

Innenraumklima in Schulen

Passivhausschule im Vergleich mit konventionellen Schulen

Untersuchungen im Oktober 2006 („Sommerphase“):
Abteilung Medizinische Dienste und Hygiene, Stadtgesundheitsamt Frankfurt

Untersuchungen im Februar 2007 („Winterphase“):
Auftraggeber: Stadtschulamt der Stadt Frankfurt
Untersucher: SGS Institut Fresenius GmbH, Taunusstein

Berichterstellung:
Stadtgesundheitsamt Frankfurt
Abteilung Medizinische Dienste und Hygiene
Priv.-Doz. Dr. med. Ursel Heudorf
Braubachstraße 18 – 22
60311 Frankfurt

Frankfurt, im April 2007

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	2
1. Einleitung: Ausgangslage, Fragestellung	4
2. Vorstellung der Schule	6
3. Untersuchungsbedingungen und Methoden	9
3.1. Untersuchungen im Oktober 2006	9
3.2. Untersuchungen im Februar/März 2007	10
4. Ergebnisse der Untersuchungen	12
4.1. Untersuchungen im Oktober 2006 – Sommerphase	12
4.1.1. Kohlendioxid-Konzentrationen	12
4.1.2. Partikel-Konzentrationen	15
4.1.3. Zwischenbewertung	18
4.2. Untersuchungen im Februar-März 2007 – Winterphase	19
4.2.1. Kohlendioxid-Konzentrationen	19
Kohlendioxid-Konzentrationen in Klassenräumen der Passivhausschule	19
Kohlendioxid-Konzentrationen – im Vergleich mit konventionell gebauten Klassenräumen	26
4.2.2. Feinstaub-Konzentrationen	29
Feinstaub-Konzentrationen in Klassenräumen der Passivhausschule	29
Hintergrundbelastung der Außenluft – Daten der HLUG	35
Feinstaub-Konzentrationen in der Raumluft – im Vergleich mit der Außenluft	36
Feinstaub-Konzentrationen – im Vergleich mit konventionell gebauten Klassenräumen	37
4.2.3. Zwischenbewertung	40
5. Diskussion	41
6. Literatur	46

Zusammenfassung:

Im Jahr 2006 hatte die Stadt Frankfurt in zwei Schulen in insgesamt vier Klassenräumen umfangreiche Untersuchungen zum Innenraumklima durchgeführt. Im Ergebnis war festgestellt worden:

- in den Klassenräumen treten sehr häufig hohe bis extrem hohe Kohlendioxidgehalte auf; Lüftung kann diese rasch und deutlich vermindern
- In den Klassenräumen finden sich teilweise sehr hohe Feinstaubgehalte, die durch verbesserte Reinigung vermindert werden können.

Daraufhin hat die Stadt Frankfurt eine Reinigungs- und Lüftungsinitiative in Schulen gestartet und die Reinigung der Klassenräume im Winter von 2x/Woche auf täglich erhöht. Mit dieser Untersuchung und der Konsequenz, die Reinigung zu verbessern, hat Frankfurt eine Vorreiterrolle übernommen. Darüber hinaus wurden allen Schulen mit einem Flyer über die Bedeutung schlechter Raumluft und die Notwendigkeit des richtigen Lüftens informiert und aufgefordert, besser zu lüften – für die Gesundheit der Kinder.

Auch im Schulneubau hat die Stadt Frankfurt Neues gewagt, indem sie eine der ersten Passivhausschulen Deutschlands errichten ließ. Dies geschah nicht nur als Beitrag zum Klimaschutz auf lokaler Ebene und als wichtige Energiesparmaßnahme. Da eine maschinelle Grundlüftung mit guter Wärmerückgewinnung als integraler, unerlässlicher Bestandteil für ein Passivhaus-Konzept verwirklicht wurde, war mit der Ausführung in Passivhausbauweise auch der Anspruch verbunden, durch Einhaltung der Vorgaben der Norm DIN 1946 (Kohlendioxidgehalte unter 1500 ppm) bessere Lernbedingungen für die Schülerinnen und Schüler durch besseres Innenraumklima in den Klassenräumen zu schaffen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Winter 2007 das Raumklima in zwei Klassenräumen der Passivhausschule untersucht. Es wurde die gleichen Untersuchungsmethoden wie ein Jahr zuvor in den konventionell gebauten und gelüfteten Klassenräumen gewählt, sodass hier unmittelbare Vergleichsmöglichkeiten bestanden. Im Fokus des Interesses stand – wie 2006 auch – die Feinstaub und Kohlendioxidbelastung. Angesichts der maschinellen Grundlüftung wurde eine geringere Kohlendioxidbelastung als in konventionell (oft schlecht) gelüfteten Klassenräumen erwartet. Darüber hinaus wurde eine etwas erniedrigte Feinstaubbelastung erwartet, als Folge der inzwischen erhöhten Reinigungsfrequenz - unabhängig von der Passivhausbauweise.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Februar/März 2007 zur Raumluftqualität in der Passivhausschule in Frankfurt waren wie folgt:

- Die Feinstaubbelastung in den Klassenräumen der Passivhausschule war gut vergleichbar mit der Feinstaubbelastung in konventionell errichteten und gelüfteten Räumen – bei erhöhter Reinigungsfrequenz. Die Hinweise aus der Untersuchung von 2006, wonach eine erhöhte Reinigungsfrequenz zu niedrigeren Zusatzbelastungen im Klassenraum führt, wurden bestätigt. Im Mittel lagen die Raumluftkonzentrationen in den Klassenräumen bei täglicher Feuchtreinigung etwa $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über der Außenluftbelastung, während sie im Vorjahr bei 2xwöchentlicher Feuchtreinigung noch etwa $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über der Außenluftbelastung gelegen hatte.

- Die durchschnittliche Kohlendioxidbelastung in den untersuchten Klassenräumen der Passivhausschule bei alleiniger mechanischer Lüftung in der Winterphase war mit der Luftqualität in konventionell gelüfteten Klassenräumen vergleichbar, die Maximalwerte waren niedriger. Zwei Drittel der Messwerte lagen über dem empfohlenen Wert von 1000 ppm (diese Rate war höher als in konventionell gelüfteten Klassenräumen) und 10 % der Werte über dem Grenzwert von 1500 ppm (diese Rate war niedriger als in den konventionell gelüfteten Klassenräumen). Insgesamt ist also auch in den Klassenräumen der Passivhausschule ein Minderungsbedarf im Hinblick auf die CO₂ –Belastung erforderlich. Dies geschieht am besten durch Fensterlüftung in den Pausen. Alternativ wäre auch eine Erhöhung der Strömungsvolumina der Lüftungsanlage denkbar.
- In der Sommerphase unterscheidet sich der Lüftungsbedarf der Passivhausschule nicht von dem konventionell gebauter Schulen. Auch hier ist auf eine gute Quer- oder Stoßlüftung durch Öffnen der Fenster zu achten. Da in den Klassenräumen der Passivhausschule nur 2 Fenster ganz zu öffnen und zwei Oberlichter zu kippen sind, sollte darauf geachtet werden, dass stets alle Fenster in den Pausen zum Lüften geöffnet werden.
- Die erhaltenen Messwerte unterstützen und bestätigen die Notwendigkeit, auch Passivhausschulen mit großen Fensterflächen zum Öffnen auszustatten.
- Der Lüftungsbedarf – für den Sommer- und Winterbetrieb – sollte in dem nach Infektionsschutzgesetz zu erstellenden Hygieneplan der Schule beschrieben und festgelegt werden.

1. Einleitung: Ausgangslage und Fragestellung

Nicht erst seit der Feinstaub-Diskussion 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 im Zentrum des Interesses. Die nach ihm benannte 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 bis heute unvermindert fort. So zeigen viele Untersuchungen an Schulen, dass in Klassenräumen in der Regel sehr hohe Kohlendioxidkonzentrationen bestehen: Medianwerte zwischen 1000 bis 1500 ppm sind publiziert - mit Maximalwerten bis 10700 ppm. Da jeder Mensch pro Stunde bei sitzender Tätigkeit ca. 15-20 Liter 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 und 2000; Niedersächsisches Landesgesundheitsamt o.J; Umweltbundesamt 2000)

In den letzten Jahren wird darüber hinaus der Frage nach der Raumbelastung in Klassenräumen mit Feinstaub intensiv nachgegangen. So hat eine große Studie, die im Winter 2000/2001 in Kindergärten in Berlin durchgeführt wurde, gezeigt, dass die Feinstaubkonzentrationen dort mit 53 µg/m³ in Konzentrationsbereichen wie in Raucherwohnungen (ca 60 µg/m³) und damit deutlich über den Belastungen in normalen Nichtraucherhaushalten (ca. 30 µg/m³) liegen (Fromme et al., 2005). Eine weitere größere Studie an 40 Berliner Schulen im Winter 2002/3 bestätigte diese Ergebnisse: auch dort lagen die Feinstaubkonzentrationen im Median mit 59 µg/m³ im gleichen Bereich wie in Raucherhaushalten (Lahrz und Piloty 2005; Lahrz 2006). Eine weiterführende Untersuchung hatte Hinweise erbracht, dass durch vermehrtes Reinigen und Lüften diese Innenraumbelastungen mit Feinstaub vermindert werden konnten (Lagetsi oJ).

Angesichts dieser Situation hat die Stadt Frankfurt am Main Im Februar /März 2006 vertiefende Untersuchungen zur Raumluftqualität durchgeführt: in jeweils zwei Klassenräumen einer Innenstadtsschule und einer im Außenbereich der Kommune gelegenen Schule wurden umfangreiche Messungen durchgeführt, die im Ergebnis die oben dargestellten hohen Kohlendioxid- und Feinstaubkonzentrationen bestätigten. Es konnte aber darüber hinaus auch gezeigt werden, dass durch vermehrtes Reinigen und Lüften die Raumluftbelastung mit Feinstaub gut zu reduzieren war. Darüber hinaus konnte das Lüften als effektive Maßnahme zur Minderung einer hohen Kohlendioxidbelastung eindrücklich bestätigt werden (Heudorf 2006).

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse startete die Stadt Frankfurt im Sommer 2006 eine Initiative zur Verbesserung der Raumluftqualität in Schulen: zum einen wurde - im Sinne einer Verhältnisprävention - die Reinigungsfrequenz in den Klassenräumen von zuvor 2x Feuchtwischen pro Woche auf täglich (Montag bis Freitag) im Winter und dreimal wöchentlich im Sommer gesteigert. Darüber hinaus wurden - im Sinne einer Verhaltensprävention - die Lehrer und Schüler aufgefordert, intensiver

zu lüften. Im Rahmen der Lüftungsinitiative wurden Flyer „Frische Luft für Frankfurts Schulen“ an alle Schulen verteilt und zum Mitmachen geworben.

Bereits im Jahre 2001 hatte die Stadt Frankfurt beschlossen, eine Schule in Passivhausstandard zu errichten. Die Riedberg-Schule wurde am 1.11.2004 eröffnet. Den Bau der Passivhausschule sieht Frankfurt nicht nur als Beitrag zum Klimaschutz, da durch diese Bauweise der Heiz- und Primärenergiebedarf deutlich reduziert werden kann; darüber hinaus wird darauf hingewiesen: „Der größte Teil der Wärme in der Unterrichtszeit geht durch Lüftung und nicht durch Verluste durch die Wände verloren. Daher ist neben der Fensterlüftung in der kurzen Heizzeit eine maschinelle Grundlüftung mit guter Wärmerückgewinnung unerlässlicher Bestandteil für ein Passivhaus-Konzept. Diese Technik verhindert gleichzeitig, dass im Verlauf der Schulstunden sich die Luftqualität in den Klassenräumen erheblich verschlechtert. Mit der Ausführung der Passivhausweise werden also nicht nur die Betriebskosten reduziert, sondern mit der Einhaltung der Vorgaben der Norm DIN 1946 (CO₂ unter 1500 ppm) auch bessere Lernbedingungen für die Schülerinnen und Schüler geschaffen“ (Bretzke, HBA der Stadt Frankfurt).

Leider liegen hier bisher nur wenige – vorläufige Messergebnisse zur Raumluftqualität von Passivhausschulen vor – insbesondere in der sog. „grauen Literatur“, d.h. im Internet oder in Tagungsberichten (Kauptert und Vollert, o.Jahr; Pfluger 2006; Peper 2007). Ein veröffentlichtes Tagesbeispiel aus der Riedbergschule zeigt Maximalwerte von ca. 800 ppm auf – es blieb dabei unklar, wie viele Kinder tatsächlich wie lange im Klassenraum waren - die mit sehr viel höheren Werten konventionell belüfteter Schulen (Fensterlüftung) verglichen werden (Pfluger 2006). Auf der Passivhaus-Tagung 2007 wurde ein weiteres Tagesbeispiel vorgestellt: in einem Klassenraum wurden – bei Anwesenheit von 18 Kindern über 2x 1 Schulstunde bei offener bzw. bei teilweise offener Türe Maximalwerte um 1400 ppm CO₂ gemessen (Peper 2007). Diese Daten legen die Vermutung nahe, dass in Klassenräumen nach Passivhausstandard grundsätzlich eine deutlich bessere Raumluftqualität vorliegt als in fensterbelüfteten Klassenräumen; gleichwohl ist auf die sehr schmale Datengrundlage hinzuweisen.

Vor diesem Hintergrund wurden die in diesem Bericht zusammengefassten Untersuchungen in der Passivhausschule in Frankfurt vorgenommen. Dabei wurden zunächst drei Schultage während der sog. „Sommerphase“ messtechnisch begleitet, d.h. in der Phase mit reiner Fensterlüftung, ohne Einsatz der mechanischen Lüftung. Darüber hinaus wurden in der „Winterphase“ zwei Klassenräume über eine Unterrichtswoche untersucht – während mechanischer Lüftung. Diese Messungen setzen zum einen die Untersuchungen vom Februar/März 2006 fort – mit identischen Methoden und Studiendesign. Sie sind aber auch insbesondere auf die Frage der Raumluftqualität in der Passivhausschule fokussiert: Kohlendioxid- und Feinstaubbelastung in den Klassenräumen.

Die zentrale Frage war:

- Wie ist die Raumluftqualität (Kohlendioxid und Feinstaub) in einer Passivhausschule im Vergleich mit konventionell gebauten und fensterbelüfteten Räumen?

Darüber hinaus sollte versucht werden, Antworten auf folgende Fragen zu finden:

- Gibt es Hinweise, dass das im Jahre 2006 gestartete Programm zur verbesserten Raumluftqualität in Frankfurter Schulen durch intensiviertes Reinigen und Lüften zu einer Verbesserung der Raumluftqualität in Klassenräumen geführt hat?

- Gibt es Hinweise zur genaueren Zusammensetzung der Feinstaubbelastung im Klassenraum im Vergleich mit der Außenluftbelastung?

2. Vorstellung der Passivhausschule

Die Passivhausschule wird nachfolgend anhand von Auszügen aus dem Internetauftritt der Stadt Frankfurt (www.frankfurt.de) vorgestellt:

„Die Stadt Frankfurt am Main macht Ernst mit dem Klimaschutz auf lokaler Ebene. Nach intensiven Beratungen seit 2001 wurde im Frühjahr 2003 beschlossen, den Neubau der Grundschule und Kindertagesstätte im Baugebiet Riedberg in Passivhausbauweise auszuführen. ... Die Schule wurde am 1.11.2004 eröffnet und am 18.11.2004 als qualitätsgeprüftes Passivhaus zertifiziert.

Passivhaus-Qualität bedeutet, den Heizenergiebedarf eines Gebäudes auf 15 kWh/m² und Jahr (entspricht 1,5 l Heizöl pro m² und Jahr) zu begrenzen sowie den Primärenergiebedarf (für Strom und Heizung) unter 120 kWh/m² a zu halten. Eine Schule oder KiTa ist ideal als Passivhaus geeignet, da die Kinder mit ihrer Wärmeabstrahlung schon einen erheblichen Anteil an Wärmeenergie zur Heizung des Klassenraumes mitbringen. So reicht – eine entsprechende Dämmung der Wände und Wärmeschutzverglasung vorausgesetzt – schon ab 12°C die Wärme von 25 Schülern und einem Lehrer aus, den Klassenraum einer Passivhausschule ausreichend zu beheizen.

Der größte Teil der Wärme in der Unterrichtszeit geht durch Lüftung und nicht durch Verluste durch die Wände verloren. Daher ist neben der Fensterlüftung in der kurzen Heizzeit eine maschinelle Grundlüftung mit guter Wärmerückgewinnung unerlässlicher Bestandteil für ein Passivhaus-Konzept. Diese Technik verhindert gleichzeitig, dass im Verlauf der Schulstunden sich die Luftqualität in den Klassen erheblich verschlechtert. Mit der Ausführung in Passivhausbauweise werden also nicht nur Betriebskosten reduziert, sondern mit der Einhaltung der Vorgaben der Norm DIN 1946 (CO₂ unter 1500 ppm) auch bessere Lernbedingungen für die Schülerinnen und Schüler geschaffen. ...

Die Ganztageschule mit KiTa ist mit Vollküche und Speisesaal ausgestattet (Passivhausbauweise, ca. 6100 m²). Die zugehörige Turnhalle wurde in vergleichbarer Massivbauweise mit gutem Niedrigenergie-Standard ausgeführt (ca. 1600 m²). ...

Die Lüftungsanlagen sind als Zuluftsysteme mit Wärmerückgewinnung ohne Heizregister ausgelegt. Die Restbeheizung der Räume erfolgt nicht über Gruppenheizregister für die Lüftung, sondern über einen kleinen Heizkörper pro Raum. .. Die Zuluft wird über einen Gegenstrom-Kreuzstrom-Plattenwärmeaustauscher 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 m³/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 (Schalldämpfer, Brandschutzklappen). ...“

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

Beschreibung der untersuchten Klassenräume:

Klassenraum 3:

Volumen 175 m³

Raumausstattung:

- Bodenbelag: PVC/Linoleum-Boden
- Möblierung: - 20 Tische und 34 Stühle für Kinder
 - Mehrere Regale/halbohohe und hohe Schränke (eine Längs- und eine Querseite)
 - Haken für Straßenkleidung der Kinder
- offene Arbeitsmaterialien (viele offen herumstehende Materialien, z.B.: Bastelmaterialien/Kunstwerke)
- Die Klasse machte nach dem Schulunterricht einen unaufgeräumten Eindruck

Anzahl der Lüftungsmöglichkeiten:

- Tür (T): 1
- Fenster (F): 2
- Oberlichter (OL): 2

Maximal erreichbarer Lüftungsindex: 4



Klassenraum 4:

Volumen 175 m³

Raumausstattung:

- Bodenbelag: PVC-Boden
- Möblierung:
 - 15 Tische und 27 Stühle für Kinder,
 - 1 Lehrerschreibtisch mit Stuhl,
 - 2 Computerschreibtische mit PCs
 - Mehrere Regale/halbhohe und hohe Schränke (eine Längs- und eine Querseite)
 - Plüschsitzgruppe mit 8 sogenannten IKEA-Bananen
- offene Arbeitsmaterialien (sehr wenige herumstehenden Materialien, z.B.: Bücher, Bastelmaterialien, Ordner,...)

Die Klasse machte nach dem Schulunterricht einen aufgeräumten Eindruck

Anzahl der Lüftungsmöglichkeiten:

- Tür (T): 1
- Fenster (F): 2
- Oberlichter (OL): 2

Maximal erreichbarer Lüftungsindex: 4



Reinigung

Das seit dem Schuljahr 2006/7 in Frankfurt gültige Reinigungsverfahren beinhaltet:
Winterhalbjahr (01.11. bis 30.04.)

Täglich: Boden, Tische und Stühle nass wischen
Schränke, Fensterbänke, Kreideleiste abwischen
Papierkorb leeren

Sommerhalbjahr (01.05. bis 31.10.)

Täglich: Papierkorb leeren
3 / Woche: Boden, Tische und Stühle nass wischen
Schränke, Fensterbänke, Kreideleiste abwischen

Erfassung der Raumlüftung und der Aktivitäten im Raum:

Bei beiden Untersuchungen (Sommer- und Winterphase) wurden zusätzlich zu den unten dargestellten Messungen folgende Parameter erfasst und alle 5 min dokumentiert.

- **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.
- **Aktivitäten im Raum,** dokumentiert wurde nach einem standardisierten Schema:
 - Pause oder Klasse leer: 1
 - Frontalunterricht : 2
 - Basteln, Werken: 3
 - Toben, Gerangel: 4

3. Untersuchungsbedingungen und Methoden

3.1. Untersuchungen im Oktober 2006 - Sommerphase

CO₂ – Messung mittels Dräger Röhrchen:

- Messbereich: 100 – 3000 ppm, (180 – 5400 mg/m³) bei 20 °C, 1013 hPa
- Hubzahl: 10
- Standardabweichung: ± 10 – 15 %
- Farbumschlag: weiß → violett
- Faktor Luftdruck: F = 1013 / tats. Luftdruck hPa
- Temperatur: 15 – 25 ° C

Partikelzahl mit dem APC Plus Laserpartikelzähler von Biotest

(Prinzip der Streulichtmessung mittels Laser, zusätzlicher Sensor für Temperatur und relative Feuchte) 1 min Messzeit, alle 5 min dokumentiert

- Durchflussrate: 2,83 l/min \pm 10 %
- Simultanzählung der Partikelgrößenklassen: 0,3 -<0,5 μ m; 0,5-<1 μ m; 1-<5 μ m; 5-20 μ m
- Temperatur: 10 bis 50 °C, \pm 2 °C
- relative Luftfeuchte: 20 % bis 95 %, \pm 10 %
- Koinzidenz: < 1,5 % bei 10⁵ Partikeln/Kubikfuß
- Umgebungsbedingung: 10 – 40 °C, 0 bis 90 % Luftfeuchtigkeit

3.2. Untersuchungen im Februar/März 2007 - Winterphase

Das Stadtschulamt der Stadt Frankfurt, beauftragte das SGS Institut Fresenius GmbH, Im Maisel 14, Taunusstein, Feinstaubmessungen sowie weitere Untersuchungen zur Innenraumluftqualität im Vergleich mit ausgewählten Messungen der Außenluft in zwei Klassenräumen der Passivhausschule Riedberg in Frankfurt durchzuführen. Die Messungen und Untersuchungen wurden an vorher festgelegten Messstellen in jeweils zwei Klassenräumen und an einer Außenluftmessstelle an der Schule durchgeführt.

Folgende **Untersuchungen** wurden im Einzelnen durchgeführt:

Außenluft

- Feinstaub PM10
- Kohlendioxid
- Temperatur
- Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit

Klassenräume – Innenraum

(diskontinuierlich)

- Alveolengängige Fraktion des Staubs (Gravimetrie)

(kontinuierlich):

- Feinstaub PM10
- Kohlendioxid
- Temperatur
- Luftfeuchte

Diese Parameter wurden in 5-min-Intervallen dokumentiert. Parallel dazu wurden gleichzeitig erfasst: Anzahl der Personen im Raum, Raumlüftung (standardisiert), Aktivitäten im Raum (standardisiert).

Die Untersuchungen wurden in der Woche vom 26.02.07 bis zum 02.03.07 jeweils von 7:30 Uhr bis 13:30 Uhr vorgenommen. Der Schulbetrieb sollte so erfasst werden, wie er immer läuft, ohne jegliche Änderungen.

Messmethoden- und Untersuchungsverfahren

Alveolengängiger Staub, PM10

Messverfahren:	BIA 6068 (Alveolengängiger Staub)
Methode:	Filtersammlung, Gravimetrie
Probenahme:	Filtersammlung auf Cellulosenitratfilter, Durchmesser: 70 mm, Porenweite: 8µm, Konditionierung der Filter 72 Stunden bei 20 °C und ca. 52 % Luftfeuchtigkeit
Probenahmegerät:	Institut Fresenius: MPG II bzw. Casella-Zyklon (MPG II System SFI von Dr. Wazau Mess- und Prüftechnik
Analysenverfahren:	Gravimetrie
Nachweisgrenze:	0,1 mg Alveolengängiger Staub / Filter = 0,004 mg/m ³ bei 24 m ³ Probeluftvolumen
Direktanzeigende Messung:	
Probenahmegeräte;	Dust Track 8520, TSI Incorporated,
Messprinzip:	90 ° Streulichtmessung
Auswertung:	Alveolengängiger Staub, PM-10,

Messung der Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit

Die Messungen wurden mit kalibrierten Messgeräten der Fa. Testo durchgeführt.

Temperatur/Feuchte-Messgeräte testo 615, testo 610 und Klima-Messgerät testo 445.

Abweichung der Temperatur: 0 - 0,1 °C, zulässige Toleranz: ± 0,2 °C

Abweichung rel. Feuchte: -0,2 bis - 0,3 % rF, zulässige Toleranz: ± 3 %

Messung der Kohlendioxidkonzentration

Messverfahren:	BIA 9070
Methode:	CO ₂ IR-Messzelle
Gerät:	Q-Track, SN 50274 Fa. TSI Incorporated, USA und DK 303-EXT-Co2, Fa. Driesen & Kern GmbH, Bad Bramstedt
Messbereich:	CO ₂ : 0-100 Vol%
Kalibration:	2-Punkt-Kalibrierung kurz vor Untersuchungsbeginn; bzw. werksseitige Kalibrierung 1 Mo vor Untersuchungsbeginn
Nachweisgrenze:	CO ₂ 0,01 Vol%, d.h. 100 ppm

4. Ergebnisse der Untersuchungen

4.1. Untersuchungen im Oktober 2006 – Sommerphase

4.1.1. Kohlendioxidkonzentrationen – Ergebnisse und Einflußfaktoren

Die am 9.-11.10.2006 erhobenen Daten im Klassenraum sind in Tab. 1 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt war die Lüftung ausgestellt („Sommerphase“ und die Räume wurden ausschließlich über Fenster und Türe belüftet.

Die Mittelwerte der Kohlendioxidkonzentrationen liegen – gemittelt über alle drei Tage – bei 1127 ppm und damit über dem lufthygienischen Standard von 1000 ppm (Pettenkofer). An den ersten beiden Tagen werden 1000 ppm im Mittel (Median) eingehalten, am dritten Tag liegt der Median sogar bei 1350 ppm. Dies ist 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 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 (Mittel- und Medianwert), am dritten Tag die geringste (Mittelwert).

Über alle Tage waren 45 % der gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen ≤ 1000 ppm, 45 % zwischen 1000 und ≤ 1500 ppm, und 4 % der Messwerte lagen über 1500 ppm. Die Verteilung über die einzelnen Tage zeigt Abb. 3

Tab. 1

Kohlendioxidkonzentrationen im Klassenraum vom 9.-11.10.2006 – in Abhängigkeit vom Lüften, der Anzahl und der Aktivität der Personen im Raum

	09.10.06	10.10.06	11.10.06	Alle Tage
CO ₂ ppm	1120 ± 278 800 – 1000 - 1500	973 ± 128 700 – 1000 - 1100	1238 ± 289 800 – 1350 - 1700	1127 ± 269 700 – 1000 - 1700
Lüftungsindex	2,07 ± 0,90 1 – 2 – 3	2,15 ± 0,59 1 – 2 - 3	0,96 ± 0,49 0,5 – 0,5 - 2	1,62 ± 0,87 1 – 1,5 – 3
Personen n	26,0 ± 11,4 1 – 29 – 36	20,3 ± 11,3 0 – 28 - 28	19,8 ± 11,9 1 – 28 - 28	21,7 ± 11,8 0 – 28 – 36
Aktivitätsindex	2,11 ± 0,78 1 – 2 - 4	2,15 ± 0,99 1 – 2 – 4	2,31 ± 1,14 1 – 2 - 4	2,21 ± 1,00 1 – 2 - 4

Abb. 3 Verteilung der Kohlendioxidkonzentrationen im Klassenraum über drei Tage

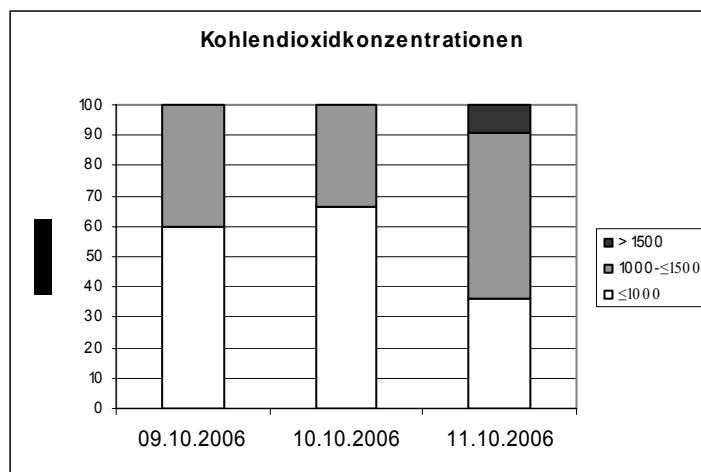
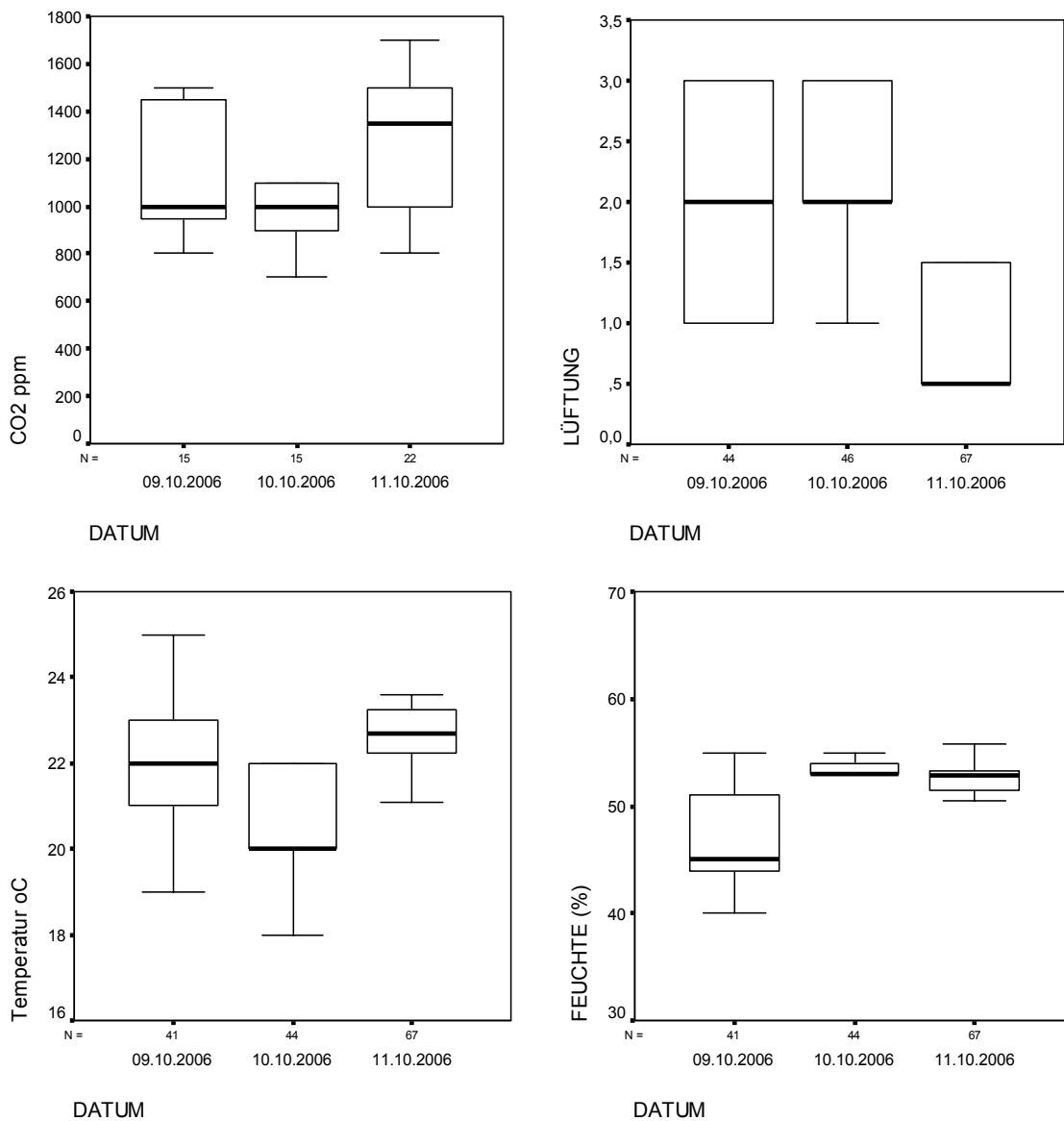


Abb. 4 a-d zeigt die Kohlendioxidkonzentrationen an den drei Tagen, sowie die gemessenen Werte für die Raumtemperatur, die relative Luftfeuchte im Raum und die erhobenen Daten zur Lüftung. Parallel zum Anstieg der CO₂-Konzentration am dritten Tag sind eine höhere Raumtemperatur und ein deutlich geringerer Lüftungsindex erkennbar.

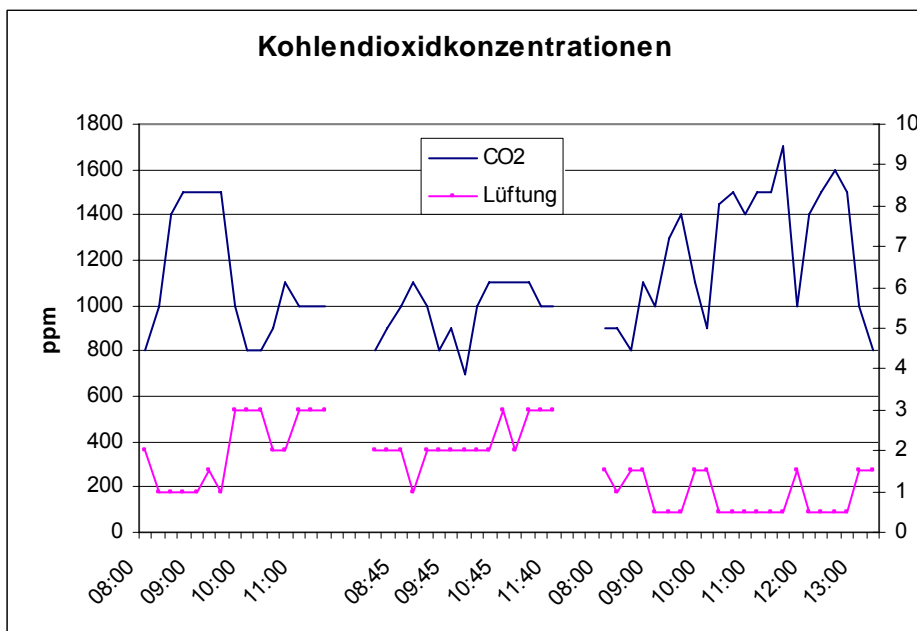
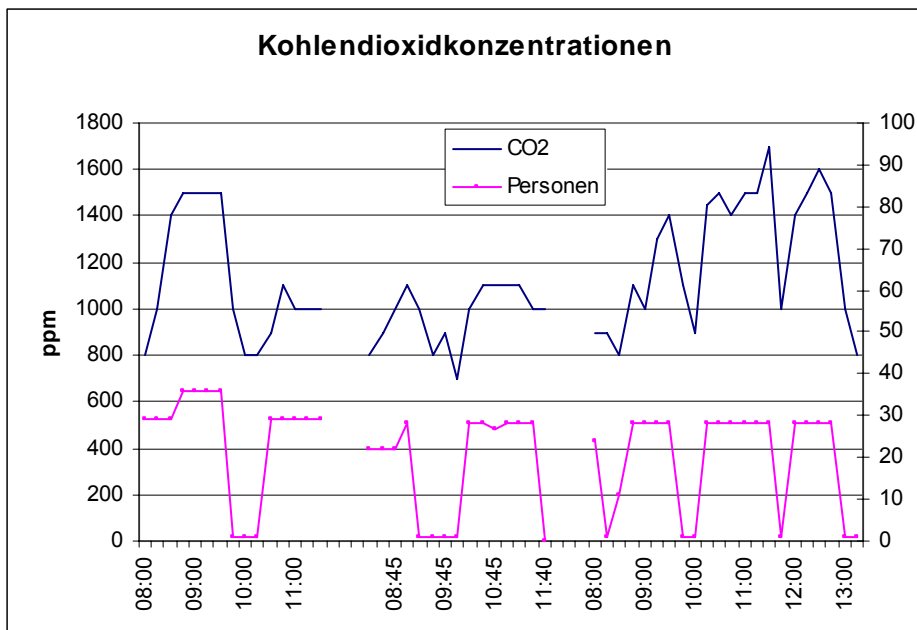
Abb. 4 a-d
Kohlendioxidgehalt, Raumtemperatur, relative Luftfeuchte und Lüftungsindex vom 09.-11.10.2006 im Klassenraum



In Abb. 5 ist der Verlauf der Kohlendioxidkonzentrationen an den drei Tagen gegen die Anzahl der Personen im Raum, resp. das Lüftungsverhalten (Lüftungsindex) aufgezeigt. Bei etwa gleicher Personenzahl im Raum sind die hohen Kohlendioxidkonzentrationen am frühen Vormittag des 09.10. und am 11.10.06 eindeutig mit der geringeren Lüftung assoziiert; Außerdem ist leicht erkennbar, dass auch kurze Lüftungsphasen rasch zu einer deutlichen Absenkung des Kohlendioxidgehalts im Raum führen. Die statistischen Berechnungen weisen eine hochsignifikant negative Korrelation zwischen der Kohlendioxidkonzentration im Klassenraum und der Lüftung auf: $-0,599$ ($p < 0,001$)

Abb. 5 a, b

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



4.1.2. Ergebnisse : Partikel-Konzentrationen

Die Partikel im Raum wurden ebenfalls gemessen und in 5-min-Abständen protokolliert. Je kleiner die Partikel, desto höher deren Konzentration in der Raumluft. Vergleichen mit den „größeren“ Partikeln > 5 µm lagen die Partikel mit 0,3-<0,5 µm in ca. 100fach höherer, die Partikel 0,5-<1 µm in ca. 20fach höherer und die Partikel 1-<5 µm in ca. 8fach höherer Konzentration vor. Diese Situation war an allen Tagen in etwa vergleichbar (Tab. 2, Abb. 6)

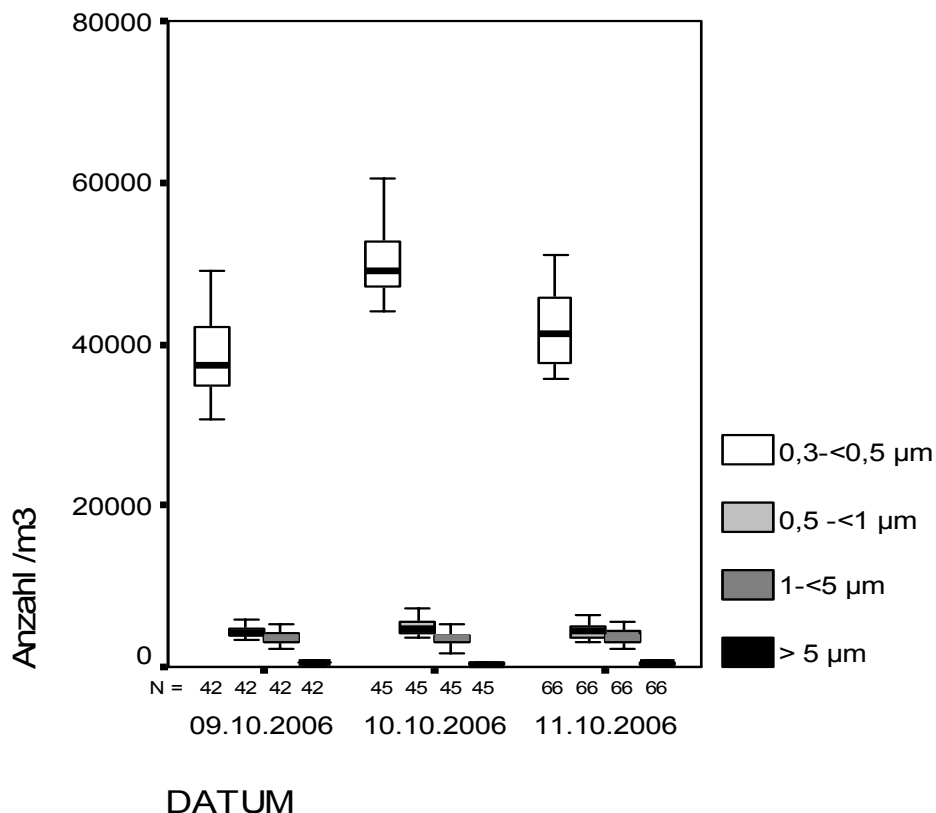
Tab. 2

Partikel in der Raumluft – Konzentrationen der Partikel unterschiedlicher Größe

	09.10.06	10.10.06	11.10.06	Alle Tage
Partikel				
0,3 -<0,5 µm/l	41171 ± 10160	50584 ± 4793	42039 ± 4423	44340 ± 7698
0,5-<1 µm/l	4283 ± 588	5032 ± 1043	4438 ± 803	4568 ± 880
1-<5 µm/l	3668 ± 784	3555 ± 743	3712 ± 838	3654 ± 794
> 5 µm/l	551 ± 182	434 ± 189	535 ± 210	510±210

Abb. 6

Partikelkonzentrationen in der Raumluft im Klassenzimmer vom 09.-11.10.2006 (Anzahl/l)



Korrelationen

Es wurden Korrelationen zwischen den Partikeln unterschiedlicher Größe, aber auch zwischen den unterschiedlichen Partikeln und anderen Parametern im Raum – z.B. Kohlendioxidgehalt, Lüftung, Anzahl und Aktivität der Personen im Raum – gerechnet (Tab. 3).

Während die „größeren“ Partikel untereinander hohe positive Korrelationen aufweisen, sind sie negativ mit den sehr kleinen Partikeln (0,3-<0,5 µm) korreliert. Die sehr kleinen Partikel weisen eine hochsignifikant positive Korrelation mit der Lüftung auf, sie sind auch signifikant negativ mit dem CO₂-Gehalt und der Anzahl der Personen im Raum korreliert. D.h. die Belastung mit Partikeln 0,3-<0,5 µm ist von Innenraumbedingungen relativ unabhängig, sondern wird im Wesentlichen durch die Lüftung von außen eingetragen. Dies lässt sich auch an der Abb. 7 gut erkennen: die höchsten Konzentrationen an Partikeln 0,3-<0,5 µm wurden bei guter Lüftung an den ersten beiden Tagen gemessen, am dritten Tag bei geringerer Lüftung waren die Konzentrationen an diesen Partikeln auch geringer.

Demgegenüber sind die „größeren“ Partikel 1-<5 µm und > 5 µm hochsignifikant positiv mit der Anzahl der Personen im Raum, deren Aktivitäten und der Kohlendioxidbelastung und hochsignifikant negativ mit zunehmender Lüftung assoziiert. Partikel mit 0,5-<1 µm nehmen eine Mittelstellung ein. D.h. die Belastung mit größeren Partikeln im Klassenraum ist im Wesentlichen abhängig von Bedingungen im Innenraum und kann durch Lüften gut vermindert werden.

Tab. 3

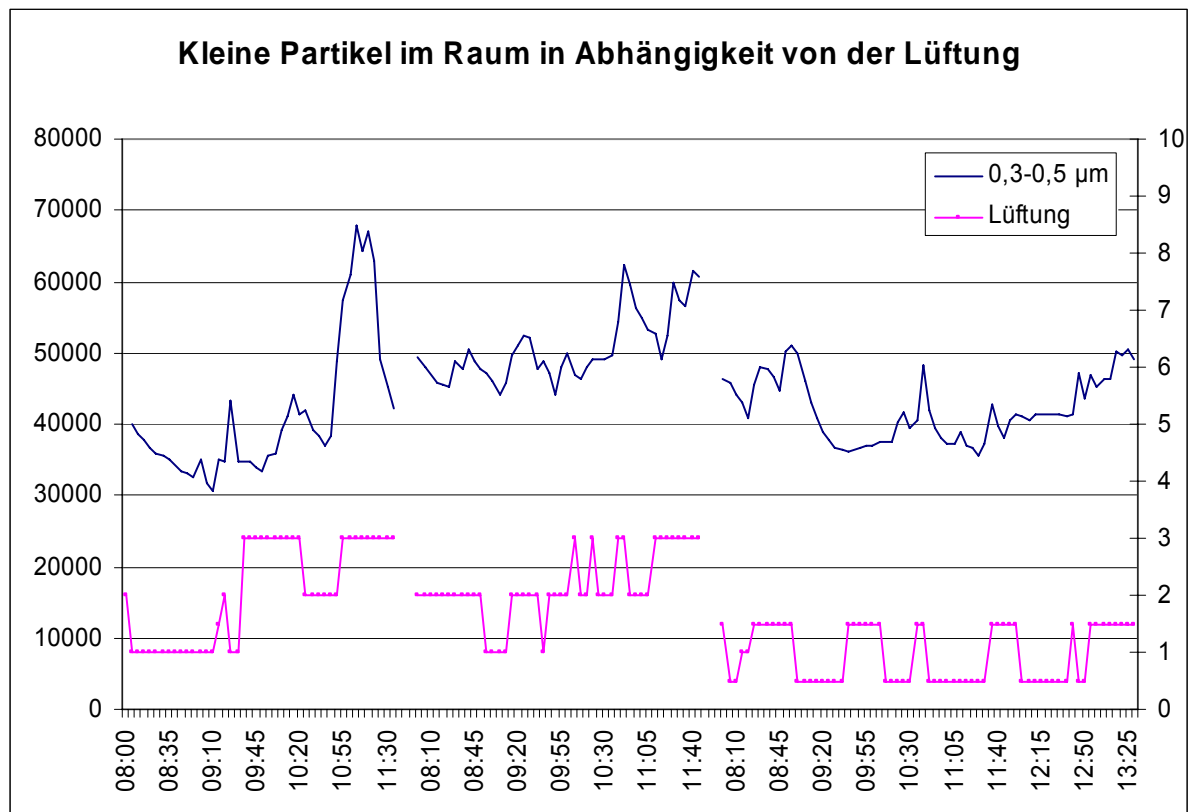
Korrelationen zwischen den Partikeln unterschiedlicher Größe untereinander sowie zwischen diesen und dem Kohlendioxidgehalt und der Lüftung, der Anzahl und der Aktivität der Personen im Raum

Partikel	0,3-<0,5 µm	0,5-<1 µm	1 -<5 µm	> 5 µm
0,3-<0,5 µm	1			
0,5-< 1µm	0,388 **	1		
1 - < 5 µm	-0,388*	0,556**	1	
> 5 µm	-0,443**	0,394**	0,884**	1
Raumbedingungen:				
CO ₂	-0,457*	0,277**	0,545**	0,603**
LÜFTUNG	0,467**	0,197**	-0,255**	-0,300**
PERSONEN	-0,229**	-0,003	0,212**	0,359**
AKTIVITÄ	0,009	0,095	0,196**	0,319**

* p<0,05, ** p<0,01

Abb. 7:

Partikelkonzentration (0,3 - < 0,5 µm/l) in Abhängigkeit von der Lüftung



Tab. 4 zeigt die Partikelkonzentrationen in der Außenluft – Mittelwerte der vor Beginn und nach Ende der Innenraummessungen erhaltenen Außenluftmesswerte – die Raumluftdaten sowie das Verhältnis Raumluftkonzentrationen (Mittelwerte) / Außenluftkonzentrationen (Mittelwerte). Auch diese Betrachtung zeigt: in der Außenluft dominieren die sehr kleinen Partikel (0,3 - < 0,5 µm), in der Raumluft die „größeren“ Partikel (1- < 5 µm und > 5 µm).

Tab. 4

Anzahl der Partikel unterschiedlicher Größe in der Außenluft, der Raumluft und das Verhältnis Raumluft/Außenluft an den drei Untersuchungstagen (Partikel/l)

	09.10.06	10.10.06	11.10.06	Alle Tage
Außenluft - Partikel	N	N	N	N
0,3-<05 µm	87535	107312	107363	100736
0,5-< 1 µm	4849	10057	9072	7992
1- < 5 µm	2011	2951	3200	2720
> 5 µm	32	23	35	30
Raumluft - Partikel				
0,3-<05 µm	41050	50584	42040	44558
0,5-< 1 µm	4265	5024	4428	4572
1- < 5 µm	3668	3558	3716	3674
> 5 µm	551	434	535	506
Verhältnis Raumluft/Außenluft				
Partikel	Verhältnis	Verhältnis	Verhältnis	Verhältnis
0,3-<05 µm	0,5	0,5	0,4	0,4
0,5-< 1 µm	0,9	0,5	0,5	0,6
1- < 5 µm	1,8	1,2	1,2	1,3
> 5 µm	17,2	18,9	15,3	17,0

4.1.3. Erste Zwischenbewertung

Zusammenfassend ist festzustellen:

- **Kohlendioxid:** In dem untersuchten Klassenraum der Passivhausschule können bei „Sommerphase“ gute und akzeptable Kohlendioxidkonzentrationen erreicht werden, wenn ausreichend gelüftet wird. Das Kippen von Fenstern alleine reicht nicht aus, selbst wenn es längerfristig vorgenommen wird. Nur durch zusätzliches Lüften mit geöffnetem Fenster können ausreichend niedrige Kohlendioxidkonzentrationen eingehalten werden. Insofern unterscheidet sich dieser Befund nicht von anderen, konventionell gebauten und fensterbelüfteten Schulen und es ist auch hier nachdrücklich auf die Bedeutung guter Lüftung hinzuweisen.
- **Feinstaub:** Bei den Messungen der Partikel im Klassenraum zeigte sich, dass die höchsten Konzentrationen stets bei den Partikeln $0,3- < 0,5 \mu\text{m}$ gefunden werden, mit zunehmender Partikelgröße finden sich geringere Partikelkonzentrationen im Raum. Im Vergleich mit der Außenluft finden sich in der Raumluft deutlich weniger sehr kleine ($0,3- < 0,5 \mu\text{m}$) aber deutlich mehr größere Partikel ($1- < 5$ und $> 5 \mu\text{m}$). Diese Partikel ($1- < 5$ und $> 5 \mu\text{m}$) werden eindeutig durch die Anzahl der Personen im Raum und deren Aktivitäten beeinflusst – mitgebracht oder mobilisiert - und sie können durch Lüften vermindert werden. Demgegenüber zeigen die sehr kleinen Partikel ($0,3- < 0,5 \mu\text{m}$) keine positiven Assoziationen zu den Personen und deren Aktivitäten im Raum, sie gelangen offenbar durch Lüften aus der Außenluft in den Raum, wo deren Zahl mit der Zeit abnimmt, möglicherweise durch Aggregationsvorgänge.

4.2. Untersuchungen im Februar-März 2007 – Winterphase

4.2.1. Kohlendioxidkonzentrationen

Die gemessenen Kohlendioxidwerte sowie die Anzahl und die Aktivität der Personen im Raum sowie das Lüftungsverhalten sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Medianwerte der Kohlendioxidkonzentrationen liegen um 1000 ppm, mit Schwankungen von Tag zu Tag, bedingt insbesondere durch die unterschiedliche Belegung der Klassenzimmer an verschiedenen Tagen. Die Maximalwerte liegen an fast allen Tagen über 1500 ppm, bleiben aber unter 2000 ppm.

Abbildungen 8 und 9 zeigen die Kohlendioxidverläufe an den einzelnen Tagen sowie die Raumbellegung. Generell ist bei Anwesenheit der Klasse ein rascher CO₂-Anstieg zu verzeichnen und nach Verlassen der Klasse sinkt dieser langsam ab. Am 01.03.07 traf sich beispielsweise die Klasse 4 zunächst im Klassenraum und verließ diesen bald wieder wegen eines Ausflugs. In der gesamten Zeit befand sich dort nur der Probenehmer in dem Klassenraum bei durchweg geschlossener Türe.

Tab. 5

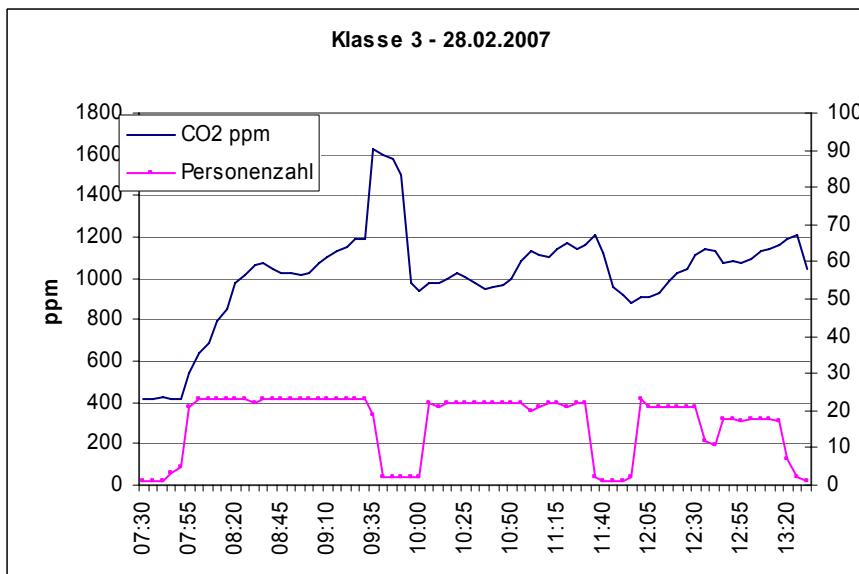
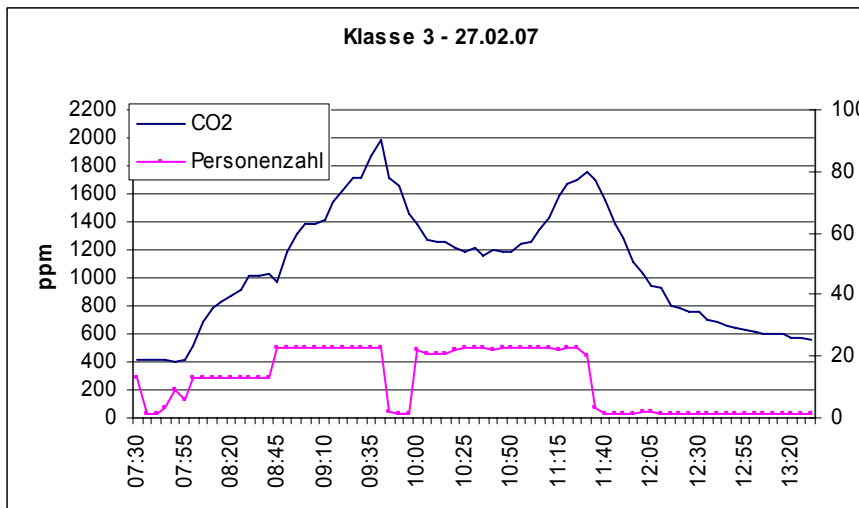
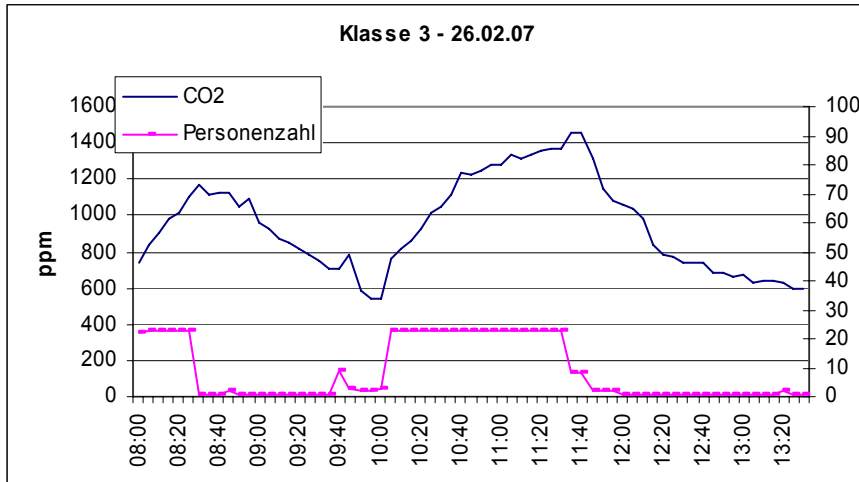
Kohlendioxidkonzentrationen sowie Anzahl der Personen im Raum, Lüftungs- und Aktivitätsindex in den untersuchten Klassenräumen über die 5 Tage

	Klasse 3	Klasse 4	Beide Klassen
Alle Tage			
CO ₂ ppm	1005 ± 308 390 – 1030 - 1980	888 ± 390 300 – 910 - 1770	946 ± 356 300 – 980 - 1980
Personen n	13 ± 10 (19)	13 ± 13 (7)	13 ± 11 (14)
Aktivitätsindex	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1
26.02.07			
CO ₂ ppm	912 ± 276 430– 860 - 1460	949 ± 373 300 – 1040 - 1630	930 ± 328 300 – 930 - 1630
Lüftungsindex	0,5 ± 0,5	0,8 ± 0,4	0,6 ± 0,5
Personen n	9 ± 10 (2)	15 ± 13 (15)	12 ± 12
Aktivitätsindex	1,7 ± 1	1,7 ± 0,8	1,7 ± 0,9
27.02.07			
CO ₂ ppm	1082 ± 426 400 – 1160- 1980	1119 ± 364 360 – 1070 - 1770	1100 ± 395 360 – 1115 - 1980
Lüftungsindex	0,6 ± 0,5	0,4 ± 0,5	0,5 ± 0,5
Personen n	12 ± 10 (13)	19 ± 12 (30)	16 ± 12
Aktivitätsindex	1,9 ± 1	2,3 ± 1,0	2,1 ± 1,0
28.02.07			
CO ₂ ppm	1018 ± 239 420 – 1050 - 1630	941 ± 273 350 – 980 - 1520	980 ± 259 350 – 1010 - 1630
Lüftungsindex	0,6 ± 0,5	0,8 ± 0,4	0,7 ± 0,5
Personen n	17 ± 9 (21)	17 ± 12 (27)	17 ± 10
Aktivitätsindex	2,1 ± 0,8	2,0 ± 0,9	2,1 ± 0,9
01.03.07			
CO ₂ ppm	1038 ± 246 400 – 1080 - 1400	439 ± 52 340 – 430 - 640	738 ± 439 340 – 520 - 1400
Lüftungsindex	0,4 ± 0,5	0,1 ± 0,3	0,3 ± 0,4
Personen n	17 ± 7 (22)	1,8 ± 4,2 (1)	9 ± 10 (1)
Aktivitätsindex	2,2 ± 0,8		1,6 ± 0,8 (1)
02.03.07			
CO ₂ ppm	974 ± 297 390 – 970 - 1500	993 ± 381 330 – 960 - 1750	983 ± 324 330 – 960 - 1700
Lüftungsindex	0,6 ± 0,5	0,5 ± 0,5	0,6 ± 0,5
Personen n	13 ± 9 (19)	12 ± 12 (9)	13 ± 10
Aktivitätsindex	1,8 ± 0,7	1,9 ± 0,9	1,8 ± 0,8

Mittelwert ± Standardabweichung; Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert

Abb. 8

Kohlendioxidkonzentrationen (ppm) in der Klasse 3 in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen im Raum – einzelne Tage



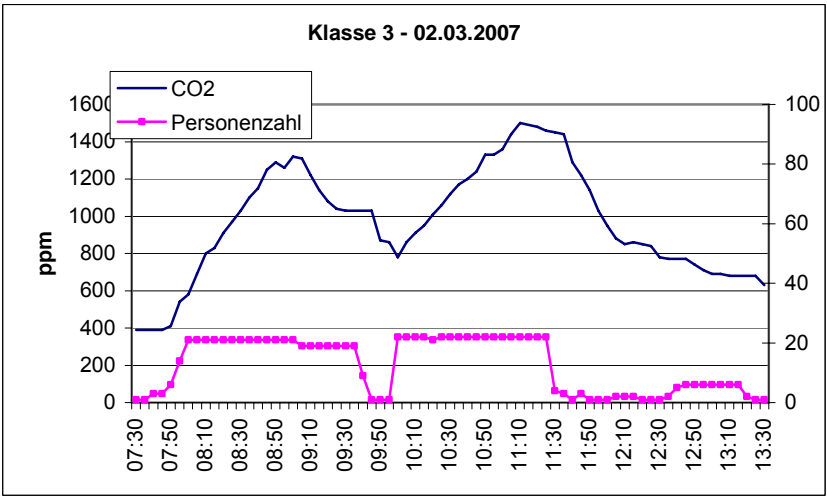
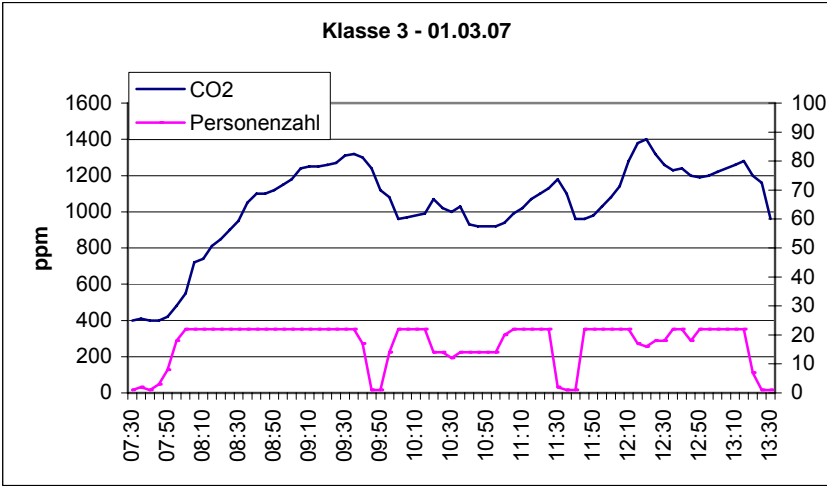
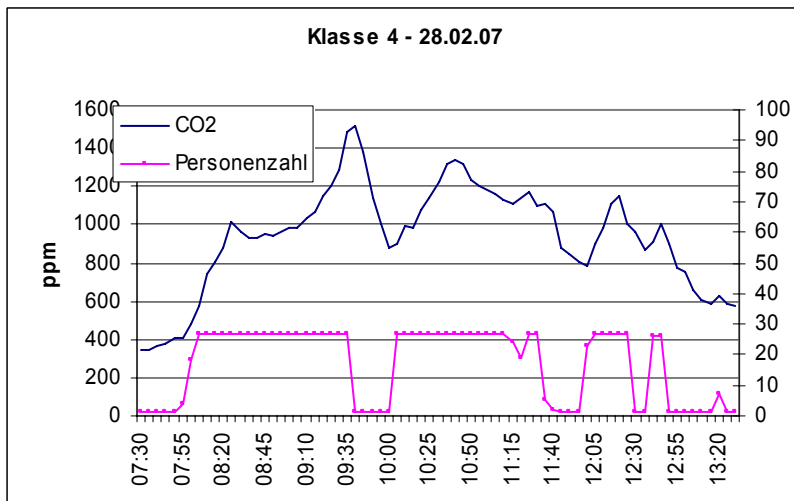
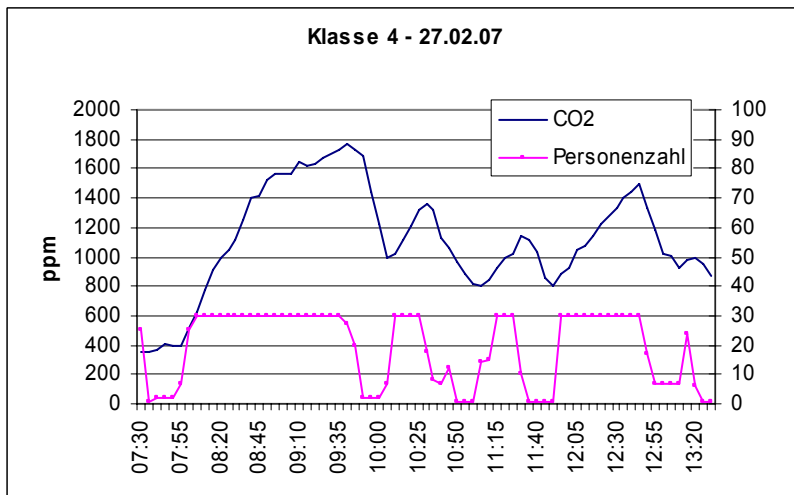
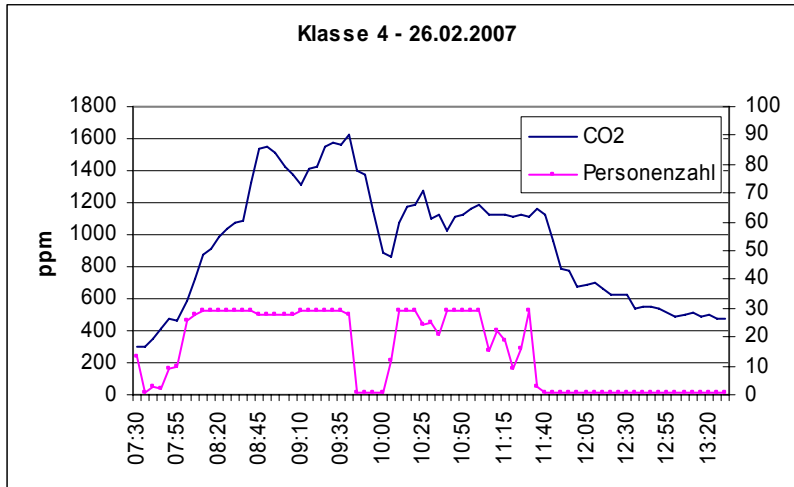
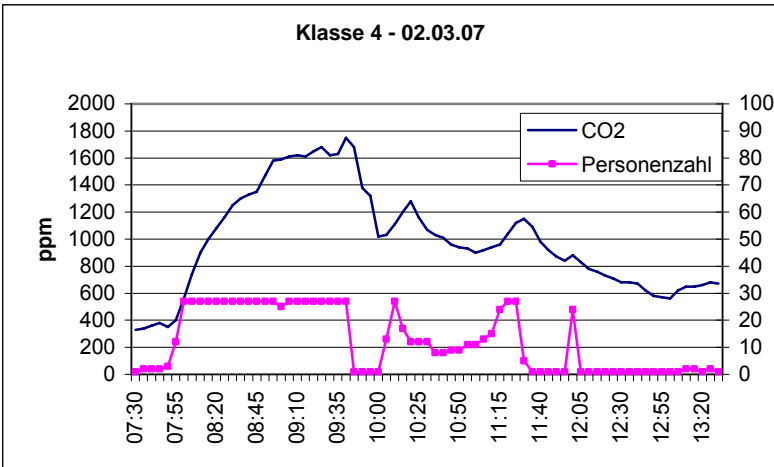
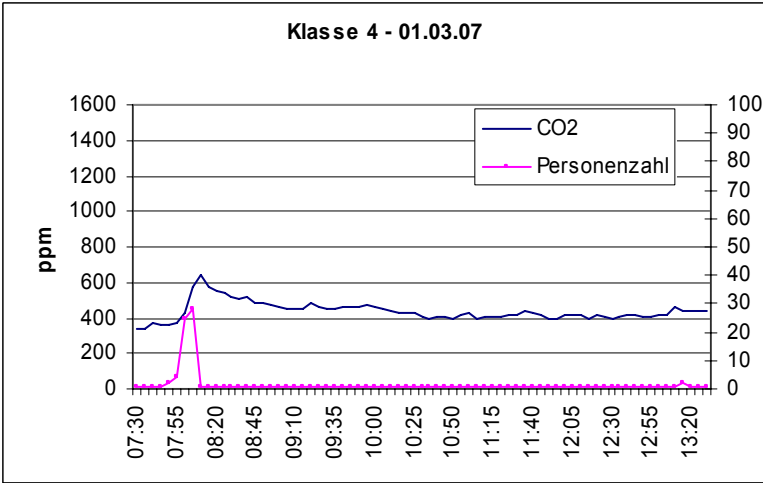


Abb. 9

Kohlendioxidkonzentrationen (ppm) in der Klasse 4 in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen im Raum – einzelne Tage

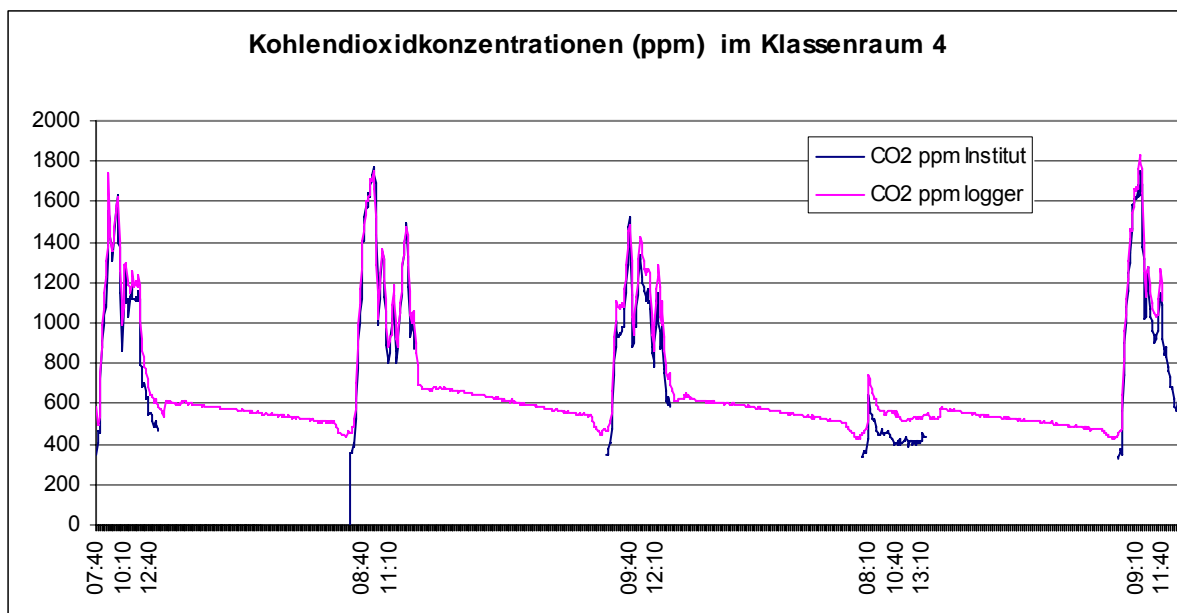




Vergleich verschiedener Messmethoden Kohlendioxidkonzentration im Raum

Parallel zu den Messungen des Instituts während der Unterrichtszeit waren Datenlogger in den Klassenräumen ausgelegt, die – neben Temperatur und Feuchte – ebenfalls die Kohlendioxidkonzentrationen erfassten, über 24 h und 5 Tage. Dabei zeigte sich zum einen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Erhebungsmethoden, zum anderen war gut zu erkennen, dass nach Schulschluss im Rahmen der „Nachspülphase“ der Raumluftechnischen Anlage ein gutes Absinken der Kohlendioxidkonzentrationen auf Werte von ca. 600 ppm erreicht wird, dass es im weiteren Verlauf des Nachmittags und der Nacht zu einer leichten weiteren Absenkung auf ca. 550 ppm kommt. Durch die Vorspülphase vor Schulbeginn werden die Kohlendioxidkonzentrationen nochmals leicht vermindert, sodass zu Unterrichtsbeginn Konzentrationen von unter 500 ppm erreicht werden. Abb. 10 zeigt dies beispielhaft für den Klassenraum 4.

Abb. 10
Kohlendioxidkonzentrationen im Klassenzimmer -Vergleich Institutsmessung und Datenlogger



Auswirkung offen stehender Türe auf die Kohlendioxidkonzentration im Klassenraum

Während des Winterbetriebs findet eine durchgängige maschinelle Belüftung während der Unterrichtszeit statt; eine zusätzliche Fensterlüftung wird von den Lehrern nicht zusätzlich durchgeführt. Da sehr häufig die Türen zum Flur und zum Nachbarzimmer hin offen standen, findet hierdurch ein zusätzlicher Luftaustausch statt. Vergleicht man die Kohlendioxidkonzentrationen bei geschlossenen und bei geöffneten Türen, so zeigt sich, dass bei geschlossenen Türen im Median (in beiden Räumen zusammen) 1020 ppm gemessen wurden, bei geöffneten Türen 950 ppm, also 70 ppm weniger. (Abb. 11). Dieser Effekt der „Türlüftung“ zeigt sich auch in der Verteilung der Kohlendioxidkonzentrationen: so lagen bei geschlossener Türe im Klassenraum 4 ein Viertel der Kohlendioxidkonzentrationen über 1500 ppm, bei geöffneter Türe waren es etwa 8 % (Abb. 12).

Abb. 11

Kohlendioxidkonzentrationen in den Klassenräumen 3 und 4 – jeweils bei geschlossener oder geöffneter Türe

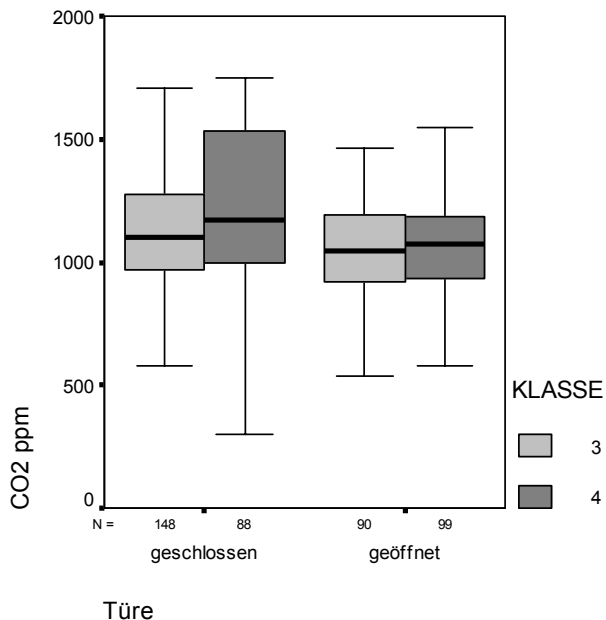
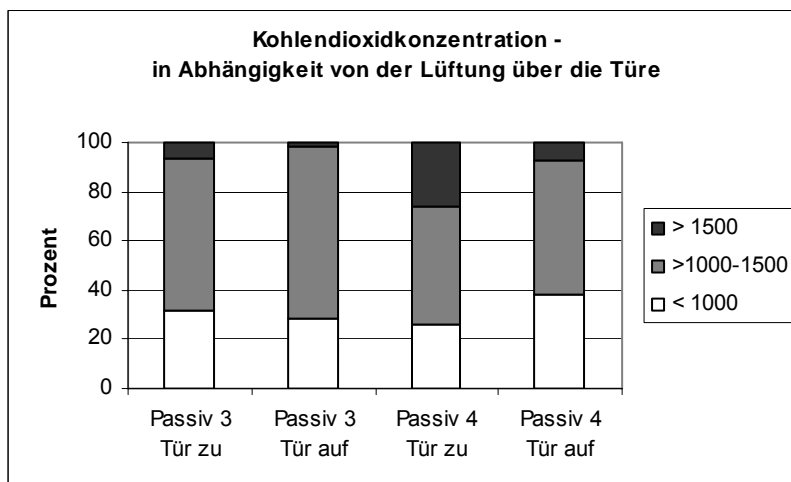


Abb. 12

Verteilung der Kohlendioxidkonzentrationen in Abhängigkeit von der Lüftung über die Türe



Auswirkung der Anzahl und der Aktivitäten der Personen im Raum auf die Kohlendioxidkonzentration

Die Korrelationstests zeigen die bekannten hochsignifikanten Assoziationen zwischen der Kohlendioxidkonzentration im Klassenzimmer und der Anzahl sowie der Aktivität der Personen im Raum – und auch dem Feinstaubgehalt im Raum – und die negative Assoziation zur Lüftung.

Tab. 6

Korrelationen zwischen dem Kohlendioxidgehalt in der Raumluft, der Anzahl und der Aktivität der Personen im Raum, der Lüftung und der Feinstaub-Konzentration

Kohlendioxid	Klasse 3	Klasse 4	Beide Klassen
Personen im Raum	0,443 **	0,657 **	0,567 **
Lüftung	- 0,293 **	0,065	- 0,103 **
Aktivität	0,322 **	0,553 **	0,459 **
Feinstaub	0,750 **	0,861 **	0,762 **

Kohlendioxidkonzentrationen in den Klassenräumen der Passivhausschule im Vergleich mit konventionell gebauten Klassenräumen

Interessant ist die Überprüfung dieser Befunde in den Klassenräumen des Passivhauses mit den im Frühjahr 2006 mit identischen Messmethoden erhobenen Daten aus 4 Klassenräumen konventionell errichteter Schulen, d.h. mit Fensterlüftung. Damals waren in einem untersuchten Klassenraum (Außen AB) extrem hohe Kohlendioxidwerte festgestellt worden, bis 4800 ppm, mit einem Median von > 2000 ppm; dieser Raum war nachweislich über eine Woche nie über ein Fenster gelüftet worden. In den drei anderen Klassenräumen in zwei Schulen waren im Median unter / um 1000 ppm Kohlendioxid in den Klassenräumen gemessen worden (s. Heudorf 2006).

Abb. 13 zeigt den Vergleich der aktuellen Kohlendioxid-Messungen in der Passivhausschule mit den anderen, im Winter 2006 untersuchten Klassenräumen. Mit Ausnahme des einen o.g. Klassenraums AB der Außenbereichsschule sind die Kohlendioxidkonzentrationen in den Klassenräumen der Passivhausschule mit denen der konventionell gelüfteten Klassenräume vergleichbar.

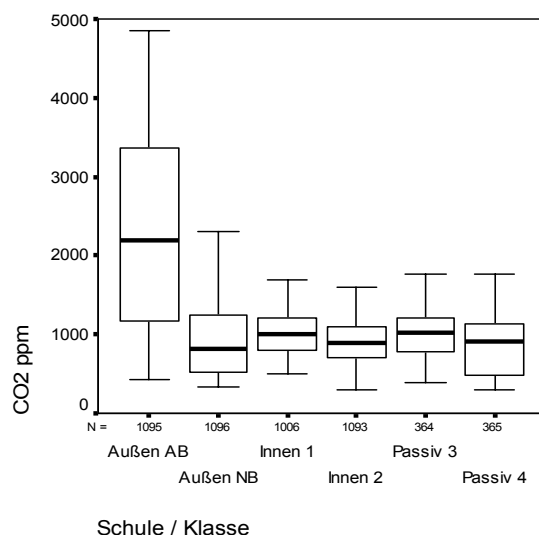
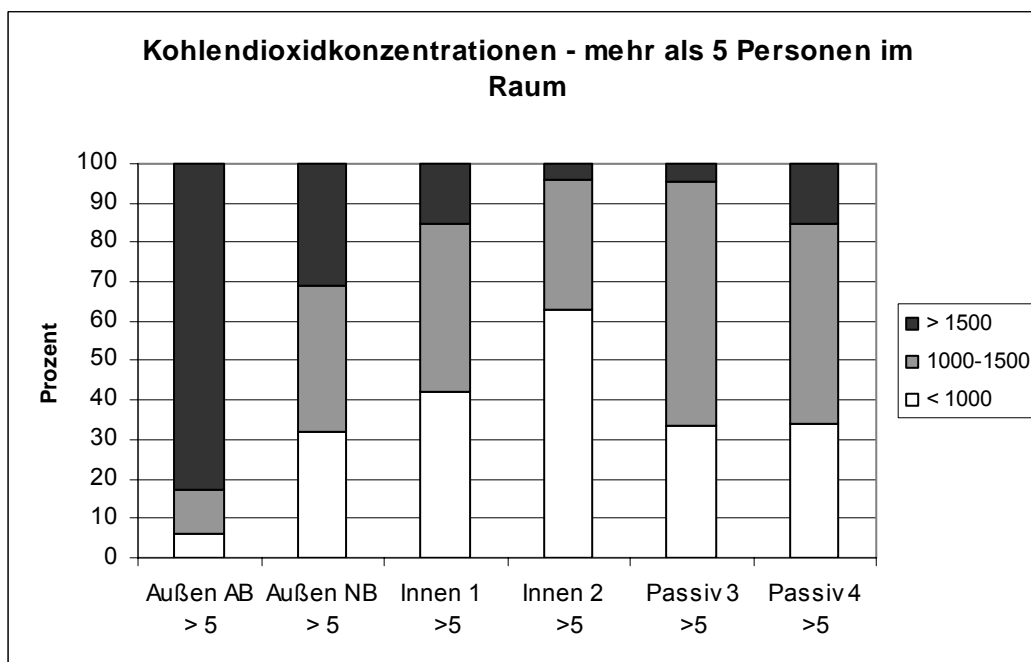
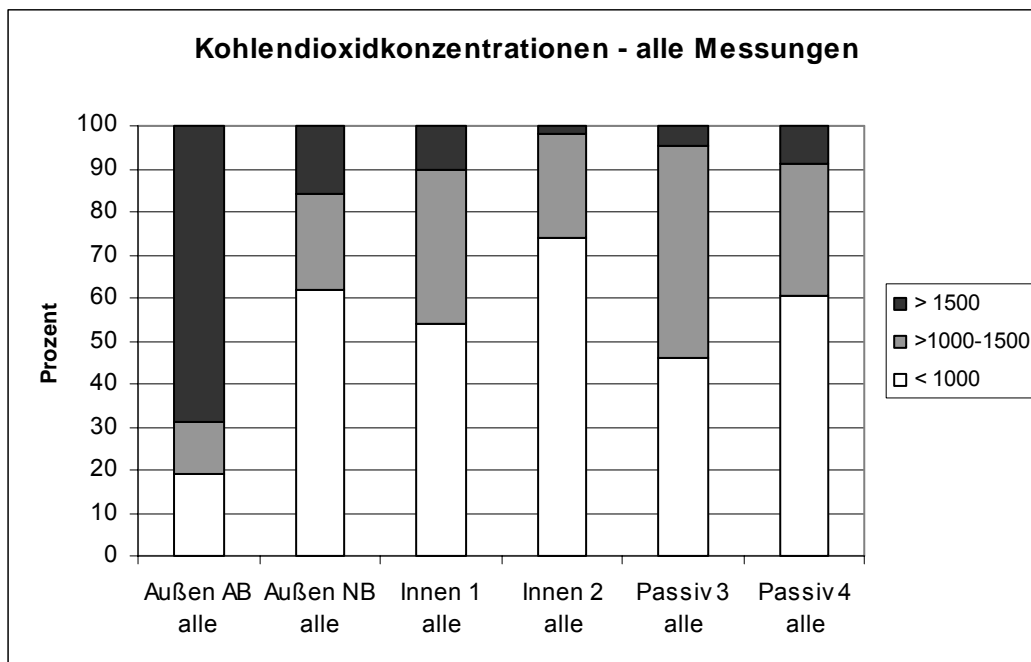


Abb. 13
Kohlendioxidgehalte in konventionell gebauten und belüfteten Klassenräumen im Vergleich mit den Räumen der Passivhausschule mit mechanischer Belüftung

Auch der Vergleich der Belastungsklassen (< 1000 ppm, 100-< 1500 ppm und > 1500 ppm) ergibt - mit Ausnahme des 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 bis 32 % der konventionell, fensterbelüfteten Klassen.

Abb. 14 a, b

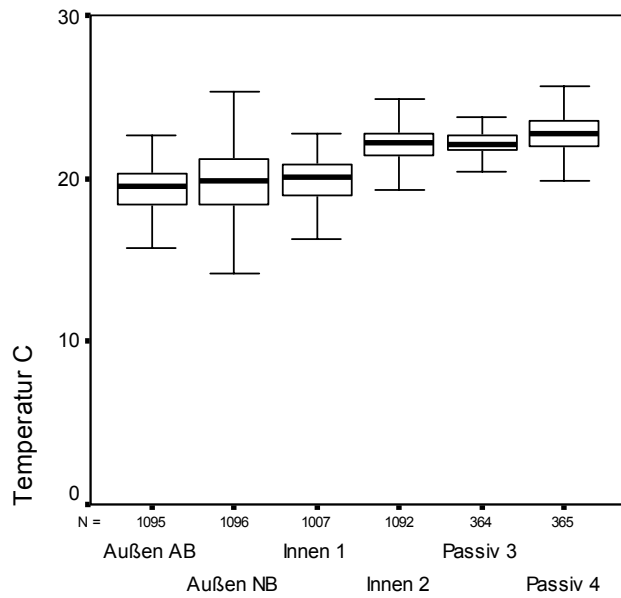
Verteilung der Kohlendioxidgehalte in Klassenräumen – Anteil der Unter-, bzw. Überschreitung der lufthygienischen Standards von 1000 resp. 1500 ppm CO₂



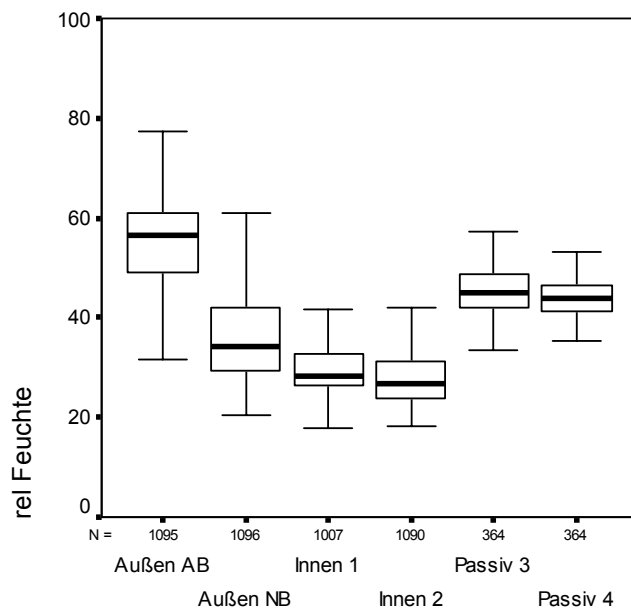
Die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchte waren in den Klassenräumen der Passivhausschule höher als in den anderen untersuchten Klassenräumen. (Abb. 15 a, b)

Abb. 15 a, b

Raumtemperatur und relative Luftfeuchte in 6 verschiedenen Klassenräumen



Schule / Klasse



Schule / Klasse

4.2.2. Feinstaub in der Raumluft

In Tabelle 7 sind die Messwerte (Mittelwert, Standardabweichung und Medianwerte) der Feinstaubbelastung ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in den beiden Klassenräumen über die verschiedenen Messtage zusammengefasst dargestellt – und den Daten Personen im Raum, Lüftungs- und Aktivitäts-Index gegenübergestellt.

Es ist erkennbar, dass die mittlere Feinstaubbelastung (Mittelwert und Medianwert) im Klassenraum 3 stets um ca. $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ unter der Belastung im Klassenraum 4 lag; am 1.3.07 fand darüber hinaus im Klassenraum 4 kein Unterricht statt; bei Anwesenheit lediglich des Probennehmers, der weiterhin die Messdaten ruhig sitzend protokollierte, ergibt sich eine niedrige Feinstaubbelastung im Innenraum, die näherungsweise mit der Feinstaubbelastung in einem leeren Klassenraum gleichgesetzt werden kann (s. auch Abb. 16).

Tab. 7

Feinstaubkonzentrationen sowie Anzahl der Personen im Raum, Lüftungs- und Aktivitätsindex differenziert nach einzelnen Klassenräumen und Untersuchungstagen

	Klasse 3	Klasse 4	Beide Klassen
	X ± sdev (median)	X ± sdev (median)	X ± sdev (median)
Alle Tage			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	37±18 (34)	47 ± 31 (52)	42 ± 26 (40)
Lüftungsindex	1 ± 0	1 ± 0	1 ± 0
Personen n	13 ± 10 (19)	13 ± 13 (7)	13 ± 11 (14)
Aktivitätsindex	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1
26.02.07			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	34 ± 15 (34)	54 ± 25 (56)	44 ± 23 (42)
Lüftungsindex	0,5 ± 0,5	0,8 ± 0,4	0,6 ± 0,5
Personen n	9 ± 10 (2)	15 ± 13 (15)	12 ± 12
Aktivitätsindex	1,7 ± 1	1,7 ± 0,8	1,7 ± 0,9
27.02.07			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	43 ± 23 (42)	67 ± 22 (69)	55 ± 25 (57)
Lüftungsindex	0,6 ± 0,5	0,4 ± 0,5	0,5 ± 0,5
Personen n	12 ± 10 (13)	19 ± 12 (30)	16 ± 12
Aktivitätsindex	1,9 ± 1	2,3 ± 1,0	2,1 ± 1,0
28.02.07			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	37 ± 15 (34)	61 ± 27 (57)	49 ± 25 (45)
Lüftungsindex	0,6 ± 0,5	0,8 ± 0,4	0,7 ± 0,5
Personen n	17 ± 9 (21)	17 ± 12 (27)	17 ± 10
Aktivitätsindex	2,1 ± 0,8	2,0 ± 0,9	2,1 ± 0,9
01.03.07			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	39 ± 20 (35)	5,1 ± 5,6 (3,0)	22 ± 22 (14)
Lüftungsindex	0,4 ± 0,5	0,1 ± 0,3	0,3 ± 0,4
Personen n	17 ± 7 (22)	1,8 ± 4,2 (1)	9 ± 10 (1)
Aktivitätsindex	2,2 ± 0,8		1,6 ± 0,8 (1)
02.03.07			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	31 ± 14 (31)	50 ± 26 (52)	41 ± 23 (37)
Lüftungsindex	0,6 ± 0,5	0,5 ± 0,5	0,6 ± 0,5
Personen n	13 ± 9 (19)	12 ± 12 (9)	13 ± 10
Aktivitätsindex	1,8 ± 0,7	1,9 ± 0,9	1,8 ± 0,8

Mittelwert ± Standardabweichung; Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert

Abb. 16
**Feinstaubbelastung in den Klassenräumen 3 und 4 an den
 5 Messtagen (am 1.3.2007 fand im Klassenraum 4 kein Unterricht statt)**

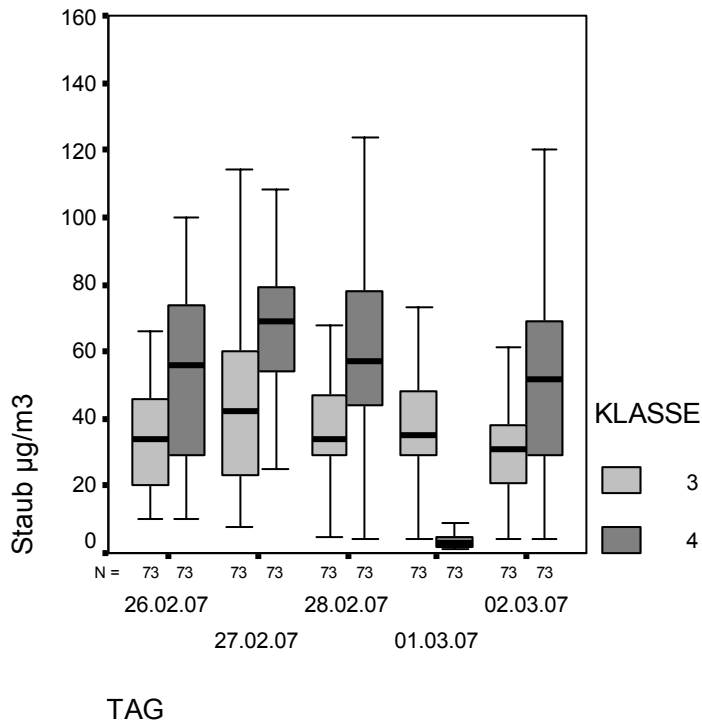


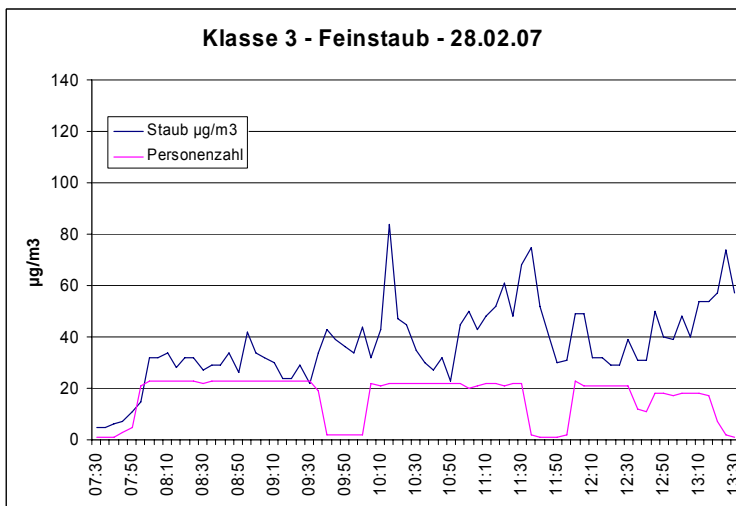
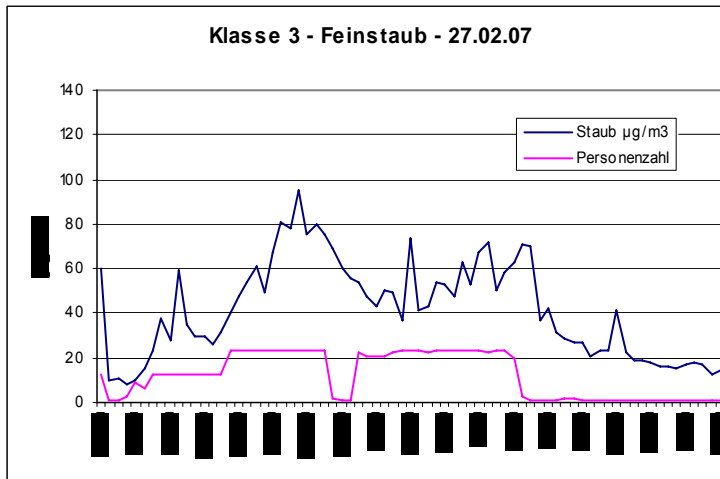
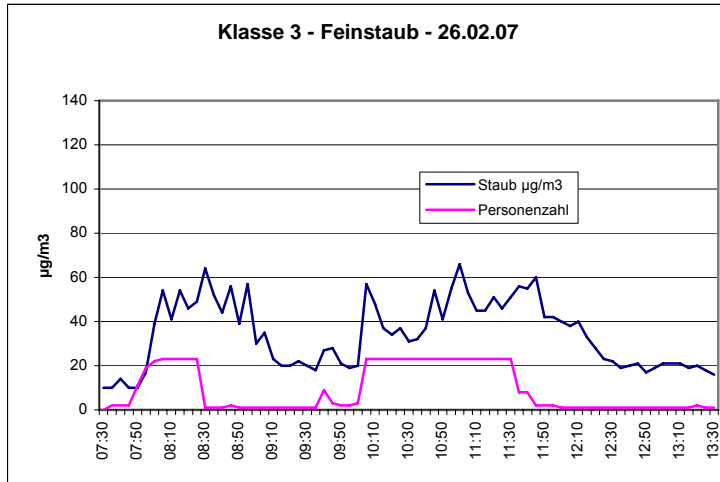
Abb. 17 und 18 zeigen die Verläufe der Feinstaubkonzentrationen in den beiden Klassenräumen an den verschiedenen Mess-Tagen – in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen im Raum. Es ist erkennbar, dass bei Anwesenheit der Klassen im Raum 4 stets höhere Feinstaubbelastungen auftraten und nach Unterrichtsende diese langsam absank. In dem Klassenraum 4 sank die Feinstaubbelastung am 1.3.07 nachdem die Kinder kurz nach 8 Uhr den Raum wieder verlassen hatten, innerhalb einer Stunde auf Werte um $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und blieb während der gesamten Messzeit in diesem Bereich.

Die Korrelationstests zeigen enge Zusammenhänge zwischen der Feinstaubkonzentration im Klassenraum und der Anwesenheit und der Aktivität der Personen im Raum sowie zur Kohlendioxidkonzentration. Im Klassenraum 3 liegt eine signifikant negative Assoziation zum Lüftungsindex vor, nicht in Klasse 4, sodaß bei Betrachtung beider Klassen sich hier kein signifikanter Zusammenhang (positiv oder negativ) zwischen der Feinstaubbelastung und der Lüftung ergibt.

Tab. 8
Korrelationen zwischen der Feinstaubbelastung in der Raumluft und der Anzahl und der Aktivität der Personen im Raum sowie dem Lüftungsindex

Feinstaub	Klasse 3	Klasse 4	beide Klassen
Kohlendioxid	0,750**	0,861**	0,762**
Personen im Raum	0,402**	0,653**	0,548**
Aktivitätsindex	0,337**	0,626**	0,485**
Lüftungsindex	-0,289**	0,190	0,006

Abb. 17
Feinstaubkonzentrationen in der Klasse 3 in Abhängigkeit
von der Anzahl der Personen im Raum – einzelne Tage



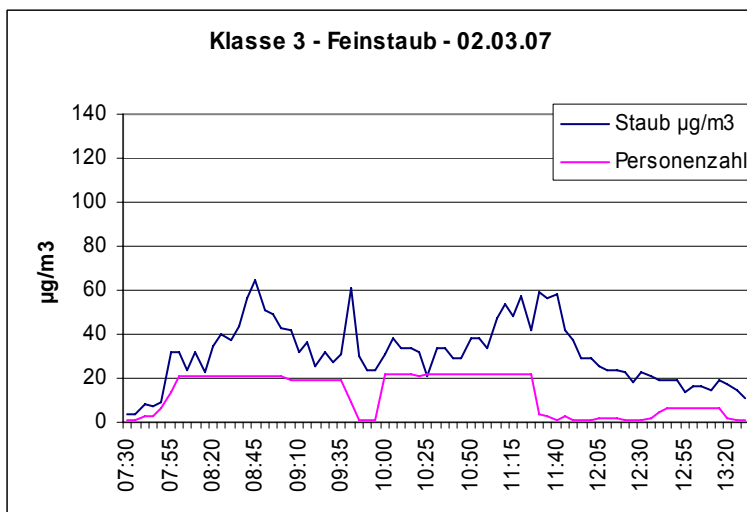
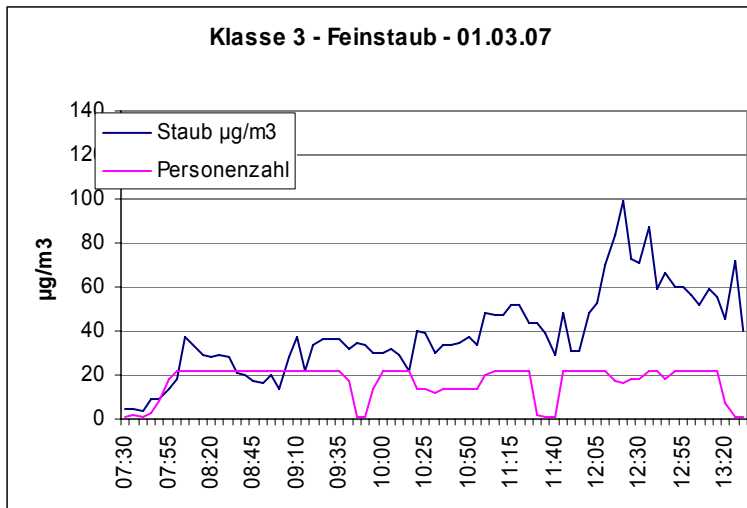
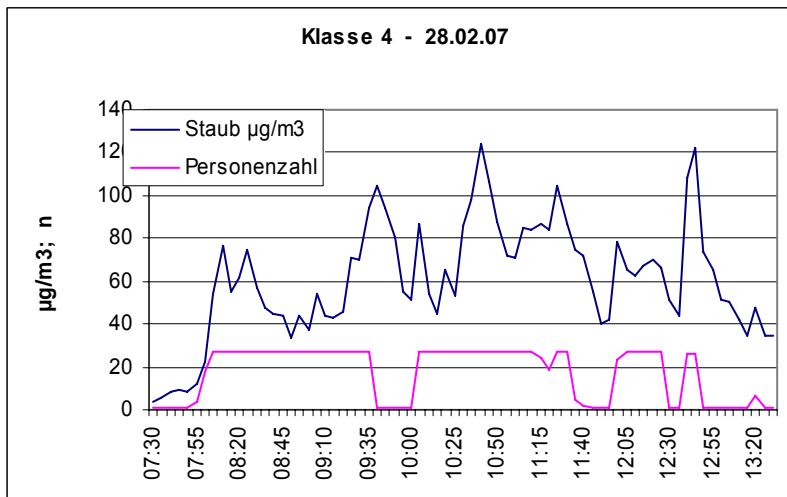
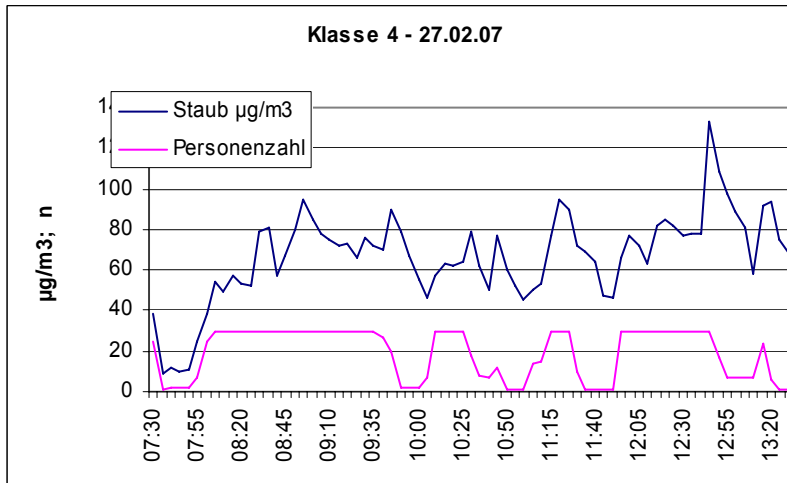
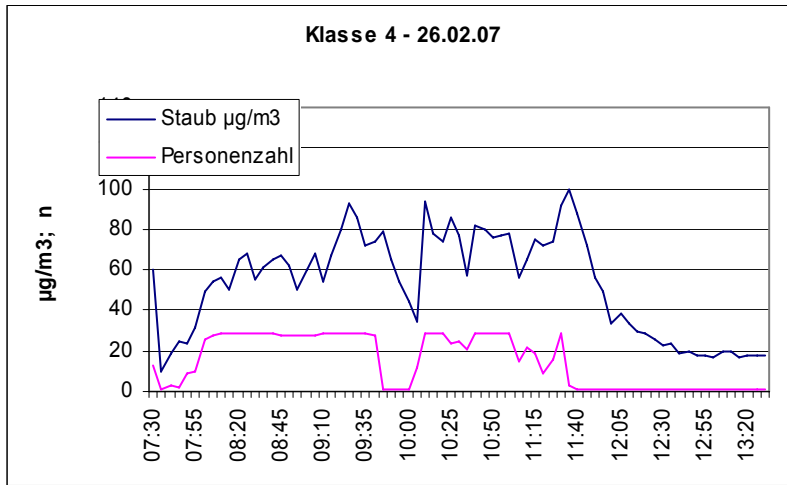
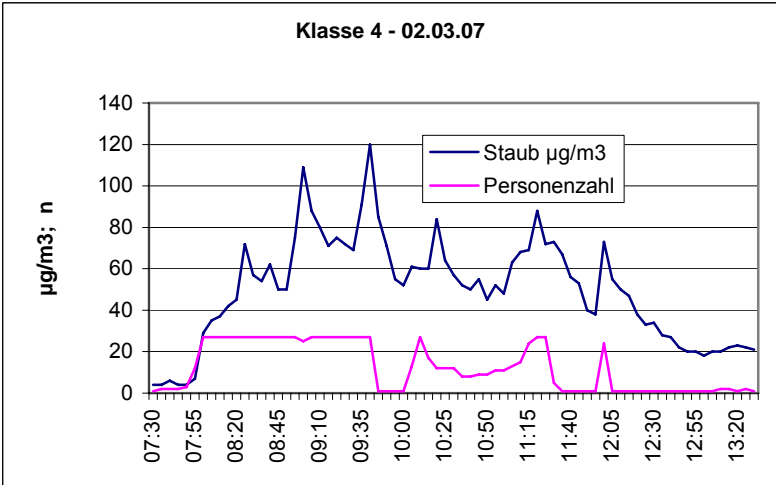
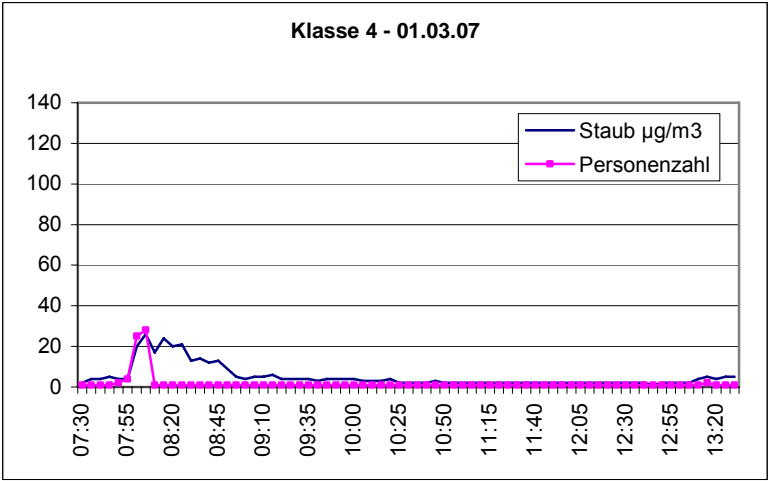


Abb. 18
Feinstaubkonzentrationen in der Klasse 4 in Abhängigkeit von
der Anzahl der Personen im Raum – einzelne Tage





Hintergrundbelastung der Außenluft – Messdaten der HLUG - 2007

Die Feinstaubbelastung in der Außenluft wird systematisch und online (Laserverfahren) an drei Messstellen im Stadtgebiet Frankfurt am Main von der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie gemessen: Frankfurt Höchst und Frankfurt Ost sowie die verkehrsbezogene Messstelle Friedberger Landstraße. Die Daten sind zeitnah im Internet verfügbar und können dort abgerufen werden (www.hlug.de) ; angegeben sind Halbstunden-Mittelwerte; aus den Halbstundenmittelwerten von 8 bis 14 Uhr an den entsprechenden Messtagen der vorliegenden Studie wurden Mittelwerte errechnet. Insgesamt war die Feinstaubbelastung der Außenluft im Untersuchungszeitraum vergleichsweise niedrig, mit deutlichen Schwankungen zwischen den einzelnen Tagen, aber keinen systematischen Unterschieden zwischen den einzelnen Messstellen (Tab. 9, Abb. 19)

Tab. 9

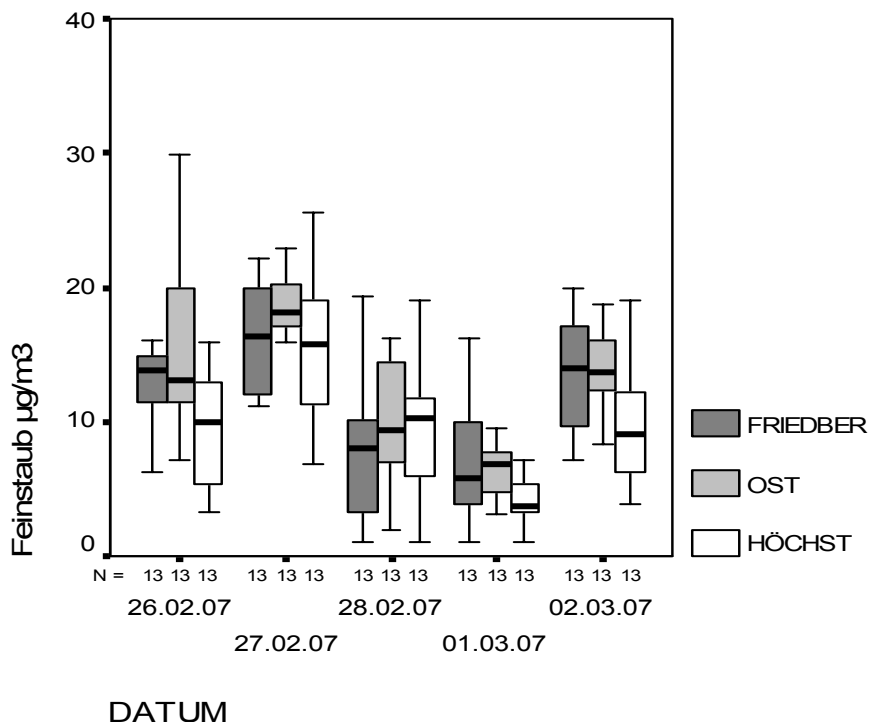
Feinstaubbelastung an drei Messstellen in Frankfurt am Main – 26.02.07 bis 02.03.07

Angaben in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Messungen der HLUG www.hlug.de)

		26.02.2007	27.02.2007	28.02.2007	01.03.2007	02.03.2007	26.02.07 - 02.03.07
Friedberger	$x \pm sdev$	13,8 \pm 4,3	16,2 \pm 4,0	8,4 \pm 6,4	7,0 \pm 4,4	13,9 \pm 4,2	11,9 \pm 5,8
	min-max	6,2 - 21,6	11,1 - 22,2	1,0 - 19,4	1,0 - 16,2	7,1 - 19,9	1,0 - 22,2
Ffm Ost	$x \pm sdev$	16,1 \pm 7,2	17,7 \pm 3,7	9,8 \pm 4,8	6,2 \pm 1,9	13,8 \pm 3,2	12,7 \pm 6,1
	min-max	7,2 - 29,9	9,1 - 22,9	2,0 - 16,2	3,1 - 9,5	8,4 - 18,8	2,0 - 29,9
Ffm Höchst	$x \pm sdev$	9,7 \pm 4,6	16,0 \pm 5,6	9,4 \pm 4,7	4,5 \pm 3,3	9,7 \pm 4,3	9,9 \pm 5,8
	min-max	3,2 - 15,9	6,9 - 25,6	1,0 - 19,0	1,0 - 10,9	3,8 - 19,1	1,0 - 25,6

Abb. 19

Feinstaubbelastung an den Messstellen Frankfurt Ost, Frankfurt Höchst und Friedberger Landstraße vom 26.02.07 bis zum 02.03.07 – Messungen der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie; Halbstundenwerte von 8-14 Uhr



Es herrschte während der Untersuchungswoche feuchtes aber relativ warmes Winterwetter mit einer Durchschnittstemperatur (8-14 Uhr) an der Messstelle Frankfurt Ost von $8,5 \pm 1,8$ C, die Minimaltemperatur betrug $5,7$ C und die Maximaltemperatur $12,3$ C.

Feinstaub-Konzentrationen in der Raumluf – im Vergleich mit der Außenluft

In Tab. 10 sind die Außenluftdaten der HLU (Mittelwerte der Stationen Frankfurt Ost und Höchst – ohne die verkehrsbelastete Station Friedberger Landstraße) den in den Klassenräumen gemessenen Feinstaubkonzentrationen gegenübergestellt; darüber hinaus wurde durch Subtraktion der Außenluftgehalte von den gemessenen Raumlufthalten orientierend der „außenluftunabhängige“ Anteil der Raumlufbelastung ermittelt. Dieser „Innenraumbeitrag“ lag an den verschiedenen Tagen zwischen 19 und $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, im Mittel bei $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Eindrucksvoll kann gezeigt werden, dass am 01.03.07, als – mit Ausnahme einer sehr kurzen Zeit – keine Kinder im Klassenraum waren, auch keine über die Außenluftbelastung hinausgehende Innenraumlufbelastung feststellbar ist. Dies spricht ebenfalls dafür, dass Raumlufkonzentrationen deutlich über den Außenluftkonzentrationen durch die Personen im Raum und deren Aktivitäten hervorgerufen werden, seien die Stäube von den Personen mit eingetragen, durch z.B. Basteltätigkeit gebildet oder sedimentierte Partikel durch Bewegung wieder auf gewirbelt.

Tab. 10
Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft (Daten der HLU) und der Raumluf – sowie „außenluftkorrigierte“ Raumlufbelastung.

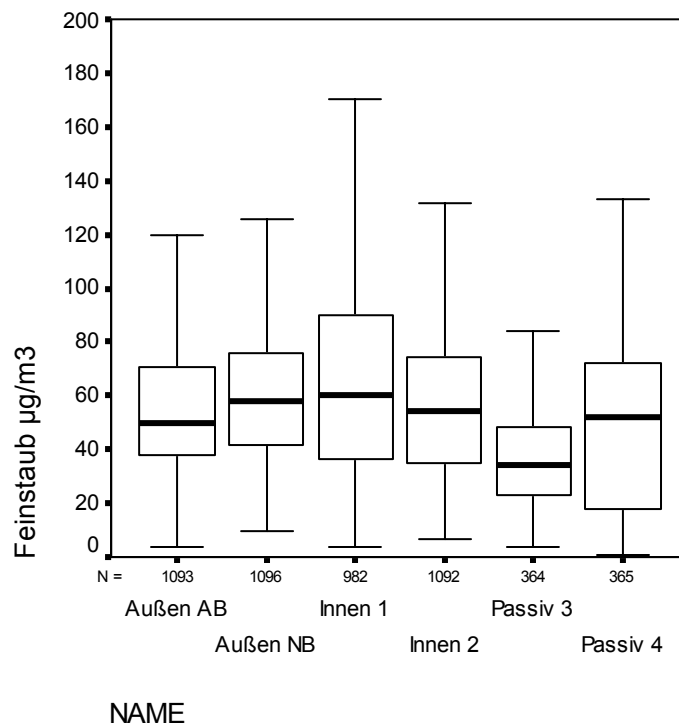
Alle Daten in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26.02.07	27.02.07	28.02.07	01.03.07	02.03.07	alle Tage
Mittelwerte Außenluft (Ost und Höchst)	13	17	9	5	12	11
Mittelwert Raumluf (Klassen 3 und 4)	44	55	49	39	41	42
Raumluf minus Außenluft	31	27	46	44	27	30
Mittelwerte Raumluf (Klasse 3)	34	43	37	39	31	37
Raumluf minus Außenluft (Klasse 3)	21	26	28	34	19	26
Mittelwerte Raumluf (Klasse 4)	54	67	61	5*	50	47
Raumluf minus Außenluft (Klasse 4)	41	50	52	0	38	36

* Kinder nur für wenige Minuten im Raum, ansonsten keine Kinder in der Klasse

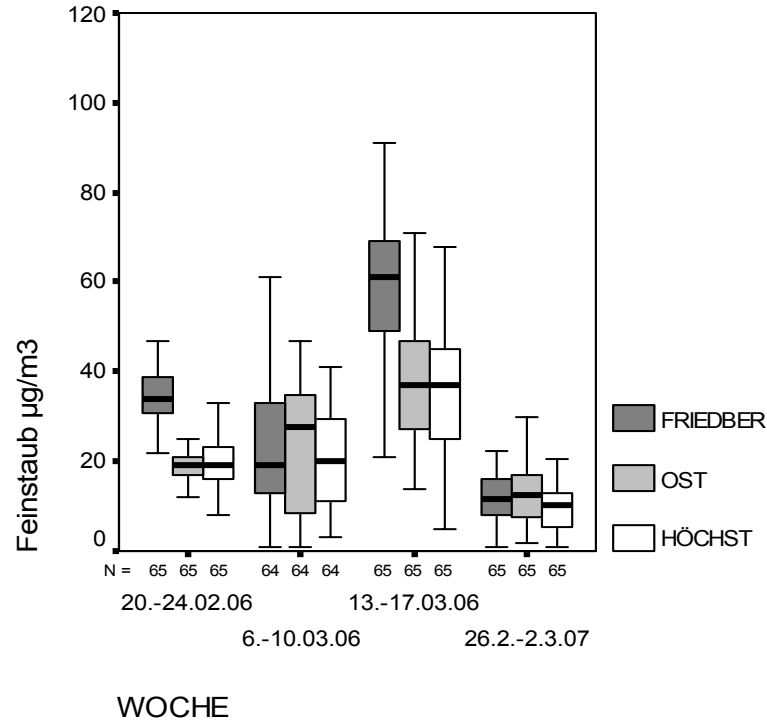
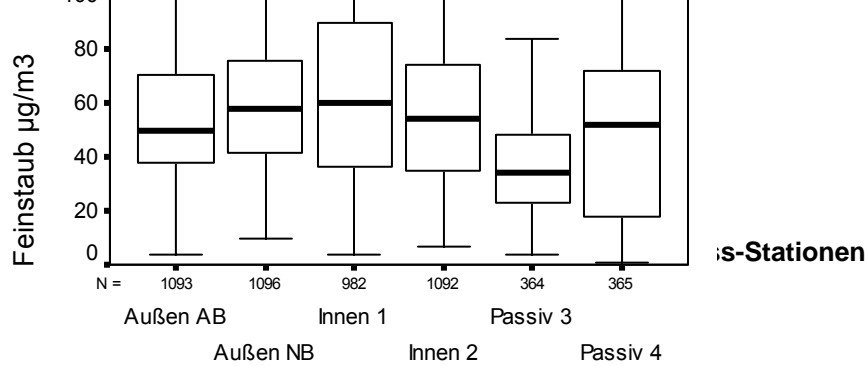
Feinstaubkonzentrationen in den Klassenräumen der Passivhausschule – im Vergleich mit konventionell gebauten und belüfteten Klassenräumen

Abb. 20 zeigt den Vergleich der Feinstaubmessungen der beiden Klassenräume aus der Passivhausschule mit den Befunden aus jeweils zwei Klassenräumen einer Außenbereichs- und einer Innenstadtsschule in Frankfurt, die im Winter 2006 mit der gleichen Methode untersucht wurden. In den Klassenräumen der Passivhausschule wurden etwas niedrigere Feinstaubbelastungen gefunden, der Unterschied war signifikant.

Abb. 20
Feinstaubkonzentrationen in verschiedenen Klassenräumen – in konventioneller Bauweise und Belüftung (Außen AB, Außen NB, Innen 1, Innen 2) sowie in Passivhausbauweise mit mechanischer Belüftung (Passiv 3 und Passiv 4)



Allerdings lässt dieser Vergleich keine unmittelbaren Schlussfolgerungen zu, da sich die Außenluftbelastung in den Untersuchungsperioden deutlich unterschied; dies ist aus Abb. 21 gut erkennbar, dort sind die Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft, wie sie von der HLUG gemessen wurden, an den angegebenen Tagen von jeweils 8-14 Uhr erkennbar.

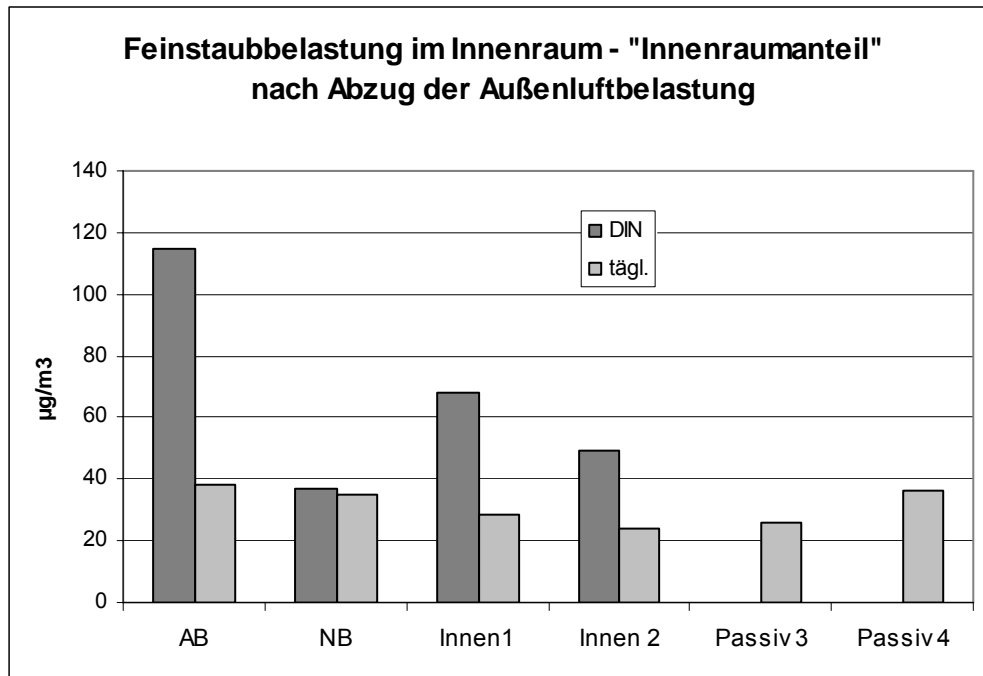


Durch Subtraktion der Mittelwerte der Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft von den in der Raumluft gemessenen Feinstaubkonzentrationen wurde wieder orientierend der „Innenraumanteil“ ermittelt (analog Tab. 10). Für die konventionell gebauten und belüfteten Klassenräume wurden die Innenraumanteile jeweils sowohl für die Woche mit damals „normaler DIN-Reinigung“ (d.h. zweimal pro Woche feuchtes Reinigen) und die Wochen mit täglicher Feuchtreinigung berechnet, für die Klassenräume der Passivhausschule liegen nur Messungen während täglicher Feuchtreinigung vor.

Wie aus Abb. 22 zu erkennen ist, lag der Innenraumanteil in den Klassenräumen während DIN-Reinigung bei ca. $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (37 bis $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$), während er in allen Klassenräumen bei täglicher Feuchtreinigung bei etwa $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 bis $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lag. Wurde bei dieser Betrachtung jedoch der Klassenraum AB der Außenbereichsschule, in dem es in der ersten Woche zu extrem hohen Feinstaubbelastungen im Innenraum wegen Kerzengiessen gekommen war (Heudorf 2006), nicht berücksichtigt, verblieb für die restlichen Klassenräume unter DIN Reinigung ein „Innenraumanteil“ von ca. $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – im Vergleich zu ca. $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei täglicher Feuchtreinigung.

Abb. 22

Feinstaubbelastung im Innenraum – Innenraumanteil (Differenz Raumluftbelastung minus Außenluftbelastung) – während der Wochen mit DIN-Reinigung (zweimal wöchentlich) und mit täglicher Feuchtreinigung



4.2.3. Zwischenbewertung

- **Kohlendioxid:** In der sog. Winterphase wird den Räumen der Passivhausschule gesteuert über ein Leitsystem erwärmte Frischluft während des Schulbetriebs kontinuierlich zugeführt. Die Tagesverläufe zeigen, dass die zugeführte Luftmenge nicht ausreicht, um den Leitwert von 1500 ppm CO₂ für künstlich belüftete Räume sicher einzuhalten. Zusätzliche Lüftung über geöffnete Türen bringt zwar eine leichte Absenkung des Kohlendioxidgehalts, die aber auch zur sicheren Einhaltung der Standards nicht ausreicht. Die Kohlendioxidgehalte in der Raumluft der Klassenräume sind zwar wesentlich niedriger als im Klassenraum AB der Außenbereichsschule, in welchem dokumentiert über eine Woche niemals eine Lüftung über ein geöffnetes oder gekipptes Fenster stattfand, sie unterscheiden sich im Mittel aber kaum von den drei anderen im Jahre 2006 untersuchten, konventionell belüfteten Klassenräumen.

Auch bei den mechanisch belüfteten Klassenräumen der Passivhausschule kommt es demnach zu Überschreitungen des Grenzwerts von 1500 ppm CO₂, jedoch sind die erreichten Maximalwerte bei der gegebenen mechanischen Belüftung niedriger als in den anderen Klassenräumen mit ausschließlicher Fensterlüftung. – Zur sicheren Unterschreitung des Grenzwerts von 1500 ppm CO₂ sind jedoch dringend weitere Maßnahmen erforderlich, sei es zusätzliche Fensterlüftung in den Pausen oder eine Erhöhung des Volumenstroms der mechanischen Lüftungsanlage.

- **Feinstaub:** Die mittlere Feinstaubbelastung in den beiden Klassenräumen über die fünf Messtage betrug 42 µg/m³ und lag damit niedriger als im Vorjahr in 4 untersuchten Klassenräumen. Allerdings war auch die gleichzeitige Außenluftbelastung deutlich niedriger als im Vorjahr. Als wesentliche Einflussfaktoren für die Feinstaubbelastung im Innenraum erwiesen sich wieder die Anzahl der Personen im Raum und deren Aktivitäten; dies zeigte sich zum einen in den Korrelationstests, war zum anderen aber auch in den einzelnen Tagesverläufen gut erkennbar. Da in der Untersuchungswoche Fenster nie geöffnet wurden, allenfalls Türen über längere Zeit offen standen, konnte auch kein Zusammenhang zwischen der Feinstaubbelastung im Innenraum und der zusätzlichen Lüftung untersucht werden.

Der Innenraumanteil der Feinstaubbelastung in der Passivhausschule – ermittelt als Differenz zwischen der gemessenen Raumluftbelastung minus der Außenluftbelastung – betrug im Mittel 30 µg/m³. Er war mit dem der im Vorjahr untersuchten konventionell gebauten und belüfteten Klassenräume vergleichbar - bei ausschließlicher Betrachtung der Zeiten mit täglicher feuchter Reinigung. Dieser Anteil hatte während der zuvor üblichen 2xwöchentlichen Feuchtreinigung deutlich höher gelegen. Dies kann als Hinweis gewertet werden, dass eine tägliche Feuchtreinigung durchaus eine Minderung der Feinstaubbelastung in Klassenräumen bewirkt. Der Effekt ist unabhängig von der Bauweise der Schulen – konventionelle Bauweise oder Passivhausstandard.

5. Diskussion:

Mit der vorliegenden Untersuchung setzt die Stadt Frankfurt ihre Untersuchungen zu raumluft-hygienischen Fragen in Kindereinrichtungen – Kindergärten, Horte, Schulen – fort. Stets wurden frühzeitig mögliche Belastungen untersucht und bei Bedarf Abhilfe geschaffen, teilweise unmittelbar nach Inkrafttreten eines Erlasses / einer Verordnung, teilweise aber auch bereits in Vorwegnahme zu erwartender Verordnungen (Heudorf 1995; Heudorf et al. 1995). Anlaßbezogen wurden auch weitere Fragen durch Untersuchungen aufgegriffen, u.a. Dioxine (Heudorf et al. 1996). Wo immer möglich und sinnvoll wurde auch die innere Belastung der Raumnutzer untersucht, als Grundlage für eine sachgerechte und auch individuelle gesundheitliche Bewertung.

Feinstaub: Nachdem eine erste Untersuchung in Berliner Kindergärten und Schulen teilweise hohe Feinstaubbelastungen in diesen Kindereinrichtungen gezeigt hatten (Fromme et al. 2005; Lahrz und Piloty 2006; Lahrz 2006) und es im Rahmen einer ersten orientierenden Untersuchung auch Hinweise gab, wie diese vermindert werden könnte, ließ die Stadt Frankfurt im Winter 2006 die Feinstaub- und Kohlendioxidbelastung in jeweils 2 Klassenräumen von einer innenstadtnahen und einer eher im ländlichen Bereich gelegenen Schule untersuchen. Im Ergebnis zeigte/bestätigte sich dieser Befund; gleichzeitig bestätigte sich auch, dass durch vermehrte Reinigung die Feinstaubbelastung in Klassenräumen zu vermindern ist (Heudorf 2006). Daraufhin regierte die Stadt umgehend: die Reinigungsfrequenz, die in Klassenräumen Frankfurter Schulen wie in vielen anderen Städten auch in den 1990er Jahren auf 2xwöchentlich reduziert worden war (sog. DIN-Reinigung), wurde erhöht auf 3xwöchentlich in den Sommermonaten und auf 5xwöchentlich in den Wintermonaten. Hier ist Frankfurt Vorbild für viele andere Städte und Gemeinden.

Bereits in dem Bericht zu den o.g. Feinstaub-Untersuchungen im Winter 2006 war im Hinblick auf die gesundheitliche Bewertung der Feinstaubbelastung in Klassenräumen darauf hingewiesen worden, dass die publizierten epidemiologischen Untersuchungen zur gesundheitsschädlichen Wirkung von Feinstaub (z.B. Peters et al., 2002; Heinrich et al. 2003; Arbeitsgruppe im VDI und DIN 2003) stets auf die Außenluftbelastungen bezogen sind. „Dabei ist aber zu betonen, dass die epidemiologischen Untersuchungen stets die Gesamtbelastung der Betroffenen abbilden und die beobachteten Wirkungen immer das Resultat der Außen- und Innenraumlufbelastungen sind. Es erscheint plausibel, in einer ersten Näherung diese Auswirkungen auf die Gesundheit auch auf die (erhöhten) Feinstaubkonzentrationen im Innenraum zu übertragen; allerdings kann die Zusammensetzung der Stäube sehr unterschiedlich sein, und anders zusammengesetzte Stäube können möglicherweise auch andere gesundheitliche Effekte bewirken. Vor diesem Hintergrund ist die Übertragung der in den epidemiologischen Studien gefundenen Effekte auf die Innenraumsituation nur bedingt möglich“ (Heudorf 2006).

Andere Autoren warnten davor, diese in Klassenräumen gemessenen Feinstaub-Werte direkt mit den Feinstaub-Grenzwerten in der Außenluft zu vergleichen (u.a. Lahrz 2006): Die Zusammensetzung und damit die potentiellen gesundheitlichen Auswirkungen der Stäube sind verschieden. So sind in der Außenluft zum überwiegenden Teil sehr kleine Partikel ($\ll 1 \mu\text{m}$) vorhanden, während im Innenraum tendenziell größere Feinstaub-Partikel vorkommen. Den häufig zu hörenden Schlussfolgerungen, dass dann die im Innenraum offenbar dominierende Feinstaubkonzentration (Partikel über $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$) eher akzeptabel sei oder dass man erst weitere detailliertere Messungen und wissenschaftlich fundierte Beweise brauche, um die richtigen Minderungsmaßnahmen zu begründen, erteilte er eine eindeutige und klare Absage. Selbst wenn die gesundheitsschädliche Wirkung der Feinstaubkonzentrationen

trationen im Innenraum nur 50 % der der Außenluftbelastung sei, sei bei den sehr viel höheren Innenraumkonzentrationen das Risiko im Innenraum immer noch erhöht. Darüber hinaus seien Keimbelastung, Endotoxine, Allergene etc. insbesondere mit den im Innenraum vorhandenen Feinstaubpartikeln assoziiert, und zusätzliche Risiken hierdurch nicht auszuschließen. „Feinstaub im Klassenraum muss als Indikator für mangelhafte Reinigung und Hygiene eingestuft werden und stellt damit ein vermeidbares Risikopotential dar. Es ist nicht begründbar, ein vermeidbares Risiko zu tolerieren“, so Lahrz (Heudorf 2006). Diese Einschätzung stimmte mit derjenigen der Stadt Frankfurt überein, und die Schulreinigung wurde intensiviert.

Im letztjährigen Bericht (Heudorf 2006) war im Hinblick auf die Feinstaubbelastung in Klassenräumen festgestellt worden: „Auch wenn die Feinstaubbelastung in Klassenräumen das Resultat verschiedener Einflussfaktoren darstellt, ist zwischen diesen zu differenzieren. Während die Anzahl der Personen im Raum oder die Aktivitäten (Unterricht, Pause, Werken etc.) eben die typische Situation „Schule“ ausmachen und quasi als fixe Variable nicht veränderbar sind, können Art und Ausmaß der Reinigung und der Lüftung durchaus verändert / beeinflusst werden im Sinne einer verbesserten Situation für Kinder und Lehrer.“ Die hier vorgestellten Daten zur Feinstaubbelastung in den Klassenräumen können als Hinweise gewertet werden, dass diese vermehrte Reinigung zu einer Verminderung der schul- und klassentypischen Zusatzbelastung durch den Schulbetrieb und Unterricht führt: nach Abzug der jeweils herrschenden Außenluftbelastung (Feinstaub) von der gemessenen Feinstaubkonzentration in der Raumluft zeigte sich, dass die Zusatzbelastung durch Schulbetrieb im Mittel ca. $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ betrug, während sie vor der intensivierten Reinigung im Mittel über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lag. Daraus kann geschlossen werden, dass durch konsequentes gründliches Feuchtreinigen die Feinstaubbelastung in Klassenräumen gut vermindert werden kann.

Gleichwohl bleibt festzustellen, dass in Klassenräumen durch Anwesenheit vieler Personen im Raum und deren Aktivitäten immer höhere Feinstaubgehalte in der Raumluft vorhanden sind und sein werden, als in der Raumluft kaum belegter oder leerer Räume; dies hat das Beispiel 01.03.07 in der Klasse 4 gezeigt, wo im leeren Klassenraum (lediglich der Probenehmer war anwesend) Feinstaubbelastungen gemessen wurden, die die der Außenluft nicht überschritten. Bei Anwesenheit der Kinder wurden sofort höhere Feinstaubgehalte in der Raumluft gemessen.

Die hier vorliegende Untersuchung hat darüber hinaus nochmals die Ausstattung der Räume als wichtigen Einflussfaktor auf die Feinstaubbelastung in der Raumluft von Klassenräumen bestätigt: Im Klassenraum 4 wurden – bei Anwesenheit von Kindern – stets höhere Feinstaubgehalte in der Raumluft gefunden als im Klassenraum 3; dies war offenbar auf die in Klasse 4 vorhandenen Sitzpolster zurückzuführen.

In einer weiteren Messung im Oktober 2006 in der Passivhausschule war der Frage der Partikelgröße der Feinstaubbelastung in Klassenräumen nachgegangen worden. Während drei Unterrichtstagen wurden mit einem Partikelmessgerät unterschiedliche Partikelgrößen untersucht. Je kleiner die Partikel, desto höhere Konzentrationen wurden gefunden – in der Außen- und in der Raumluft. Während die sehr kleinen Partikel in der Außenluft in höheren Konzentrationen vorlagen als in der Raumluft (Innen/Außen < 1), war dieses Verhältnis mit zunehmender Partikelgröße umgekehrt (Innen/ Außen $>> 1$).

Diese Daten bestätigten vorliegende Untersuchungen aus Klassenräumen in Frankreich (Poupard et al. 2005): dort lagen die Mittelwerte der Partikel $0,3\text{-}0,4 \mu\text{m}$ bei $49\ 000/\text{l}$ (unsere Daten: $0,3\text{-}0,5 \mu\text{m}$ 44

000/l), der Partikel 1,6-2 µm bei 265/l (unsere Daten: 1-5 µm 3654/l). Auch dort war das Verhältnis Außen/Raumluft bei den sehr kleinen Partikeln kleiner als 1 und nahm mit zunehmender Partikelgröße zu (> 1). Auch dort wurde die positive Korrelation zwischen den größeren Partikeln und dem CO₂-Gehalt (als Indikator für die Belegung der Klasse) gefunden, nicht aber bei den kleineren Partikeln. Der Vergleich der Klassen leer oder belegt zeigte, dass bei Belegung die Innenraum/Außenluftrelationen deutlich anstiegen – je größer die untersuchten Partikel desto mehr (Blondeau et al., 2004).

In einer weiteren Studie waren größere Partikel gut durch Lüftung zu entfernen, nicht die kleineren Partikel (Chang et al. 2006) – ein mit unseren Daten übereinstimmender Befund. In unserer Untersuchung war erkennbar, dass die kleineren Partikel <0,5 µm durch Lüften in die Klassen eingetragen werden, nicht die größeren Partikel. Dies ist in Übereinstimmung mit einer weiteren Untersuchung, in welcher die Partikel in der Raum- und Außenluft über verschiedene Wochen bei unterschiedlichen Lüftungsbedingungen in einem leeren Raum untersucht wurden: dort wurde nach kurzem Lüften ein starker und deutlicher Anstieg der Partikelkonzentration insgesamt im Innenraum festgestellt, nicht aber bei größeren Partikeln (2,5 µm oder black smoke) (Cyrus et al., 2004).

Somit stimmen die vorliegenden Daten allesamt gut überein: in Klassenräumen dominieren eher größere Partikel, in der Außenluft die kleineren.

Kohlendioxidgehalte in Klassenzimmern: Die in 4 Klassenräumen im Winter 2006 durchgeführten Kohlendioxidmessungen hatten die allgemeine Erfahrungen aus Schulen bestätigt: es wird zuwenig gelüftet, und die aus hygienischer und präventivmedizinischer Sicht empfohlenen Werte von 1000 ppm in mechanisch belüfteten Räumen bzw. 1500 ppm in Räumen mit Raumlufotechnischen Anlagen werden häufig überschritten, teilweise sogar mit sehr hohen Maximalwerten (Heudorf 2006). Daraufhin wurde – parallel zur Erhöhung der Reinigungsfrequenz als Verhältnisprävention (s.o.) – eine Aktion zur Verbesserung der Raumlüftung in Klassenräumen im Sinne einer Verhaltensprävention in Schulen gestartet. Alle Frankfurter Schulen und Kindererichtungen erhielten einen Flyer, der auf die Bedeutung einer guten Raumlüftung hinwies und Tips zur Umsetzung der Empfehlung enthielt.

Im Herbst 2006 wurde an verschiedenen Schulen, die Interesse bekundet hatten, eine CO₂-Ampel eingesetzt, die die Fa. ORG-DELTA, Reichenbach, kostenlos für 4 Wochen überlassen hatte. Die Ampel gibt bei Überschreitung von 1500 ppm CO₂ im Klassenraum ein Leuchtsignal, das der Klasse die Notwendigkeit einer Lüftung anzeigt. Das Thema Innenraumklima in Schulen war durch die Messungen und die Lüftungsinitiative bekannter geworden; die Raumlufthygiene war auch in entsprechenden Arbeitskreisen des staatlichen Schulamtes aufgegriffen worden, und von dort war die Aktion CO₂-Ampel sehr unterstützt worden.

In den untersuchten Klassenräumen zeigte die CO₂-Ampel nach Protokoll der Klassen/Lehrer nur sehr selten und kurz eine Überschreitung des Grenzwerts von 1500 ppm. Allerdings kann aus diesen Ergebnissen leider nicht unmittelbar auf eine gute Wirkung der „Lüftungs-Initiative“ geschlossen werden, da nicht auszuschließen ist, dass sich eben solche Schulen oder Lehrer die CO₂-Ampel ausgeliehen haben, die an einer guten Raumlufth generell interessiert sind und eine gute Lüftung praktizieren.

Unsere im Winter 2006 und jetzt im Februar 2007 durchgeführte Messreihe zur Kohlendioxidbelastung in Klassenräumen in Frankfurt zählt nach den uns vorliegenden Daten und Veröffentlichungen zu den größten Messreihen in Deutschland. Nachfolgend werden die Daten mit anderen publizierten Daten verglichen.

Im umfangreichen Niedersächsischen Messprogramm standen Messwerte von 58 Messtagen – sowohl Sommer-, als auch Wintermessungen - für die weiteren Auswertungen zur Verfügung – nachdem zahlreiche Messungen wegen fehlendem Stundenprotokoll nicht nutzbar waren (Grams et al., 2002, ergänzt 2004). Dort war es bei 7 von 22 Sommermessungen (32%) zu DIN-Wert-Überschreitungen gekommen, ebenso bei 32 von 36 Wintermessungen (89%). Die Mittelwerte der Kohlendioxidbelastung lagen im Winter bei 1316 ppm, im Sommer bei 766 ppm. Statt der zeitlich differenzierten Angabe zur Belegung der Räume über den Tag, die Aktivitäten der Raumnutzer sowie Art und Ausmaß der (Fenster)-Lüftung wurde dort nur die generelle Raumbelastung (Klassengröße) publiziert. Diese betrug im Mittel 25,1 Personen, 21 bis 29 pro Klasse. Daraus folgt, dass hier nur orientierende Vergleiche angestellt werden können.

Auch in einer 2004 publizierten umfangreichen Diplomarbeit (Stollenwerk 2004) wurde zunächst über 22 Messungen in einer Schule berichtet, von welcher jedoch nur 8 Messungen verwertbar waren, die übrigen Messungen waren aus verschiedenen, nicht näher genannten Gründen nicht auswertbar. In insgesamt 4 Klassenräumen einer Schule wurden Kohlendioxidbelastungen gemessen, wobei einmal der Klasse die Art und Häufigkeit der Lüftung freigestellt war, einmal eine instruierte Kipplüftung stattfinden sollte; ein weiterer Raum wurde über eine Lüftungsanlage mit unterschiedlichen Volumenströmen (200 bis 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/Personen 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.

Unsere Untersuchungsserie 2006 und 2007 an drei Frankfurter Schulen umfasst detailliert protokollierte, auswertbare Messungen über 70 Unterrichtstage (Winter 2006 in 4 Klassenräumen über 15 Tage, Winter 2007 in 2 Passivhaus-Klassenräumen über 5 Tage). Bei Betrachtung der im Winter 2006 untersuchten Klassenräume mit Fensterlüftung lagen 52% von insgesamt 4264 Messwerten unter 1000 ppm CO₂, und 24,5 % der Messwerte lagen > 1500 ppm. Wurden nur die Messungen berücksichtigt, während derer die Klasse belegt war (> 5 Personen im Raum), so wurde der Pettenkoferwert von 1000 ppm nur bei 37,5 % der Messungen eingehalten, während 30,8 % der Messwerte über 1500 ppm lagen. Damit lagen die Messwerte deutlich besser als die Daten aus Niedersachsen (s.o.). Gleichwohl waren die Belastungen teilweise inakzeptabel zu hoch, weshalb die Lüftungsinitiative in Frankfurt gestartet wurde.

Passivhausschule: Eine gewisse Vorreiter-Rolle hat die Stadt Frankfurt auch übernommen, indem sie eine der ersten Passivhausschulen in Deutschland errichtete. Zentrales Ziel war dabei die Verminderung des Energiebedarfs und der Klimaschutz, doch gleichzeitig wurde auch darauf hingewiesen, dass infolge der maschinellen Grundlüftung mit guter Wärmerückgewinnung als unerlässlichem Bestandteil für eine Schule im Passivhauskonzept und durch die Einhaltung der Vorgaben der Norm DIN 1946 (<1500 ppm) auch bessere raumklimatische und damit bessere Lernbedingungen für die Schüler geschaffen werden.

Bei den Nutzern 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 nach den Vorgaben der DIN 1946-2 für Schulen nicht ausreicht, um auf Zusatzlüftung zu verzichten.

Während der Untersuchung im Februar 2007 wurde in den Klassenräumen der Passivhausschule kein einziges Mal die Fenster geöffnet, die einzige zusätzliche Belüftung über die mechanische Belüftung mit ca.14-16 m³/Person und Stunde hinaus war die Lüftung über die geöffnete Türe. Vor diesem Hintergrund ist es plausibel, dass zwei Drittel der Messwerte über 1000 ppm lagen und auch der Grenzwert von 1500 ppm in 10 % der Messungen überschritten wurde. Die mittleren CO₂-Belastungen waren denen in drei untersuchten konventionell gebauten und belüfteten Räumen vergleichbar (ein Raum, der nachweislich über eine Woche nicht gelüftet worden war, wurde hier nicht betrachtet). D.h. die mittleren, durchschnittlichen Kohlendioxidkonzentrationen waren nicht zwischen den konventionell gelüfteten Räumen und den mechanisch (teil)belüfteten Räumen der Passivhausschule unterschieden; die Maximalwerte waren in der Passivhausschule niedriger. Daraus ergibt sich, dass auch in der Passivhausschule (bei Winterbetrieb) eine Verbesserung der raumlufthygienischen Situation durch Verbesserung der Lüftung erforderlich ist, am besten durch zusätzliche kurze Pausenlüftung über geöffnete Fenster.

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“ (Kaupert und Vollert, o. Jahr). Auch in der Passivhausschule in Frankfurt sollte klarer auf den Bedarf einer ausreichenden Fensterlüftung in den Pausen hingewiesen werden.

Im Winter 2006/7 kam es in der Passivhausschule zu einem Ausfall der Gebäudeleittechnik über längere Zeit. Der Schule wurde dies offenbar nicht genau mitgeteilt, die Lehrer stellten 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, was nicht zuletzt auf eine nicht ausreichende Information und Kommunikation zurückzuführen ist. 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. Ein entsprechendes Vorgehen sollte im Hygieneplan nach § 36 Infektionsschutzgesetz festgeschrieben werden.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass alle Fenster geöffnet werden müssen.

Somit kann zusammenfassend zur Frage der Raumluftqualität in der Passivhausschule Riedberg und zu Passivhausschulen insgesamt folgendes gesagt werden:

- Die Feinstaubbelastung in den Klassenräumen der Passivhausschule war – unter Berücksichtigung der jeweils aktuell herrschenden Außenluftbelastung, der Aktivitäten im Raum – gut vergleichbar mit der Feinstaubbelastung in konventionell errichteten und gelüfteten Räumen. Die Hinweise, dass eine erhöhte Reinigungsfrequenz zu niedrigeren Zusatzbelastungen im Klassenraum führt, wurden bestätigt.
- Die durchschnittliche Kohlendioxidbelastung in den untersuchten Klassenräumen der Passivhausschule bei alleiniger mechanischer Lüftung in der Winterphase (14-16 m³/Person und h) war mit der in konventionell gelüfteten Klassenräumen während der Untersuchung im Winter 2006 vergleichbar, die Maximalwerte waren niedriger. Zwei Drittel der Messwerte lagen über dem empfohlenen Wert von 1000 ppm (diese Rate war höher als in konventionell gelüfteten Klassenräumen) und 10 % über dem Grenzwert von 1500 ppm (diese Rate war niedriger als in den konventionell gelüfteten Klassenräumen). Insgesamt ist also auch in den Klassenräumen der Passivhausschule ein Minderungsbedarf im Hinblick auf die CO₂ –Belastung gegeben. Dies geschieht am besten durch Fensterlüftung in den Pausen (alternativ wäre auch eine Erhöhung der Strömungsvolumina der Lüftungsanlage denkbar.)
- In der Sommerphase unterscheidet sich der Lüftungsbedarf der Passivhausschule nicht von dem konventionell gebauter Schulen. Auch hier ist auf eine gute Quer- oder Stoßlüftung durch Öffnen der Fenster zu achten. Da in den Klassenräumen der Riedbergschule nur zwei Fenster ganz zu öffnen und zwei Oberlichter zu kippen sind, sollte darauf geachtet werden, dass in der Passivhausschule stets alle Fenster in den Pausen zum Lüften geöffnet werden.
- Der Lüftungsbedarf – für den Sommer- und Winterbetrieb – sollte in dem nach § 36 Infektionsschutzgesetz zu erstellenden Hygieneplan der Schule beschrieben und festgelegt werden.
- Bei künftigen Schulneubauten in Passivhausweise ist – angesichts der erhaltenen Messwerte im Sommer- und Winterbetrieb und der Erfahrungen mit dem möglichen Ausfall der Gebäudeleittechnik - darauf zu achten, dass eine ausreichend große Fensterfläche mit Fenstern zum Öffnen ausgestattet wird.

Abschließend 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.“

6. Literatur:

Pettenkofer v M: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Literarisch-artistische Anstalt der Cotta'schen Buchhandlungen, München 1858

Pluschke P. Luftschadstoffe in Innenräumen: ein Leitfaden. Berlin, Heidelberg Springer Verlag, 1996, S. 69 ff

Grams H, Hehl O, Dreesman J: „Aufatmen in Schulen“ – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen (2003) 65: 447-456

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, S. 88- 113.

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

Moriske H-J: Chemische Innenraumluftverunreinigungen. In: Moriske/Turowski: Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Ecomed Verlag, Kapitel III-4.2. S. 1-63

Moriske H-J: Empfehlungen zur Innenraumhygiene in Schulgebäuden. In: Moriske/Turowski: Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Ecomed Verlag, Kapitel III – 4.4.9 S. 1-14

Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK): Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Umweltbundesamt, Berlin (2000) 66 Seiten

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>

Fromme H, Lahrz T, Hainsch A, Oddoy A, Piloty M, Ruden H. Elemental carbon and respirable particulate matter in the indoor air of apartments and nursery schools and ambient air in Berlin (Germany). Indoor Air. (2005) 155: 335-41.

Lahrz T, Piloty M: Innenraumlufthqualität in Berliner Schulen – Feinstaub und adsorbierte Substanzen. Bericht im Auftrag des Landesamtes für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technische Sicherheit, Berlin (LAGetSi), 2005

Lahrz T: Innenraumlufthqualität in Berliner Schulen – Feinstaub und Adsorbierte Substanzen. In: Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit: Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 1. Band 13 der Schriftenreihe: Materialien zur Umweltmedizin. Erlangen, 2006, S. 88-113

LAGetSi Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technische Sicherheit, Berlin 2005 www.berlin.de/lagetsi

Heudorf U: Innenraumklima in Schulen. Dezernat für Umwelt, Bildung und Frauen sowie Stadtgesundheitsamt Frankfurt, 2006

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

Kaupert M, Vollert S: Erweiterung der Realschule Mölln im Passivhaus-Standard. Architektonische und technische Umsetzung – erste Betriebserfahrungen.

Pfluger R: Messungen zur Luftqualität in Schulen. In: Feist W (Hrsg): Protokollband Passivhaus-Schulen; Arbeitskreis kostengünstiger Passivhäuser: Passivhaus-Schulen. Darmstadt, Juli 2006

Peper S: PH-Grundschule Frankfurt a.M. – Ergebnisse der Messbegleitung. Vortrag auf der 11. Internationalen Passivhaustagung 2007, Bregenz

Heudorf U: 09.02 Stäube. Teil 2: Asbest. in Beyer/Eis (Hrsg): Praktische Umweltmedizin, Folgelieferung November 1995, Springer Verlag 1995.

Heudorf U, Angerer J, Göen Th: PCB-Konzentrationen im Blut von Mitarbeiterinnen PCB-belasteter Kindertagesstätten, Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin, (1995) 30: 398-407.

Heudorf U, Salzmann, Angerer J, Wittsiepe J: Biomonitoring auf Dioxine/Furane sowie auf polychlorierte Biphenyle bei stark erhöhten Raumluftbelastungen. Umweltmed Forsch Prax (1996) 1: 6-12.

Peters A, Heinrich J, Wichmann HE: Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Kurzzeiteffekte. Umweltmedizin in Forschung und Praxis (2002) 7: 101-115.

Heinrich J, Grote V, Peters A, Wichmann HE: Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Langzeiteffekte. Umweltmedizin in Forschung und Praxis (2002) 7: 91-99.

Arbeitsgruppe „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“ der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN: Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur gesundheitlichen Bewertung von Partikeln in der Luft. Umweltmedizin in Forschung und Praxis (2003) 8: 257-278.

Heudorf U: Hygiene in Schulen (k)eine Utopie? Hessisches Ärzteblatt (2006) 67: 747-748 und Nachdruck in HLZ Zeitschrift der DEW Hessen (2007) 60 (3): 7-8.

Poupard O, Blondeau P, Iordache V, Allard F: Statistical analysis of parameters influencing the relationship between out and indoor air quality in school. Atmospheric Environ (2005)

Blondeau P, Iordache V, Poupard O, Genin D, Allard F. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. Indoor Air. (2005) 15: 2-12.

Chang TJ, Hsieh YF, Kao HM. Numerical investigation of airflow pattern and particulate matter transport in naturally ventilated multi-room buildings. Indoor Air. (2006) 16: 136-52.

Cyrys J, Pitz M, Bischof W, Wichmann HE, Heinrich J. Relationship between indoor and outdoor levels of fine particle mass, particle number concentrations and black smoke under different ventilation conditions. J Expo Anal Environ Epidemiol. (2004) 14: 275-83.

Stollenwerk D: Überprüfung der Schadstoffbelastung in Klassenräumen mit unterschiedlichen Lüftungskonzepten unter Beachtung nationaler und internationaler Grenzwerte. Diplomarbeit, an der Fachhochschule Köln, August 2004.

Zenger A, Rimili R, Gagelmann M: Energieeinsparung und Luftqualität in Schulen. Umwelt-Medizin-Gesellschaft (2003) 16: 127-130.