

Innenraumklima in Schulen

Auftraggeber: Dezernat für Bildung, Umwelt und Frauen
Stadtschulamt der Stadt Frankfurt
Seehofstraße 41
60594 Frankfurt

Untersucher: TÜV SÜD Industrie Service GmbH und
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 Mai 2006

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1. Ausgangslage, Einleitung	5
2. Auftrag und Problemstellung, Methoden	6
Messmethoden und Untersuchungsverfahren	8
Beschreibung der Klassenräume Außenbereichsschule A	9
Beschreibung der Klassenräume Innenstadtschule I	10
Fotodokumentation Innenstadtschule I	11
3. Hintergrundbelastung Feinstaub in der Außenluft – Daten der HLUg	12
4. Ergebnisse der Untersuchungen	14
4.1. Feinstaub in der Außen- und Raumluft - Gravimetrie	14
4.2. Feinstaub in der Raumluft – Laserverfahren	17
4.3. Kohlendioxid (CO ₂) in der Raumluft	22
4.4. Überprüfung möglicher Einflussfaktoren auf die Feinstaub- und Kohlendioxid- konzentration in Klassenräumen – Vermehrte Reinigung und intensivierete Lüftung	25
4.5. Feinstaub- und Kohlendioxidkonzentrationen in Klassenräumen – Tagesbeispiele	27
5. Diskussion	31
6. Literatur	37

Anlage: Flyer: **Frische Luft für Frankfurter Schulen**

Zusammenfassung

Die Feinstaubbelastung in der Außenluft hat angesichts der in zahlreichen Studien nachgewiesenen erheblichen gesundheitlichen Auswirkungen eine große umweltmedizinische Relevanz. Im Vergleich mit der Fülle der Daten zur Feinstaubbelastung in der Außenluft sind nur relativ wenige Untersuchungen zur Feinstaubkonzentration in Innenräumen publiziert. In einer größeren Studie an 40 Berliner Schulen lagen die Feinstaubkonzentrationen im Median bei $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit im gleichen Bereich wie in Raucherhaushalten. Bei einer weiterführenden Untersuchung konnte dort ein positiver Effekt der Lüftung, insbesondere aber einer intensivierten Reinigung gesehen werden.

Vor diesem Hintergrund hat die Stadt Frankfurt eine vertiefte Untersuchung zur Feinstaubkonzentration in Klassenräumen und deren möglichen Einflussfaktoren durchgeführt. Bei gleichzeitigem Einsatz verschiedener Untersuchungsverfahren und Aufzeichnung möglicher Einflussfaktoren wie Personen im Raum, Aktivitätsgrad, Lüftung etc. konnten die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Feinstaubkonzentration in der Raumluft sehr differenziert betrachtet und bewertet werden.

Die Untersuchungen wurden im Februar und März 2006 über drei Wochen in jeweils 2 Klassenräumen je einer Innenstadt-Schule und einer eher peripher gelegenen Schule durchgeführt: erste Woche, übliche Reinigung und Lüftung, zweite Woche intensivierte Reinigung, dritte Woche zusätzlich zur intensivierten Reinigung intensivierte Lüftung.

Die Ergebnisse:

1. Die Feinstaubbelastung in Klassenräumen ist hoch. Mit durchschnittlich $69 \pm 19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median: $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lag sie deutlich über der gleichzeitig mit gleichen Verfahren gemessenen durchschnittlichen Außenluftkonzentration ($44 \pm 16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Median 46). Somit wurden auch in Klassenräumen Frankfurter Schulen Feinstaubkonzentrationen gemessen, die im Bereich der üblicherweise in Raucherwohnungen vorzufindenden Feinstaubbelastung und doppelt so hoch wie in Nichtraucherwohnungen liegen.

2. Die Kohlendioxidbelastung in Klassenräumen liegt deutlich über den lufthygienischen Standards. Der hygienisch wünschenswerte Bereich von unter 1000 ppm (Pettenkofer-Zahl) wurde nur in weniger als der Hälfte der Messungen (jeweils 5 min-Werte) unterschritten, der Wert von 1500 ppm wurde in einem Viertel der Messungen überschritten; die gemessenen Maximalwerte lagen knapp unter dem MAK-Wert (maximale Arbeitsplatz-Konzentration), der für Arbeitsplätze festgelegt wurde, an denen mit Gefahrstoffen umgegangen wird.

3. Durch verstärkte Reinigung kann die Feinstaubbelastung in Klassenräumen verbessert werden. Der nachweisbare Verbesserungseffekt betrug durchschnittlich $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in allen untersuchten Klassenräumen insgesamt, er war allerdings nicht in allen einzelnen Klassenräumen nachweisbar. Der positive Effekt der vermehrten Reinigung blieb auch nach Berücksichtigung der weiteren, durchaus stärkeren Einflussfaktoren wie Personen im Raum, Aktivitäten, Lüftung als signifikanter Einflussfaktor nachweisbar. D.h. eine intensivierte Reinigung ist sinnvoll, um die Feinstaubbelastung der Kinder und Lehrer in den Klassenräumen zu vermindern.

4. Durch verbesserte Lüftung kann die Feinstaubkonzentration im Klassenraum gut gesenkt werden. Bei Betrachtung des Verlaufs der Feinstaubkonzentrationen in den Klassenräumen über die Messzeit, konnte durchweg festgestellt werden, dass durch Lüftung (Öffnen von Fenster oder Tür) die

Feinstaubkonzentration parallel mit der Kohlendioxidkonzentration immer gut vermindert werden konnte, und insbesondere am Unterrichtschluss oft bis unter die Außenluftkonzentration fiel. Damit ist nachgewiesen, dass Lüftung tatsächlich die Feinstaubbelastung im Innenraum verbessert.

5. Lüftung vermindert die Kohlendioxidbelastung in Klassenräumen rasch und effektiv. Die Kohlendioxidkonzentration in Klassenräumen war hochsignifikant positiv mit der Anzahl der Personen im Raum und deren Aktivitäten korreliert; aber auch die Abnahme der Kohlendioxidkonzentration mit der Lüftung war hochsignifikant und konnte durch Tagesverläufe beispielhaft dargelegt werden.

In den untersuchten Klassenräumen lagen also neben den wie erwartet teilweise hohen Feinstaubkonzentrationen in der überwiegenden Zeit hygienisch und umwelt- und präventivmedizinisch unerwünschte Konzentrationen an Kohlendioxid für die Schüler und Lehrer vor. Effektive Minderungsmaßnahmen sind gefragt, um die Gesundheit der Raumnutzer und die Lernfähigkeit der Kinder zu erhalten bzw. zu stärken. Neben einer intensivierten Reinigung ist insbesondere eine verbesserte Lüftung geeignet, hier eine deutliche Verbesserung zu schaffen.

1. Ausgangslage

Die Feinstaubbelastung in der Außenluft hat angesichts der in zahlreichen Studien nachgewiesenen erheblichen gesundheitlichen Auswirkungen nicht nur eine große umweltmedizinische Relevanz (1-6), sie hat darüber hinaus in den letzten Monaten wegen der in der EU-Richtlinie und der 22. Bundesimmissionschutz-Verordnung geforderten Minderungsmaßnahmen bis hin zu Verkehrsbeschränkungen große politische Aufmerksamkeit erlangt. Demgegenüber wurde die Feinstaubbelastung im Innenraum bislang weniger betrachtet, obwohl betont werden muss, dass epidemiologische Studien immer die Gesamtbelastung der betroffenen abbilden, die beobachteten Wirkungen sind also immer das Resultat der Raumluf- und Außenluftbelastung.

Im Vergleich mit der Fülle der Daten zur Feinstaubbelastung in der Außenluft sind nur relativ wenige Untersuchungen zur Feinstaubkonzentration in Innenräumen publiziert, einige davon aus Deutschland (7-10). So hat eine große Studie, die im Winter 2000/2001 in Kindergärten in Berlin durchgeführt wurde, gezeigt, dass die Feinstaubkonzentrationen dort mit $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Konzentrationsbereichen wie in Raucherwohnungen (ca. $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und damit deutlich über den Belastungen in normalen Nichtraucherhaushalten (ca. $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) liegen (7). Eine weitere größere Studie an 40 Berliner Schulen im Winter 2002/3 bestätigte diese Ergebnisse: auch dort lagen die Feinstaubkonzentrationen im Median mit $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im gleichen Bereich wie in Raucherhaushalten (8, 9).

Daraufhin untersuchte die Stadt Berlin in zwei Schulen, inwieweit eine verbesserte Reinigung und Lüftung die hohe Feinstaubkonzentration in Klassenräumen senken kann. Untersucht wurde die Feinstaubkonzentration mittels gravimetrischem Verfahren in jeweils einem Klassenraum pro Schule über mehrere Wochen. Es war wochenweise eine unterschiedliche Intensität der Reinigung / Lüftung vorgesehen, und die Auswirkung dieser Maßnahmen sollte untersucht werden. Dabei zeigte sich eine Tendenz zur Verbesserung durch vermehrte Lüftung. In einer Schule konnte auch eine deutliche und signifikante Reduktion der Feinstaubbelastung in der Woche der intensivierten Reinigung erzielt werden, in der zweiten Schule war dieser Effekt nicht nachweisbar. Im Nachhinein stellte sich heraus, dass dort die intensivierte Reinigung entgegen der Vorgabe nicht durchgeführt worden war (8, 9). Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind somit plausibel, wenngleich auf sehr schmaler Datengrundlage.

Vor diesem Hintergrund hat die Stadt Frankfurt, beschlossen, eine vertiefte Untersuchung zur Feinstaubkonzentration im Innenraum und deren möglichen Einflussfaktoren durchzuführen. Über die bisher publizierten Untersuchungen hinaus, die mittels gravimetrischer Verfahren die Feinstaubbelastung in Klassenräumen integriert über ganze Unterrichtstage ermittelt haben, sollte jetzt die Feinstaubkonzentration zusätzlich mittels Laserverfahren ermittelt werden. Dieses erlaubt die Erfassung der Feinstaubkonzentration über sehr kurze Zeitabstände (< Minuten), sodass hiermit auch kurzfristige Änderungen und Bewegungen während des Unterrichtstags gemessen werden können. Bei gleichzeitiger Aufzeichnung möglicher Einflussfaktoren wie Personen im Raum, Aktivitätsgrad, Lüftung etc. können die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Feinstaubkonzentration in der Raumluf sehr differenziert betrachtet und bewertet werden.

Darüber hinaus sollte angesichts der raumlufthygienischen Bedeutung auch die Kohlendioxidkonzentration mit untersucht und bewertet werden.

2. Auftrag und Problemstellung

Das Stadtschulamt der Stadt Frankfurt, beauftragte die TÜV SÜD Industrie Service GmbH sowie das SGS Institut Fresenius GmbH, Taunusstein, Feinstaubmessungen sowie weitere Untersuchungen zur Innenraumluftqualität im Vergleich mit ausgewählten Messungen der Außenluft in jeweils zwei Klassenräumen einer in der Innenstadt gelegenen Schule „Innenstadtschule I“ und einer eher peripher gelegenen Schule, „Außenbereichsschule A“, in Frankfurt durchzuführen.

Die Messungen und Untersuchungen wurden an vorher festgelegten Messstellen in jeweils zwei Klassenräumen und an zwei Außenluftmessstellen der Innenstadtschule I, bzw. einer Außenluftmessstelle an der Außenbereichsschule A 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)

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

Die Untersuchungen wurden in drei Wochen, d.h. 20.02. - 24.02.06, 06.03. - 10.03.06 und 13.03. - 17.03.06 jeweils von 8 – 14 Uhr vorgenommen.

In der ersten Woche wurden keine Änderungen zum üblichen in der Schule eingesetzten Reinigungs- und Lüftungsregime vorgenommen, um den üblichen Nutzungszustand zu erfassen. Ab der zweiten Woche wurde die Reinigung der Räume intensiviert.

Reinigung

die **reguläre Reinigung** an Schulen, entspricht der Reinigung in der ersten Woche, verläuft wie folgt:

Mo Boden kehren, Papierkorb leeren
Di: Boden, Tische und Stühle feucht wischen, Papierkorb leeren
Mi: *Schränke, Fensterbänke, Kreideleiste abwischen, Papierkorb leeren
Do: Boden, Tische und Stühle feucht wischen, Papierkorb leeren
Mi: *Schränke, Fensterbänke, Kreideleiste abwischen, Papierkorb leeren

*Vollgestellte Fensterbänke und Möbel werden nicht abgewischt

In der Regel kehren die Schüler den Boden fast täglich zum Schulschluss, besonders aber dann, wenn er sehr verdreckt ist wegen schlechten Wetters oder Basteln.

Während der **intensivierten Reinigung** in der 2. und 3. Messwoche wurde wie folgt verfahren:

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

Die Lehrerinnen hatten Fensterbänke und Möbeloberflächen so gut wie möglich frei geräumt, um eine optimale Reinigung zu ermöglichen.

In der dritten Woche sollte zusätzlich zu der – weiterhin beibehaltenen – intensivierten Reinigung vermehrt gelüftet werden. Die Vorgaben für die **intensivierte Lüftung** waren:

Vor Beginn der ersten Stunde sowie in jeder Pause über den kompletten Zeitraum sollen alle Fenster ganz geöffnet und die Oberlichter in Kippstellung gebracht werden - soweit es die Außentemperatur zulässt (bei niedrigen Außentemperaturen mindestens 5 min Stoßlüftung).

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:	TÜV: ortsfeste Messungen mit Gravikon PM 4 F, Fa. Ströhlein, mit Feinstaubmesskopf 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:	TÜV: Laserstaubmessgeräte der Fa. Grimm, Typ 1.106 und 1.107 Institut Fresenius: Dust Track 8520, TSI Incorporated,
Messprinzip:	90 ° Streulichtmessung
Auswertung:	Alveolengängiger Staub, PM-10, PM-2,5, PM-1,0
Kalibrierung:	TÜV: mit Hilfe eines Referenzgeräts, Latex 1 µm sowie Micro Dolomit DR80; retrospektive Kalibrierung anhand der gravimetrischen Ergebnisse Institut Fresenius: Werkskalibrierung 20.01.06

Messung der Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit

Die Messungen wurden von beiden Instituten 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:	TÜV: Multiwarn Typ X-am-7000, Fa. Dräger Institut Fresenius: 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:	TÜV: 2-Punkt-Kalibrierung mit Stickstoff (Nullpunkt) und Prüfgas, von Fa. Dräger Institut Fresenius: 2-Punkt-Kalibrierung kurz vor Untersuchungsbeginn; bzw. werksseitige Kalibrierung 1 Monat vor Untersuchungsbeginn
Nachweisgrenze:	CO ₂ 0,01 Vol%, d.h. 100 ppm

Außenbereichsschule A

Raumnummer/Klasse: Altbau, (1. OG.)

Größe: ca. 7 x 4,5 m

Raumausstattung:

- Bodenbelag: PVC/Linoleum-Boden
- Möblierung:
 - Tische und Stühle für 20 - 25 Kinder,
 - 1 Lehrerschreibtisch mit Stuhl,
 - 2 Computerschreibtische
 - Mehrere Regale/halbhohe und hohe Schränke
- offene Arbeitsmaterialien:
 - Es liegen offene Kartenmaterialien in den Räumen
 - Es liegen Bücher und Hefte in offenen Regalen
 - Es liegen Lehrmaterialien offen im Klassenraum

Anzahl der Lüftungsmöglichkeiten:

- Tür (T): 1
- Fenster (F): 4
- Oberlichter (OL): 4

Maximal erreichbarer Lüftungsindex: 7

Außenbereichsschule A

Raumnummer/Klasse: Neubau, (1. OG.)

Größe: ca. 7 x 4,5 m

Raumausstattung:

- Bodenbelag: PVC-Boden
- Möblierung:
 - Tische und Stühle für 20 - 25 Kinder,
 - 1 Lehrerschreibtisch mit Stuhl,
 - 2 Computerschreibtische
 - Mehrere Regale
- offene Arbeitsmaterialien:
 - Es liegen offene Kartenmaterialien in den Räumen
 - Es liegen Bücher und Hefte in offenen Regalen
 - Es liegen Lehrmaterialien offen im Klassenraum

Anzahl der Lüftungsmöglichkeiten:

- Tür (T): 1
- Fenster (F): 7
- Oberlichter (OL): keine

Maximal erreichbarer Lüftungsindex: 8

Innenstadtschule I

Raumnummer/Klasse: 38, 3.OG, 3b

Größe: 10,5 x 7 m

Raumausstattung: 19 Tische, 33 Holzstühle, 2 Polsterstühle, Akustikdeckenplatten

Bodenbelag: PVC-Bahnen

Möblierung: 3 Regale mit Materialien, 2 Holzschränke, 3 Computer mit Bildschirm

- offene Arbeitsmaterialien:

Viele offene Materialien, 26 offene Sammelordner, Bastelmaterialien, Bücher offen im Regal

Anzahl der Lüftungsmöglichkeiten:

- Tür (T): 1

- Fenster (F): 7

- Oberlichter (OL): 6

Maximal erreichbarer Lüftungsindex: 11

Innenstadtschule I

Raumnummer/Klasse: 15, 1.OG, 3b

Größe: 10,5 x 7 m

Raumausstattung: 22 Tische, 27 Holzstühle, Akustikdeckenplatten

Bodenbelag: PVC-Bahnen, alt, teilweise gebrochen

Möblierung: 2 Holzschränke, 2 große Schreibtische, 2 Computer mit Bildschirm,

1 Korbessel, 5 Polsterteile, 1 Wäscheleine mit Kinder- bzw. Babykleidung, 1 Garderobe mit Kinderjacken.

- offene Arbeitsmaterialien:

Viele offene Materialien auch auf Fensterbänken

Anzahl der Lüftungsmöglichkeiten:

- Tür (T): 1

- Fenster (F): 6

- Oberlichter (OL): 6

Maximal erreichbarer Lüftungsindex: 10

**Fotos aus der Innenstadtsschule I
Vor (oben) und während (unten) intensiverer Reinigung**

Raum 15, 1.OG, 200206:



Raum 15, 1.OG, 14.03.06:



3. Hintergrundbelastung: Feinstaub in der Außenluft – Messdaten der HLUG

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. Demnach gestaltete sich die Außenluftbelastung – während der Untersuchungen in den Schulen - wie folgt:

An den nicht verkehrsbezogenen Messstellen lag die Feinstaubbelastung in den ersten beiden Untersuchungswochen im Median bei ca. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und stieg in der dritten Untersuchungswoche auf über 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ an. Die Feinstaubbelastung an der verkehrsbezogenen Messstelle Friedberger Landstraße nahm im Median von 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in der ersten Woche auf 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in der zweiten Woche ab, um dann in der dritten Woche ebenfalls stark anzusteigen auf 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese Veränderungen der Außenluftbelastungen über die drei Untersuchungswochen müssen bei der nachfolgenden Bewertung der Messergebnisse in den Schulen berücksichtigt werden.

Bei der Gesamttendenz der Zunahme in der dritten Untersuchungswoche waren die Belastungen an den einzelnen Tagen größeren Schwankungen unterworfen (Abb. 2 a-c)

Abb. 1

Feinstaubbelastung an den Messstellen Frankfurt Ost, Frankfurt Höchst und Friedberger Landstraße während der drei Untersuchungswochen – Messungen der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie; Halbstundenwerten von 8-14 Uhr

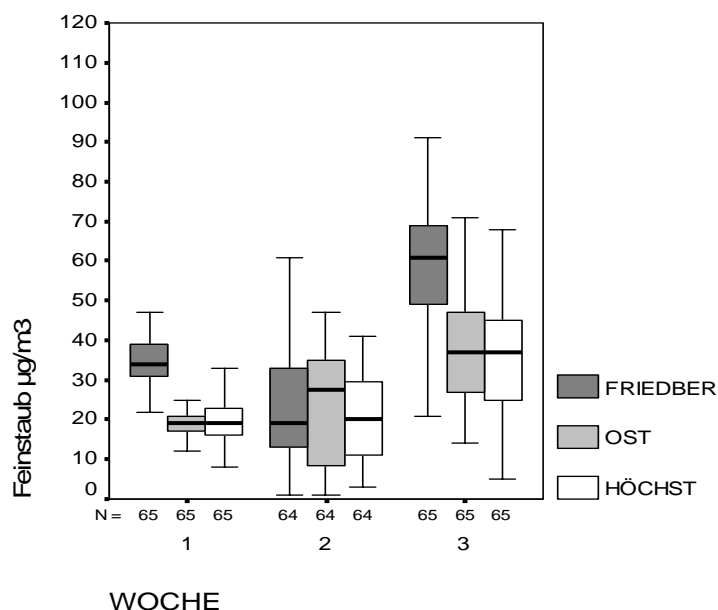
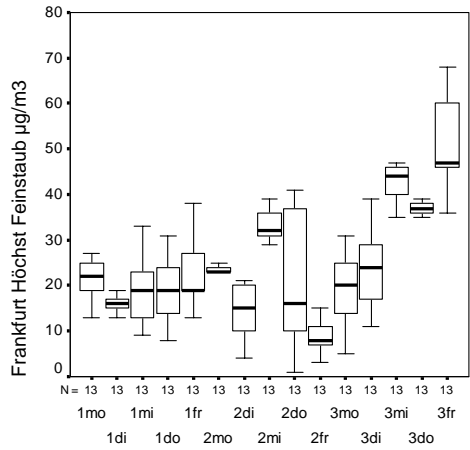
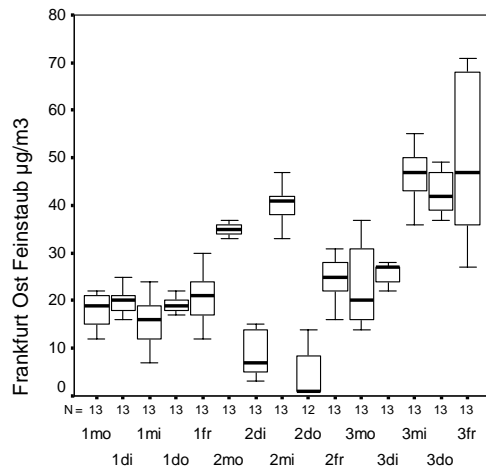


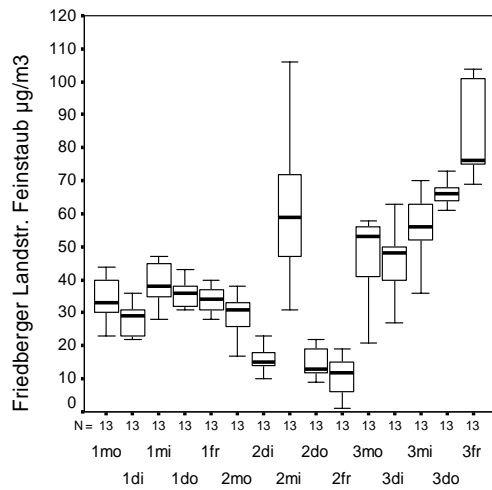
Abb. 2 a-c
Tagesdaten der Feinstaubbelastung an den Messstellen Frankfurt Höchst, Frankfurt Ost und Friedberger Landstraße während der drei Untersuchungswochen – Messungen der Hessischen Landesanstalt für Umwelt und Geologie jeweils 8-14 Uhr



TAG



TAG



TAG

4. Ergebnisse der Untersuchungen

4. 1. Feinstaub in der Außen- und in der Raumluft - Gravimetrie

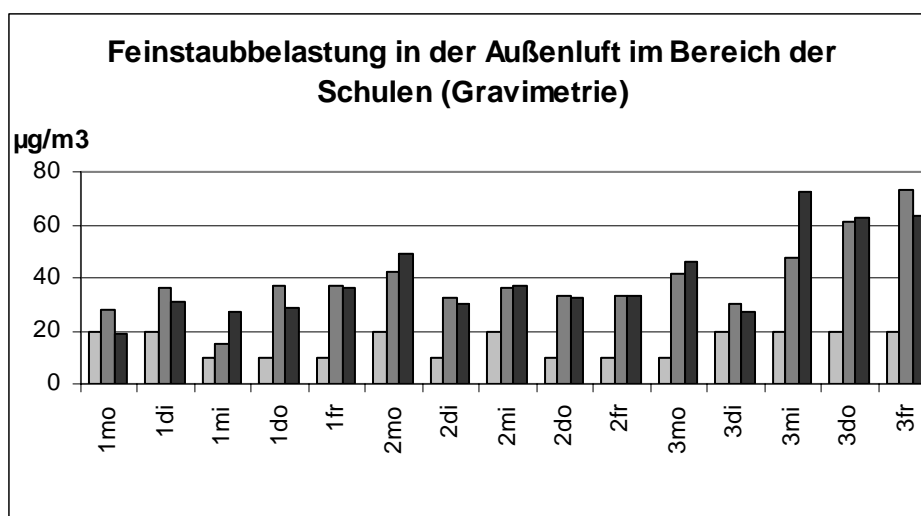
Die bei der beauftragten Untersuchung parallel zu den Raumluftuntersuchungen gemessenen Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft (Gravimetrie) zeigen die gleiche Entwicklung über die drei Untersuchungswochen wie die Daten der HLUG (Laserverfahren). Gemittelt an beiden Schulen ergibt sich eine Zunahme über die Wochen von 22 µg/m³ in der ersten Woche auf 35 µg/m³ in der dritten Woche.

Bei getrennter Betrachtung der beiden Schulen zeigt sich, dass die Außenluftbelastung an der Außenbereichsschule A in der ersten Woche etwa halb so hoch wie in der Innenstadtsschule I liegt und über alle Wochen im niedrigen Bereich bleibt. Im Bereich der Innenstadtsschule I steigt die schon in der ersten Woche vergleichsweise hohe Außenluftbelastung bis zur dritten Woche nochmals deutlich an, von 29 auf 52 µg/m³.

Tab. 1
Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft der untersuchten Schulen – gravimetrische Untersuchungen – im Wochenvergleich

	1. Woche	2. Woche	3. Woche	2.+3. Woche
Alle Schulen	21,8 ± 10,2 10 – 20 - 37	25,0 ± 12,4 10 – 25 – 49	35,3 ± 21,2 10 – 24 - 73	30,1 ± 17,9 10 – 24 - 73
Außenbereichsschule A Außenluft µg/m³	14,0 ± 5,5 10 – 10 - 20	14,0 ± 5,5 10 – 10 – 20	18,0 ± 4,5 10 – 20 - 20	16,0 ± 5,0 10 – 20 - 20
Innenstadtsschule I Außenluft µg/m³	29,5 ± 7,8 15 – 30 - 37	36,0 ± 5,7 30 – 33 - 49	52,5 ± 16,5 27 – 55 - 73	44,3 ± 14,7 27 – 39 - 73

Abb. 3
Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft der untersuchten Schulen – gravimetrische Untersuchungen – Tagesverlauf – hellgraue Balken Außenbereichsschule A, mittelgraue und schwarze Balken Innenbereichsschule I



Die Ergebnisse der Raumlufthuntersuchungen mittels gravimetrischer Messung auf Feinstaub in den vier Klassenräumen sind in Tab. 2 und 3 zusammengestellt. Die Messungen wurden jeweils von 8-14 Uhr durchgeführt und so die gemittelte Feinstaubkonzentration während dieser Zeit gemessen.

Betrachtet man alle Schulen zusammen, nimmt die Feinstaubkonzentration in den Klassenräumen von der ersten zur zweiten Woche signifikant ab: Mittelwerte 79 zu 57 µg/m³, Medianwerte 75 zu 59 µg/m³ (p < 0,001). Die Abnahme von der ersten bis zur dritten Woche ist geringer – Abnahme auf 70 µg/m³ im Mittelwert und 64 µg/m³ im Medianwert, aber immer noch signifikant (p < 0,005) (Tab. 2).

Auch bei Betrachtung der Unterschiede zwischen der Phase normale Reinigung und vermehrte Reinigung (d.h. 2. + 3. Woche) ist die Abnahme der Feinstaubbelastung über alle Schulen gemittelt signifikant (Tab. 3; Abb. 4). Dies ist im wesentlichen auf die Abnahme der in der ersten Woche sehr hohen Feinstaubbelastung im Altbau-Klassenraum der Außenbereichsschule zurückzuführen, während die Unterschiede zwischen den Phasen normale und vermehrte Reinigung (1. vs 2.+3. Woche) in den anderen Schulen nicht signifikant war; diese Schulen hatten ursprünglich auch geringere Feinstaubbelastungen aufgewiesen.

Grundsätzlich muss die Möglichkeit in betracht gezogen werden, dass der Wiederanstieg der Feinstaubbelastung in der dritten Untersuchungswoche auch durch die in dieser Zeit höhere Außenluftbelastung mit verursacht war, weshalb der in der zweiten Untersuchungswoche offenkundige Effekt der intensivierten Reinigung dann nicht mehr so gut sichtbar war.

Nach Angaben der Schulhausmeister wurde die intensivierte Reinigung in allen Klassenräumen wie vorgesehen durchgeführt. Vor der zweiten Woche wurden darüber hinaus möglichst viele „Staubfänger“ entfernt und Ablageflächen – insbesondere auch Fensterbänke – frei geräumt und gewischt.

Tab. 2
Messergebnisse Feinstaub – Gravimetrie µg/m³ – im Wochenvergleich
Alle Schulen sowie einzelne Schulen / Klassenräume

	1. Woche	2. Woche	3. Woche		2.+3. Woche
Alle Schulen					
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	79 ± 22 54 – 75 - 150	57 ± 11 35 – 59 - 79	70 ± 15 42- 64 - 105		64 ± 15 35 – 63 - 105
Außenbereichsschule AB					
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	106 ± 26 80 – 100 - 150	61 ± 6 53 – 61 - 70	75 ± 13 63 – 72 - 90		68 ± 12 53 – 63 - 90
Außenbereichsschule NB					
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	74 ± 15 60 – 70 - 90	58 ± 15 35 – 61 - 72	76 ± 12 63 – 81 - 90		67 ± 16 35 – 66 - 90
Innenstadtschule R 15					
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	73 ± 7 62 – 74 - 81	59 ± 12 49 – 57 - 79	71 ± 19 57 – 65 - 105		65 ± 16 49 – 61 - 105
Innenstadtschule R 38					
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	62 ± 10 54 – 58 - 75	51 ± 12 38 – 50 - 66	57 ± 9 42 – 58 - 67		54 ± 11 38 – 58 - 67

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

Tab. 3

Messergebnisse Feinstaub – Gravimetrie – im Vergleich normale versus intensivierte Reinigung; Alle Schulen sowie einzelne Schulen / Klassenräume

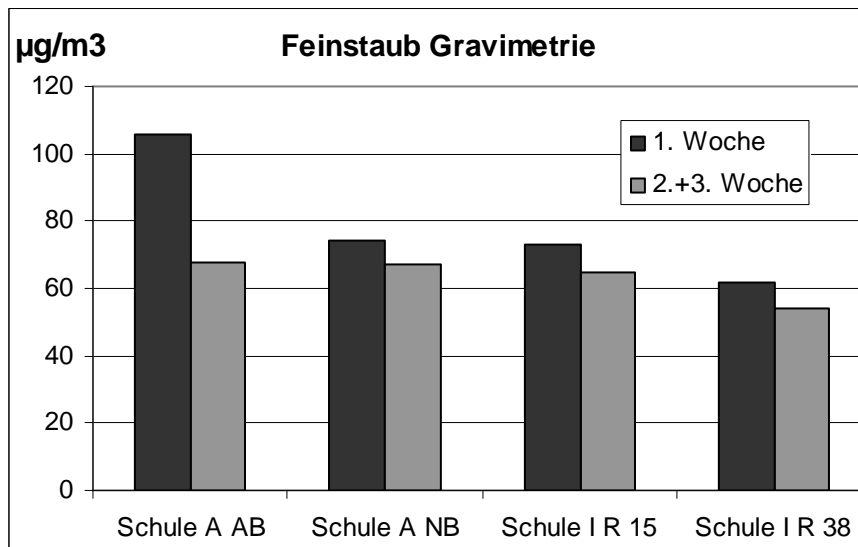
	Reinigung normal	Reinigung intensiviert	Signifikanz
	1. Woche	2.+3 Woche	
Alle Schulen			
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	79 ± 22 54 – 75 - 150	64 ± 15 35 – 63 - 105	Sign.
Außenbereichsschule AB			
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	106 ± 26 80 – 100 - 150	68 ± 12 53 – 63 - 90	Sign.
Außenbereichsschule NB			
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	74 ± 15 60 – 70 - 90	67 ± 16 35 – 66 - 90	n.s.
Innenstadtschule R 15			
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	73 ± 7 62 – 74 - 81	65 ± 16 49 – 61 - 105	n.s.
Innenstadtschule R 38			
Staub (Gravimetrie) µg/m ³	62 ± 10 54 – 58 - 75	54 ± 11 38 – 58 - 67	n.s.

Mittelwert ± Standardabweichung

Minimalwert – *Median (mittlerer Wert)* – Maximalwert

Abb. 4

Messergebnisse Feinstaub – Gravimetrie – im Vergleich normale Reinigung (1. Woche) versus intensivierte Reinigung (2. + 3. Woche)



4. 2. Feinstaub in der Raumluft - Laserverfahren

Während bei der gravimetrischen Messung die Feinstaubbelastung gemittelt über den Sammelzeitraum (8-14 Uhr) gemessen wird, ist mit dem Laserverfahren auch die Betrachtung kleinerer Zeitabstände möglich, sodass hier die kurzfristigen Änderungen über Minuten und mögliche Einflussfaktoren gut betrachtet werden können.

Das Laserverfahren misst Partikelzahlen definierter unterschiedlicher Größen online. Allerdings kann aus den mit dem Laserverfahren gemessenen Partikelzahlen nicht direkt auf die Feinstaubkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ umgerechnet werden, da sich die Stäube unterscheiden können. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, die Lasermessungen im Hinblick auf die jeweils vorkommenden spezifischen Staubgewichte zu kalibrieren. In der Außenbereichsschule A wurde diese Kalibrierung von dem Institut vor Übermittlung der Laserbefunde an den Auftraggeber vorgenommen, in der Innenstadtschule I wurde die Kalibrierung nachträglich anhand der parallel gravimetrisch bestimmten Feinstaubdaten durchgeführt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die Feinstaubkonzentrationen alle 5 min protokolliert. Somit liegen hier nicht nur wie bei der Gravimetrie ein Messwert pro Tag vor sondern (bis zu) 73 Messwerte über 5 min, weshalb hier auch unterschiedliche Belastungen innerhalb eines Tages, Schwankungen, Mittelwerte und weitere statistische Maße berechnet und dargestellt werden können.

Betrachtet man die Wochenmittelwerte aller Schulen so zeigt sich - wie bei der Gravimetrie - die Abnahme von der ersten zur zweiten Woche und dann wieder eine leichte Zunahme in der dritten Woche, wobei auch in der dritten Woche die Feinstaubbelastung unter der der ersten Woche liegt. Betrachtet man einzelne Schulen, so ergibt sich ein unterschiedliches Bild, wobei insbesondere der Klassenraum im Neubau der Außenbereichsschule A auffällt, mit gleich bleibender Belastung

Tab. 4

Feinstaub (Laserverfahren) in allen Schulen, sowie differenziert nach einzelnen Schulen / Klassenräumen – aggregiert in Wochen

Woche 1 (normal), 2 (vermehrte Reinigung), 3 (vermehrte Reinigung und intensiviertes Lüften)

	1. Woche	2. Woche	3. Woche
Alle Schulen			
Staub (Laserverfahren) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	86 \pm 116 7 – 60 – 1090	57 \pm 80 4 – 45 – 1060	72 \pm 79 11 – 63 - 1280
Außenbereichsschule AB			
Staub (Laserverfahren) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	134 \pm 213 22 – 58 - 1090	71 \pm 146 4 – 38 - 1060	95 \pm 144 32 – 67 – 1280
Außenbereichsschule NB			
Staub (Laserverfahren) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	56 \pm 22 15 – 51 – 168	51 \pm 22 14 – 51 – 120	77 \pm 27 34 – 75 - 175
Innenstadtschule R 15			
Staub (Laserverfahren) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	87 \pm 50 7 – 79 – 285	53 \pm 37 4 – 52 – 240	61 \pm 40 11 – 55 - 475
Innenstadtschule R 38			
Staub (Laserverfahren) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68 \pm 35 13 – 62 – 234	52 \pm 29 6 – 50 – 151	53 \pm 29 12 – 49 - 197

Mittelwert \pm Standardabweichung

Minimalwert – *Median* (mittlerer Wert) – Maximalwert

während der ersten zwei Untersuchungswochen und anschließendem Anstieg. Diese Besonderheit zeigt sich auch bei Vergleich der Untersuchungsphase „normale Reinigung“ (erste Woche) mit der Phase „verstärkte Reinigung“ (zweite und dritte Woche). Auch hier sind in den Schulen insgesamt und in den Klassenräumen der Innenstadtsschule und dem Altbauklassenraum der Außenbereichsschule A eine signifikante Verminderung der Feinstaubbelastung zu beobachten, während im Neubau-klassenraum der Außenbereichsschule A ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen ist.

Tab. 5

Feinstaub (Laserverfahren) in allen Schulen, sowie differenziert nach einzelnen Schulen / Klassenräumen – aggregiert in Wochen - Woche 1 (normal), 2 + 3 (vermehrte Reinigung)

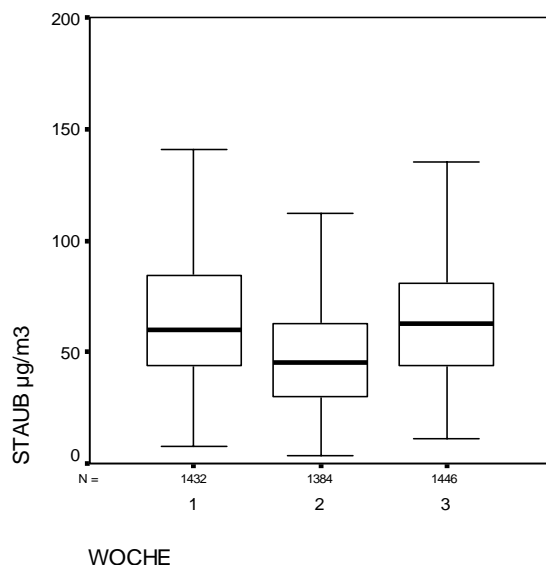
	Reinigung normal	Reinigung intensiviert	Signifikanz
	1. Woche	2.+ 3. Woche	
Alle Schulen			
Staub (Laserverfahren) µg/m ³	86 ± 116 7 – 60 – 1090	64 ± 80 4 – 54 – 1280	Sign.
Außenbereichsschule AB			
Staub (Laserverfahren) µg/m ³	134 ± 213 22 – 58 - 1090	83 ± 146 4 – 51 – 1280	Sign.
Außenbereichsschule NB			
Staub (Laserverfahren) µg/m ³	56 ± 22 15 – 51 – 168	64 ± 28 14 – 62 – 175	Sign. Zunahme!
Innenstadtsschule R 15			
Staub (Laserverfahren) µg/m ³	87 ± 50 7 – 79 – 285	57 ± 39 4 – 53 – 474	Sign.
Innenstadtsschule R 38			
Staub (Laserverfahren) µg/m ³	68 ± 35 13 – 62 – 234	53 ± 29 6 – 50 – 197	Sign.

Mittelwert ± Standardabweichung

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert

Abb. 5

Feinstaubkonzentrationen in der Raumluft (Laserverfahren) in allen Schulen – aggregiert in Wochen - Woche 1 (normal), 2 + 3 (vermehrte Reinigung)



Bei Betrachtung der Medianwerte und weiterer statistischer Lagemaße aller Schulen insgesamt (Tab. 4 und 5; P 25 und P 75: Abb. 5) ist im Median (mittlerer Wert, d.h. 50 % der Messwerte liegen unter und 50 % liegen über diesem Wert) keine Tendenz zur Abnahme über die Wochen feststellbar.

Abbildungen 6 a-d zeigen die Wochenergebnisse für die einzelnen Schulen.

In Abbildungen 7 a-d sind die Ergebnisse der einzelnen Tage in den verschiedenen Klassenräumen dargestellt. Es ist erkennbar, dass in allen Klassenräumen sehr unterschiedliche Ergebnisse gemessen wurden.

Im Altbau der Außenbereichsschule A traten in der ersten Woche am Dienstag und Mittwoch sowie in der zweiten Woche am Mittwoch extrem hohe Feinstaubbelastungen auf, darüber hinaus ist eine Zunahme über die einzelnen Tage der dritten Messwoche zu sehen. Laut Angaben der Schule wurde zu dieser Zeit auch häufiger mit Wolle gearbeitet.

Im Neubau der Außenbereichsschule A lag die mittlere Feinstaubkonzentration in den ersten beiden Wochen weitgehend gleich bleibend im Bereich $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und stieg – wie im Altbau - in der dritten Untersuchungswoche täglich an, bis auf über $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieser Anstieg geht parallel mit der von der HLUG gemessenen Belastung der Außenluft (S. 9, 10) und könnte also Ergebnis einer höheren Außenluftbelastung sein. Dagegen spricht, dass bei den gravimetrischen Messungen in der Außenluft an der Außenbereichsschule A eine Zunahme der Außenluftbelastung in der dritten Untersuchungswoche nicht feststellbar war.

In beiden Räumen der Innenstadtsschule I ist eine Tendenz zu höheren Feinstaubkonzentrationen in der ersten Woche erkennbar und geringere Konzentrationen an den Tagen der beiden folgenden Wochen. Die in den Klassenräumen der Außenbereichsschule A festzustellende zunehmende Feinstaubkonzentration in der dritten Untersuchungswoche fehlt hier völlig - dies obwohl nicht nur die seitens der HLUG gemessene Feinstaubkonzentration in der Außenluft in der dritten Woche anstieg sondern auch die auf dem Gelände der Innenstadtsschule I gravimetrisch bestimmte Außenluftbelastung deutlich zunahm.

Vor diesem Hintergrund wurden weitere mögliche Einflussfaktoren auf die Feinstaubkonzentration in der Raumluft überprüft.

Abb. 6

Feinstaubkonzentrationen (Laserverfahren) in Klassenräumen – Wochen
Außenbereichsschule A - Altbau und Neubau (oben)
Innenstadtschule I - R 15 und R 38 (unten)

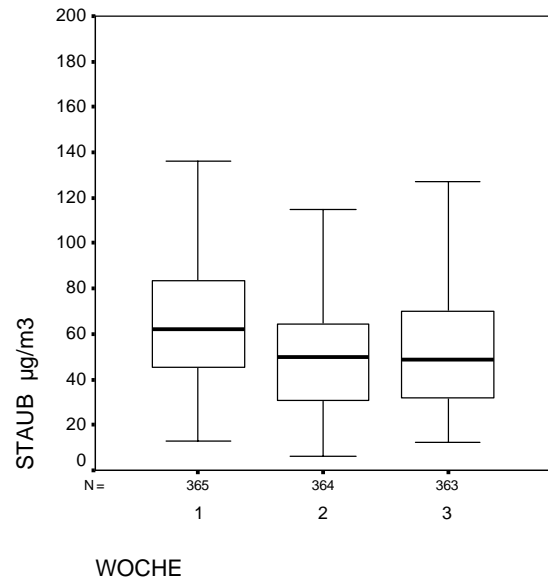
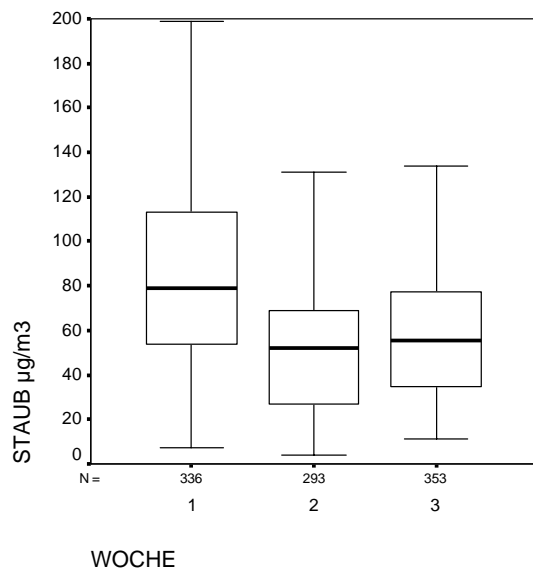
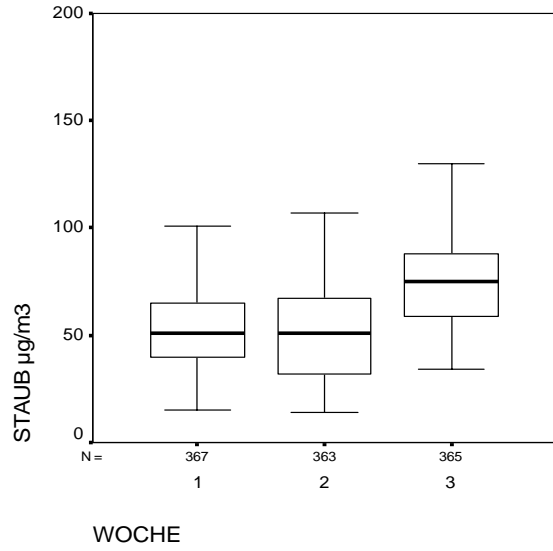
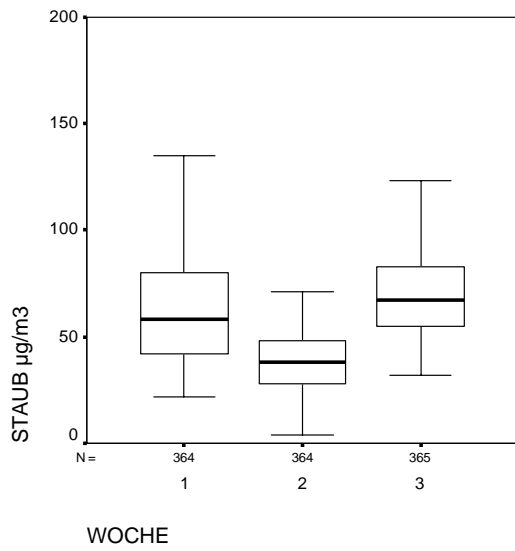
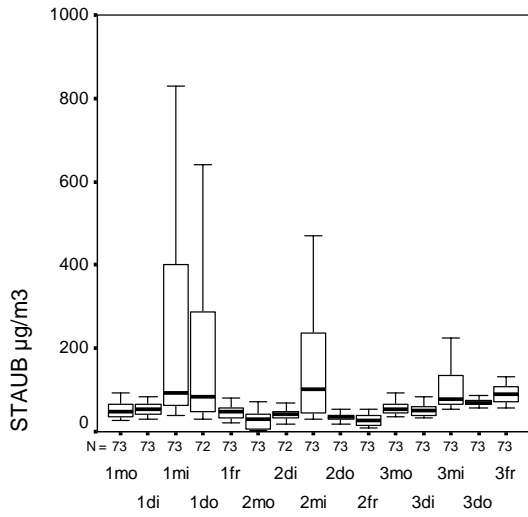
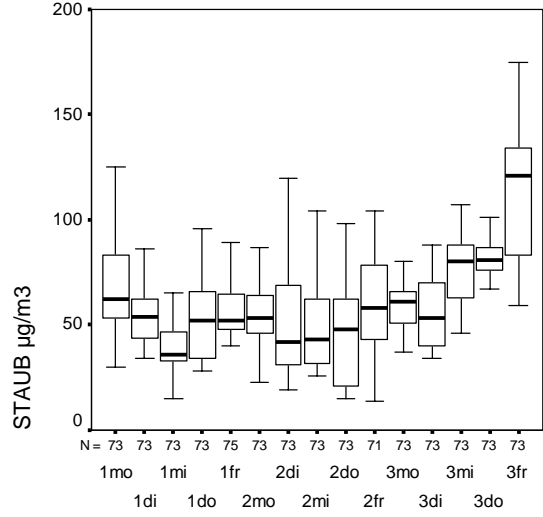


Abb. 7

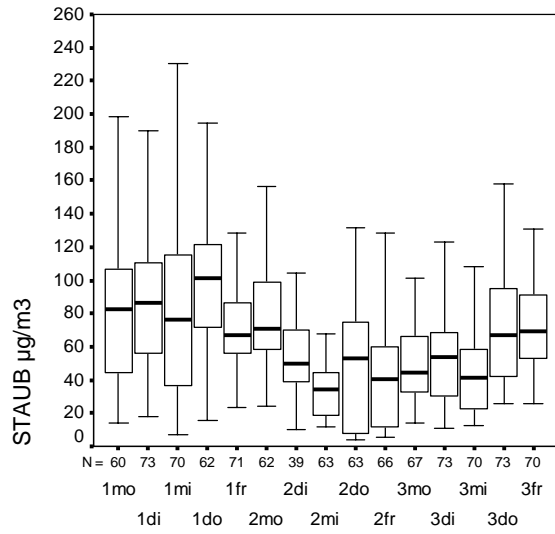
Feinstaubkonzentrationen (Laserverfahren) in Klassenräumen – Tage
Außenbereichsschule A - Altbau und Neubau (oben)
Innenstadtschule I - R 15 und R 38 (unten)



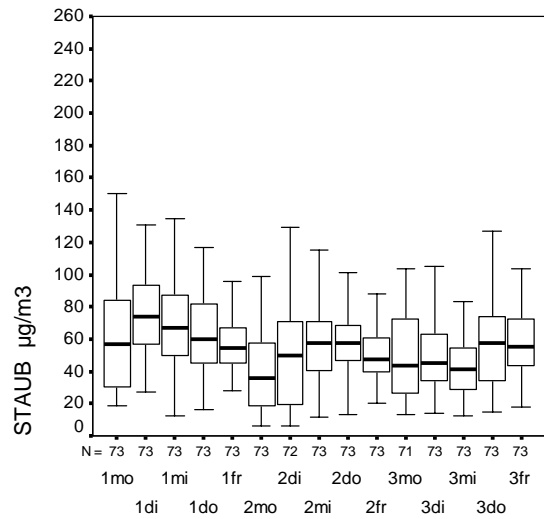
TAGE



TAGE



ZEIT



ZEIT

4. 3. Kohlendioxid (CO₂) in der Raumluft

Vorgabe bei der Untersuchung war – neben der intensivierten Reinigung ab der zweiten Untersuchungswoche - während der ersten beiden Wochen wie immer („normal“) zu lüften und in der dritten Woche eine intensivierte Lüftung durchzuführen (s. Methodenteil). Bei der Betrachtung über alle Schulen scheint dies auch so befolgt worden zu sein: die CO₂-Konzentrationen im Wochenmittel waren in den ersten beiden Wochen durchschnittlich 1437 ppm und 1479 ppm und fielen in der dritten Woche auf 1051 ppm ab. Gleichzeitig nahm der Lüftungsindex von 1,3 in den ersten beiden Wochen auf 1,6 in der dritten Woche zu. Weitere potentielle Einflussfaktoren wie Anzahl der Personen im Raum und Aktivitäten im Raum blieben über die gesamte Untersuchungszeit weitgehend konstant (Tab. 6)

Auch bei den Kohlendioxidkonzentrationen sind wieder deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Schulen über die Wochen zu erkennen. Im Altbau-Klassenraum der Außenbereichsschule A nimmt die durchschnittliche CO₂-Konzentration von mehr als 2700 ppm in den ersten beiden Wochen auf die Hälfte ab bei gleichzeitig deutlicher Steigerung des Lüftungsindex von 0,2 auf 0,7. Allerdings ist die CO₂-Konzentration über alle Woche insgesamt extrem hoch und der Lüftungsindex auch in der dritten Woche mit „verstärkter Lüftung“ noch extrem gering.

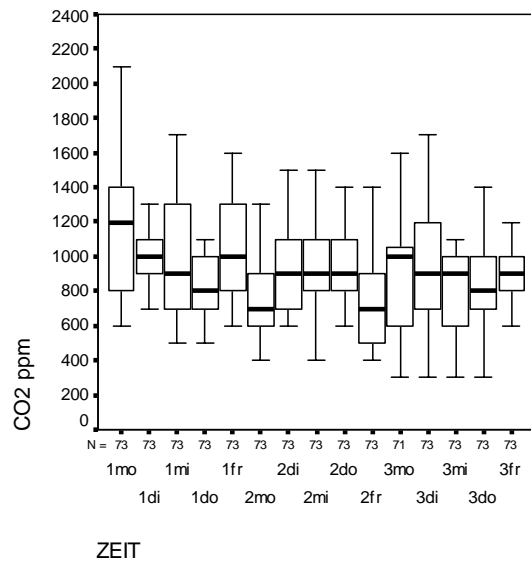
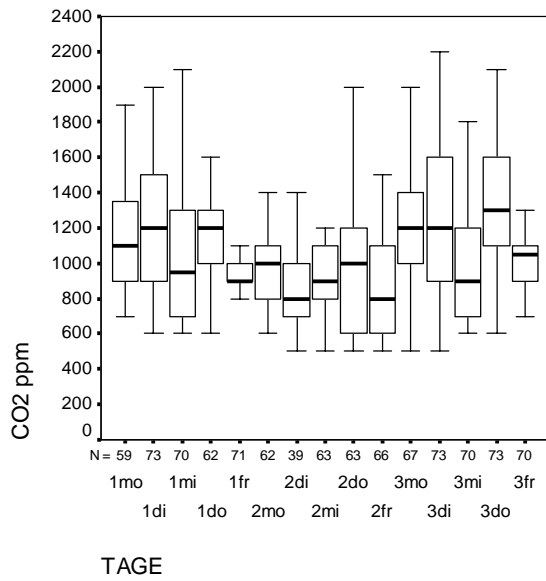
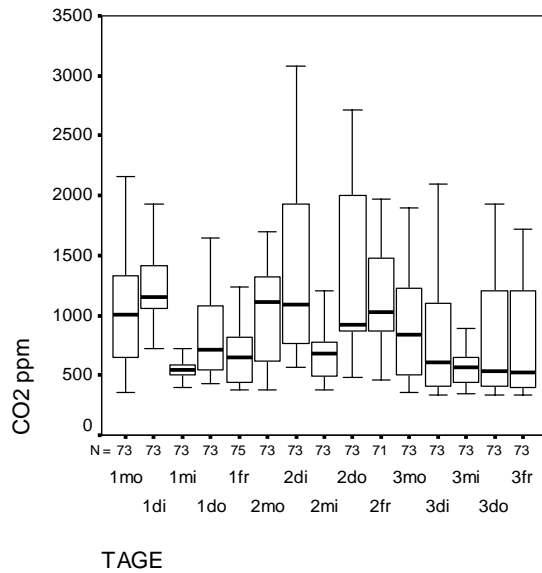
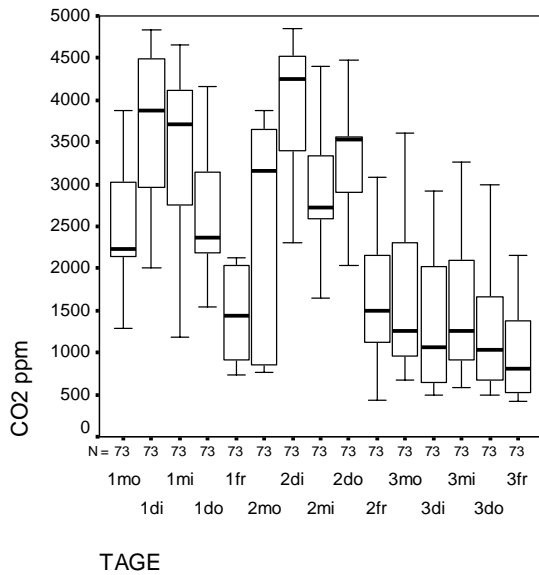
Im Neubau-Klassenraum der Außenbereichsschule A nimmt die CO₂-Konzentration im Wochenmittel in der zweiten Woche deutlich zu und in der dritten Woche wieder ab, sie liegt dann geringfügig unter der Ausgangskonzentration der ersten Woche. Der durchschnittliche Lüftungsindex unterscheidet sich nicht in den ersten beiden Wochen und steigt in der dritten Woche auf 1. Bei weiterer Betrachtung wird erkennbar, dass der Klassenraum in der überwiegenden Zeit in der ersten Woche nicht genutzt war, erkennbar an den Medianwerten für die Anzahl der Personen im Raum (n=1) und für den Aktivitätsindex (1, d.h. Pause oder Klasse leer). Erst in der dritten Woche wird der Klassenraum intensiver genutzt, jetzt halten sich im Median 13 Personen im Raum bei Unterricht auf. Dies erklärt, warum in der dritten Woche trotz deutlich verbesserter Lüftung die CO₂-Konzentration vergleichbar hoch ist wie in der ersten Woche bei sehr viel geringerer Lüftung.

In der Innenstadtsschule I Raum 15 nimmt die CO₂-Konzentration in der zweiten Woche im Vergleich mit der ersten Woche ab, bei gleichzeitig deutlich höherem durchschnittlichem Lüftungsindex. In der dritten Woche steigt die CO₂-Konzentration wieder an, sie übersteigt sogar die Konzentration in der ersten Woche. Bei ansonsten gleich bleibenden Parametern für Personen im Raum bzw. Aktivitätsindex ist dies auf eine deutlich geringere Lüftung in der dritten Woche zurückzuführen. Aus der Schule wurde mitgeteilt, dass in diesem Raum in der dritten Woche wegen der kalten Witterung die Lüftungsempfehlungen nicht umgesetzt wurden. - Im Raum 38 der Innenstadtsschule I ist eine geringe Abnahme der CO₂-Konzentration ab der zweiten Woche zu verzeichnen, bei zunehmend besserer Lüftung und abnehmender Anzahl der Personen im Raum.

In Abb. 8 sind die CO₂-Konzentrationen in den jeweiligen Klassenräumen über die einzelnen Untersuchungstage nochmals graphisch dargestellt. Erkennbar ist, dass die CO₂-Konzentrationen insgesamt sehr hoch sind und die empfohlenen Richtwerte für den Innenraum in der Regel deutlich überschritten werden. Im Altbau der Außenbereichsschule A wird sogar den Bereich des MAK-Werts nahezu erreicht.

Abb. 8

Kohlendioxidkonzentrationen in Klassenräumen ppm – einzelne Tage
Außenbereichsschule A - Altbau und Neubau (oben)
Innenstadtschule I - R 15 und R 38 (unten)



Tab. 6

Feinstaub und Kohlendioxidkonzentrationen sowie Anzahl der Personen im Raum, Lüftungs- und Aktivitätsindex in allen Schulen sowie differenziert nach einzelnen Klassenräumen

	1. Woche	2. Woche	3. Woche
Alle Schulen			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	86 \pm 116 7 – 60 – 1090	57 \pm 80 4 – 45 – 1060	72 \pm 79 11 – 63 – 1280
CO2 ppm	1437 \pm 994 360 – 1100 – 4840	1479 \pm 1081 380 – 1000 – 4850	1051 \pm 559 300 – 1000 – 3610
Lüftungsindex	1,3 \pm 1,1 0 – 1 – 5	1,3 \pm 1,5 0 – 1 – 7	1,6 \pm 1,9 0 – 1 – 8,5
Personen n	12,4 \pm 10,2 0 – 16 – 28	12,5 \pm 11,1 0 – 14 – 32	12,2 \pm 10,4 0 – 15 – 29
Aktivitätsindex	1,8 \pm 0,9 1 – 2 – 4	1,9 \pm 1,1 1 – 2 – 4	1,9 \pm 1,1 1 – 2 – 4
Außenbereichsschule A -AB			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	134 \pm 213 22 – 58 – 1090	71 \pm 146 4 – 38 – 1060	95 \pm 144 32 – 67 – 1280
CO2 ppm	2761 \pm 1071 730-2560-4840	2861 \pm 1153 440 – 3010 – 4850	1347 \pm 755 420 – 1120 – 3610
Lüftungsindex	0,2 \pm 0,4 0 – 0 – 2	0,3 \pm 0,6 0 – 0 – 4	0,7 \pm 1,7 0 – 0 – 7
Personen n	12,1 \pm 10,9 0 – 13 – 28	13,4 \pm 12,7 1 – 6 – 32	12,4 \pm 11,3 1 – 15 – 29
Aktivitätsindex	1,7 \pm 0,8 1 – 2 – 4	1,7 \pm 0,9 1 – 2 – 4	1,7 \pm 0,9 1 – 2 – 4
Außenbereichsschule A- NB			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	56 \pm 22 15 – 51 – 168	51 \pm 22 14 – 51 – 120	77 \pm 27 34 – 75 – 175
CO2 ppm	879 \pm 422 360 – 810 – 2650	1152 \pm 585 380 – 940 – 3080	827 \pm 519 340 – 600 – 2600
Lüftungsindex	0,2 \pm 0,5 0 – 0 – 3,5	0,2 \pm 0,4 0 – 0 – 1	1,0 \pm 2,2 0 – 0 – 7
Personen n	9,1 \pm 8,9 0 – 1 – 22	11,2 \pm 10,4 1 – 5 – 26	10,9 \pm 9,6 1 – 13 – 24
Aktivitätsindex	1,5 \pm 0,7 1 – 1 – 4	1,8 \pm 1,0 1 – 2 – 4	1,8 \pm 1,0 1 – 2 – 4
Innenstadtschule I - R 15			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	87 \pm 50 7 – 79 – 285	53 \pm 37 4 – 52 – 240	61 \pm 40 11 – 55 – 475
CO2 ppm	1081 \pm 321 500 – 1000 – 2100	900 \pm 307 500 – 900 – 2000	1164 \pm 374 500 – 1100 – 2200
Lüftungsindex	1,9 \pm 1,1 0 – 1,5 – 5,5	2,9 \pm 1,7 0 – 2,5 – 7	1,9 \pm 1,5 0 – 1 – 8,5
Personen n	14,5 \pm 10,0 0 – 22 – 23	13,8 \pm 10,9 0 – 21 – 24	13,4 \pm 10,4 0 – 20 – 25
Aktivitätsindex	2,2 \pm 1,2 1 – 2 – 4	2,1 \pm 1,2 1 – 2 – 4	2,1 \pm 1,2 1 – 2 – 4
Innenstadtschule I - R 38			
Staub $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68 \pm 35 13 – 62 – 234	52 \pm 29 6 – 50 – 151	53 \pm 29 12 – 49 – 197
CO2 ppm	1002 \pm 299 500 – 900 – 1500	873 \pm 257 400 – 800 – 1500	869 \pm 288 300 – 900 – 1700
Lüftungsindex	1,9 \pm 0,9 0 – 2 – 4	2,0 \pm 1,0 0 – 2 – 5	2,8 \pm 1,5 0 – 3 – 6,5
Personen n	13,9 \pm 10,1 0 – 19 – 24	12,0 \pm 12,2 0 – 14 – 24	12,2 \pm 9,9 0 – 15 – 24
Aktivitätsindex	1,8 \pm 0,7 1 – 2 – 4	2,2 \pm 1,2 1 – 2 – 4	2,2 \pm 1,2 1 – 2 – 4

Mittelwert \pm Standardabweichung; Minimalwert – Median (*mittlerer Wert*) – Maximalwert

4.4. Überprüfung möglicher Einflussfaktoren auf die Konzentration an Feinstaub und CO₂ in Klassenräumen - Vermehrte Reinigung und intensiviert Lüftung

Parallel zu den Messungen der Feinstaubkonzentration in den Klassenräumen wurden weitere Parameter untersucht: Kohlendioxid, Lüftungssituation, Temperatur, Feuchte, Personen im Raum, Aktivität (s. Methodenteil). Auf die Darstellung der Daten zu Temperatur und Luftfeuchte wird hier zunächst verzichtet. Beide Parameter steigen mit der Anzahl der Personen im Raum und fallen mit zunehmender Lüftung. Bezüglich der anderen Daten wird auf Tab. 6 verwiesen.

Die Zusammenhangsanalysen (bivariate Korrelationen) zeigen - über alle Schulen und die Messserie insgesamt - hochsignifikante Korrelationen zwischen der Feinstaubkonzentration und der CO₂-Konzentration, der Anzahl Personen im Raum, den Aktivitäten im Raum und eine signifikant negative Korrelation zu der Reinigungsintensität, d.h. bei zunehmender Reinigung ergibt sich eine signifikante Abnahme der Feinstaubbelastung im Raum. Diese signifikant negative Korrelation zur Reinigungsintensität bleibt auch nach Korrektur (Adjustierung) für die anderen signifikanten Einflussfaktoren bestehen (Tab. 7). D.h. die Reinigung der Räume ist zwar im Hinblick auf die Feinstaubbelastung im Klassenraum „nur“ ein Einflussfaktor unter anderen - und durchaus nicht der stärkste -, er bleibt aber auch nach Berücksichtigung und Adjustierung für die anderen Faktoren ein signifikanter Einflussfaktor. Dies zeigt sich sowohl bei Betrachtung aller untersuchten Klassenräume insgesamt als auch bei Betrachtung der einzelnen Klassenräume.

Demgegenüber sind die Korrelationen zwischen der Feinstaubkonzentration und intensivierter Lüftung (dritte Woche, verglichen mit erster und zweiter Woche) niedriger; sie erreichen bei allen Schulen insgesamt gerade noch das Signifikanzniveau. Dies ist angesichts der unterschiedlich vorgenommenen Lüftung (Lüftungsindex) und der oben beschriebenen weiteren Einflussfaktoren auch plausibel. Die Hypothese, dass die Feinstaubkonzentration in Klassenräumen durch vermehrte Lüftung gut vermindert werden kann, ist dadurch nicht widerlegt. Darüber hinaus vermindert die Lüftung - wie in zahlreichen Studien bestätigt - die Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft; dies zeigen auch die hier ermittelten Daten: Zwischen der Kohlendioxidkonzentration im Raum und der Anzahl sowie der Aktivität der Raumnutzer besteht erwartungsgemäß ein hochsignifikant positiver und zu der Lüftung (dem Lüftungsindex) ein hochsignifikant negativer Zusammenhang (Tab. 7).

Tab. 7

Zusammenhangsanalysen zwischen der Feinstaubbelastung im Raum und der CO₂-Konzentration, der Anzahl der Personen im Raum, der Lüftung und der Aktivitäten im Raum und der Intensität der Reinigung und Lüftung (Wochen)

Korrelationen	Alle Schulen	Außenbereichsschule A		Innenstadtschule I	
		Altbau	Neubau	Raum 15	Raum 38
Feinstaub zu					
CO ₂	0,3047 ***	0,0912 **	0,3110 ***	0,5801 ***	0,5266 ***
Lüftung	0,0312 *	-0,0063 ns	0,2032 ***	-0,1845 ***	0,1767 ***
Personen	0,3560 ***	0,0131 ns	0,4797 ***	0,4195 ***	0,5410 ***
Aktivität	0,4056 ***	0,2118 ***	0,5239 ***	0,4769 ***	0,4307 ***
Woche Reinigung	-0,1304 ***	-0,1247 ***	0,1683 ***	-0,3192 ***	-0,2221 ***
Reinigung					
Part. Korrelation, kontrolliert für Personen, Aktivität, Lüftung und CO ₂	-0,1035 ***	-0,0891 **	-0,0804 **	-0,3516 ***	-0,2398 ***
Woche Lüftung	0,132 ***	0,351 ***	0,432 ***	- 0,103***	-0,099**
Lüftung					
Part. Korrelation, kontrolliert für Personen, Aktivität, Woche Reinigung	0,0693**	0,0591 ns	0,4715 ***	0,0903 ns	0,0270 ns
CO₂ zu					
Lüftung	-0,2941***	-0,2150 ***	-0,1112 ***	-0,4456 ***	-0,1763 ***
Personen	0,4709***	0,2907 ***	0,6726 ***	0,4324 ***	0,4947 ***
Aktivität	0,3024***	0,2839 ***	0,6373 ***	0,2577***	0,1986 ***

4. 5. Feinstaub- und Kohlendioxidkonzentration in Klassenräumen – Tagesbeispiele

Anhand von einzelnen ausgewählten Tagesbeispielen kann die Bedeutung der Lüftung auf die Raumluftqualität – Feinstaub und Kohlendioxidkonzentration – eindrücklich gezeigt werden.

In Abb. 9 a-c sind drei Tagesbeispiele aus dem Altbauklassenraum der Außenbereichsschule A in der ersten Woche dargestellt. Am Montag Morgen, den 20.02.2006 startet der Unterricht bereits bei CO₂-Konzentrationen von 1500 ppm. In der Doppelstunde bis 9:40 Uhr nimmt diese Konzentration bis 3000 ppm zu. Sie wird durch Pausenlüftung auf 2000 ppm reduziert und nimmt in der folgenden Doppelstunde nochmals auf fast 4000 ppm zu. Erst nach Ende des Unterrichts nimmt die CO₂-Konzentration wieder etwas ab, bleibt aber auf extrem hohem Niveau konstant. Die Feinstaubkonzentration zeigt einen ähnlichen Verlauf, allerdings auf insgesamt deutlich niedrigerem Niveau. Die Konzentrationen liegen zwischen 30 und 80 µg/m³ insbesondere ist auch hier eine gute Abnahme durch Lüftung zu erkennen.

Am Dienstag wird der Unterricht – offenkundig ohne weitere Lüftung am Vortag – bei nach wie vor extrem hohen CO₂-Konzentrationen aufgenommen; auch hier ist wieder ein weiterer CO₂-Anstieg während der ersten und unterbrochen durch eine Pausenlüftung auch in der zweiten Doppelstunde erkennbar, wobei diesmal Konzentrationen bis 4800 ppm erreicht werden, d.h. Luftbelastungen, die knapp unter dem MAK-Wert von 5000 ppm bleiben. Die Feinstaubkonzentration zeigt wieder auf niedrigerem Niveau den gleichen Verlauf: Anstieg während des Unterrichts und Absenkung während der Lüftung.

Der Donnerstag zeigt wieder eine mit den Vortagen vergleichbare extrem hohe und während des Unterrichts steigende CO₂-Belastung. Darüber hinaus ist in der zweiten Doppelstunde ein extremer Anstieg der Feinstaubkonzentration bis 1000 µg/m³ (!) zu verzeichnen. Durch Lüftung zum Unterrichtsende normalisiert sich auch diese extreme Feinstaubbelastung wieder. Nachfragen ergaben, dass Kerzengießen mit den Schülern die Ursache dieser extrem hohen Feinstaubbelastung war.

Abb. 10 zeigt drei Tage aus dem Neubauklassenraum der Außenbereichsschule A in der ersten Woche. An allen Tagen sind eine deutliche Zunahme der CO₂-Konzentration während des Unterrichts und eine rasche Abnahme durch Lüftung erkennbar. Nach der ersten Doppelstunde ist der „Pettenkofferwert“ 1000 ppm jeweils überschritten, nach der zweiten Doppelstunde wird er nahezu erreicht. Die insgesamt niedrigere CO₂-Konzentration am dritten Tag ist durch einen späteren Unterrichtsbeginn, d.h. verkürzte Nutzung des Raums zurückzuführen. Auffällig war, dass in diesem Raum – mit Ausnahme der kurzen Fensterlüftung zu Beginn des 2. Tages – niemals die Fenster geöffnet wurden, sondern die Lüftung ausschließlich durch die Öffnung der Tür zum Flur hin erfolgte.

Insgesamt zeigen die Beispiele, dass die Kinder und Lehrer während des Unterrichts extrem hohen CO₂-Konzentrationen ausgesetzt sind, wenn keine ausreichende Lüftung vor Unterrichtsbeginn und nach einer Schulstunde vorgenommen wird. Auch die Feinstaubbelastung kann bei bestimmten Tätigkeiten wie Basteln, Kerzengießen extrem hohe Werte erreichen, ist aber auch durch (Zwischen-)Lüftung gut zu reduzieren.

Abb. 9

**Feinstaub- und Kohlendioxidkonzentrationen in der Raumluft
 Außenbereichsschule A- Altbauklassenraum in Abhängigkeit von der Lüftung (senkrechte Balken)
 und der Anwesenheit von Schülern (waagerechte Balken)**

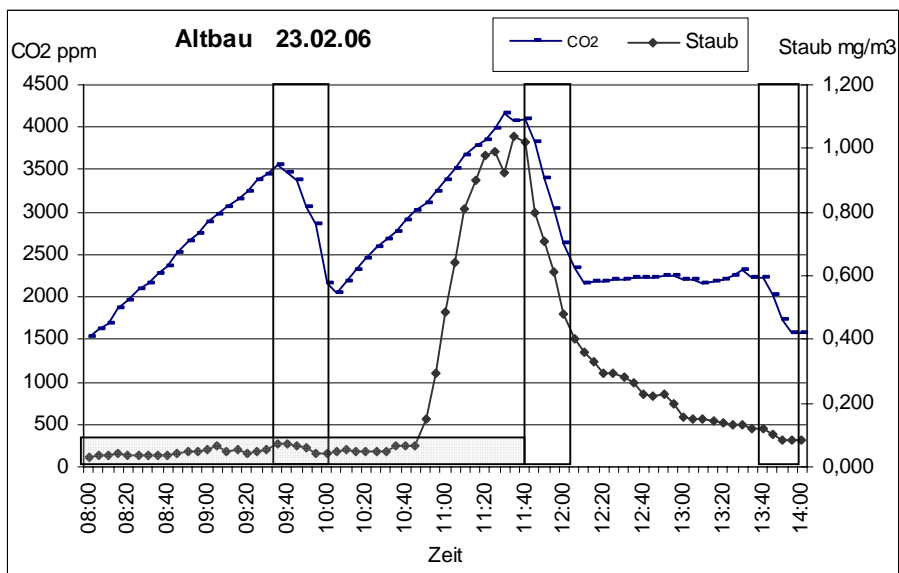
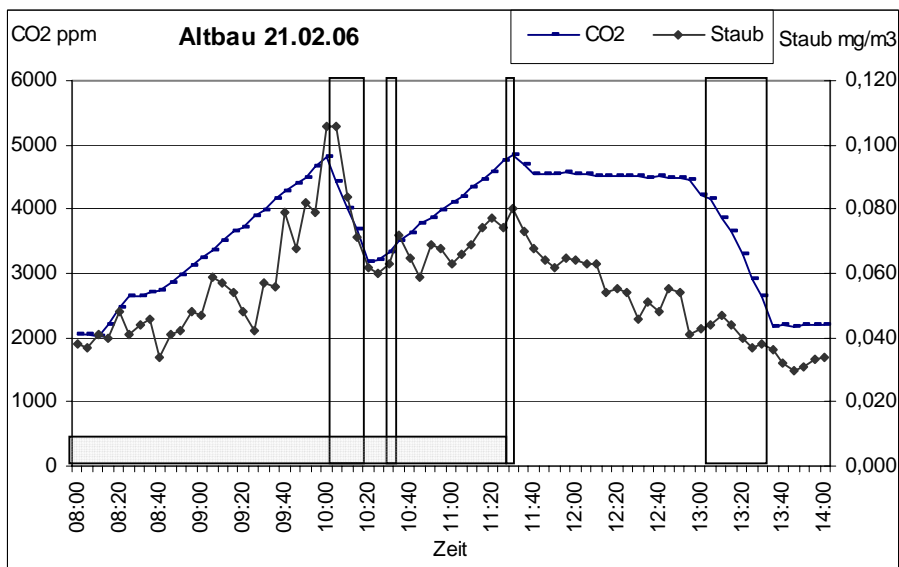
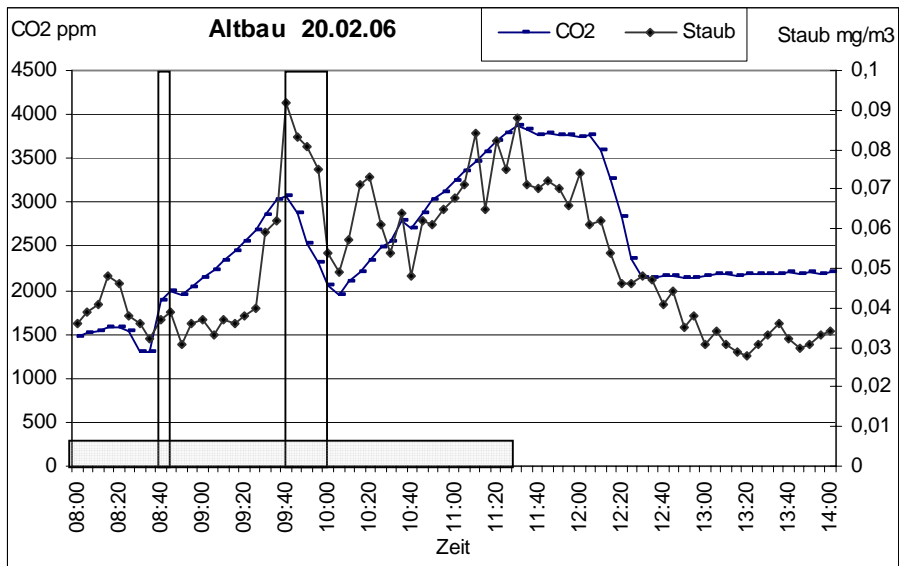
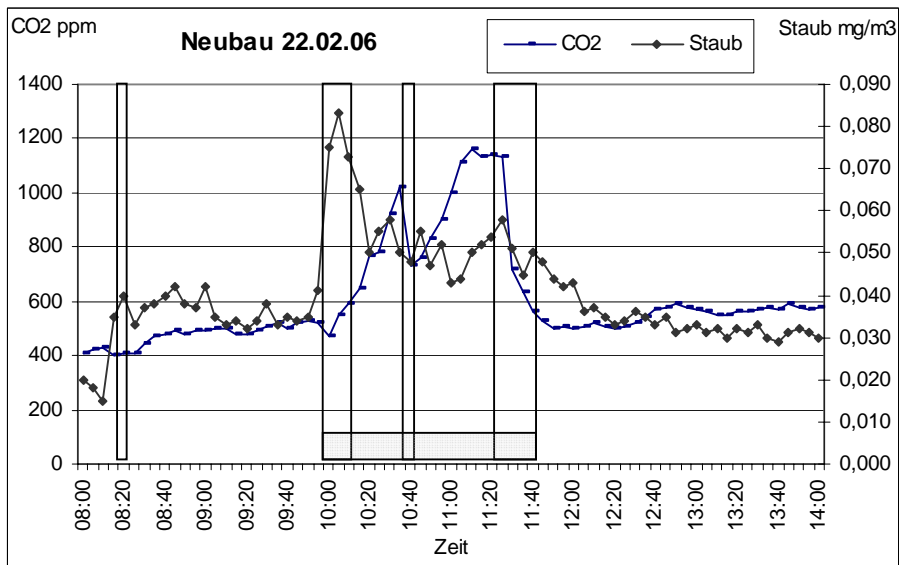
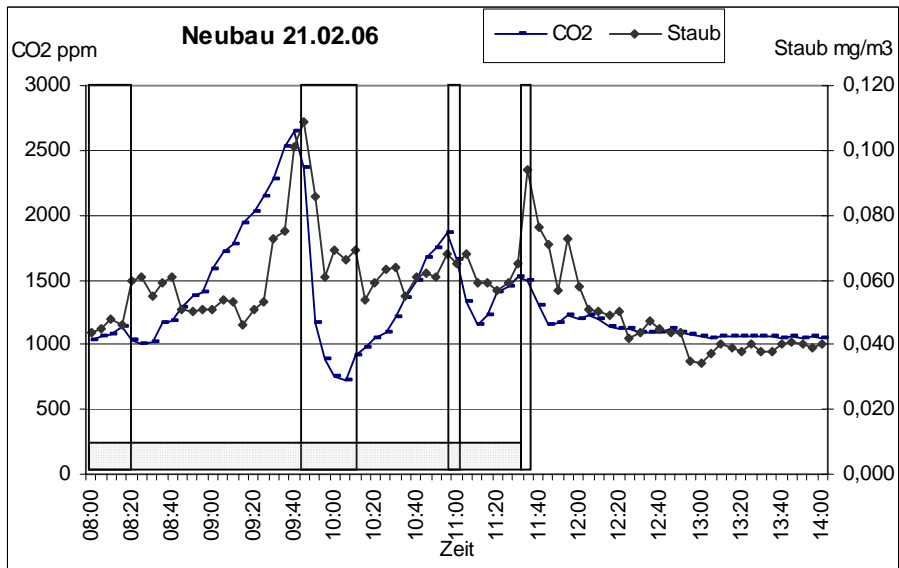
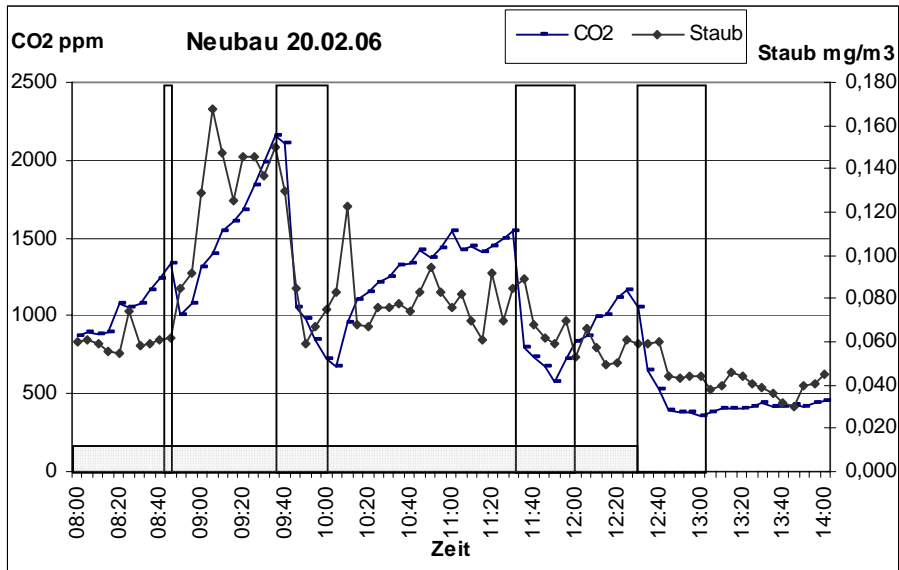


Abb. 10

**Feinstaub- und Kohlendioxidkonzentrationen in der Raumluft
 Außenbereichsschule A - Neubauklassenraum in Abhängigkeit von der Lüftung (senkrechte Balken)
 und der Anwesenheit von Schülern (waagerechte Balken)**

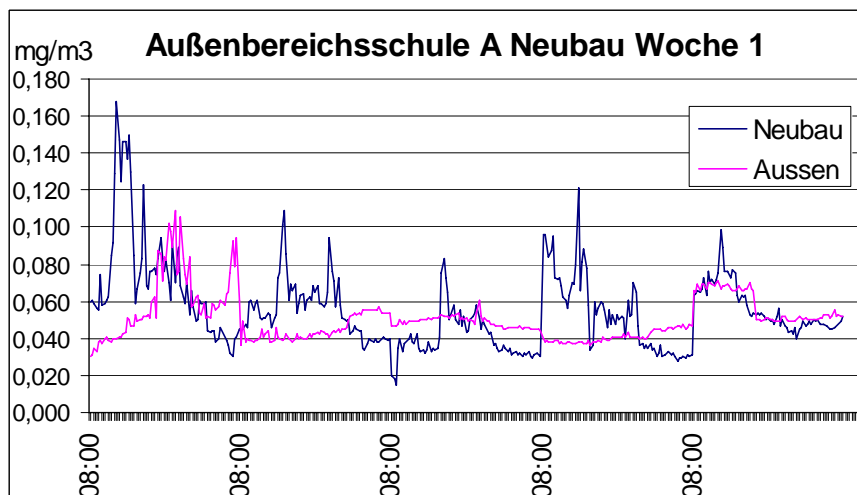
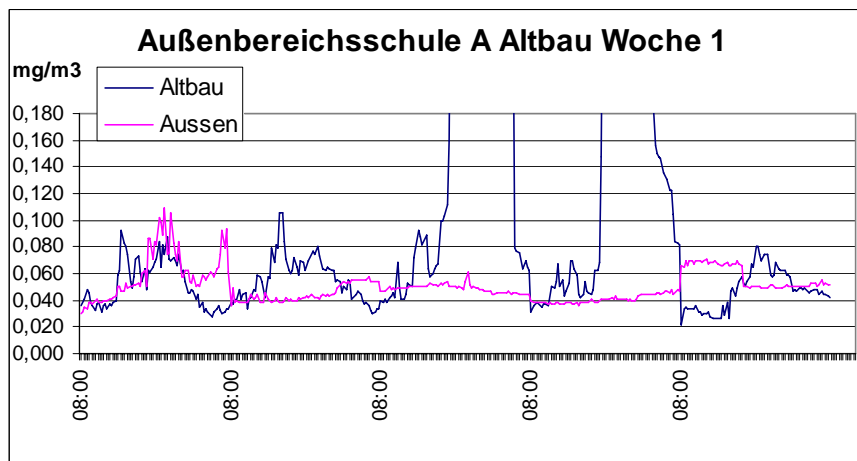
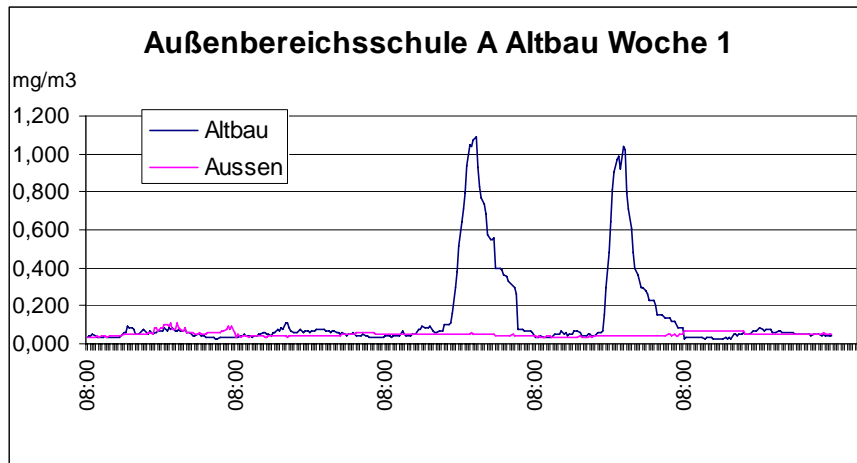


Die Feinstaubbelastung während des Unterrichts ist immer höher als die gleichzeitig gemessene Außenluftbelastung, sie kann nach Schulschluss und Lüftung durchaus unter der Außenluftbelastung liegen. Dies lassen die Daten der ersten Woche aus der Außenbereichsschule A beispielhaft erkennen (Abb. 11)

Abb. 11

Feinstaubbelastung in der Raumluft in den Klassenräumen der Außenbereichsschule A in der ersten Woche – im Vergleich mit der Außenluftkonzentration (Laserverfahren)

(Abb. b entspricht Abb. a, nur sind die hohen Innenraumkonzentrationen gekappt, um eine optische Vergleichbarkeit mit Abb. c Neubau herzustellen)



5. Diskussion:

Die Stadt Frankfurt am Main hat sich schon seit Jahren immer wieder mit verschiedenen raumluft-hygienischen Fragen in Kindereinrichtungen – Kindergärten, Horte, Schulen – befasst. Nach ersten Untersuchungen zur PCP-Belastung in Schulen und entsprechenden Sanierungsmaßnahmen wurden bereits sehr frühzeitig in den 1980er Jahren, noch vor Publikation der Asbestrichtlinie, nach ersten Asbestfunden in Schulen, umfangreiche Untersuchungen und Messungen durchgeführt und entsprechende Sanierungsmaßnahmen eingeleitet, die nach Publikation der Richtlinie weiter zügig fortgesetzt wurden (11). Ebenso wurden nach Publikation der PCB-Richtlinie Ende 1993 in Hessen umgehend flächendeckende Untersuchungen in Kindergärten und Schulen und entsprechende Sanierungen durchgeführt, begleitet von einer Humanbiomonitoring-Studie zur inneren Belastung durch Nutzung PCB-belasteter Räume (12). Anlass bezogen wurden auch weitere Fragen durch Untersuchungen aufgegriffen, u.a. Dioxine (13). Im Zusammenhang mit der Diskussion um die sog. IPI-Bauten wurden Erhebungen zur Raumlufthygiene durchgeführt, die nicht nur die in der jeweiligen öffentlichen Diskussion betreffenden chemischen Schadstoffe sondern weitere gesundheitsrelevante Parameter umfassten wie Raumtemperatur, Feuchte, Kohlendioxidbelastung und Lärm (14).

Parallel dazu wurde allerdings angesichts der Finanzlage der Stadt die Reinigungsintensität in Frankfurter Schulen vermindert – wie in zahlreichen Orten in Deutschland auch. Die früher übliche tägliche Feuchtreinigung der Schulen wurde – bei Beibehaltung der täglichen Reinigung der Sanitäranlagen – auf eine zweimal wöchentliche Feuchtreinigung der Klassenräume reduziert. Dies entspricht zwar der DIN-Vorschrift und ist inzwischen in vielen Kommunen üblich. Die Reinigungsfrequenz liegt damit aber deutlich unter den Empfehlungen des Umweltbundesamtes (15), das auch in Klassenräumen eine tägliche Feuchtreinigung des Bodens und ggf. auch der Fensterbänke empfiehlt. Diese Empfehlung basiert auch auf der Überlegung, dass mit dem durch feuchtes Reinigen entfernten Staub auch Bakterien, Schimmelsporen oder auch staubgebundene, schwerflüchtige Schadstoffe wie z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe oder auch persistente chlororganische Substanzen aus dem Räumen wirkungsvoll entfernt werden. Offensichtlich werden diese Empfehlungen in Schulen in Deutschland aber kaum umgesetzt und der derzeitige Zustand in Schulen in Deutschland hat dementsprechend nicht nur Klagen von Schülern, Lehrern und Eltern sondern auch deutliche Worte von Umweltmedizinern und Hygienikern hervorgerufen (15, 16). Die Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes „beobachtet mit Sorge, dass in Schulen teilweise katastrophale hygienische Zustände anzutreffen sind. ... In einigen Fällen ist besonders der Sanitärbereich betroffen. Dies ist umso bedenklicher, als die Erfahrung zeigt, dass eine Vernachlässigung der Sauberkeit in diesem Bereich auch das Hygienebewusstsein der Schüler nachhaltig negativ beeinflusst. mangelhafte Reinigung kann unter Umständen einen Schädlingsbefall nach sich ziehen, der dann wieder mit hochwirksamen Bioziden bekämpft werden muss. Diese wiederum können wegen ihrer Toxizität nachteilige Wirkungen auf die menschliche Gesundheit haben... “ (17).

Aber nicht nur über mangelnde Reinigung sondern auch über mangelhafte Lüftung in Schulen und Kindereinrichtungen in Deutschland wird allenthalben von Umweltmedizinern und Hygienikern geklagt. Bereits Max von Pettenkofer hat vor mehr als 100 Jahren auf die Bedeutung einer guten Raumluftqualität hingewiesen und die Untersuchung des Kohlendioxidgehalts (CO₂) in der Raumluft als Maß für „verbrauchte Luft“ herangezogen. Messungen zeigen immer wieder, dass in Klassenräumen extrem hohe Kohlendioxidkonzentrationen eher die Regel als die Ausnahme sind, und dass empfohlene Lüftungsregime kaum umgesetzt werden (15, 18, Lit. in 19). Auch Überschreitungen der für den

industriellen, arbeitsmedizinischen Bereich erstellten MAK-Werte (maximale Arbeitsplatzkonzentrationen) (20) in Klassenräumen sind publiziert (21).

Eine gute Lüftung in den Pausen führt 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. Das bloße Schrägstellen/Kippen der Fenster hat nicht den erforderlichen Effekt. Der Pausenlüftung als Querlüftung sollte aus umwelt- und präventivmedizinischer Sicht viel mehr Bedeutung beigemessen werden. Durch gute Lüftung können nicht nur die von den Raumnutzern selbst abgegebenen Stoffe (z.B. CO₂) sondern auch ggf. andere flüchtige Schadstoffe aus Bau- und Bastelmaterialien oder von Einrichtungsgegenständen gut vermindert werden. Zum richtigen Lüften in den Schulen gab es in verschiedenen Städten besondere Aktionen, wie z.B. „Frische Luft in Hamburg“. Diese Beispiele sollten in anderen Städten viel häufiger übernommen werden (22).

Als im Zusammenhang mit der Diskussion zur Feinstaubbelastung in der Außenluft auch die Frage der Feinstaubbelastung in der Raumluft in Schulen in das Blickfeld rückte und erste Untersuchungen aus Berlin Hinweise darauf erbrachten, dass eine verbesserte Reinigung und Lüftung durchaus die in Klassenräumen sehr hohe Feinstaubbelastung wirkungsvoll senken kann, hat die Stadt Frankfurt am Main auch diese Fragestellung frühzeitig aufgegriffen und eine vertiefte Untersuchung in vier Klassenräumen zweier verschiedener Schulen über drei (Winter)-Wochen durchgeführt.

Mit der Untersuchung sollte ermittelt werden, ob und wenn ja in welchem Ausmaß

- eine tägliche Feuchtreinigung im Vergleich zur DIN-Reinigung (2x wöchentliche Feuchtreinigung)
- eine verbesserte Lüftung

die Feinstaubkonzentration in der Raumluft von Klassenräumen reduzieren kann. Erwartet wurden Ergebnisse, die nach Umsetzung in die tägliche Praxis eine tatsächliche Verbesserung der gesundheitlichen Rahmenbedingungen für Schüler und Lehrer bewirken können.

Die Qualität der Reinigung wurde durch die Hausmeister kontrolliert und überprüft. Nach deren Auskunft war die intensivierete Reinigung wie beauftragt täglich durchgeführt worden, d.h. nach möglichst umfassendem Freiräumen von Fensterbänken und Möbeloberflächen zwischen der ersten und der zweiten Untersuchungswoche wurden Böden, Tische, Stühle und soweit möglich Fensterbänke täglich feucht gewischt. - Art und Ausmaß der Lüftung wurden standardisiert beobachtet und protokolliert (5-min-Intervalle), der Effekt der Lüftung wurde anhand der ebenfalls über die gesamte Untersuchungszeit gemessenen Kohlendioxidgehalte messtechnisch überwacht.

Weitere potentielle Einflussfaktoren wurden berücksichtigt und protokolliert:

- **Außenluft:** Unter der Hypothese, dass die Feinstaubkonzentration im Innenraum auch durch die Belastung der Außenluft beeinflusst wird, wurden parallel Außenluftmessungen vorgenommen. Darüber hinaus wurde die Untersuchung bewusst im Winter durchgeführt, um den möglichen Einfluss der in dieser Jahreszeit höheren Feinstaubbelastung in der Außenluft abzubilden. Der mögliche Einfluss der Außenluftbelastung fand auch Berücksichtigung in der Wahl der Schulen: so wurde eine Schule aus dem Innenstadtbereich und eine eher am Stadtrand in einem ländlichen Bereich gelegene Schule für die Untersuchung ausgewählt.

- **Personen im Raum:** Die Annahme ist plausibel, dass die Feinstaubkonzentration im Raum mit der Anzahl der im Raum sich aufhaltenden Personen steigt, da diese an Schuhen und Kleidung Stäube mit eintragen und bei Bewegungen aufwirbeln können (5-min-Abstände).
- **Aktivitäten im Raum:** Je nach Aktivitätsgrad der im Raum befindlichen Personen – ruhiges Sitzen, Toben o.ä. – muss mit unterschiedlichen Feinstaubkonzentrationen in der Raumluft gerechnet werden, weshalb auch hier standardisiert die Aktivitäten im Raum, klassifiziert in vier verschiedene Gruppen, protokolliert wurden (5-min-Abstände).

Auch wenn die Feinstaubbelastung in Klassenräumen das Resultat vieler verschiedener Einflussfaktoren darstellt, ist zwischen diesen Einflussfaktoren 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. Vor diesem Hintergrund standen die Auswirkungen der Reinigung und Lüftung im Focus des Interesses.

Die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind:

1. Die Feinstaubbelastung in Klassenräumen ist hoch. Mit durchschnittlich $69 \pm 19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Median: $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lag sie deutlich über der gleichzeitig mit gleichen Verfahren gemessenen durchschnittlichen Außenluftkonzentration ($44 \pm 16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Median 46).

Die Belastung in den Klassenräumen lag damit im gleichen Bereich, wie er im Winter 2002/3 in 40 Berliner Schulen (Median $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gemessen wurde. Somit wurden auch in Klassenräumen Frankfurter Schulen Feinstaubkonzentrationen gemessen, die im Bereich der üblicherweise in Raucherwohnungen gemessenen Feinstaubbelastung und doppelt so hoch wie in Nichtraucherwohnungen liegen (8, 9).

Zur Feinstaubbelastung in der Außenluft und deren gesundheitlichen Auswirkungen liegt eine Fülle epidemiologischer Studien vor, die sowohl Kurzzeit (wenige Tage) als auch Langzeiteffekte (über Jahre) beschreiben. Eine erhöhte Feinstaubbelastung über wenige Tage ist verbunden mit einer Steigerung des Medikamentenverbrauchs bei Asthmatikern, einem Anstieg der Krankenhauseinweisungen wegen Atemwegs- und/ oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie einer Zunahme der Sterblichkeit (vorgezogene Sterblichkeit). Als Langzeiteffekte sind beschrieben ein Anstieg der Sterblichkeit insgesamt, aber insbesondere ein Anstieg der Sterblichkeit an Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie an Lungenkrebs (1-3, 6). Dabei ist zu betonen, dass die epidemiologischen Studien stets die Gesamtbelastung der Betroffenen abbilden und die beobachteten Wirkungen immer das Resultat der Außen und Innenraumluftbelastungen sind.

Es erscheint plausibel, in einer ersten Näherung diese Auswirkungen auf die Gesundheit auch für (erhöhte) Feinstaubkonzentrationen in Innenräumen anzunehmen; 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.

2. Die Kohlendioxidbelastung in Klassenräumen ist viel zu hoch und teilweise extrem erhöht.

Der hygienisch wünschenswerte Bereich von unter 1000 ppm wurde nur in weniger als der Hälfte der Messungen (jeweils 5-min-Werte) unterschritten, der Wert von 1500 ppm wurde in einem Viertel der Messungen überschritten; die gemessenen Maximalwerte lagen knapp unter dem MAK-Wert, der für Arbeitsplätze festgelegt wurde, an denen mit Gefahrstoffen umgegangen wird. Werden nur die Zeiten betrachtet, in denen Schüler im Raum waren, so lagen 70 % der Messwerte über 1000 ppm und 30 % über 1500 ppm.

Dies bestätigt andere Untersuchungen in Schulräumen (Lit bei 19; 21); auch dort werden in der Regel Medianwerte zwischen 1000 bis 1500 ppm erreicht 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.

Schon im Bereich von 1000- 2000 ppm Kohlendioxid in der Atemluft verringert sich durch eine leichte pH-Verschiebung im Blut die Sauerstofftransportkapazität. Kopfschmerzen, Benommenheit und Verringerungen des Leistungsvermögens können die Folge sein (18). Über diese Wirkungen des CO₂ hinaus sind Assoziationen zwischen zunehmender CO₂-Konzentration und Sick-Building-Syndrom beschrieben. Hohe CO₂-Gehalte sind häufig auch mit anderen leichtflüchtigen Innenraumschadstoffen assoziiert.

Bereits im 19. Jahrhundert hatte Max von Pettenkofer den lufthygienischen Standard von 1000 ppm CO₂ vorgeschlagen. Die nach ihm benannte „Pettenkoferzahl“ 1000 ppm 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“.

In den untersuchten Klassenräumen lagen also in der überwiegenden Zeit hygienisch und umwelt- und präventivmedizinisch unerwünschte Konzentrationen an Kohlendioxid für die Schüler und Lehrer vor. Effektive Minderungsmaßnahmen sind gefragt, um für Kinder und Lehrer die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Lernfähigkeit zu erhalten bzw. zu stärken.

3. Durch verstärkte Reinigung kann die Feinstaubbelastung in Klassenräumen verbessert werden.

Der nachweisbare Verbesserungseffekt – täglich feucht Wischen im Vergleich zu 2 x wöchentlicher Feuchtreinigung – um durchschnittlich 15 µg/m³ war in den 4 untersuchten Klassenräumen insgesamt zwar geringer als nach der Berliner Untersuchung aus einem Klassenzimmer erwartet worden war – dort war die Feinstaubbelastung während der Phase intensiverer Reinigung um 30 µg/m³ gesenkt worden - und er war auch nicht konsistent in allen untersuchten Klassenräumen nachweisbar (gravimetrische Untersuchungen).

Um Fehlbewertungen zu vermeiden ist die Betrachtung der weiteren Einflussfaktoren unabdingbar. So ist bei näherer Betrachtung der Aktivitäten im Raum und der Lüftung zu erkennen, dass der vermeintlich vergleichsweise sehr gute Reinigungseffekt im Altbau der Außenbereichsschule A – Vergleich erster zu zweiter/dritte Woche – eher auf die in der ersten Woche durch das Kerzengießen sehr hohen Ausgangswerte der Feinstaubkonzentration im Raum zurückzuführen ist als durch eine besonders gute Reinigung in den nachfolgenden Wochen. Demgegenüber ist die Zunahme der Feinstaubbelastung trotz vermehrter Reinigung in der dritten im Vergleich mit der ersten Woche in dem Neubau der Außenbereichsschule A auch der Tatsache geschuldet, dass in der ersten Woche die Nutzung des Raumes nur sehr gering war, was einen „falsch niedrigen“ Ausgangswert der Feinstaubkonzentration in der Raumluft (mit)bedingte. In der Innenstadtsschule I, wo in beiden Klassenräumen die Parameter Personen und Aktivitäten im Raum in den verschiedenen Wochen weitgehend gleich blieben, konnte demgegenüber mit beiden Analysemethoden für Feinstaub (Gravimetrie- und Laserverfahren) konsistent eine Abnahme in der Phase vermehrter Reinigung gefunden werden.

Insgesamt blieb der positive Effekt der vermehrten Reinigung bei der vorliegenden Untersuchung in verschiedenen Zusammenhangsanalysen auch nach Berücksichtigung der weiteren, durchaus stärkeren Einflussfaktoren wie Personen im Raum, Aktivitäten, Lüftung als signifikanter Einflussfaktor nachweisbar. D.h. eine intensiviertere Reinigung ist nachgewiesenermaßen sinnvoll, um die Feinstaubbelastung der Kinder und Lehrer in den Klassenräumen zu vermindern.

Insofern wird die bereits publizierte Berliner Studie bestätigt und unterstützt. Allerdings ist einzu-räumen, dass dieses Ergebnis immer noch auf sehr schmaler Datengrundlage steht. Darüber hinaus ist durchaus zu diskutieren, welche Art der Reinigung den besten und nachhaltigen Minderungseffekt bringen kann. In der vorliegenden Untersuchung wurde eine tägliche Feuchtreinigung untersucht; denkbar wären auch andere Modifikationen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass eine verbesserte Feuchtreinigung sich nicht nur positiv auf die gemessene Feinstaubkonzentration im Klassenraum auswirken kann, sondern dass hierdurch auch andere, hier nicht gemessene insbesondere staubgebundene, schwerflüchtige Schadstoffe aus dem Raum entfernt werden und somit auch solche – messtechnisch nicht erfassten - Belastungen reduziert werden.

Schon 1891 hatte Prausnitz formuliert: „... es ist vielmehr notwendig, dass die Schulzimmer möglichst oft – besten täglich – durch nasses Aufwischen von dem Staub und Schmutz gereinigt werden, welche die Schulkinder jeden Tag in das Schulzimmer hereinbringen. Dieser Schmutz und Staub bildet in trockenem Zustande bei der häufig lebhaften Bewegung der Schulkinder die hauptsächlichste Veranlassung zur Verunreinigung der Luft des Schulzimmers (Zitiert nach 16).

3. Durch verbesserte Lüftung kann die Feinstaubkonzentration im Klassenraum gut gesenkt werden. Dies war allerdings kaum in der Wochenbetrachtung (Vorgabe: normale Lüftung vs. intensiviertere Lüftung) oder im Vergleich mit dem Lüftungsindex erkennbar, auch vor dem Hintergrund, dass insgesamt mangelhaft gelüftet wurde und in keiner Schule gute Lüftungsindices erreicht wurden. Teilweise wurde sogar über eine ganze Wochenbeobachtungszeit kein Fenster geöffnet und ein Luftaustausch nur über die Tür zum Flur hin ermöglicht. In einer anderen Klasse wurde die Vorgabe der intensivierten Lüftung in der dritten Woche wegen der kalten Witterung nicht umgesetzt. Vor diesem

Hintergrund ist nachvollziehbar, dass die Auswertung über Wochenbetrachtung bzw. Lüftungsindex alleine nicht aussagekräftig sein kann.

Bei Betrachtung des Verlaufs der Feinstaubkonzentrationen in den Klassenräumen über die Messzeit, konnte aber durchweg festgestellt werden – wie es auch an verschiedenen Einzelbeispielen in diesem Bericht dargestellt wurde – dass im Anschluss an Lüftung (Öffnen von Fenster oder Tür) die Feinstaubkonzentration parallel mit der Kohlendioxidkonzentration immer gut vermindert werden konnte, insbesondere am Unterrichtsschluss oft bis unter die Außenluftkonzentration. Damit ist nachgewiesen, dass Lüftung – wenn sie denn durchgeführt wird – tatsächlich die Feinstaubbelastung im Innenraum verbessert. Nach unserer Kenntnis wird dieser Zusammenhang erstmals in dieser Form dokumentiert.

5. Lüftung vermindert die Kohlendioxidbelastung in Klassenräumen rasch und effektiv. Dieses Ergebnis wurde sehr klar und eindeutig erhalten. Die Kohlendioxidkonzentration in Klassenräumen war hochsignifikant positiv mit der Anzahl der Personen im Raum und deren Aktivitäten korreliert; auch die Abnahme der Kohlendioxidkonzentration mit der Lüftung war hochsignifikant und konnte durch Tagesverläufe beispielhaft dargelegt werden.

Vor diesem Hintergrund wurden die Empfehlungen zur Lüftung und Reinigung, wie sie von der Länderarbeitsgruppe Umweltbezogener Gesundheitsschutz der Landesgesundheitsbehörden (LAUG) im September 2005 und von anderer Seite (15; 22) im Hinblick auf die Feinstaub- und CO₂-Belastung in Klassenräumen veröffentlicht wurden, voll bestätigt.

Die LAUG stellte Ende 2005 fest:

„derzeit laufende bzw. bereits abgeschlossene Untersuchungen zur Belastung der Innenraumluft von Schulräumen mit Kohlendioxid und Feinstäuben in mehreren Bundesländern haben übereinstimmend große Defizite hinsichtlich einer ausreichenden Innenraumluftqualität in Schulen aufgezeigt. Empfehlungen der Ländergesundheitsbehörden zum richtigen Lüften und zur Verminderung der Staubbelastung in Schulen werden offensichtlich nicht konsequent umgesetzt. Vor diesem Hintergrund sehen es die Gesundheitsbehörden als dringend erforderlich an, dass im Schulbereich mehr Verständnis für hygienische Anforderungen an Lüftung und Reinigung hergestellt wird.“

Sie bitten deshalb das Kultusressort, klare Zuständigkeiten für das Lüftungs- und Reinigungsverhalten in Schulklassen zu schaffen. Insbesondere wird die Notwendigkeit betont, dass regelmäßig über ein richtiges Lüftungsmanagement informiert wird und auch regelmäßig für eine Reinigung Flächen, auf denen sich Staub ablagern kann, zugänglich gemacht werden. Nach Ansicht der Ländergesundheitsbehörden stellt diese Vorgehensweise einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung der Belastungssituation gegenüber Kohlendioxid und Staub in Schulräumen dar. ...“

Durch Umsetzung vorliegender Empfehlungen (z.B. 15, 22, 23) kann dieses Ziel erreicht werden.

6. Literatur:

1. Peters A, Heinrich J, Wichmann HE: Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Kurzzeiteffekte. Umweltmedizin in Forschung und Praxis (2002) 7: 101-115.
2. Heinrich J, Grote V, Peters A, Wichmann HE: Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub – Epidemiologie der Langzeiteffekte. Umweltmedizin in Forschung und Praxis (2002) 7: 91-99.
3. 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.
4. Wichmann HE: Positive gesundheitliche Auswirkungen des Einsatzes von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen – Risikoabschätzung für die Mortalität in Deutschland. Umweltmedizin in Forschung und Praxis (2004) 9: 85-99.
5. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit: Umweltmedizinische Bedeutung von Dieselruß / Feinstaub. Band 11 der Schriftenreihe: Materialien zur Umweltmedizin. Erlangen, 2005
6. World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen: Particulate matter. In: Air Quality Guidelines for Europe. Kopenhagen, 2000, S. 186-193; und www.who.int
7. 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) 15: 335-41.
8. Lahrz T, Piloty M: Innenraumluftqualität in Berliner Schulen – Feinstaub und adsorbierte Substanzen. Bericht im Auftrag des Landesamtes für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technische Sicherheit, Berlin (LAGetSi), 2005
9. Lahrz T: Innenraumluftqualität 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
10. Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg: Feinstaubbelastungen und deren gesundheitliche Wirkungen bei Kindern. Untersuchung 2001/2 im Auftrag des Sozialministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, 2004.
11. Heudorf U: 09.02 Stäube. Teil 2: Asbest. in Beyer/Eis (Hrsg): Praktische Umweltmedizin, Folgelieferung November 1995, Springer Verlag 1995.
12. Heudorf U, Angerer J, Göen Th: PCB-Konzentrationen im Blut von Mitarbeiterinnen PCB-belasteter Kindertagesstätten, Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin, (1995) 30: 398-407.
13. 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.
14. Stadtgesundheitsamt Frankfurt am Main: Bericht über die Untersuchung der raumlufthygienischen Qualität der IPI-Bauten in Frankfurt am Main. Frankfurt, im Februar 1993. (Quenzer A)
15. Umweltbundesamt: Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Berlin, 2000 www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/1824.pdf

16. Eikmann T, Herr C. Schmutzige Schulen sind ein Zeichen für fehlendes hygienisches Problembewusstsein im öffentlichen Bereich. Umweltmedizin Forschung Praxis (2005) 10: 5-6.
17. Pressemitteilung , zitiert im Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Berlin, 2000
18. Pluschke P. Luftschadstoffe in Innenräumen: ein Leitfaden. Berlin, Heidelberg Springer Verlag, 1996, S. 69 ff
19. 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
20. Deutsche Forschungsgemeinschaft: MAK- und BAT-Werte-Liste 2004. Mitteilung 40. Wiley-VCH, Weinheim (2004)
- 21: Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technische Sicherheit in Berlin (LAGetSi), Untersuchungen der Luftgüte an Berliner Schulen im Zeitraum von 2002 bis 2004. Ergebnisse und Schlußfolgerungen unter Bezugnahme auf die Abschlußberichte der Landesmessstelle (ILAT / BBGes) 2005 www.berlin.de/imperia/md/content/lagetsi/1072.pdf
22. Freie und Hansestadt Hamburg. Behörde für Wissenschaft und Gesundheit: Frischer Wind in Schulen. www.gesundheit-umwelt.hamburg.de
23. Frische Luft für Frankfurter Schulen. Information des Stadtschulamtes und des Stadtgesundheitsamtes der Stadt Frankfurt am Main, Mai 2006

Wie sollte die Belüftung erfolgen?

- **Stoßlüften**
Ein Fenster ist ganz geöffnet
- **Querlüften**
gegenüberliegende Fenster sind geöffnet.
Querlüften ist am effektivsten und zugleich energiesparend, kann aber zu Zugscheinungen führen
- **Spaltlüften**
Fenster in Kippstellung: uneffektiv und energieungünstig
- **Morgens vor Unterrichtsbeginn**
sollten Fenster im Flurbereich, Eingangstüren und alle Fenster im Klassenraum (soweit möglich) geöffnet und 3-5 min lang quer- oder stoßgelüftet werden
- **Zur Mitte einer (Doppel)-Stunde**
muss wenigstens eine kurze Lüftung erfolgen
- **Verantwortlichkeiten**
zum Öffnen und Schließen der Fenster und Türen festlegen, z.B. einen so genannten Lüftungsdienst einrichten

Ursachen des Lüftungsproblems in Schulen

- **Energiesparfenster** unterbinden den Luftaustausch zwischen Außenluft und Innenraumluft.
- **Energiekosten** sollen gesenkt werden. Aus Sorge um Energieverluste bleiben Fenster geschlossen.
- **Sicherheitsaspekte und bauliche Gegebenheiten** können ein optimales Fensteröffnen erschweren.
- **Anforderungen und Hektik im Schulalltag** haben zugenommen. Es bleibt weniger Zeit zum Fensteröffnen.
- **Lärm durch verkehrsreiche Straßen** in der Nähe der Schule. Geöffnete Fenster während des Unterrichts oder in den Pausen erhöhen die Lärmbelastung.

Für eine ausreichende Raumluftqualität ist es wichtig, einen geeigneten Kompromiss zu finden zwischen

- **Energieeinsparung**
- **Sicherheitsaspekten und**
- **ausreichender Lüftung.**

Dies gelingt mit der Umsetzung der genannten Lüftungsempfehlungen.

Frische Luft für Frankfurter Schulen

*Eine Information
des Stadtschulamtes und des
Stadtgesundheitsamtes
Stadt Frankfurt am Main*

Stand: Mai 2006



Was ist und woher kommt CO2?

CO₂, Kohlendioxid, ist ein natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre und liegt in der Außenluft in Konzentrationen zwischen 360 ppm (parts per million) in ländlichen und bis zu 500 ppm in städtischen Gebieten vor.

Jeder Mensch atmet permanent Sauerstoff ein und Kohlendioxid aus, die jeweiligen Mengen variieren in Abhängigkeit von der körperlichen Aktivität. Schon bei sitzender Tätigkeit atmet jeder Mensch pro Stunde ca. 15 – 20 Liter CO₂ aus. Dieses reichert sich im Innenraum an. Durch Lüftung kann eine gute Absenkung der CO₂-Konzentration rasch erreicht werden.

Darüber hinaus werden mit der Lüftung nicht nur CO₂ sondern auch weitere luftgetragene Schadstoffe wie Geruchsstoffe, Feinstaub etc. wirkungsvoll entfernt.

In Klassenräumen gilt: je mehr Schüler in einer Klasse sind und je höher deren Aktivitätsgrad, desto schneller steigt die CO₂-Konzentration an und desto höhere Werte werden erreicht. Umso wichtiger ist eine gute Lüftung.

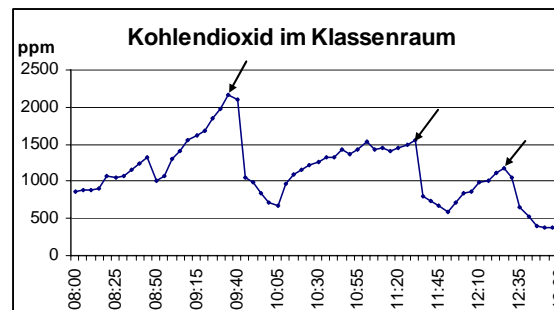
Nebenstehende Graphik aus einer Messung in einer Frankfurter Schule zeigt eindrücklich den Anstieg der CO₂-Konzentration während des Unterrichts und die Abnahme durch Lüftung (mit Pfeilen markiert).

CO₂ – ein Indikator für „dicke Luft“

Kohlendioxid ist ein guter Indikator für verbrauchte Luft. Bereits im 19. Jahrhundert hat Pettenkofer 1000 ppm als „lufthygienisch akzeptablen Bereich“ benannt und die Einhaltung bzw. Unterschreitung dieses Wertes in Innenräumen gefordert.

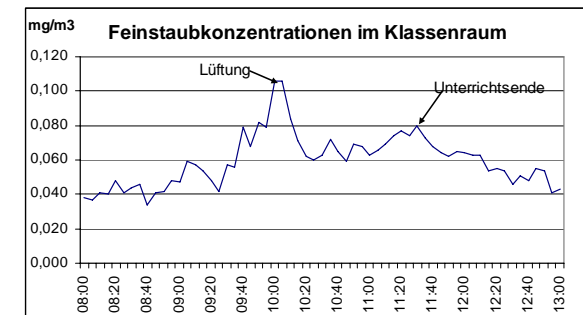
Bereits jeder fünfte empfindet die Qualität der Raumluft ab einer Konzentration von 1000 ppm als unbefriedigend. Mit steigender Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft nehmen Konzentrations- und Leistungsfähigkeit ab, Müdigkeit und Geruchswahrnehmungen steigen an, das Wohlbefinden wird vermindert.

In Klassenräumen sollte deswegen im Sinne der Gesundheitsvorsorge und der Sicherung des Wohlbefindens der „Pettenkofer-Wert“ durch gutes Lüften möglichst unterschritten werden.



Was ist mit anderen Stoffen und Feinstaub?

In der Tat sind im Innenraum immer eine Vielzahl von Stoffen vorhanden, Geruchsstoffe, leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe und – das zeigen aktuelle Studien - auch Feinstaub.



Feinstaubkonzentrationen in einer Frankfurter Schule: Die Konzentrationen variieren in Abhängigkeit von der Aktivität der Schüler, können durch Lüftung gesenkt werden und nehmen nach Unterrichtsende weiter ab.

Mit richtiger Lüftung sind auch diese anderen Stoffe gut aus dem Innenraum zu entfernen, dies zeigt das obige Feinstaub-Beispiel.

Darüber hinaus kann Feinstaub auch durch Feuchtreinigen reduziert werden. Deshalb wird die Stadt Frankfurt die Schulreinigung intensivieren, um auch auf diesem Wege eine Verminderung der Feinstaubkonzentrationen in Klassenräumen zu erreichen.

