

Mögliche Auswirkungen einer energetische Optimierung auf die Luftqualität in Schulen

Axel Zenger¹, Regina Rimili¹, Michael Gagelmann².

¹Fachhochschule Mainz, Umweltschutz im Bauwesen; ²Öko-Consult GmbH Schriesheim
Axel.Zenger@FH-Mainz

Zusammenfassung

Ausgewählte Untersuchungen zeigen, dass in neu errichteten oder sanierten und stark frequentierten Gebäuden hohe, lufthygienisch nicht mehr akzeptable Schadstoffbelastungen auftreten können wenn die Räume nicht ausreichend belüftet werden. Hiervon sind besonders Schulen und andere Bildungseinrichtungen betroffen. Messungen in zwei ausgewählten Schulen belegen, dass die lufthygienischen Richtwerte nach der VDI 1946 in Klassenzimmern schon innerhalb von 45 Minuten überschritten sein können und die beobachteten CO₂ Immissionen mit 0,28 bzw. 0,4 Vol% sogar schon in der Nähe des MAK-Wertes liegen. Es ist dringend nötig statistisch abgesicherten Ergebnisse über die Innenraumluftqualität in verschiedenen alten bzw. unterschiedlich sanierten Schulgebäuden zu bekommen und den verantwortlichen Planern, aber auch Schulleitern und Lehrern Konzepte für Lösungsmöglichkeiten anzubieten.

Energieeinsparung, Luftwechsel und Lufthygiene

Im Hinblick auf die wachsende Abhängigkeit der EU von Energieimporten sowie den zunehmenden Treibhauseffekt ist eine Verringerung des Energieverbrauchs in den Mitgliedstaaten dringend geboten. Vor allem bei der Bereitstellung von Raumwärme sind große, teilweise kostenneutrale und damit leicht umsetzbare Einsparpotentiale vorhanden. Dies betrifft nicht nur Wohn- sondern auch Büro- und Schulgebäude. So ergab eine Untersuchung von Kluttig et al. (2000) an 199 Schulen und 301 Hochschulen, dass der Mittelwert und die Standardabweichung des Heizenergieverbrauches bei ca. 230 ± 143 kWh/m²/a bzw. 270 ± 187 kWh/m²/a liegt. Eine Verringerung dieses Verbrauchs auf etwa 100 kWh/m²a ist technisch ohne weiteres realisierbar (Kluttig et al., 2000).

Da der Lüftungswärmeverlust bei zunehmender Wärmedämmung der Gebäudeaußenhülle an Bedeutung zunimmt, werden neue Gebäude – auch solche ohne mechanische Lüftungsanlagen – sehr luftdicht konstruiert. D.h. die Luftwechselrate wird deutlich reduziert. Während im Gebäudebestand Luftwechselraten von bis zu 2 [h⁻¹]¹ und mehr zu finden sind, beobachtet man in Niedrig- und Passivhäusern Luftwechselraten von teilweise weniger als 0,2 [h⁻¹] (siehe z.B. Remstedt und Gagelmann, 2001). Aber auch die energetische Sanierung des Gebäudebestandes, die in Zukunft durch die Umsetzung der Richtlinie 2001/0098 der EU über das Energieprofil von Gebäuden im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen verbindlich geregelt wird, kann zu einer effektiven Absenkung des Luftaustauschs führen.

Ein niedriger Luftwechsel hat jedoch nicht nur energetische Vorteile. Die Konzentration an Luftbeimengungen steigt mit abnehmender Luftwechselrate bei gleichbleibender Emission umgekehrt proportional an. Das bedeutet, dass sich die Innenraumkonzentration in zwei gleich genutzten Räumen z.B. um einen Faktor 10 unterscheiden, wenn die Luftwechselraten um den gleichen Faktor voneinander abweichen. Dichte Gebäude ohne kontrollierte Lüftungsanlagen sind daher anders zu nutzen als entsprechende Gebäude mit einer hohen Luftwechselrate. Das trifft, wie von Richter (2002) abgeleitet wurde, auf Wohngebäude und wie nachfolgend erläutert, besonders auch auf Schulen zu.

¹ Eine Luftwechselrate von 2 bedeutet, dass das Raumvolumen in einer Stunde zweimal ausgetauscht wird.

Kohlendioxid als Leitsubstanz der Lufthygiene in Schulen

Wenn man davon ausgeht, dass nur schadstofffreie bzw. -arme Baustoffe und Einrichtungen zum Einsatz kommen und auch keine anderen Emissionsquellen vorliegen, hängt die Lufthygiene in einem Klassenraum von der Außenluftqualität und den Stoffwechselprodukten der Nutzer (Schüler und Lehrer) ab. Hierunter fallen im wesentlichen CO₂, Geruchs- und Botenstoffe (wie z.B. VOC u.ä.) und Feuchte. Mit zunehmender Konzentration dieser stoffwechselbedingten Luftbeimengungen stellen sich Befindlichkeitsstörungen, wie z.B. Geruchsbelästigung und gegebenenfalls Konzentrationsstörungen ein. Da es nicht möglich ist, diese Befindlichkeitsstörungen monokausal einer Substanz oder einer Stoffgruppe zuzuordnen, hat man einen leicht zu messenden Parameter festgelegt, der die durch die menschliche Aktivität verursachte Luftbelastung erfasst. Dieser Parameter ist - wie schon vor mehr als 140 Jahren von Pettenkofer (1858) vorgeschlagen- das Gas Kohlendioxid. Während Feuchtigkeit primär das Gebäude schädigt und erst sekundär, z.B. über Schimmelbildung zu einer Belastung der Menschen führen kann, wird CO₂ nicht als direktes Schadgas angesehen. Pettenkofer schrieb schon 1858, „...*der Kohlendioxidgehalt allein macht die Luftverderbnis nicht aus, wir benutzen ihn bloß als Maßstab, wonach wir auch noch auf den größeren und geringeren Gehalt an anderen Stoffen schließen, welche zur Menge der ausgeschiedenen Kohlendioxid sich proportional verhält*“ (Pettenkofer, 1858). Der im Hinblick auf eine toxikologische Vorsorge am Arbeitsplatz orientierte MAK-Wert von CO₂ ist mit 5000 ppm (über 8h) festgelegt. Es muss jedoch betont werden, dass die für gesunde, exponierte Arbeitnehmer ausgelegten MAK-Werte nicht für die Beurteilung der Luftqualität in Wohn- und Aufenthaltsräumen oder gar in Schulen anzuwenden sind.

Rein durch die CO₂-Belastung bedingte gesundheitliche Auswirkungen sind ab Konzentrationen von 15.000 ppm beschrieben (siehe z.B. EPA, 2002). Untersuchungen zeigen jedoch (ECA, 1992), dass etwa 25% der Probanden die Luftqualität schon bei einer CO₂ Konzentrationen von 0,1 %, das entspricht 1000 ppm als nicht befriedigend einstufen. Bei höheren Konzentrationen können vereinzelt Müdigkeit, Konzentrationsschwächen etc. auftreten (Umweltbundesamt, 2000). Für Arbeits- und Versammlungsräume, die über raumluftechnische Anlagen verfügen, legt die DIN 1946, Teil 2 in ihren gesundheitstechnischen Anforderungen daher fest, dass der Luftaustausch so geregelt sein muss, dass die CO₂-Konzentration in Gebäuden den hygienischen Höchstwert von 0,15%, das entspricht 1500 ppm, nicht überschreitet. Für Schulräume wurde vom Umweltbundesamt (Umweltbundesamt 2000) gefordert, dass der hygienische Richtwert von 0,15 Vol % (1500 ppm) nicht dauerhaft überschritten wird. Dies deckt sich in etwa mit den Vorgaben in anderen Ländern. In den USA setzt die ASHRAE² einen Richtwert für die CO₂-Innenraumkonzentration von 0,1 % fest (zitiert in EPA, 2002).

Bestehende Untersuchungen

Vergleichsweise hohe CO₂-Konzentrationen in Schulen sind an vielen Stellen dokumentiert. Eine sehr umfangreiche Untersuchung in den USA aus dem Jahr 2001 zeigt, dass die CO₂-Konzentrationen in 42% der mehr als 3800 analysierten Klassenzimmer über 0,1% und in 36% der Räume über 0,2 % lag. Aber auch in der BRD wurde schon in der Vergangenheit über erhöhte Kohlendioxidimmissionen berichtet. Schuhmann (1994) beobachtete z.B. in ausgewählten Schulräumen in der BRD schon nach einer Stunde Belastungen von bis 2800 ppm CO₂. Während in den USA von der dortigen Umweltbehörde, ausgehend von den oben zitierten Ergebnissen, weitgehende Maßnahmen zur Verbesserung der Lufthygiene in Schulen ein-

² (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

geleitet wurden (EPA, 2001) scheint die Thematik in der BRD derzeit noch eine untergeordnete Bedeutung aufzuweisen.

Durchgeführte Messungen

Im Rahmen einer Studienarbeit im Weiterbildungsstudiengang Umweltschutz im Bauwesen an der FH Mainz wurde die Luftwechselrate und die zeitliche Entwicklung der CO₂ Konzentration in einem ausgewählten Klassenzimmer einer im Jahr 1999 fertiggestellten Schule untersucht. Das analysierte Gebäude weist planerisch den bauordnungsrechtlich vorgeschriebenen Wärmeschutz nach DIN 4108 und WSchV (1994) auf und hat keine mechanische Lüftungsanlage. Das untersuchte Klassenzimmer hat ein Raumvolumen von 175 m³. Für die Belüftung können im unteren Teil der Fensterfront 4 Fenster gekippt und ein Fenster im Lehrerbereich ganz geöffnet werden. Die 4 Oberlichter sind nur zu kippen. In der Abb.1 ist der vordere Teil des untersuchten Klassenzimmer zusammen mit der Fensteranordnung dargestellt.



In einem ersten Schritt wurde die Luftwechselrate in dem ausgewählten Klassenzimmer bei geschlossenen Fenstern und Tür mittels einer Tracergas -Untersuchung bestimmt. Hierzu wurden einige Milliliter des Tracergases Schwefelhexafluorid in dem Raum freigesetzt und anschließend im Abstand von jeweils 30 Minuten Luftproben gezogen. Nach etwas 2 Stunden wurden 4 Oberlichter gekippt. Die Tür blieb geschlossen. Der zeitliche Abstand der Probenahme wurde nun auf 10 Minuten verringert. Der so bestimmte Konzentrationsverlauf des Tracergases ist in der Abb. 2 dargestellt.

Da die Konzentration des Tracergases in der Außenluft gleich 0 ppm ist kann aus dem Konzentrationsabfall $C(t_1) - C(t_2)$ zwischen dem Zeitpunkt t_1 und t_2 die Luftwechselrate n entsprechend der Gleichung 1 ermittelt werden:

$$C(t_2) = C(t_1) \cdot e^{-n(t_2-t_1)}$$
$$n = 1 / (t_2-t_1) \cdot \ln (C(t_1) / C(t_2)) \quad (1)$$

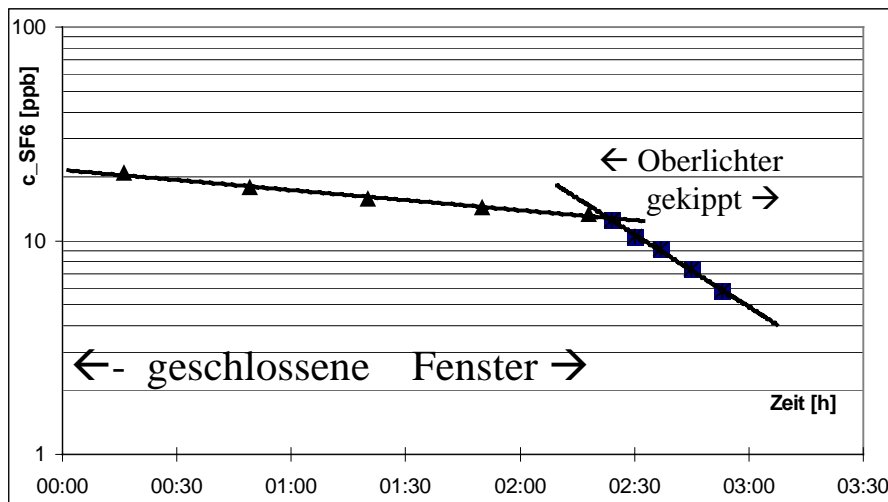


Abb.2: Zeitlicher Abfall des zum Zeitpunkt 0 freigesetzten SF₆-Tracergases in dem untersuchten Klassenraum. Während in den ersten 2 Stunden blieben alle Fenster geschlossen. Danach wurde der Luftwechsel bei Fensterlüftung (gekippte Oberlichter) analysiert.

Die Luftwechselrate ergab sich für den untersuchten Klassenraum bei geschlossenen Fenstern zu $0,22 \text{ [h}^{-1}\text{]}$ und mit gekippten Oberlichtern zu $1,56 \text{ [h}^{-1}\text{]}$. Während der Messung herrschte eine Temperaturdifferenz zur Außenluft von ca. 10 K, die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe außerhalb des Gebäudes war uneinheitlich und schwankte zwischen etwa 1 – 3 m/s.

Bei der CO₂-Messung war das Klassenzimmer mit 24 Schülern und zwei Erwachsenen besetzt. Die CO₂-Anfangskonzentration des unbesetzten Klassenraums wurde zu 0,08 %, die Außenluftkonzentration zu 0,038 % bestimmt. Wie man aus der Abb. 3 erkennt, stieg die CO₂-Konzentration schon binnen 45 Minuten nach Unterrichtsbeginn auf 0,21 %. Der lufthygienische Richtwert nach DIN 1946 war nach 20 Minuten überschritten. In der 5-minütigen Pause verringerte eine ausgiebige Querlüftung (Tür und alle Fenster geöffnet) die CO₂-Immission auf 0,13 %. Danach setzte sich der CO₂-Anstieg auf 2500 ppm (0,25 %) fort.

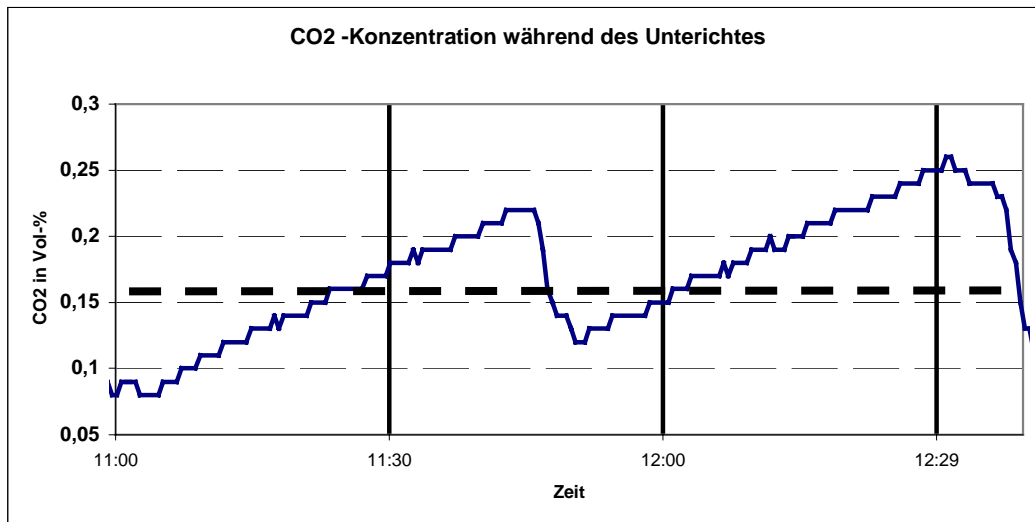


Abb.3 : Anstieg der CO₂ Konzentration in einem Unterrichtsraum von 175 m³ mit 24 Schülern und einer experimentell bestimmten Luftwechselrate von 0,2. Wie man aus der Abbildung erkennt, wird der luft-hygienische Richtwert nach der DIN 1946 überschritten und auch 5 Minuten Querlüften reichen nicht die CO₂ Konzentrationen zu normalisieren; Rimili (2002)

Mit der experimentell bestimmten Luftwechselrate, dem Raumvolumen, der (zeitlich variablen) Anzahl an Personen im Raum und einer CO₂ - Emission von 12 – 18 l/h/Person bei sitzender Tätigkeit lässt sich die zeitliche Entwicklung der Kohlendioxid Immission in dem Klassenraum leicht modellieren (siehe z.B. Zenger, 1997). Dies ist in der Abb.4 für einen mittleren CO₂ -Emissionsmassenstrom von 15 l/Person/h dargestellt. Da die Luftwechselrate bei Querlüftung nicht experimentell bestimmt wurde, musste diese aus der CO₂ - Zeitreihe abgeleitet werden. Die beste Übereinstimmung des Konzentrationsabfalls während der Pausen mit Querlüftung (Fenster und Tür geöffnet) ergab sich für eine Luftwechselrate von etwa 11 [h⁻¹].

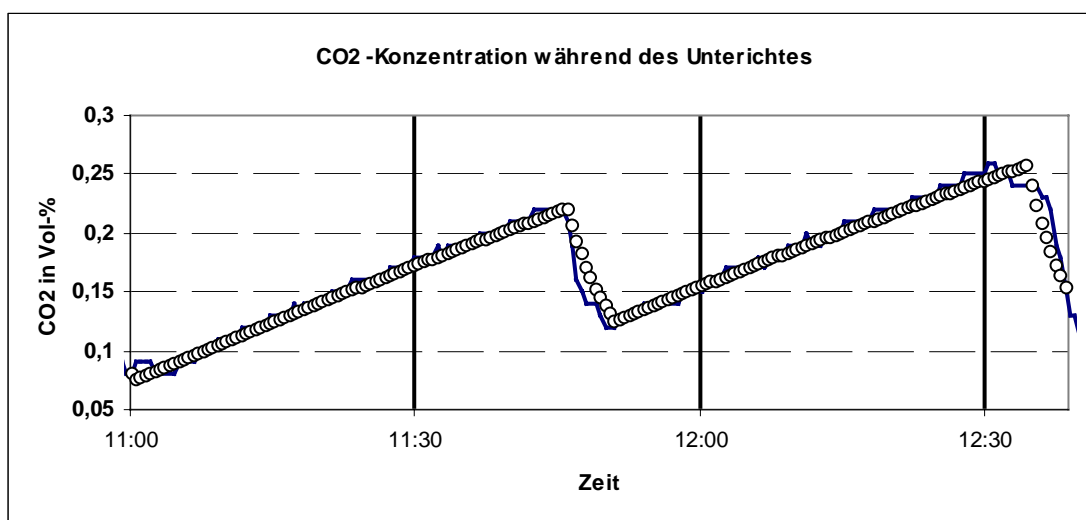


Abb.4 : Modellierung des CO₂-Anstiges in dem untersuchten Klassenzimmer unter Berücksichtigung der sich verändernden Anzahl an Personen und den zwei Luftwechselarten (Symbole) sowie die gemessene Kohlendioxid Immission (durchgezogene Linie).

Wie man aus der Abb.4 erkennt stimmt der modellierte und gemessene Verlauf der CO₂ - Immissionen (wie zu erwarten) sehr gut überein. Deutlich ist zu erkennen, wie unterschiedliche Lüftungsverhalten die Innenraumlufthygiene beeinflussen.

Art der Lüftung	Luftwechselrate [h ⁻¹]	Methode
Fenster, Türen geschlossen	0,2 ± 0,02	SF ₆ -Tracergas
4 Oberlichter gekippt, Tür geschlossen (einseitige Lüftung)	1,5 ± 0,02	SF ₆ -Tracergas
Alle Fenster, Oberlichter und Tür geöffnet (Querlüftung)	11	Numerisch aus Modellierung

Mit Hilfe des verwendeten Rechenverfahrens lässt sich nun leicht abschätzen, welche Auswirkungen unterschiedliche Klassenstärken und/ oder Lüftungsverhalten bei einem bestimmten Raumvolumen und Gebäudezustand haben. Angenommen werden soll der Fall eines Klassenzimmers mit z.B. 175 m³ Volumen, einer Luftwechselrate von 0,2 [h⁻¹] und einer Belegung mit 35 Schülern. Der Raum soll nur in der Pause mittels gekippter Oberlichter d.h. ohne Querlüftung gelüftet werden. Unter diesen Bedingungen erreicht man schon in 2 h den MAK-Wert von 5000 ppm. Ähnlich hohe Konzentrationen, nämlich 4000 ppm wurden in einer anderen Schule auch tatsächlich beobachtet (Gagelmann, persönliche Mitteilung).

Es sollte nun jedoch nicht versucht werden im Übermaß zu lüften und die energetischen Aspekte zu ignorieren. Mit dem beschriebenen Verfahren ist es möglich, unterschiedliche Lüftungsmaßnahmen bezüglich ihrer Auswirkungen und auch ihres Wärmeverlustes zu vergleichen und für einen bestimmten Raum mit einer vorgegebenen Klassenstärke bezüglich Lufthygiene und Energieverbrauch optimierte Lüftungsverhalten festzulegen.

Schlussfolgerung

Bei Schulneu- und auch bei sanierten Schulaltbauten führt die deutliche Verringerung der Luftwechselrate im Rahmen von energetischen Sanierungen bei großen Klassenstärken dazu, das bestehende lufthygienische Richtwerte deutlich überschritten werden können. Besonders in Bildungseinrichtungen, in denen ein konzentriertes Arbeiten in großen Gruppen stattfindet, kann eine unzureichende Lufthygiene unter Umständen zu einer eingeschränkten Aufnahmefähigkeit der Schüler führen. Es ist ein erstrebenswertes Ziel, dass bei der Planung, Auslegung und Sanierung von Schulgebäuden neben den energetischen Aspekten vermehrt auch lufthygienische Kriterien berücksichtigt werden. Die Autoren versuchen derzeit ein entsprechendes, einfach anzuwendendes und kostengünstiges Hilfsmittel zu konzipieren.

Literatur

ECA (1992): COST Project 613 – Report No.11 – Guidelines for ventilation requirements in buildings. (Zitiert in Richter et al., 2002)

EPA (2001): IAQ Tools for Schools Kit - Ventilation Checklist and Log. Zu finden unter: <http://www.epa.gov/iaq/schools/tfs/ventilat.html>

Epa (2002): Appendix E - Typical Indoor Air Pollutants / Indoor Air Pollutant - Carbon Dioxide (CO₂). Zu finden unter: <http://www.epa.gov/iaq/schools/tfs/guidee.html>

Pettekofer, Max von(1858): Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. *Literarisch-artistische Ansalt der Cotta'schen Buchhandlungen, München 1858.*

Remstedt C.-D. und M. Gagelmann (2001): Vom MVV-Musterhaus zum zertifizierten und bilanzierten „Ökohaus“ am Beispiel eines Einfamilienhauses in Holzständerbauweise.

In: Handbuch für Bioklima und Lüfthygiene. Hrsg. H.-J. Moriske und E. Turowski. Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech, IV-7.4.1 Seiten 1-8

Richter, T.Hartmann, A.Kremonke, D.Reichel (2002): Gewährleistung einer guten Raumluftqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste (RS III 4 – 6741-97.118). *Bundesamt für Bauwesen*

Rimili,R,. (2002):Ermittlung der Innenraumluftqualität in einem Klassenraum anhand des Indikators CO₂. *Studienarbeit im Rahmen des Weiterbildungsstudiengangs Umweltschutz im Bauwesen. FH Mainz, 2002*

Schumann (1994): Kohlendioxid in Innenräumen. *VDI Bericht Nr. 1122, 1994 S 253-268.*

Umweltbundesamt (2000): Leitfaden für die Innenraumluftthygiene in Schulgebäuden. Umweltbundesamt, Innenraumluftthygiene-Kommission des UBA, Berlin

Zenger, A (1997): Rechenverfahren zur Abschätzung zeitlicher Variationen der Innenraumkonzentrationen luftgetragener Schadstoffe. *Boden, Wasser, Luft 7/8 1997.*

Zenger, A T.Gritsch, U.Höpfner, M.Sinn, P.Rabl, N.van der Pütten, H.Gabler (1999): Predicting Emission and Mean Air Quality in Underground Garages. *Tagungsband der 8.Int.Tagung Verkehr und Umwelt und COST 319, 1999. Graz.*