

Bringt die Passivhausschule die Lösung der Raumlufthygienischen Probleme in Schulen?

Passive-House Schools – A Tool for Improving Indoor Air Quality in Schools?

Autor

U. Heudorf

Institut

Stadtgesundheitsamt Frankfurt, Abteilung Medizinische Dienste und Hygiene, Frankfurt

Schlüsselwörter

- Innenraumhygiene Schulen
- Passivhausschule
- Kohlendioxid
- Lüftung

Key words

- Passive-house standard
- passive-house school
- indoor air quality
- CO₂ levels

Zusammenfassung

Passivhäuser haben Konjunktur, insbesondere im Zusammenhang mit der Diskussion um Klimaschutz und Energieeinsparung. Seit einigen Jahren wird das Passivhauskonzept auch für den Schulbau propagiert. Da eine maschinelle Grundlüftung mit guter Wärmerückgewinnung als unerlässlicher Bestandteil für ein Passivhaus-Konzept gilt, wird auch mit besserer Raumluftqualität und damit verbesserten Lern- und Lehrbedingungen in Passivhausschulen argumentiert. Bislang liegen jedoch fast keine Untersuchungsergebnisse zur Raumluftqualität in Passivhausschulen unter Unterrichtsbedingungen vor. Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen zur Raumluftqualität in Klassenräumen einer Passivhausschule in Frankfurt durchgeführt, über die nachfolgend berichtet wird.

Material und Methode: Die Passivhausschule in Frankfurt verfügt über Zuluftsysteme mit Wärmerückgewinnung ohne Heizregister. Der Luftwechsel pro Person beträgt ca. 15 m³/h. Die geringe Luftmenge garantiert die Aufheizung durch die Schüler. Die Lüftungsanlagen werden nach einem Wochenprogramm durch eine Gebäudeleittechnik (GLT) gesteuert. Diese maschinelle Belüftung ist nur in der Winterphase in Betrieb; in der Sommerphase ist eine konventionelle Fenster-Lüftung vorgesehen. An drei Unterrichtstagen in der Sommerphase wurde in einem Klassenraum die Kohlendioxidbelastung mit Dräger-Röhrchen in 15 min-Abständen untersucht. In der Winterphase wurde in 2 Klassenräumen über eine Unterrichtswoche die Kohlendioxidbelastung mit Infrarotmesszellen nach dem BIA 9070-Verfahren gemessen. Parallel dazu wurden in 5 min-Abständen die Anzahl der Personen im Raum, deren Aktivitäten und die Raumlüftung nach einem standardisierten Schema dokumentiert.

Abstract

In Germany, some schools have already been built according to the passive-house standard as an answer to the discussion of climate change and energy saving. For European passive construction, a prerequisite is an annual heating requirement of less than 15 kWh/(m²a) (4755 Btu/ft²/yr). Efficient heat recovery from exhaust air using an air-to-air heat exchanger reduces energy consumption and is considered to improve indoor air quality as well. However, data on indoor air quality have been lacking up to now. Here, the data on indoor air quality in a passive house school are presented. **Material and Methods:** In the passive-house school in Frankfurt/M in summer time ventilation is performed by opening the windows. In winter time a mechanical ventilation system provides air at 14–16 m³/person h, with the incoming air being heated by an air-to-air heat exchanger. CO₂ levels were obtained during 3 school days in one classroom in summer time, and during 5 days in two classrooms in winter time. In 5-minute intervals a continuous documentation of the number of persons present in the room, their activity and ventilation was done parallel to the measurements.

Results: Mean CO₂ levels in summer time were 1127 ppm, and 946 ppm in winter time. Regarding only those measurements with people present in the classroom, the air quality standard of 1000 ppm (Pettenkofer's level) was exceeded in two thirds of the measurements in summer and in winter, with 5% (summer) and 10% (winter) of the levels exceeding the guideline value (DIN 1946) of 1500 ppm. Considering the guideline values of the "new" DIN EN 13779, 9–21% of the measurements exceeded 1400 ppm, i.e., "low air quality".

Discussion: Mean CO₂ levels in the passive-house school were comparable to those in con-

Bibliografie

DOI 10.1055/s-2007-985133
Gesundheitswesen 2007; 69: 1–8
© Georg Thieme Verlag KG
Stuttgart · New York
ISSN 0941-3790

Korrespondenzadresse

Priv.-Doz. Dr. U. Heudorf
Stadtgesundheitsamt Frankfurt
Abteilung Medizinische Dienste
und Hygiene
Braubachstr. 18-22
60311 Frankfurt
ursel.heudorf@stadt-frankfurt.
de

Ergebnisse: Die Kohlendioxidbelastung lag im Mittel (Mittelwert) während der Sommerphase bei 1127 ppm CO₂, in der Winterphase bei 946 ppm. Wurden nur die Zeiten mit mehr als 5 Personen im Raum betrachtet, wurde sowohl in der Sommer- als auch in der Winterphase der lufthygienische Standard 1000 ppm in etwa zwei Drittel der Messwerte überschritten; der Richtwert (DIN 1946) von 1500 ppm wurde in 5% der Messungen in der „Sommer-“ und in 10% der Messungen der „Winterphase“ überschritten. Werte über 1500 ppm wurden an einem von drei Tagen in der Sommerphase und an drei von neun Tagen (in denen im Klassenraum unterrichtet wurde) festgestellt.

Diskussion und Schlussfolgerung: Im Vergleich mit konventionell gelüfteten Räumen waren die mittleren Kohlendioxidbelastungen vergleichbar, die Maximalwerte lagen in der Passivhausschule niedriger, dennoch wurde auch in der Passivhausschule der DIN-Wert von 1500 ppm an 33% der Messtage überschritten. Legt man die neue DIN EN 13779 zugrunde so wurde – bei Anwesenheit der Klasse – an zwei der drei Sommer- und an allen Wintermesstagen 1400 ppm in der Raumluft überschritten und somit eine niedrige Raumluftqualität erreicht. D. h. auch in einer Passivhausschule ist in der Winterphase zusätzlich zur gewählten mechanischen Grundlüftung eine Fensterlüftung in den Pausen zwingend erforderlich und auch in der Sommerphase ist die Fensterlüftung zu verbessern. Deswegen und auch wegen möglicher Ausfälle der Gebäudeleittechnik, sind auch in Passivhausschulen ausreichend große Fensterflächen zur Lüftung vorzuhalten und die Schulen sind über die Notwendigkeit ausreichender Lüftung sowohl Sommer als auch im Winter zu informieren. Neben den energetischen Aspekten sind raumlufthygienische Kriterien vermehrt zu berücksichtigen – auch in Passivhausschulen.

Passivhäuser haben Konjunktur, insbesondere im Zusammenhang mit der Diskussion um Klimaschutz und Energieeinsparung. Passivhaus-Qualität bedeutet, den Heizenergiebedarf eines Hauses auf 15 kWh/m² und Jahr (ca. 1,5 l Heizöl pro m² und Jahr) zu begrenzen sowie den Primärenergiebedarf für Strom und Heizung unter 120 kWh/m² zu halten (Bretzke o.J.). Die ersten Passivhauswohnsiedlungen wurden bereits vor ca. 10 Jahren errichtet (Feist, 2006). Seit einigen Jahren wird das Passivhauskonzept auch für den Schulbau propagiert (Feist 2006). Dabei wird nicht nur mit Klimaschutz und Energievorteilen argumentiert. Da eine maschinelle Grundlüftung mit guter Wärmerückgewinnung als unerlässlicher Bestandteil für ein Passivhaus-Konzept gilt, wird darüber hinaus auf die bessere Raumluftqualität und damit verbesserte Lern- und Lehrbedingungen in Passivhausschulen (Bretzke o.J.; Kah 2006).

Über schlechte Raumluftqualität in Schulen und Kindereinrichtungen in Deutschland wird allenthalben von Umweltmedizinern und Hygienikern, aber auch von Raumnutzern geklagt. Erforderliche Maßnahmen, insbesondere ausreichende Lüftung wird in vielen Schulen nach wie vor nicht umgesetzt (uba 2000; Eikmann und Herr, 2005). Insofern erscheint das Passivhauskonzept mit integrierter mechanischer Lüftung interessant. Bislang liegen jedoch – abgesehen Modellrechnungen und von wenigen vorläufigen Daten – fast keine Untersuchungsergebnisse zur Raumluftqualität in Passivhausschulen unter Unterrichtsbedingungen vor.

Nachfolgend wird über Untersuchungen zur Raumluftqualität in Klassenräumen einer Passivhausschule in Frankfurt berichtet.

ventionally ventilated schools, i.e., ventilation via opening the windows, whereas maximal levels were lower in the passive-house school than in other schools. The guideline value of 1500 ppm was exceeded on 33% of the measurement days, the level of 1400 ppm was exceeded in 92% of the days. According to these data, indoor air quality should be improved not only in conventionally ventilated schools but also in passive-house schools. In addition to the mechanical ventilation, ventilation by opening the windows during breaks is necessary. Therefore, sufficient capacity for opening the windows should be available. This is mandatory not only for summer time ventilation but also in case of problems with the mechanical ventilation system. As a result air quality should be an important issue in passive houses as well, in addition to the focus on energy saving.

Material und Methode



Die Schule

Die Riedbergschule in Frankfurt wurde 2004 in Betrieb genommen; das Gebäude mit einer Nettogeschossfläche von ca. 6300 m² enthält u.a. 16 Klassenräume und eine Kita (Pfluger 2006). Die Lüftungsanlagen sind als Zuluftsysteme mit Wärmerückgewinnung ohne Heizregister ausgelegt. Die Restbeheizung der Räume erfolgt über einen kleinen Heizkörper pro Raum. Die Zuluft wird über einen Gegenstrom-Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher erwärmt und den Räumen ohne Nachheizung über Weitwurfschlitze zugeführt. Die Lufttemperatur bei Einblasung unter der Decke beträgt mindestens 16 °C. Die geringe Luftmenge garantiert die Aufheizung durch die Schüler. Volumenstromregler gewährleisten eine gestufte Regelung je Klassenraum (100%, 50%, 0%). Der Luftwechsel pro Person beträgt ca. 15 ml/h (zusätzliche Fensterlüftung möglich), die Luftwechselrate damit bei Vollbelegung 2/h. Für gering genutzte Räume wird der Volumenstromregler über CO₂- oder Mischgassensoren angesteuert. Die Luft strömt von den Klassenräumen über die Gruppenräume in den Flur ...“ (Bretzke, o.J.) Die Lüftungsanlagen werden nach einem Wochenprogramm durch eine Gebäudeleittechnik (GLT) gesteuert. Bei Einstufung „Klassenzimmer belegt“ gibt das Zeitprogramm montags eine Lüftung von 5 bis 13 Uhr, dienstags bis freitags von 7 bis 13 Uhr vor. Dabei dienen die Zeiten vor Unterrichtsbeginn um 8 Uhr zum „Vorspülen“ der Räume nach Nacht- und Wochenendstunden ohne Lüftung. Für Räume mit anderer Nutzung sind andere Lüftungszeiten in der GLT hinterlegt. Während der Schulstunden ergeben sich damit Lüftungsströme von

Tab. 1 Kohlendioxidkonzentrationen in den Klassenräumen in Abhängigkeit vom Lüften und der Anzahl der Personen im Raum

	09.-11.10.06 „Sommerphase“ Klasse 3	26.02.-02.03.07 „Winterphase“ Klasse 3	26.02.-02.03.07 „Winterphase“ Klasse 4
CO ₂ ppm	1127 ± 269 700–1000–1700	1005 ± 308 390–1030–1980	888 ± 390 300–910–1770
Personen n	22 ± 12 0–28–36	13 ± 10 0–19–23	13 ± 13 0–7–30
Lüftungsindex	1,6 ± 0,9 11,5–3	0,5 ± 0,5 0–1–1	0,5 ± 0,5 0–1–1

Sommerphase: keine mechanische Belüftung; Winterphase: mechanische Belüftung mit 14–16 m³/Person und h.

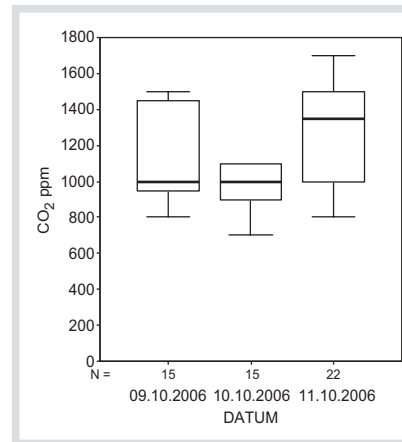
4000 bis 4200 m³/h, in der unterrichtsfreien Spätnachmittags- und Nachtzeit von 0 m³/h (Peper, 2007).

Untersuchung der Kohlendioxidbelastung und von möglichen Einflussfaktoren

Im Oktober 2006 wurden an drei Unterrichtstagen in einem Klassenraum u. a. die Kohlendioxidbelastung mit Dräger-Röhren in 15 min-Abständen untersucht. Der Messbereich der Methode liegt zwischen 100 und 3000 ppm, die Standardabweichung bei ± 10–15%. In der Woche vom 26.02. bis zum 2.03.2007 untersuchte das Institut Fresenius in 2 Klassenräumen die Kohlendioxidbelastung mit Infrarotmesszellen nach dem BIA 9070-Verfahren unter Verwendung des Q-Track, SN 50274 Fa. TSI Incorporated, USA und DK 303-EXT-Co₂, Fa. Driesen & Kern GmbH, Bad Bramstedt. Die Messwerte wurden alle 5 min protokolliert. Die Messungen wurden täglich zwischen 7:30 und 13:30 Uhr durchgeführt. Parallel dazu wurde in einem Klassenraum über 5 Tage (24 h) die Kohlendioxidbelastung im Raum mittels Datenlogger aufgezeichnet.

Zur Bewertung der Ergebnisse werden zunächst der „Pettenkofer-Wert 1000 ppm“ und der Richtwert der DIN 1946 von 1500 ppm, der streng genommen für mechanisch belüftete Räume gilt zugrundegelegt, zum anderen aber auch die Klassifikationen der „neuen“ DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage“ aus dem Jahr 2005. Dort werden zur Bewertung der Lüftungssituation vier Raumluftkategorien eingeführt: RAL 1 besondere Raumluftqualität < 800 ppm CO₂; RAL 2 hohe Raumluftqualität 800–1000 ppm; RAL 3 mittlere Raumluftqualität 1000–1400 ppm und RAL 4 niedrige Raumluftqualität > 1400 ppm. D. h. der „alte Pettenkoferwert“ gibt die Grenze zwischen hoher und mittlerer Raumluftqualität an, währenddem der frühere Richtwert 1500 ppm jetzt auf 1400 ppm herabgesetzt wurde und bereits ab diesem Wert eine niedrige Raumluftqualität festgestellt werden muss.

Während beiden Untersuchungsphasen wurden von 7:30 bis 13:30 Uhr – ebenfalls in Abständen von 5 Minuten – die Anzahl der Personen im Raum dokumentiert, deren Aktivitäten und die Raumlüftung nach einem standardisierten Schema. Aktivitäten im Raum: Pause oder Klasse leer: 1; Frontalunterricht: 2; Basteln, Werken: 3; Toben, Gerangel: 4. Raumlüftung: Erfasst wurden die Anzahl der Türen, Fenster und Oberlichter, die jeweils geöffnet, gekippt oder geschlossen waren. Für die Auswertung wurde ein Lüftungsindex entwickelt, wobei ein vollständig geöffnetes Fenster/geöffnete Tür einen Punkt erhielt, ein gekipptes Fenster/gekipptes Oberlicht je 0,5 Punkte: Der Lüftungsindex pro 5-min-Einheit wurde durch Addition bestimmt.

**Abb. 1** Kohlendioxidgehalt vom 09.-11.10.2006 im Klassenraum – „Sommerphase“ ohne mechanische Lüftung.

Ergebnisse

Die von 9.–11.10.2006 sowie von 26.02.07–02.03.07 erhobenen Daten Klassenräumen der Passivhausschule sind in **Tab. 1** zusammengefasst dargestellt.

Untersuchung ohne mechanische Lüftung

Im Oktober war die mechanische Lüftung der Schule nicht in Betrieb („Sommerphase“) und die Räume wurden ausschließlich über Fenster und Türe belüftet. Die Mittelwerte der Kohlendioxidkonzentrationen lagen – gemittelt über alle drei Tage – bei 1127 ppm und damit über dem lufthygienischen Standard von 1000 ppm (Pettenkofer). An den ersten beiden Tagen wurden 1000 ppm im Mittel (Median) eingehalten, am dritten Tag lag der Median bei 1350 ppm (**Abb. 1**). Dies war auf eine sehr geringe Lüftung am dritten Tag im Vergleich mit den Vortagen zurückzuführen. Während an den ersten beiden Tagen fast durchweg 2 Fenster und Oberlichter (jeweils 2 pro Klassenraum) gekippt blieben und auch die Türe sehr oft geöffnet war, war am dritten Tag nur ein Fenster in Kipp-Stellung und die Türe relativ häufig geschlossen. Dies führte zu einem Lüftungsindex < 1 mit der Folge überhöhter Kohlendioxidgehalte im Klassenraum. Diese ist nicht auf eine höhere Anzahl an Kindern im Raum zurückzuführen, im Gegenteil: am ersten Tag war die höchste Anzahl an Kindern im Raum (Mittelwert 26), am dritten Tag die geringste (Mittelwert 20). Über alle Tage lagen 4% der Messwerte über 1500 ppm. Die Verteilung über die einzelnen Tage zeigt **Abb. 2a**. 26% der Messwerte lagen im Bereich RAL 4 nach der DIN EN 13779, d. h. im Bereich „niedriger Luftqualität“. **Abb. 2b** zeigt die Verteilung nach den Kriterien der DIN EN 13779.

In **Abb. 3** ist der Verlauf der Kohlendioxidkonzentrationen an den drei Tagen gegen die Anzahl der Personen im Raum, resp. dem Lüftungsverhalten (Lüftungsindex) aufgezeigt. Bei etwa gleicher Personenzahl im Raum sind die hohen Kohlendioxidkonzentrationen am frühen Vormittag des 09.10. und am 11.10.06 mit der geringeren Lüftung assoziiert; Außerdem ist erkennbar, dass auch kurze Lüftungsphasen rasch zu einer deutlichen Absenkung des Kohlendioxidgehalts im Raum führen. Die statistischen Berechnungen weisen eine hochsignifikante negative Korrelation zwischen der Kohlendioxidkonzentration im Klassenraum und der Lüftung auf: $-0,599$ ($p < 0,001$).

Untersuchung während mechanischer Lüftung

Abb. 4 zeigt eine Übersicht der Kohlendioxidwerte, die im Klassenraum 4 über 5 Tage mittels Datenlogger erfasst wurden sowie der Ergebnisse der Kohlendioxidmessung durch das Insti-

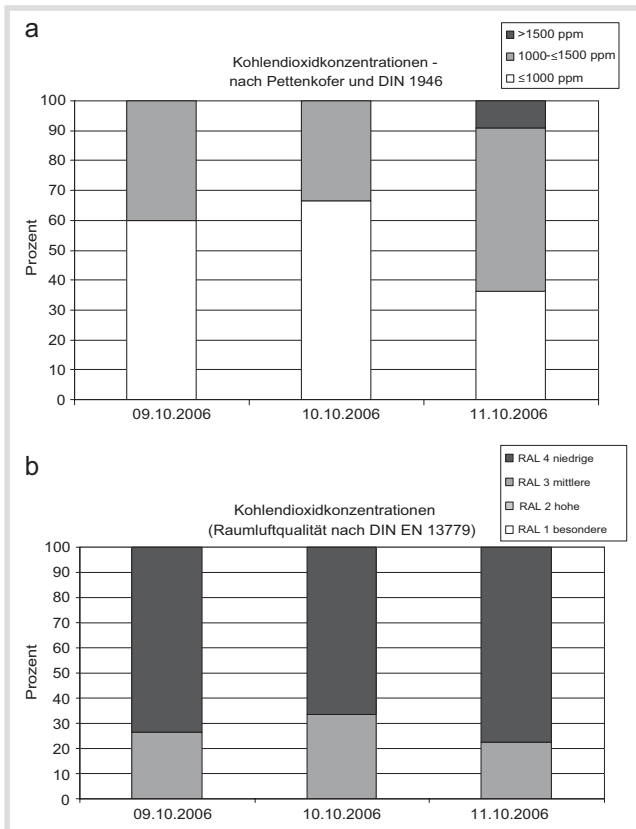


Abb. 2a, b Verteilung der Kohlendioxidkonzentrationen im Klassenraum über drei Tage, d. h. ausschließliche Lüftung über Fenster und Türe.

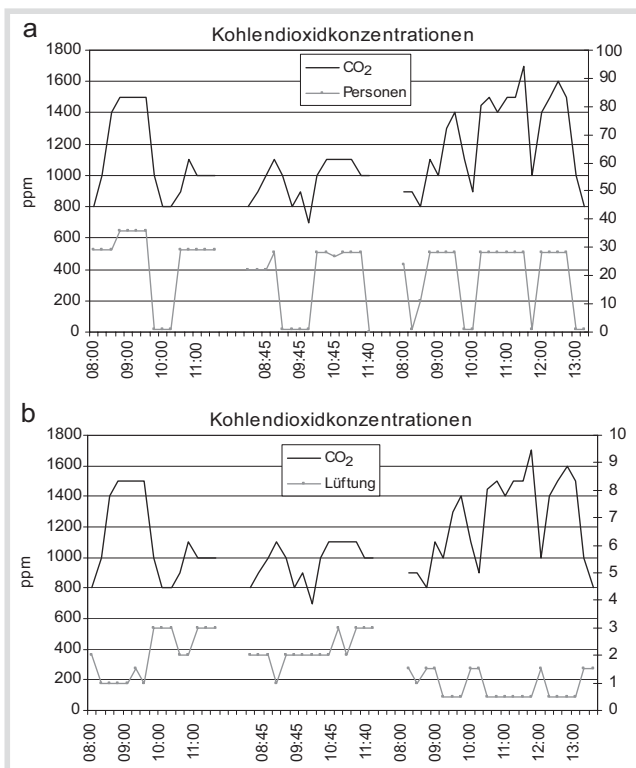


Abb. 3 Kohlendioxidkonzentrationen während der Schulstunden am 09. – 11.10.2006 – in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen im Raum (oben) und der Lüftung (unten).

tut während der Unterrichtsvormittage. Dabei zeigte sich zum einen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Erhebungsmethoden, zum anderen war gut zu erkennen, dass es während der Unterrichtszeit zu einer raschen Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration im Raum kommt mit Ausnahme des 01.03.07, als die Klasse sich nur kurz im Raum versammelte und diesen dann wegen eines Ausflugs verließ. Nach Schulschluss ist im Rahmen der „Nachspülphase“ der raumlufttechnischen Anlage stets ein gutes Absinken der Kohlendioxidkonzentrationen auf Werte von ca. 600 ppm zu beobachten. Im weiteren Verlauf des Nachmittags und der Nacht kommt es zu einer leichten weiteren Absenkung auf ca. 550 ppm. Durch die Vorpülphase vor Schulbeginn werden die Kohlendioxidkonzentrationen nochmals leicht vermindert, sodass zu Unterrichtsbeginn Konzentrationen von unter 500 ppm erreicht werden.

Die während der Unterrichtszeit gemessenen Kohlendioxidgehalte in der Raumluft der Klassenräume 3 und 4 sind in **Tab. 1** und **Abb. 5** dargestellt. Die beispielhaften Verläufe über zwei Messtage zeigen **Abb. 6a** und **b**, jeweils der Anzahl der Personen im Raum und der Lüftung gegenübergestellt. Während der Untersuchungszeit in der Winterphase wurden den Klassenräumen 14–16 m³ Luft/Person und Stunde zugeführt; darüber hinaus wurde oft die Türe zum Flur hin offengehalten, damit die Kinder, die auch in einen angrenzenden Raum wechseln konnten, weiter unter der Aufsicht der Lehrerin stehen. Eine weitere Lüftung durch Öffnen der Fenster oder der Oberlichter wurde in der Untersuchungswoche nicht vorgenommen. Am 26.02.07 war während Anwesenheit der Kinder und bei geschlossener Türe in der ersten halben Stunde ein rascher CO₂-Anstieg erkennbar, der nachdem die Kinder den Raum verlassen hatten, langsam wieder auf Werte unter 600 ppm abfiel. Im Verlauf der nächsten Doppelstunde kam es wieder in der ersten halben Stunde zu einem raschen Anstieg, der dann abflachte (**Abb. 6a**). Am 27.02.07 wurden im Verlauf der ersten Doppelstunde trotz zeitweilig offen stehender Türe Werte bis 1980 ppm CO₂ erreicht, durch die geöffnete Türe fielen die Kohlendioxidkonzentrationen dann im Verlauf der zweiten Doppelstunde zunächst ab, um dann bei geschlossener Türe wieder auf Werte bis 1800 ppm CO₂ anzusteigen. Nach Unterrichtsende war wieder ein langsamer Abfall der CO₂-Konzentration zu verzeichnen – bei geöffneter Türe (**Abb. 6b**).

Abb. 7 und **8** zeigen den Vergleich der in der Winterphase in der Passivhausschule ermittelten Kohlendioxidwerte mit Erhebungen über drei Unterrichtswochen in jeweils 2 Klassenräumen in 2 Schulen in konventionell errichteter Bauweise in Frankfurt. Die Untersuchungen dort waren im Winter 2006 mit identischen Untersuchungsmethoden und Designs durchgeführt worden (Heudorf 2006). Mit Ausnahme eines Klassenraums (AußenAB), in welchem nachweislich über eine Woche nie ein Fenster geöffnet worden war, sind die Kohlendioxidkonzentrationen in den Klassenräumen der Passivhausschule mit denen der drei anderen, konventionell gelüfteten Klassenräume vergleichbar (**Abb. 7**). Auch der Vergleich der Belastungsklassen (<1000 ppm, 1000–<1500 ppm und >1500 ppm) ergibt – mit Ausnahme des o.g. einen Raumes – ein vergleichbares Bild. In der Passivhausschule liegen 5–10% der Messungen über 1500 ppm CO₂, verglichen mit 2–15% in den drei anderen Klassenräumen. Betrachtet man nur die Messungen, bei welchen mindestens 5 Personen im Raum waren, liegen in der Passivhausschule 5–15% der Messwerte über 1500 ppm CO₂, im Vergleich mit 4–32% der konventionell, fensterbelüfteten Klassen (**Abb. 8a**). Legt man die Klassifikationen der DIN EN 13779 zugrunde so wird unter den o.g. Bedingungen (Ausnahme des o.g. einen Raumes sowie mehr als

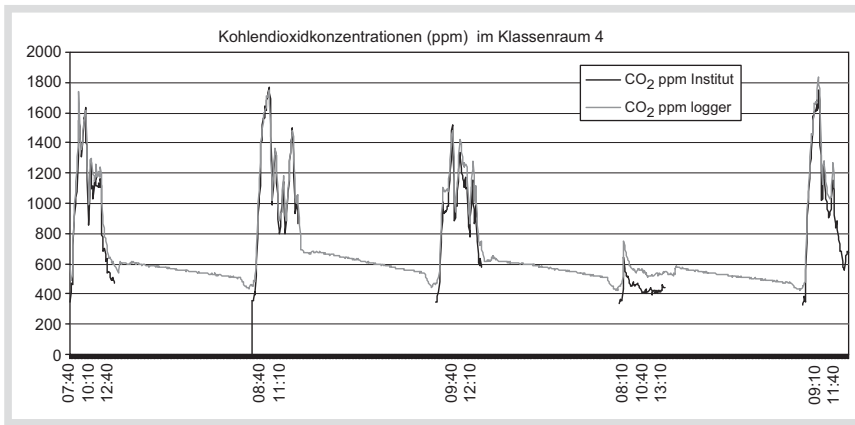


Abb. 4 Kohlendioxidkonzentrationen im Klassenzimmer – Winterphase, d. h. unter mechanischer Lüftung – Vergleich Institutsmessung und Datenlogger.

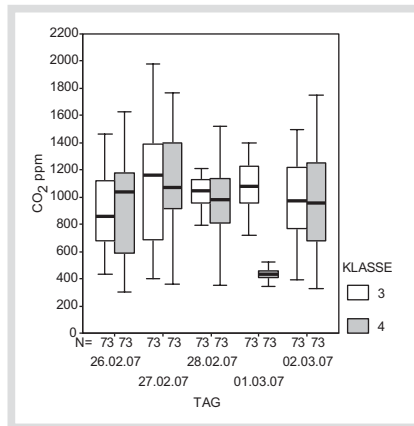


Abb. 5 Kohlendioxidkonzentrationen in zwei Klassenräumen der Passivhausschule – Winterphase, d. h. mit mechanischer Lüftung.

5 Personen im Raum), in konventionell belüfteten Klassenräumen in 12–38% der Messungen eine niedrige Raumluftqualität dokumentiert, in der Passivhausschule bei 9–21% der Messungen.

Diskussion

Nicht erst in den letzten Jahren ist das Raumklima in Schulen immer wieder in der Diskussion. Bereits im 19. Jahrhundert, als Pettenkofer sich intensiv mit Fragen der Innenraumhygiene beschäftigte und zu erreichende Standards formulierte, standen Kohlendioxidkonzentrationen als Marker der Raumluftqualität im Zentrum des Interesses. Die „Pettenkoferzahl“ 1000 ppm Kohlendioxid bezeichnet den lufthygienisch akzeptablen Bereich. Bei Überschreitungen sind eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens, Müdigkeit und eingeschränkte Leistungsfähigkeit zu erwarten. Gleichzeitig hat Pettenkofer aber erklärt: „der Kohlensäuregehalt alleine 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 Kohlensäure sich proportional verhält“ (Pettenkofer 1858).

Diese Problematik hoher Kohlendioxidbelastungen in Klassenräumen besteht – seit Pettenkofer – bis heute unvermindert fort. So zeigen viele Untersuchungen in Schulen, dass in Klassenräumen in der Regel sehr hohe Kohlendioxidkonzentrationen bestehen: Medianwerte zwischen 1000–1500 ppm sind publiziert – mit Maximalwerten bis 10700 ppm. Da jeder Mensch pro Stunde bei sitzender Tätigkeit ca. 15–20 l CO₂ ausatmet, können diese Werte in Klassenräumen sehr rasch erreicht werden, wenn nicht ausreichend gelüftet wird (Pluschke P 1996; Grams et al. 2003; Fromme und Dietrich 2006; Heudorf 2005; Moriske 1998

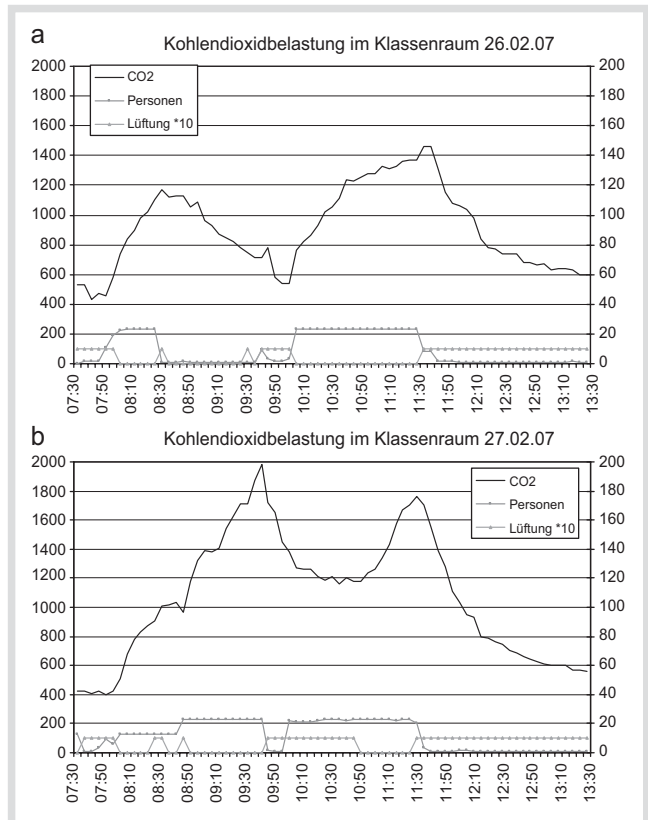
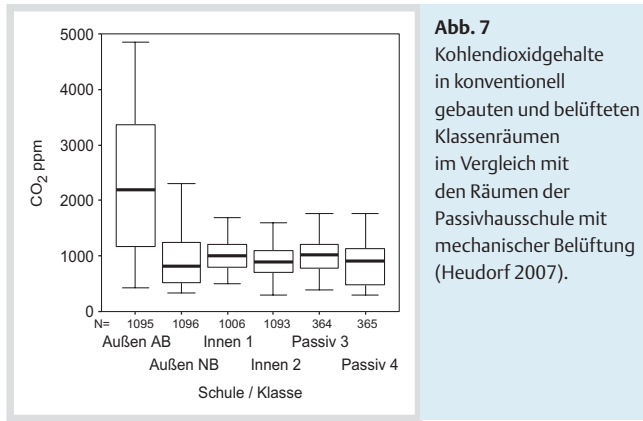


Abb. 6a, b Kohlendioxidkonzentrationen (ppm) in der Klasse 3 in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen im Raum – einzelne Tagesbeispiele.

und 2000; Niedersächsisches Landesgesundheitsamt o.J; Umweltbundesamt 2000). Eine gute Lüftung in den Pausen führt anerkanntermaßen zu einer deutlichen Abnahme des CO₂-Gehalts in der Raumluft; allerdings wird die Pausenlüftung oft nicht in ausreichendem Maße durchgeführt, sei es aus Nachlässigkeit, weil Sicherheitsbedenken bestehen oder weil schlichtweg die Fenster in ihrer Größe oder Konstruktion nicht ausreichen.

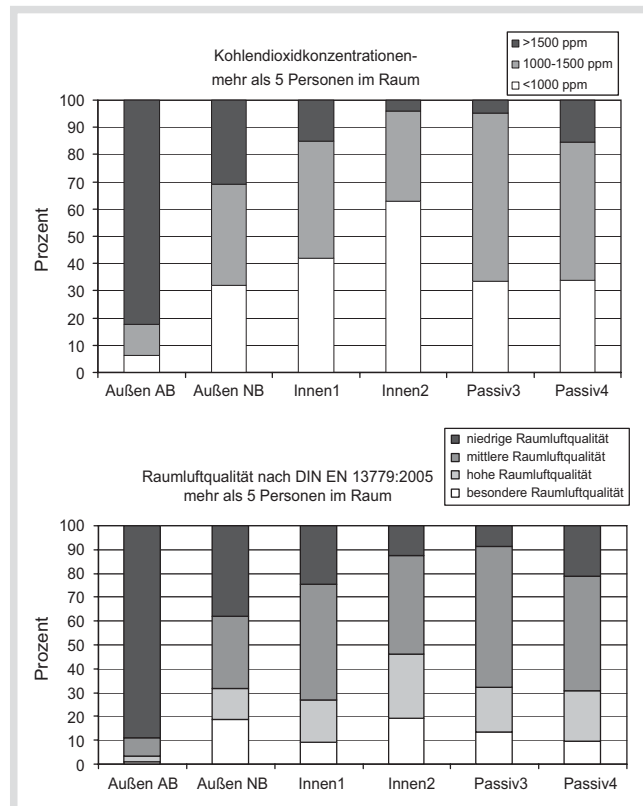
Als ein Lösungsweg werden in den letzten Jahren Schulbauten in Passivhausbauweise mit integrierter maschineller Grundlüftung (mit guter Wärmerückgewinnung) in die Diskussion gebracht, teilweise auch sehr intensiv beworben. Erste orientierende Messungen wurden dahingehend interpretiert, dass in Passivhausschulen Kohlendioxidwerte <1000 ppm gut einhaltbar seien, bzw. wurde aus diesen wenigen Messwerten im Vergleich mit Daten aus konventionell errichteten Schulen abgeleitet „dass



eine gute Raumluftqualität bei schultypischer Belegungsdichte praktikabel nur mit einer kontrollierten Be- und Entlüftung möglich wird. Die im Passivhauskonzept vorausgesetzte kontrollierte Lüftung ermöglicht erst eine gute Raumluftqualität und damit verbesserte Lern- und Lehrbedingungen“ (Kah 2006).

Die hier vorgestellten Ergebnisse umfangreicher CO₂-Messungen und detaillierter Erfassung verschiedener Einflussparameter über insgesamt 13 Unterrichtstage in der Passivhausschule können diese Aussagen so nicht bestätigen. Die mittleren Kohlendioxidbelastungen waren mit denen aus konventionell gelüfteten Räumen vergleichbar, wenn ein Raum, in dem nachweislich über eine Woche nicht über Fenster gelüftet wurde, nicht berücksichtigt wurde. Die Maximalwerte in der Passivhausschule lagen niedriger als in den konventionell belüfteten Klassenräumen, dennoch wurde in der Passivhausschule der DIN-Wert von 1500 ppm an 1 von 3 Sommermesstagen sowie an 3 von 9 Wintermesstagen – während mechanischer Grundlüftung – überschritten. Nach der Klassifizierung nach DIN EN 13779 wurde die Grenze zur niedrigen Raumluftqualität nur an einem der insgesamt 13 Messtage nicht überschritten.

Diese Ergebnisse sind nicht überraschend, wenn man die Daten einer aktuellen Diplomarbeit zur Belüftung von Klassenräumen betrachtet (Stollenwerk 2004). In insgesamt 4 Klassenräumen einer Schule wurden Kohlendioxidbelastungen gemessen; 8 Messtage waren auswertbar. An einem Tag war der Klasse die Art und Häufigkeit der Lüftung freigestellt, an einem anderen sollte eine instruierte Kipplüftung stattfinden; ein weiterer Raum wurde über eine Lüftungsanlage mit unterschiedlichen Volumenströmen (200–600 m³/h) belüftet – mit oder ohne gleichzeitige Fensterlüftung. Bei geschlossenen Fenstern und ohne mechanische Lüftung wurden Kohlendioxidbelastungen bis ca. 5000 ppm festgestellt, analog der im Winter 2006 in dem Altbau der Außenbereichsschule in Frankfurt am Main erhaltenen Werte (Heudorf 2006). Wurde bei geschlossenen Fenstern mit 200 m³/h belüftet, das entsprach ca. 11–12 m³/Person und h, wurden Kohlendioxidwerte von 2000 ppm erreicht. Diese Maximalwerte waren bei höheren Volumenströmen geringer. Erst bei 350 m³/h, d.h. 16–17 m³/Person und h und gleichzeitiger intensiver Pausenlüftung konnte der Grenzwert von 1500 ppm tatsächlich eingehalten werden; die Maximalwerte lagen knapp unter dem Grenzwert. Bei Verzicht auf die zusätzliche Pausenlüftung waren noch höhere Volumenströme erforderlich, um den Grenzwert einzuhalten. Diese Messwerte stimmen letztendlich auch gut mit den in den technischen Regelwerken niedergelegten Angaben zu den erforderlichen Volumenströmen bei raumlufttechnischen Anlagen überein: so werden beispielsweise in Deutschland und der Schweiz in Klassenräumen 30 resp.



25 m³/h und Person gefordert; geringere Volumenströme bis z. B. 15 m³/h und Person sind in der Schweiz zugelassen, wenn in den Pausen stoßgelüftet wird (Zit nach Stollenwerk 2004).

Bei den Nutzern der Passivhausschule in Frankfurt war die Ansicht verbreitet, es handele sich bei der mechanischen Lüftung der Passivhausschule im sog. „Winterbetrieb“ um eine Vollklimatisierung, die während ihres Betriebs keine weitere Lüftung erfordert. Dies mag darauf zurück zu führen sein, dass in den Beschreibungen der Passivhausschule (Riedbergschule) nicht explizit auf die Notwendigkeit einer zusätzlichen Pausenlüftung hingewiesen wird, obwohl die mechanische Lüftung mit einem Volumen von 14–16 m³/Person und Stunde nicht ausreicht, um auf Zusatzlüftung zu verzichten. D.h. es hätte von vornherein klar auf den Bedarf einer ausreichenden Fensterlüftung in den Pausen hingewiesen werden müssen.

Eine ähnliche Erfahrung war bereits in dem Erweiterungsbau der Realschule Mölln, einem der ersten Schul(erweiterungs)-Bauten in Passivhausstandard gemacht worden: „Es stellte sich als sehr wichtig heraus, die Schüler und Lehrerschaft über das Gebäude zu informieren und in das Messprojekt einzubeziehen. Zu Beginn des Schuljahres wurde noch teilweise die Meinung vertreten, dass im Gebäude eine Vollklimatisierung vorhanden ist“ (Kauptert und Vollert, o.J.).

In der Beschreibung zur Realschule Mölln wird darauf hingewiesen, dass – nach eingehender Betrachtung energetisch. 10–12 m³/h und Person über die mechanische Grundlüftung zugeführt wurde, da dieses Volumen sich als das unter energetischen und Kostenaspekten als am günstigsten erwiesen hat. In der hier untersuchten Schule beträgt der zugeführte Volumenstrom 14–16 m³/h und Person – mit dem Ergebnis eines deutlichen Verbes-

serungsbedarfs; dieser kann entweder durch Erhöhung des Volumenstroms der mechanischen Lüftungsanlage besser aber durch Fensterlüftung in Pausen erreicht werden.

Im Winter 2006/7 kam es in der Passivhausschule in Frankfurt zu einem Ausfall der Gebäudeleittechnik über längere Zeit. Die Lehrer stellten dies daran fest, dass es kühler war als bei funktionierender Gebäudeleittechnik. Ansonsten ging der Schulbetrieb wenig verändert weiter, d. h. es wurde – wie bei funktionierender Gebäudeleittechnik – weiterhin keine Fensterlüftung vorgenommen. Leider liegen aus dieser Zeit keine Messwerte zur Kohlendioxidbelastung vor. Es muss aber angenommen werden, dass diese hoch war. Daraus folgt, dass die Raumnutzer unbedingt informiert werden müssen, dass bei Ausfall der Gebäudeleittechnik ein ausreichender Luftaustausch ausschließlich über die Fenster erfolgen kann und eine Fensterlüftung wie in der Sommerphase (ohne zusätzliche maschinelle Lüftung) erforderlich wird.

Vor dem Hintergrund möglicher Störungen der Technik, insbesondere aber, da die Lüftung von Passivhausschulen sich im Sommerbetrieb, d. h. ohne mechanische Lüftung, in keiner Weise von der Lüftung in konventionell erbauten Schulen unterscheidet, ist auf eine ausreichende manuelle Lüftungsmöglichkeit auch in Passivhausschulen zu achten. Es müssen ausreichende Fensterflächen zum Öffnen vorhanden sein, um zu jeder Jahreszeit ein gutes Raumklima sicher zu ermöglichen. Die Messergebnisse aus der Sommerphase mit ausschließlicher konventioneller Lüftung über Fenster, Oberlichter und Türen zeigen, dass in der untersuchten Passivhaus-Schule nur bei nahezu dauerhafter Nutzung aller Lüftungsmöglichkeiten eine angemessene Raumluftqualität zu erreichen ist; d. h. weitere (Passivhaus)-Schulen sollten mit einer größeren Fensterfläche mit zu öffnenden Fenstern ausgestattet werden.

Zusammengefasst ergeben sich aus den hier vorgestellten Untersuchungen folgende Schlussfolgerungen:

- ▶ Während der „Sommerphase“, d. h. ohne maschinelle Grundlüftung muss in einer Passivhausschule wie in Schulen konventioneller Bauweise eine ausreichende Raumluftqualität durch Fensterlüftung sichergestellt werden. Das bedeutet: es sind ausreichende Lüftungsmöglichkeiten erforderlich, die Schule muss über die notwendige Lüftung informiert sein. Das Lüftungsregime sollte im Hygieneplan nach § 36 Infektionsschutzgesetz festgelegt und bei den Begehungen der Gesundheitsämter angesprochen und überprüft werden.
- ▶ Während der „Winterphase“ wird in Passivhausschulen mit integrierter maschineller Grundlüftung mit Wärmerückgewinnung eine Basislüftung vorgehalten. Aus energetischen Gründen wird in der Regel keine Gesamtlüftung vorgehalten. D. h. je nach dem gewählten Volumenstrom (10–12 m³/h und Person bis 14–16 m³/h und Person) ist eine zusätzliche Pausenlüftung zwingend erforderlich, um eine gute Luftqualität im Klassenraum sicherzustellen. Auch hierüber ist die Schule zu informieren und das gewählte Lüftungsregime ist im Hygieneplan festzulegen.
- ▶ In der „Winterphase“ kann es zu Ausfällen der Gebäudeleittechnik und damit der maschinellen Lüftung kommen; auch in diesem Fall muss die Möglichkeit einer ausreichenden manuellen Lüftung bestehen (ausreichende Fensterflächen), die entsprechenden Informationen in der Schule vorhanden und das Lüftungsverhalten festgelegt werden.

Ohne die Argumente der Energieeinsparung oder des Klimaschutzes zu schmälern: aus hygienischer, präventivmedizinischer Sicht stehen in Schulen eindeutig die Frage des Raumklimas, der Innenraumhygiene, d. h. die Gesundheit und das Wohlbefinden der Raumnutzer im Zentrum des Interesses. Die hier

vorgestellten Untersuchungen haben die seitens der Passivhaus-Vertreter propagierten guten raumhygienischen Standards in Passivhausschulen so nicht bestätigen können. Vor diesem Hintergrund ist Zenger et al. (2003) zuzustimmen: „Es ist ein erstrebenswertes Ziel, dass bei der Planung, Auslegung und Sanierung von Schulgebäuden neben den energetischen Aspekten vermehrt auch lufthygienische Kriterien berücksichtigt werden.“ Pettenkofer und seine Forderungen sind also nach wie vor aktuell, auch in Passivhausschulen.

Literatur

- 1 Bretzke A. Planung und Bau der Passivhaus Grundschule Kalbacher Höhe 15, Frankfurt am Main www.frankfurt.de/sixcms/media.php/738/Fachaufsatz-Riedberg.pdf www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/passiv/passiv.htm
- 2 Feist W. Das Passivhaus – ein Konzept auch für den Schulbau. In: Feist W (Hrsg): Protokollband Passivhausschulen. Passivhaus-Institut, Eigenverlag, Darmstadt, 2006, S. 13–34
- 3 Kah O. Schulen im Passivhaus-Standard: Randbedingungen und Anforderungen. In Feist W (Hrsg): Protokollband Passivhausschulen. Passivhaus-Institut, Eigenverlag, Darmstadt, 2006, S. 129–178
- 4 Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Umweltbundesamt, Berlin, 2000; 66
- 5 Eikmann T, Herr C. Schmutzige Schulen sind ein Zeichen für fehlendes hygienisches Problembewusstsein im öffentlichen Bereich. Umweltmedizin Forschung Praxis 2005; 10: 5–6
- 6 Pettenkofer v M. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Literarisch-artistische Anstalt der Cotta'schen Buchhandlungen, München, 1858
- 7 Pluschke P. Luftschadstoffe in Innenräumen: ein Leitfaden. Berlin, Heidelberg Springer Verlag, 1996, S. 69 ff
- 8 Grams H, Hehl O, Dreesman J. Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 2003; 65: 447–456
- 9 Fromme H, Dietrich S. Luftqualität in öffentlichen Einrichtungen am Beispiel des Kohlendioxids. In: Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit: Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 1. Band 13 der Schriftenreihe: Materialien zur Umweltmedizin. Erlangen, 2006, 88–113
- 10 Heudorf U. Hygienische Probleme und Anforderungen an eine gute Raumluftqualität in Schulen. In: Büsching/Paulus/Schirm (Hrsg.): Arzt und Schule. Handbuch für die Zusammenarbeit von Arzt und Schule., Berufsverband der Kinder- und Jugendärzte e.V., 2005
- 11 Heudorf U. Innenraumklima in Schulen. Stadtgesundheitsamt Frankfurt, Mai, 2006
- 12 Heudorf U. Innenraumklima in Schulen. Passivhausschule im Vergleich mit konventionellen Schulen. Stadtgesundheitsamt Frankfurt, Mai, 2007
- 13 Moriske H-J. Chemische Innenraumluftverunreinigungen. In: Moriske/Turowski: Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Ecomed Verlag, Kapitel III-4.2. 1–63
- 14 Moriske H-J. Empfehlungen zur Innenraumhygiene in Schulgebäuden. In: Moriske/Turowski: Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Ecomed Verlag, Kapitel III-4.4.9 1–14
- 15 Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (Hrsg) Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxidverläufen <http://www.nlga.niedersachsen.de/umwelt/schul.htm>
- 16 Heudorf U. Innenraumklima in Schulen. Dezernat für Umwelt, Bildung und Frauen und Stadtgesundheitsamt Frankfurt, 2006
- 17 Pfluger R. Passivhaus Grundschule und Kindertagesstätte auf dem Riedberg Wilhelm-Busch-Schule, Frankfurt. In: Feist W (Hrsg): Protokollband Passivhausschulen. Passivhaus-Institut, Eigenverlag, Darmstadt, 2006, 247–266
- 18 Pfluger R. Messungen zur Luftqualität in Schulen. In: Feist W (Hrsg): Protokollband Passivhausschulen. Passivhaus-Institut, Eigenverlag, Darmstadt, 2006, 103–128
- 19 Stollenwerk D. Überprüfung der Schadstoffbelastung in Klassenräumen mit unterschiedlichen Lüftungskonzepten unter Beachtung nationaler und internationaler Grenzwerte. Diplomarbeit, an der Fachhochschule Köln, August 2004
- 20 Kaupert M, Vollert S Erweiterung der Realschule Mölln im Passivhaus-Standard. Architektonische und technische Umsetzung – erste Betriebserfahrungen.
- 21 Zenger A, Rimili R, Gagelmann M. Energieeinsparung und Luftqualität in Schulen. Umwelt-Medizin-Gesellschaft 2003; 16: 127–130