

Schulhäuser

Wieviel Luft braucht das Hirn?

Dr. Heinrich Gugerli, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich,
Heinrich Huber, Hochschule für Technik und Architektur, Luzern (HTA)
Andreas Weber, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)

Zusammenfassung

Die zurzeit noch gültige Fassung der Norm SIA 382/1 fordert für mechanische Lüftungen in Schulhäusern $15 \text{ m}^3/\text{hP}$ Volumenstrom und setzt dementsprechend den Grenzwert für CO_2 in der Raumluft bei 1500 ppm fest. Seit einiger Zeit schon zeichnete sich ab, dass diese Eckwerte nicht genügen. Nach heutigem Wissen sollten im Tagesmittel höchstens 1000 ppm CO_2 erreicht werden, was Volumenströme ab $25 \text{ m}^3/\text{hP}$ erfordert. Im Rahmen von Messungen an Zürcher Schulhäusern konnte dies bestätigt werden. Durch Simulationsberechnungen wurden allgemein anwendbare Regeln für die Lüftung von Schulzimmern gewonnen. Sie zeigten beispielsweise, dass in Schulhäusern mit $15 \text{ m}^3/\text{hP}$ mechanischer Lüftung nur durch zusätzliche, konsequente Pausenlüftung via grosse Drehfenster eine genügende Luftqualität erreicht werden kann.

Résumé

La norme SIA 382/1, encore en vigueur actuellement, préconise un débit volumique de $15 \text{ m}^3/\text{hP}$ pour les aérations mécaniques dans les bâtiments scolaires et fixe donc à 1500 ppm la valeur limite du CO_2 de l'air ambiant. Depuis quelques temps, il s'est avéré que ces valeurs de référence ne sont plus suffisantes. En l'état actuel des connaissances, la moyenne journalière ne devrait pas dépasser 1000 ppm CO_2 , ce qui nécessite un débit volumique supérieur à $25 \text{ m}^3/\text{hP}$. Ce fait a pu être confirmé par des mesures effectuées dans des bâtiments scolaires à Zurich. Des calculs de simulation ont permis d'établir des règles générales à appliquer en matière d'aération des locaux scolaires. Ces règles ont montré par exemple que les bâtiments scolaires disposant d'une aération mécanique de $15 \text{ m}^3/\text{hP}$ ne pouvaient présenter une qualité d'air suffisante qu'au moyen d'une aération supplémentaire par de grandes fenêtres pivotantes pendant les pauses.

1. Ausgangslage

Die Stadt Zürich legt grossen Wert auf gute Raumlufthqualität in ihren Schulhäusern. Wo immer möglich baut die Stadt nach dem Minergie-Standard, was dazu führt, dass neue Schulbauten mit mechanischen Lüftungen ausgerüstet werden.

Die Luftqualität in Schulzimmern wird im Wesentlichen von der CO₂-Konzentration und der Feuchte bestimmt. Die Norm SIA 382/1 von 1992 setzt den Grenzwert für Schulbauten bei 1500 ppm CO₂ an. Dieser Wert erscheint aber aus heutiger Sicht zu hoch. Das berücksichtigt die europäische CEN-Norm prEN 13779 bereits, indem sie als Tagesmittelwert nur noch 1000 ppm zulässt. Es ist anzunehmen, dass im Rahmen der Überarbeitung dieser Wert auch in die Norm SIA 382/1 übernommen wird.

Bezüglich der Luftfeuchtigkeit fordern die Norm SIA 382/1 und die prEN 13779 generell ein Tagesmittel von minimal 30 %. Die relative Feuchtigkeit der Raumlufth darf diesen Wert aber während „weniger Tage“ unterschreiten. Genaue Angaben zur Anzahl der gestatten Unterschreitungen fehlen aber in beiden Normwerken.

Anlass für die eingehende Untersuchung der Raumlufthqualität in Schulzimmern gab eines der neuen Minergie-Schulhäuser der Stadt Zürich. Es verfügt über eine mechanische Lüftung, die gemäss der gültigen SIA-Empfehlung 382/1 auf 15 m³/hP dimensioniert wurde. Wie bei Minergie-Gebäuden üblich wurde den Benutzern empfohlen, besonders im Winter auf die Fensterlüftung zu verzichten. Damit sollen unkontrollierte Wärmeverluste möglichst gering gehalten werden. In der Folge häuften sich allerdings die Klagen wegen mangelnder Luftqualität in den Schulzimmern. Dies wurde im Rahmen der Erfolgskontrolle durch die Firma Bau- und Umweltchemie, Beratungen und Messungen AG denn auch bestätigt. Die einwöchigen Messungen zeigten CO₂-Werte über 1500 ppm während der Nutzungszeit. Um der Situation auf den Grund zu gehen, wurden 2003 bei der Hochschule für Technik + Architektur Luzern (HTA) und der EMPA Dübendorf eine Untersuchung in Auftrag gegeben, die unter anderem folgende Frage beantworten sollte:

- Mit welchen CO₂-Konzentrationen muss bei ausschliesslich mechanischer Lüftung mit 15 m³/hP resp. 25 m³/hP Luftwechselrate im normalen Schulbetrieb gerechnet werden?
- Wie wirkt sich die Kombination von Fenster- und mechanischer Lüftung mit 15 m³/hP auf die CO₂-Werte aus?
- Wie verhält sich die relative Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur CO₂-Konzentration bei verschiedenen Lüftungsvarianten?

2. Vorgehen

Um zu allgemein gültigen Aussagen zu gelangen, wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Im ersten Schritt wurden die realen Luftwechselraten und die CO₂-Konzentrationen in einem Schulzimmer unter definierten Randbedingungen gemessen. Zur Bestimmung der Luftwechselrate bediente sich die HTA der Abkling-Methode [1]. Hierbei wird eine kleine Menge des Gases Schwefelhexafluorid (SF₆) gleichmässig im Raum verteilt und anschliessend der Konzentrationsverlauf gegen die Zeit gemessen. Um realitätsnahe Werte zu erhalten, wurde wo möglich bei realer Belegung gemessen. Wo dies nicht möglich war, wurden die internen Lasten mit Glühbirnen nachgebildet. Während der Raumlufthmessungen wurden auch die meteorologischen Daten (Aussen-temperatur, Wind) sowie die Raumlufthtemperatur und -Feuchte erfasst.

Im zweiten Schritt wurden die CO₂-Konzentrationen und Luftfeuchten mit dem Simulationsprogramm COMIS 3.1 durch die Abteilung Energiesysteme/Haustechnik der EMPA Dübendorf berechnet. Dieses Programm eignet sich besonders für die Bestimmung des Luft- und Verunreinigungstransports in mehrzonigen Gebäuden. Zur Kontrolle der Resultate wurden die gerechneten Werte mit denen aus vorangegangenen Messungen verglichen. Dabei wurden die vor Ort gemessenen Volumenströme der mechanischen Lüftung und die gemessenen Raumlufthtemperaturen in die Simulation eingesetzt. Wie sich zeigte, stimmten die beiden Kurven sehr gut überein (Abb. 1).

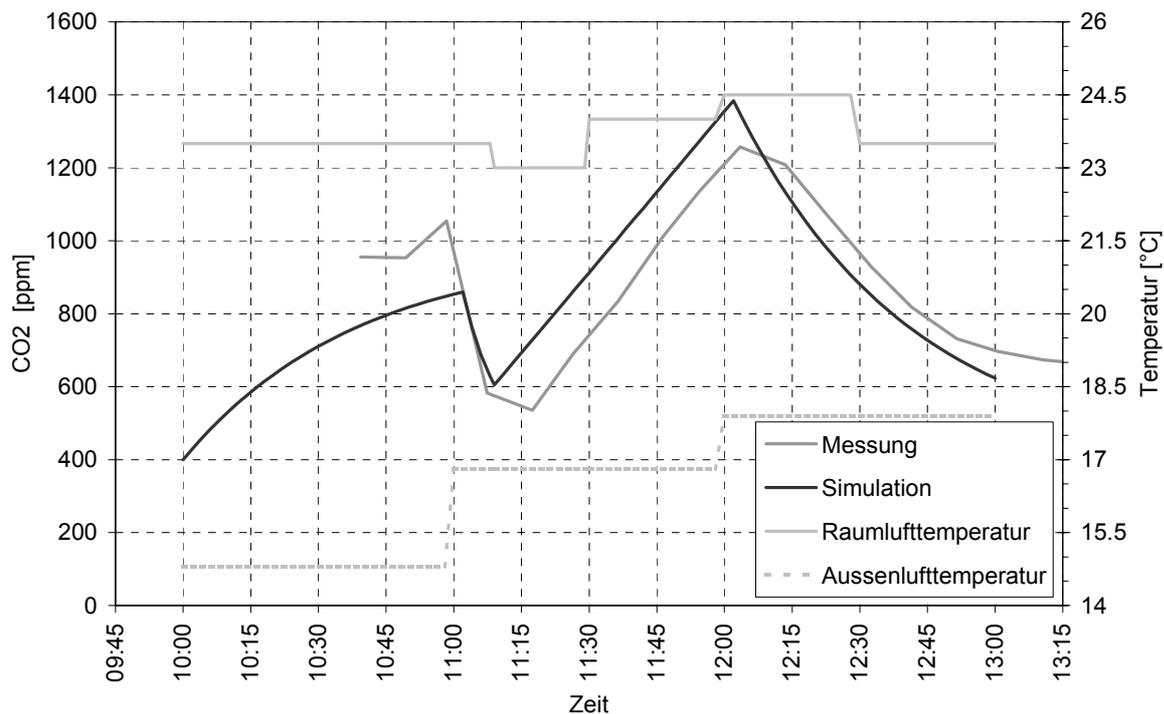


Abbildung 1: Vergleich der CO₂-Konzentrationen zwischen Messung und Simulation; Randbedingungen:

	Personenbelegung	mech. 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

Randbedingungen für die Simulation

Als Szenario für die Simulationsberechnungen diente ein typisches Schulzimmer mit Belegung gemäss Normstundenplan. Da sich das Problem der Luftqualität vor allem während des Heizbetriebs bemerkbar macht, wurden die Wetterdaten der Station Zürich SMA für die Zeit zwischen 1. Oktober und 30. April in die Simulation eingespeist.

Als zulässige Vereinfachung liess sich annehmen, dass zwischen Wänden und Luft kein Feuchtaustausch stattfindet. Zudem wurde postuliert, dass bei der Pausenlüftung die Fenster nur auf einer Seite des Zimmers geöffnet werden. Unter dieser Voraussetzung tritt die Luft durch dieselben Fenster ein bzw. aus und die Intensität des Luftaustausches hängt ausschliesslich von der Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen ab. Eine dichte Gebäudehülle vorausgesetzt, lässt sich so der Einfluss von Wind ausschalten. Die detaillierten Randbedingungen zeigt Tabelle 1.

Raumvolumen	205 m ³
Raumtemperatur	20 °C
Heizperiode	1. Oktober bis 30. April
Wetterdaten	DRY-Datensatz Zürich SMA mit Meteororm auf 430 m ü. M. extrapoliert
CO ₂ Aussenluft	400 ppm
CO ₂ -Produktion	27,8 g/h·Person (15 l/h·Person)
Feuchteproduktion	52 g/h·Person
Anzahl Personen	20
Grenzwerte	CO ₂ : Maximalwert: 1500 ppm CO ₂ : Maximaler Tagesmittelwert: 1000 ppm <i>rel. Feuchtigkeit</i> : Minimaler Tagesmittelwert: 30 %
Belegungszeit	7:30 - 11:55 und 13:45 - 17:15 Freie Tage und Ferien sind nicht berücksichtigt.
Pausen	8:15 - 8:20, 9:05 - 9:15, 10:00 - 10:15, 11:05 - 11:10, 11:55 - 13:45, 14:30 - 14:40, 15:25 - 15:35, 16:20 - 16:30
Mechanische Lüftung	15 m ³ /h resp. 25 m ³ /h (bei 20 °C), von 7:30 bis 19:00
Kippfenster	1 m x 2,9 m; Spalt oben: 0,21 m
Drehfenster	0,6 m x 2,1 m

Tabelle 1: Randbedingungen für die Simulation der Rauluftqualität in einem Schulzimmer

Es wurden folgende Lüftungsvarianten simuliert:

	Zuluft [m ³ /hP]	Belegung	Fensterlüftung
A	15	Personen während gesamter Belegungszeit anwesend	keine
B	15	Personen während der zwei grossen Pausen abwesend	keine
C	15	Personen während der zwei grossen Pausen abwesend	4 Kippfenster während allen Pausen geöffnet
D	25	Personen während gesamter Belegungszeit anwesend	keine
E	15	Personen während der zwei grossen Pausen abwesend	3 Drehfenster in allen Pausen geöffnet

Tabelle 2: Varianten, die mit dem Simulationsprogramm berechnet wurden

3. Resultate

CO₂-Konzentration

Abbildung 2 zeigt die simulierten CO₂-Konzentrationen für einen typischen Schultag. Wie zu erwarten war, pendeln sich die Werte in den Schulzimmern bei ausschliesslich mechanischer Lüftung um etwa 1500 ppm (Fall A, 15 m³/hP) resp. 1000 ppm (Fall D, 25 m³/hP) ein. Schon auf den ersten Blick zeigen die simulierten Tagesverläufe die unterschiedliche Wirksamkeit von zusätzlicher Lüftung durch Kippfenster (Variante C) und Drehfenster (Variante E). Unter den gewählten Rahmenbedingungen (Fenster werden nur auf einer Seite des Zimmers geöffnet) hängt der zusätzliche Luftvolumenstrom nur von der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Aussenluft sowie der wirksamen Fläche der Öffnung ab. Beim gezeigten Beispiel liegt die Aussentemperatur zwischen 3 °C und 4 °C.

Durch Öffnen der Kippfenster während der Pausen entsteht beim hier gezeigten Beispiel eine zusätzliche momentane raumvolumenbezogene Luftwechselrate von 3 h⁻¹, geöffnete Drehfenster hingegen erzeugen zusätzlich etwa 14 h⁻¹. Bei einer durchschnittlichen Pausendauer von 8 Minuten ergibt das über den gesamten Tagesverlauf bei Kippfenstern eine zusätzliche Luftwechselrate von 0,4 h⁻¹ und bei Drehfenstern von etwa 1,9 h⁻¹.

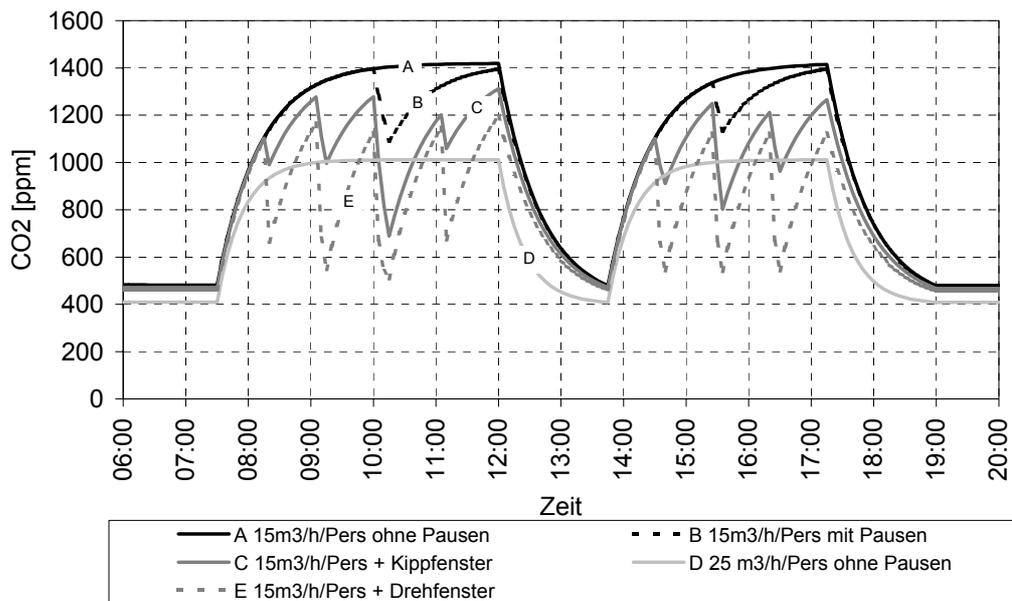


Abbildung 2: Typischer Tagesverlauf der simulierten CO₂-Konzentration in einem Schulzimmer
Aussentemperatur zwischen 3 °C und 4 °C

Anschauliche Informationen zu den CO₂-Werten über die ganze Heizsaison liefern die Summenhäufigkeitsdiagramme. Aus ihnen lässt sich ablesen, wie häufig die CO₂-Konzentration bestimmte Werte überschreitet. Abbildung 3 zeigt die Summenhäufigkeiten für die CO₂-Konzentration als Momentan- und als Tagesmittelwerte bei den verschiedenen Lüftungsvarianten. Bei ausschliesslich mechanischer Lüftung mit 15 m³/hP unterschreiten die Momentanwerte 1000 ppm nur während 14 % der Belegungszeit. Die Tagesmittelwerte liegen bei dieser Variante ständig über 1000 ppm. Bei 25 m³/hP hingegen unterschreiten die Momentanwerte während rund 55 % der Belegungszeit 1000 ppm und die Tagesmittelwerte ständig. Damit wird klar, dass 15 m³/hP nicht reichen, um die aus heutiger Sicht erforderliche minimale Luftqualität zu erreichen.

Die zusätzliche Pausenlüftung durch Kippfenster vermag die Situation nicht wesentlich zu verbessern. In diesem Fall liegen die Momentanwerte auch nur während rund 29 % der Belegungszeit unter 1000 ppm – die Tagesmittelwerte liegen ständig darüber. Viel wirksamer ist die Pausenlüftung mit Drehfenstern. Bei dieser Variante liegen die Momentanwerte während 68 % der Zeit unter 1000 ppm und die Tagesmittelwerte gar während deutlich über 90 %. Durch gleichzeitiges Öffnen der Zimmertüren oder Fensterlüftung an verschiedenen Fassadenseiten liesse sich der Luftwechsel weiter erhöhen. Der Effekt der Querlüftung ist für den allgemeinen Fall aber nicht zu quantifizieren.

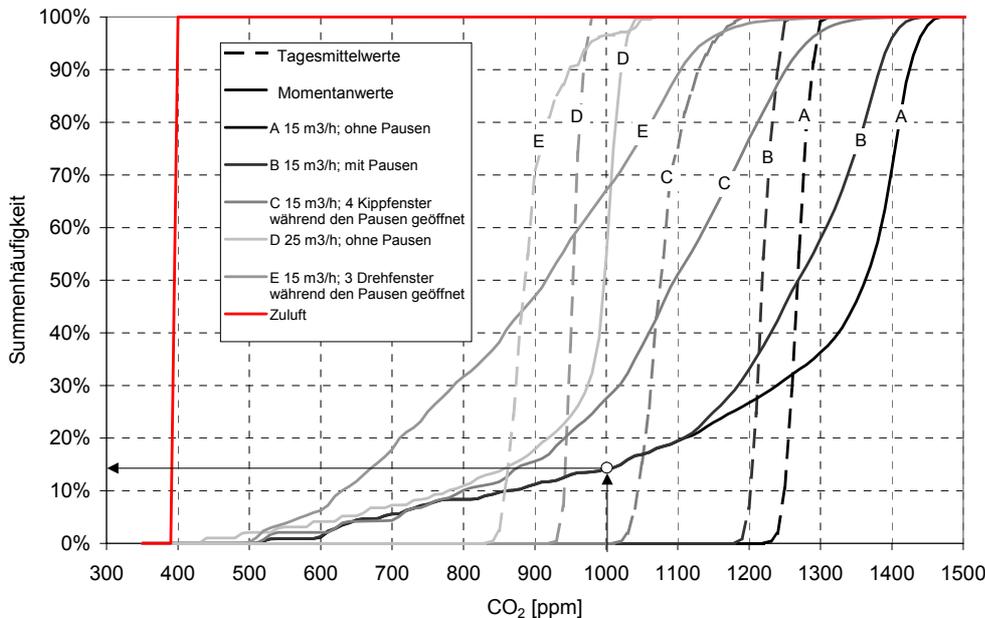


Abbildung 3: Summenhäufigkeiten der CO₂-Konzentration bei verschiedenen Lüftungsregimes.

Relative Luftfeuchtigkeit

Wird die Luftwechselrate zum Einhalten von 1000 ppm CO₂ auf 25 m³/hP erhöht, unterschreitet das Tagesmittel der relativen Feuchtigkeit die geforderten 30 % während rund 10 % der Belegungszeit. Wird mit 15 m³/hP und Drehfenstern gelüftet, sind es sogar rund 18 %. Bei den zugrunde liegenden Simulationsrechnungen wurde davon ausgegangen, dass keine Feuchtigkeit aus der Abluft zurückgewonnen wird.

Wie sich zeigt, ist es unter diesen Umständen kaum möglich, während der Heizsaison die CO₂- und die Feuchtigkeitwerte im Bereich der Normwerte zu halten (Abb. 4). Ein Kompromiss wäre die Reduktion des Volumenstromes bei tiefen Aussentemperaturen. Dadurch verringert sich die Anzahl Tage mit zu tiefer Luftfeuchtigkeit. Gleichzeitig muss jedoch in Kauf genommen werden, dass 1000 ppm CO₂ im Tagesmittel an einigen Tagen überschritten werden.

Bei Unterbelegung der Räume verschärft sich das Feuchteproblem noch. Eine Person gibt in der Stunde etwa 52 Gramm Feuchtigkeit ab. Meist sind Schüler/-innen und Lehrer/-innen die einzigen Feuchtigkeitsquellen in einem Schulzimmer. Deshalb fällt im Halbklassenunterricht die Hälfte der intern produzierten Feuchte weg.

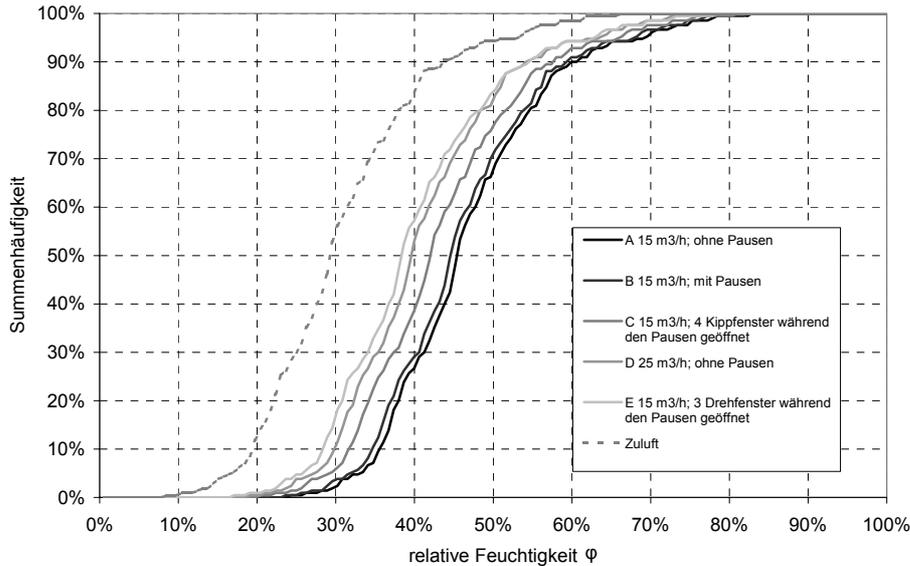


Abbildung 4: Summenhäufigkeiten der Luftfeuchtigkeit bei verschiedenen Lüftungsregimes (Tagesmittelwerte).

4. Diskussion und Empfehlungen

Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mechanische Lüftungen mit 15 m³/hP nicht in der Lage sind, eine nach heutigen Erkenntnissen genügende Raumluftqualität in Schulzimmern sicherzustellen. In Schulhäusern mit solchen Lüftungen lässt sich die CO₂-Konzentration aber auf Tagesmittel unter 1000 ppm senken, wenn während der Pausen konsequent zusätzlich durch grosse Drehfenster gelüftet wird. Zusätzliches Lüften durch Kippfenster hingegen ist wenig wirksam.

Bestätigt wurde auch der in der Praxis immer wieder festgestellte Konflikt zwischen normengerechten CO₂- und Feuchtwerten sowohl bei mechanischer Lüftung als auch bei Fensterlüftung. Das führt dazu, dass mit 25 m³/hP wohl fast durchgängig Tagesmittelwerte unter 1000 ppm einzuhalten sind, die nötigen 30 % relativer Feuchtigkeit in der Heizperiode aber während 10 % der Belegungszeit unterschritten werden.

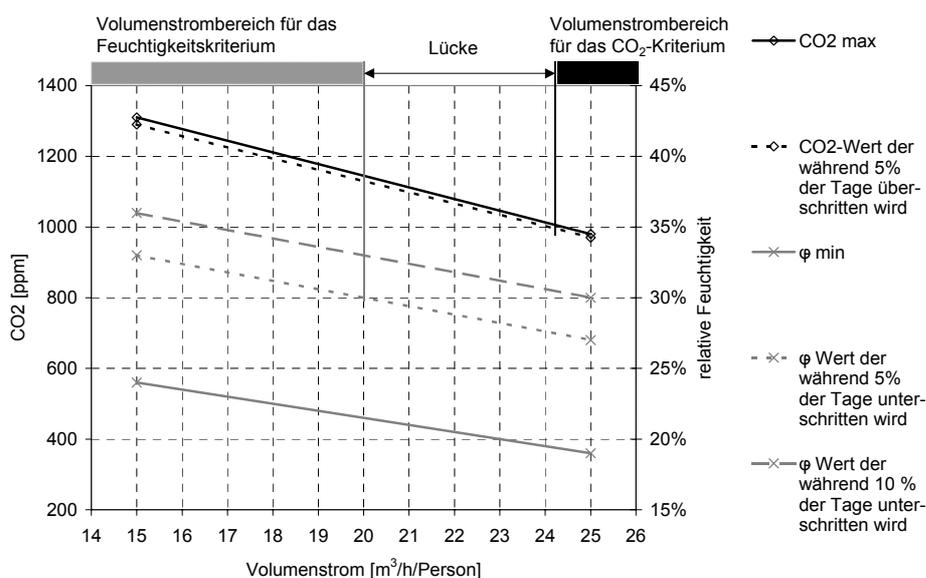


Abbildung 5: CO₂-Konzentration und relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit des Volumenstroms: Entweder lässt sich der CO₂-Gehalt im optimalen Bereich halten oder die Feuchte – beides gleichzeitig geht kaum.

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich **für künftig zu bauende Schulhäuser** folgende Empfehlungen ableiten:

- Die mechanische Lüftung soll auf 25 bis 30 m³/hP ausgelegt werden. Wie Nachmessungen während des ordentlichen Schulbetriebs an einem Schulhaus ergeben haben, können mit Volumenströmen in dieser Grössenordnung 1000 ppm in der Regel eingehalten werden (Abb. 6).

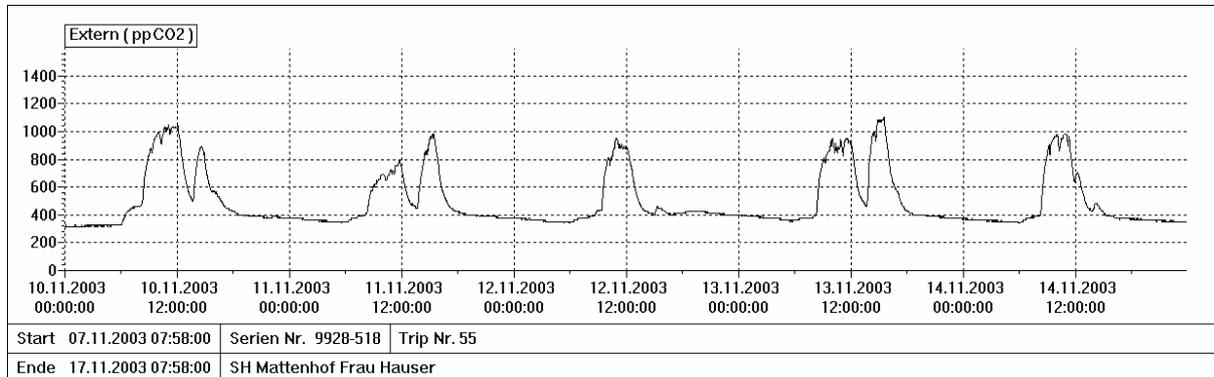


Abbildung 6: CO₂-Messung an einem Schulhaus mit 22,5 m³/hP mechanischer Lüftung während des normalen Schulbetriebs. Quelle: Bau- und Umweltchemie, Beratungen + Messungen AG, Zürich

- Aus energetischen Gründen ist die Kombination von mechanischer Lüftung mit 15 m³/hP und ergänzender Fensterlüftung nicht zu empfehlen. Bei effizienten mechanischen Lüftungssystemen ist der zusätzliche Energiebedarf für den höheren Luftwechsel meist geringer als der Verlust durch zusätzliche Fensterlüftung.
- In Schulräumen muss im Hinblick auf eine kurzfristige Überbelegung (z. B. Elternmorgen) oder zur Schadstoffabfuhr (z. B. Basteln) zusätzlich zur mechanischen Lüftung immer eine effiziente Stosslüftung über Fenster oder Fassadenöffnungen möglich sein. Die Grösse der Öffnungen kann gemäss Tabelle 3 ausgelegt werden.
- Die Wärmerückgewinnung von Lüftungsanlagen soll nach Möglichkeit immer mit Feuchteübertragung realisiert werden. Dabei ist allerdings eine mögliche Geruchsübertragung (z. B. durch Hortkuchen) zu berücksichtigen.
- Zur Vermeidung tiefer relativer Feuchtigkeit im Winter kann der Aussenluftvolumenstrom bei tiefen Aussentemperaturen reduziert werden. Dabei übersteigt die CO₂-Konzentration vorübergehend den Wert von 1000 ppm. Räume mit stark variierender Belegungsdichte (z. B. Hörsäle, Mehrzweckräume) können mit einer Bedarfsregelung via CO₂-Sensoren ausgerüstet werden. Hierfür eignen sich beispielsweise einfache 2-Punkt-Regelungen. Bei tiefen Aussentemperaturen lässt sich der obere Schwellenwert für die CO₂-Konzentration bis 1500 ppm heben. Die Stadt Zürich als Bauherr vertritt die Grundhaltung einer einfachen, angepassten Technisierung.

Für bestehende Schulhäuser mit mechanischen Lüftungen, die weniger als 25 m³/hP leisten, können wir folgende Empfehlungen abgeben:

- Bei Normalbelegung ist in den Pausen zusätzliches Lüften durch Drehfenster notwendig. Die minimal zu öffnenden Fensterbreiten in Abhängigkeit der Aussentemperatur zeigt Tabelle 3. Kippfenster reichen zum Einhalten von 1000 ppm CO₂ in den meisten Fällen nicht.

Aussen-temp. [°C]	Fensterhöhe [m]			Fensterbreite [m]
	1,0	1,5	2,0	
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	

Tabelle 3: Minimal zu öffnende Fensterbreiten in einem Schulraum mit 20 Personen Belegung und 15 m³/hP mechanischer Lüftung bei 8 min. Pausenlänge je Unterrichtsstunde und. Rahmenbedingung: Lüftung nur über eine Fassadenseite.

- An Tagen mit sehr tiefen Aussentemperaturen soll die Fensterlüftung reduziert werden. Damit werden Tiefstwerte bei der relativen Luftfeuchtigkeit vermieden.
- An warmen Tagen soll auch während der Unterrichtszeit über die Fenster gelüftet werden, sofern die Lärmbelastung dies zulässt. Dabei gilt es darauf zu achten, dass im Aufenthaltsbereich keine Zugerscheinungen auftreten.

Die Stadt Zürich hat bereits Konsequenzen gezogen und setzt die Erkenntnisse aus den Untersuchungen seit 2003 um. In ihren „Zielvereinbarungen Raumluftqualität“ verlangt sie 1000 ppm CO₂ als maximalen Tagesmittelwert. 1500 ppm sind nur noch als Spitzenwert erlaubt. Die Lüftungsanlagen in Neubauten werden auf 25 m³/hP ausgelegt. Auch dem Minergie-Standard für Schulen liegt gegenwärtig dieser Wert zugrunde.

5. Literatur/Referenzen

- [1] HTA Luzern, Prüfstelle für HLK: Bericht Nr. HP-03346: „Messung der Lüftungswirksamkeit in einem Schulzimmer im Schulhaus Kugeliloo, Zürich“, 6.12.2003
- [2] EMPA Dübendorf, Abteilung 175, Energiesysteme/Haustechnik: Bericht Nr. 429 680, „Simulationsberechnungen zum Projekt: Planungshilfsmittel und Checklisten für Lüftungsanlagen von Schulhäusern“, 12.06.2003
- [3] Lemon Consult GmbH: „Erfolgskontrolle – Behaglichkeit und Energieeffizienz in städtischen Minergie-Bauten, Schulhauserweiterung Kugeliloo, Zürich-Oerlikon“, 20.05.2004
- [4] Reto Coutalides (Hrsg.), Roland Ganz, Walter Sträuli: „Innenraumklima – keine Schadstoffe in Wohn- und Arbeitsräumen“, Werd Verlag, Zürich 2002 mit Planungsleistung / -blättern / Checklisten und Beispielen auf www.eco-bau.ch
- [5] KBOB/IPB Empfehlung 2004/1 „Gutes Innenraumklima ist planbar“ Download www.kbob.ch
- [6] Amt für Hochbauten der Stadt Zürich: „Richtlinien Gebäudetechnik“, Fachstelle Energie und Gebäudetechnik, Mai 2004