Der geforderte Wert für den Tagesmittelwert von mindestens 30 % relativer Feuchte wird im besten Fall A während ca. 3% und im schlechtesten Fall E während ca. 18% der Tage unterschritten. Noch kritischer wird die Situation, wenn mit reduzierten Schülerzahlen (Halbklassen) unterrichtet wird, ohne den Volumenstrom anzupassen.



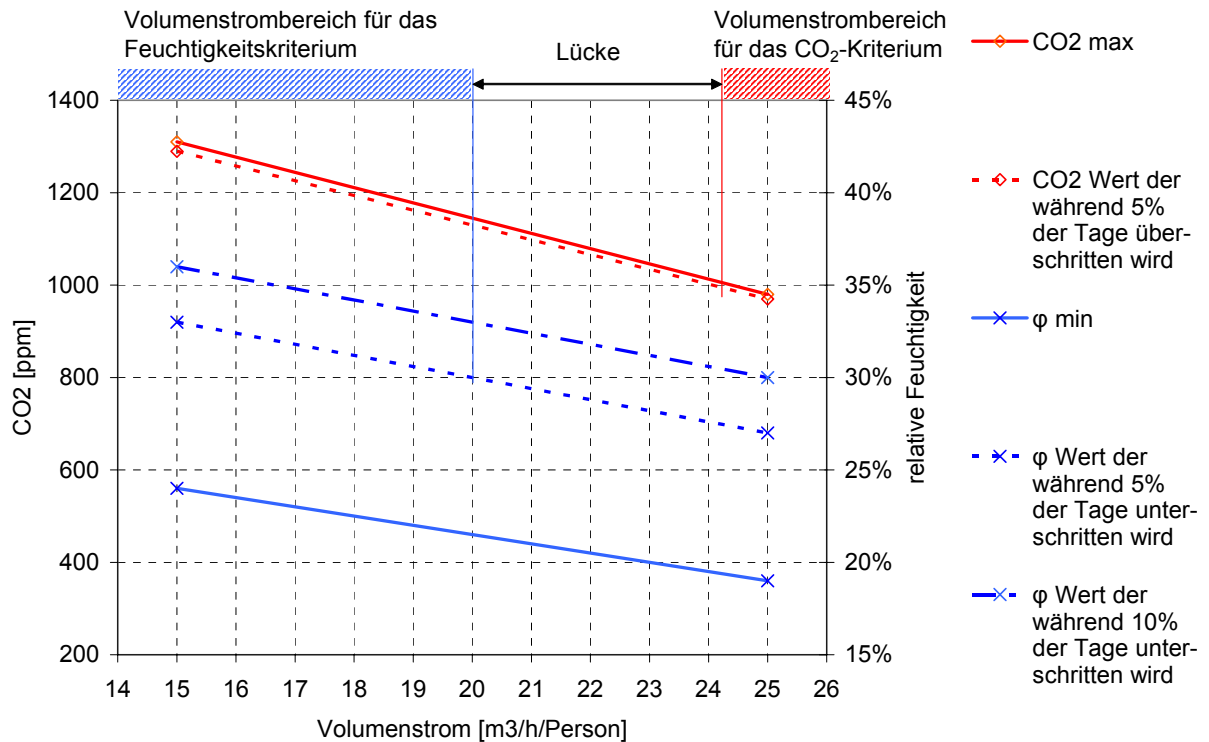
Figur 5: Vergleich der Summenhäufigkeiten der Momentanwerte und der Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeiten.



Figur 6: Summenhäufigkeitsdiagramm der Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeiten

Die Figur 7 zeigt die Tagesmittelwerte der CO<sub>2</sub> Konzentration und der relativen Luftfeuchtigkeit der beiden Fälle A und D mit rein mechanischer Lüftung in Abhängigkeit des Volumenstromes und zwar bei der CO<sub>2</sub> Konzentration den Maximalwert und den Wert der während 5% der Tage überschritten wird und bei der Luftfeuchtigkeit den minimalen Wert und diejenigen welche während 5 resp. 10 % der Tage nicht unterschritten werden. Für die Volumenströme dazwischen wird in dieser Darstellung eine lineare Interpolation angenommen. Der Minimalwert der Luftfeuchtigkeit liegt in beiden Fällen unter den geforderten 30 %. Wenn eine Unterschreitung dieses Grenzwertes während maximal 5% der Tage zugelassen wird, dann

muss der Volumenstrom kleiner als ca. 20 m<sup>3</sup>/h/Person sein. Damit der CO<sub>2</sub> – Grenzwert von 1000 ppm nicht öfter als an 5% der Tage überschritten wird, muss der Volumenstrom grösser als ca. 24 m<sup>3</sup>/h/Person sein. Es existiert also eine Lücke zwischen den beiden Bereichen der Volumenströme die jeweils eines der Kriterien erfüllen. Erst wenn die Unterschreitung des Feuchtigkeitsgrenzwertes während 10% der Tage zugelassen wird, gibt es eine Überlappung dieser Bereiche.



Figur 7: CO<sub>2</sub>-Konzentration und relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit des Volumenstromes

## 9 Beurteilung der Simulationsergebnisse gegenüber internationalen Standards

### 9.1 prEN 13779 Ventilation for Buildings – Performance Requirements for Ventilation and Air Conditioning Systems

Die Klassierung der Raumluftqualität nach CO<sub>2</sub> Konzentration und nach Aussenluftfrate pro Person erfolgt in dieser Norm gemäss Tabelle 4 [2]:

Klasse	Raumluftqualität	CO <sub>2</sub> -Konzentration über der Aussenluft [ppm]	Aussenluftfrate (Nichtraucher) [m <sup>3</sup> /h/Person]
IDA 1	hohe	≤ 400	> 54
IDA 2	mittlere	400 – 600	36 – 54
IDA 3	genügende	600 -1000	22 – 36
IDA 4	niedere	> 1000	< 22

Tab. 4: Klassierung der Raumluftqualität nach prEN 13779

Die zugrunde liegende CO<sub>2</sub> - Quellenstärke liegt demzufolge bei ca.:

$$S = (C_i - C_a) \cdot \dot{V} = 22 \text{ l/h/Person}$$

Bezüglich der zulässigen Zeit der Unterschreitung der minimalen Raumlufffeuchtigkeit ist die prEN 13779 ebenso wie die SIA 382/1:

„In kalten Klimaregionen darf der untere Grenzwert von 30 % relativer Luftfeuchtigkeit an wenigen Tagen unterschritten werden,“.

## 9.2 CR 1752 Ventilation for Buildings – Design criteria for the indoor environment

Die CR 1752 [7] nimmt folgende Klassierung vor:

Klasse	Unzufriedene %	CO <sub>2</sub> -Konzentration über der Aussenluft [ppm]	Aussenluftrate [m <sup>3</sup> /h/Person]
A	15	460	36
B	20	660	25
C	30	1190	14.4

Tab. 5: Klassierung der Raumluffqualität nach CR 1752

Daraus folgt eine angenommene Quellenstärke von ca 17 l/h/Person. Die in der Norm angegebene Quellenstärke für sitzende leichte Tätigkeit (1.2 met) beträgt 19 l/h/Person (auch für 14- bis 16-jährige Schüler).

## 9.3 FiSIAQ 2000 Classification of indoor Climate

Die FiSIAQ (Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate) teilt die Raumluffqualität in folgende Klassen ein [8]:

Klasse	Raumluffqualität	CO <sub>2</sub> -Konzentration über der Aussenluft [ppm]	Aussenluftrate [m <sup>3</sup> /h/Person]	relative Raumlufffeuchte [%]
S1	Sehr gut	350	43	25
S2	gut	550	29	-
S3	genügend	850	22	-

Tab. 6: Klassierung der Raumluffqualität nach FiSIAQ 2000

Die zugrunde liegende Quellenstärke liegt bei ca. 15 bis 18 l/h/Person.

Entsprechend dem kalten Klima in Finnland sind die Anforderungen bezüglich der minimalen Raumlufffeuchte etwas weniger streng als in den CEN Normen.

## 9.4 Klassierung der Simulationsresultate

Die in den Simulationen berechneten Raumluftqualitäten liegen demnach in den folgenden Klassen:

Fall	prEN 13779	CR 1752	FISIAQ 2000
A	IDA 3 ... 4	C	S3
B	IDA 3 ... 4	C	S3
C	IDA 3	B - C	S3
D	IDA 2 ... 3	B	S3
E	IDA 2 ... 3	B	S2 – S3

Tab 7: Klassierung der berechneten Raumluftqualitäten

Je nach Klassierungssystem wird also in den beiden besten Fällen D und E höchstens eine genügende bis mittlere Raumluftqualität erreicht. Demzufolge müsste der Volumenstrom auf mindestens ca. 30 bis 36 m<sup>3</sup>/h/Person erhöht werden, um eine gute Klassierung zu erreichen, mit dem Nachteil, dass die Situation bezüglich minimaler Feuchte noch kritischer wird.

## 10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der in der Praxis festgestellte Widerspruch zwischen einem Luftvolumenstrom, der den hygienischen Anforderungen genügt und zu tiefen relativen Raumluftfeuchtigkeiten bei sehr tiefen Aussentemperaturen wurde durch die Simulationsberechnungen bestätigt. Bei einem Volumenstrom der mechanischen Lüftung von 25 m<sup>3</sup>/h/Person wird gemäss Klassierungssystem internationaler Normen eine genügende Raumluftqualität erreicht, es muss jedoch mit zu tiefer Raumluftfeuchtigkeit an 10% der Tage während der Heizperiode gerechnet werden. Ein Kompromiss könnte durch die Reduktion des Volumenstromes bei tiefen Aussentemperaturen erreicht werden. Dadurch wird der Prozentsatz der Tage mit zu tiefer Luftfeuchtigkeit reduziert und derjenige mit zu hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration erhöht.

Bei mechanischen Anlagen mit zu kleinem Volumenstrom können durch eine konsequente Pausenlüftung mit genügend grossen Drehfenstern die hygienischen Anforderungen fast immer eingehalten werden. Wenn an warmen Tagen zusätzlich auch noch während der Unterrichtszeit gelüftet wird, oder die Pausenlüftung durch eine Querlüftung verstärkt wird, könnten diese Anforderungen immer erfüllt werden. Die minimale Raumluftfeuchtigkeit wird jedoch an 18 % der Tage während der Heizperiode unterschritten. Um dies zu minimieren, sollte die Fensterlüftung an kalten Tagen reduziert werden.

Die Pausenlüftung mit 4 Kippenstern reicht bei einer mechanischen Lüftung mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person nicht aus, um die geforderte Raumluftqualität zu erreichen.

Bei mechanischen Lüftungssystemen mit kleinen Druckverlusten und sehr guten Wirkungsgraden der WRG und des Ventilators ist der Energiebedarf auch unter Einbezug einer Wertigkeit von 2 bis 3 für die elektrische Energie in den meisten Fällen geringer als bei der Fensterlüftung. Deshalb sollte bei neuen Anlagen der Volumenstrom der mechanischen Lüftung immer mindestens so hoch geplant werden, dass bei Normalbelegung keine zusätzliche Fensterlüftung notwendig ist.

### 10.1 Empfehlungen für neue Anlagen

Empfehlungen für die Planung und den Betrieb:

- Volumenstrom der mechanischen Lüftung: 25 - 30 m<sup>3</sup>/h/Person
- WRG, wenn möglich mit Feuchteübertragung
- Bedarfsregelung mit CO<sub>2</sub> Sensoren insbesondere in Räumen mit stark variierender Belegungsdichte:  
z.B. 2-Punkt Regelung  
Schiebung des oberen Schwellwertes bei tiefen Aussentemperaturen bis 1500 ppm

- Wenn keine Bedarfsregelung realisiert werden kann, soll die Anlage 2-stufig sein, damit der Volumenstrom bei tiefen Aussentemperaturen reduziert werden kann
- Fensterlüftung in den Pausen nur bei Überbelegung notwendig. (Signalisierung durch CO<sub>2</sub>-Sensor)

## 10.2 Empfehlungen für bestehende Anlagen

Empfehlungen für den Betrieb mechanischer Anlagen mit mindestens 25 m<sup>3</sup>/h/Person mit WRG jedoch ohne Bedarfsregelung:

- Volumenstrom bei tiefen Aussentemperaturen bis auf 15 m<sup>3</sup>/h/Person reduzieren. (Stufenschalter oder zeitliches takten)
- Fensterlüftung in den Pausen nur bei Überbelegung notwendig
- Falls möglich, bei Unterbelegung den durchschnittlichen Volumenstrom reduzieren

Empfehlungen für den Betrieb mechanischer Anlagen mit weniger als 25 m<sup>3</sup>/h/Person mit WRG jedoch ohne Bedarfsregelung:

- Fensterlüftung in den Pausen ist bei Normalbelegung notwendig. Die erforderliche Öffnungsfläche kann abhängig vom zusätzlich geforderten Volumenstrom der Fensterlüftung und der Aussentemperatur gemäss Gleichung (5) resp. (6) festgelegt werden. Dabei soll der Mittelwert aus den Luftströmen während den Pausen und der Unterrichtszeit mindestens 25 m<sup>3</sup>/h/Person betragen. Für den Fall einer mechanischen Lüftung mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person, einer durchschnittlichen Pausendauer von 8 min je Stunde Unterrichtszeit und einer Belegung von 20 Personen sind die erforderlichen minimal zu öffnenden Fensterbreiten in der Tabelle 8 zusammengestellt:

T <sub>a</sub> [°C]	Fensterhöhe [m]		
	1	1.5	2
15	5.0	2.7	1.8
10	3.5	1.9	1.3
5	2.9	1.6	1.0
0	2.5	1.3	0.9

*Tab 8: Minimal zu öffnende Fensterbreiten [m] für die Pausenlüftung für 20 Personen, abhängig von der Fensterhöhe und der Aussentemperatur, wenn mechanisch mit 15 m<sup>3</sup>/h/Person gelüftet wird und die Pausendauer im Mittel 8 min je Stunde Unterrichtszeit beträgt*

- An Tagen mit sehr tiefen Aussentemperaturen die Fensterlüftung in den Pausen reduzieren
- An warmen Tagen Fensterlüftung auch während der Unterrichtszeit, sofern die äussere Lärmsituation dies zulässt

### 10.3 Ausserhalb der Heizperiode

Die Empfehlungen für den Betrieb ausserhalb der Heizperiode beschränken sich auf die hygienischen Bedarf. Betrachtungen betreffend Nachtauskühlung mittels mechanischer oder natürlicher Lüftung waren nicht Gegenstand dieser Untersuchung:

- Falls von den akustischen Bedingungen zulässig, kann Förderenergie gespart werden, indem der Volumenstrom bis auf  $15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person}$  reduziert wird und dafür zusätzlich die Fenster auch während der Unterrichtszeit geöffnet werden.
- Fensterlüftung gegen besonnte Fassaden an heissen Tagen vermeiden (Überhitzungsgefahr). Nachtauskühlung mittels Fensterlüftung war nicht Gegenstand dieser Untersuchung

## 11 Hinweise auf Planungsunterlagen natürliche Lüftung

Die neue SIA 382/1 wird Hinweise bezüglich der Grenzen einer Fensterlüftung enthalten. Die momentanen Vorschläge beziehen sich auf:

- A) Lärmbelastung: LSV Empfindlichkeitsstufe III und IV und Empfindlichkeitsstufen I und II mit Überschreitung der Planungswerte.
- B) Aussenluftqualität: LRV Immissionsgrenzwerte für  $\text{NO}_2$  oder PM10 sind um mehr als z.B.50 % überschritten oder bei störender Geruchsbelastung
- C) Gesamtwärmelast: Interne und externe Wärmelasten im Sommer in  $\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
- D) Aussenluftstrom: Notwendiger Aussenluftstrom in  $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  (bezogen auf die Bodenfläche)

Die Norm wird auch Hinweise über Massnahmen zur Minimierung der Komforteinbussen durch die Fensterlüftung enthalten.

Eine umfassende Übersicht der Planungsgrundlagen stellt das Script „Natürliche Lüftung“ der HTA Vorlesung zu diesem Thema dar [9].

## 12 Formelzeichen

$\alpha$	Kippwinkel	$^\circ$
$C_i$	$\text{CO}_2$ -Konzentration in der Raumluft	ppm
$C_a$	$\text{CO}_2$ -Konzentration in der Aussenluft	ppm
$C_d$	Dischargekoeffizient	-
$C_k$	Kippfensterkoeffizient	-
$H$	Fensterhöhe	m
$S$	$\text{CO}_2$ -Quelle	ml/h
$T_a$	Aussenlufttemperatur	K
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz $\vartheta_i - \vartheta_a$	K
$\vartheta$	Temperatur	$^\circ\text{C}$
$t$	Zeit	h
$\tau$	Zeitkonstante $V/\dot{V}$	h
$V$	Raumvolumen	$\text{m}^3$
$\dot{V}_\square$	Volumenstrom durch Rechtecköffnung	$\text{m}^3/\text{h}$
$\dot{V}_k$	Volumenstrom durch Kippfenster	$\text{m}^3/\text{h}$
$W$	Fensterbreite	m

## 13 Referenzen

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: *SIA 382/1 Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen*, 1992 Zürich
- [2] CEN/TC156/WG7 prEN 13779: *Ventilation for non residential Buildings – Performance requirements for ventilation and room –conditioning systems*, January 2003
- [3] Feustel H., Smith B., Dorer V., A. Haas A., Weber A. et al.: *COMIS 3.1 – Program for Modelling of Multizone Airflow and Pollutant Transport in Buildings*, 2001 EMPA Dübendorf
- [4] Cadloni M., Ferrazzini M.: *Natürlicher Luftaustausch durch Kippfenster*, Diplomarbeit 1997, ETH Zürich
- [5] Ferrazzini M. : *Ergänzung zur Diplomarbeit: „Natürlicher Luftaustausch durch Kippfenster“*, 1997 ETH Zürich
- [6] Weber A.: *Modell für Natürliche Lüftung durch Kippfenster*, TRNSYS Usertag, November 1997, Stuttgart
- [7] CEN/TC156 CEN report CR 1752: *Ventilation for Buildings – Design criteria for indoor environment*, 1998 Brüssel
- [8] Finnish Society of indoor Air Quality and Climate (FiSIAQ): *Classification of indoor Climate 2000. Target values, design guidance and product requirements*, FiSIAQ publication 5E, 2001 Espoo, Finnland
- [9] Dorer V.: *Natürliche Lüftung*, Vorlesungsscript, EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik, Mai 2003 Dübendorf

## Anhang

### Normstundenplan

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
07:30-08:15					
08:20-09:05					
09:15-10:00					
10:15-11:05					
11:10-11:55					
13:45-14:30					
14:40-15:25					
15:35-16:20					
16:30-17:15					