

**Abbildung 9:** Schwarzer Grobstaub an Schulen (außen und innen)

Im Bereich der Außenluft an den Wohnungen bestand im Größenbereich 3 bis 24 µm ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Konzentration des gesamten Grobstaubs und der Konzentration des schwarzen Grobstaubs ( $r^2 > 0,5$ ). Dieser Zusammenhang war an den Schulen weniger deutlich ausgeprägt ( $r^2 = 0,29 - 0,37$ ), was daran liegen könnte, dass an den Schulen andere Staubquellen als der Straßenstaub eine größere Rolle einnehmen.

Zusammenhänge zwischen dem  $PM_{2,5}$ -Gehalt und dem Grobstaub waren nicht erkennbar.

### A.3.5 Ergebnisse zur Partikelanzahlkonzentration

In Mannheim und in Aulendorf/Bad Waldsee wurde die Partikelzahl in den Wohnungen der Kinder und parallel dazu in der Außenluft mit Kondensationspartikelzählern über einen Zeitraum von jeweils 10 Stunden kontinuierlich gemessen. Die Messungen wurden mit Kondensationspartikelzählern durchgeführt, mit denen Partikel ab einer Größe von etwa 10 nm erfasst wurden. Die statistischen Kenngrößen der 1-Minuten-Messwerte über den gesamten Zeitraum aller Messungen in Mannheim und in Aulendorf/Bad Waldsee sind in Tabelle 7 zusammengefasst. In Mannheim war die Partikelanzahl sowohl in der Außenluft als auch in der Innenraumluft höher als in Aulendorf/Bad Waldsee. Während in Mannheim die Partikelzahl in der Außenluft meist höher war als in den Wohnungen, war dies in Aulendorf/Bad Waldsee eher umgekehrt. Insgesamt zeigten sich in den Wohnungen deutlich geringere Ortsunterschiede als in der Außenluft.

**Tabelle 7:** Partikelanzahl (> 10 nm) an den Wohnungen in Mannheim und Aulendorf Partikel/cm<sup>3</sup>

	Mannheim		Aulendorf	
	außen	innen	außen	innen
Anzahl Messreihen	11	28	5	32
Mittelwert	28.548	20.420	8.133	19.905
Minimum	4.280	1.660	2.030	1.070
Maximum	225.000	275.000	77.400	373.000
5. Perzentil	8.560	3.520	2.448	1.977
25. Perzentil	14.800	7.320	4.640	4.080
Median	22.800	13.700	5.870	7.550
75. Perzentil	31.900	24.100	12.000	19.300
95. Perzentil	81.360	63.100	16.610	78.470

An den Schulen in Mannheim und in Aulendorf/Bad Waldsee wurde die Partikelanzahlkonzentration in parallelen Messungen im Innern der Räume und in der Außenluft ermittelt. Die Messungen erfolgten in der Regel nur während der Schulstunden am Vormittag.

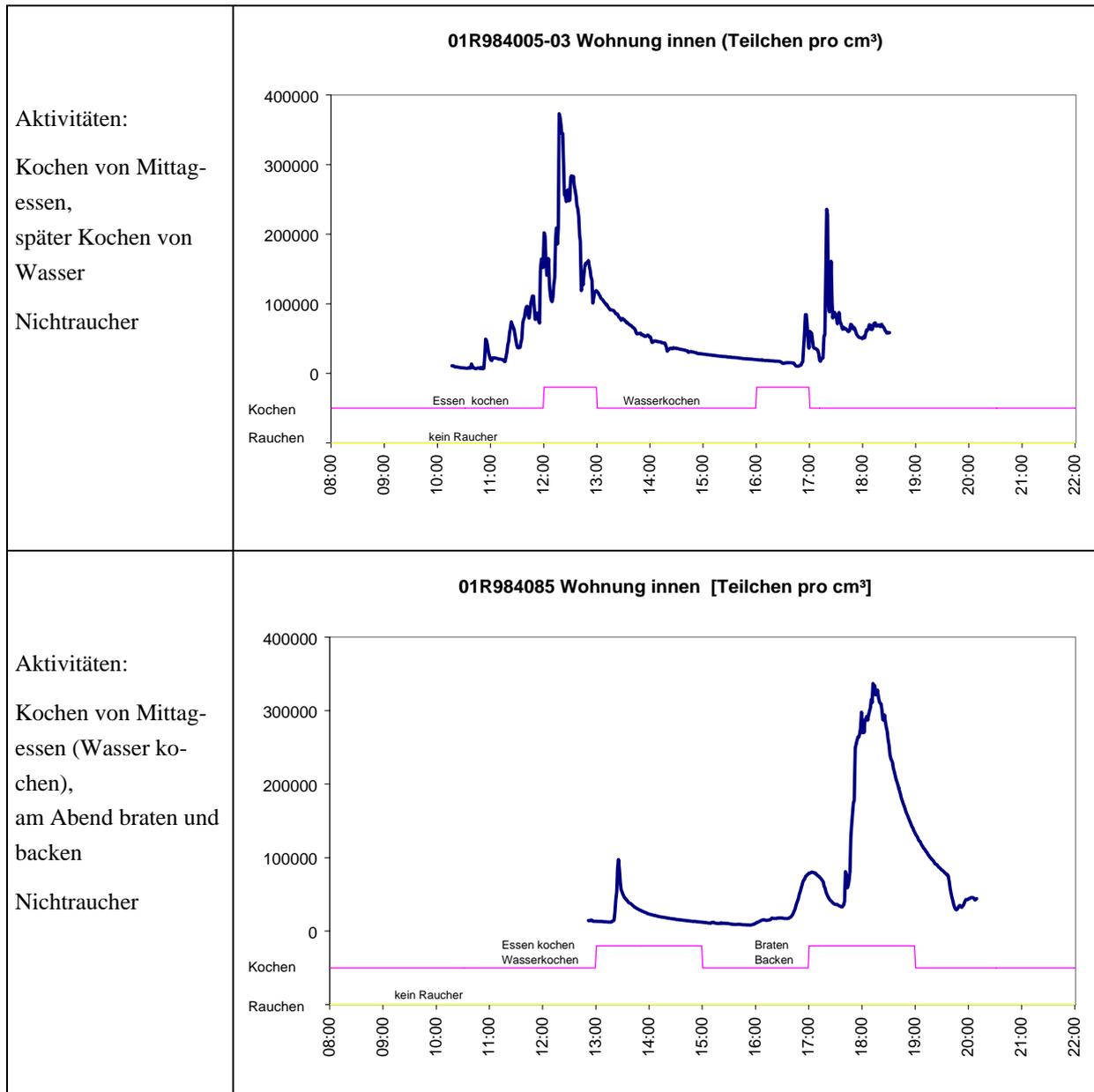
Die statistischen Kenngrößen aller 1-Minuten-Messwerte über die Gesamtdauer aller Messungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst. In Mannheim waren die Partikelanzahlkonzentrationen in der Außenluft deutlich höher als in den Schulräumen. In Aulendorf/Bad Waldsee war die Partikelanzahl in und außerhalb der Schulen nicht wesentlich verschieden und lagen deutlich unterhalb der in Mannheim gefundenen Werte, allerdings wurden in Aulendorf in der Außenluft nur 4 Messungen durchgeführt.

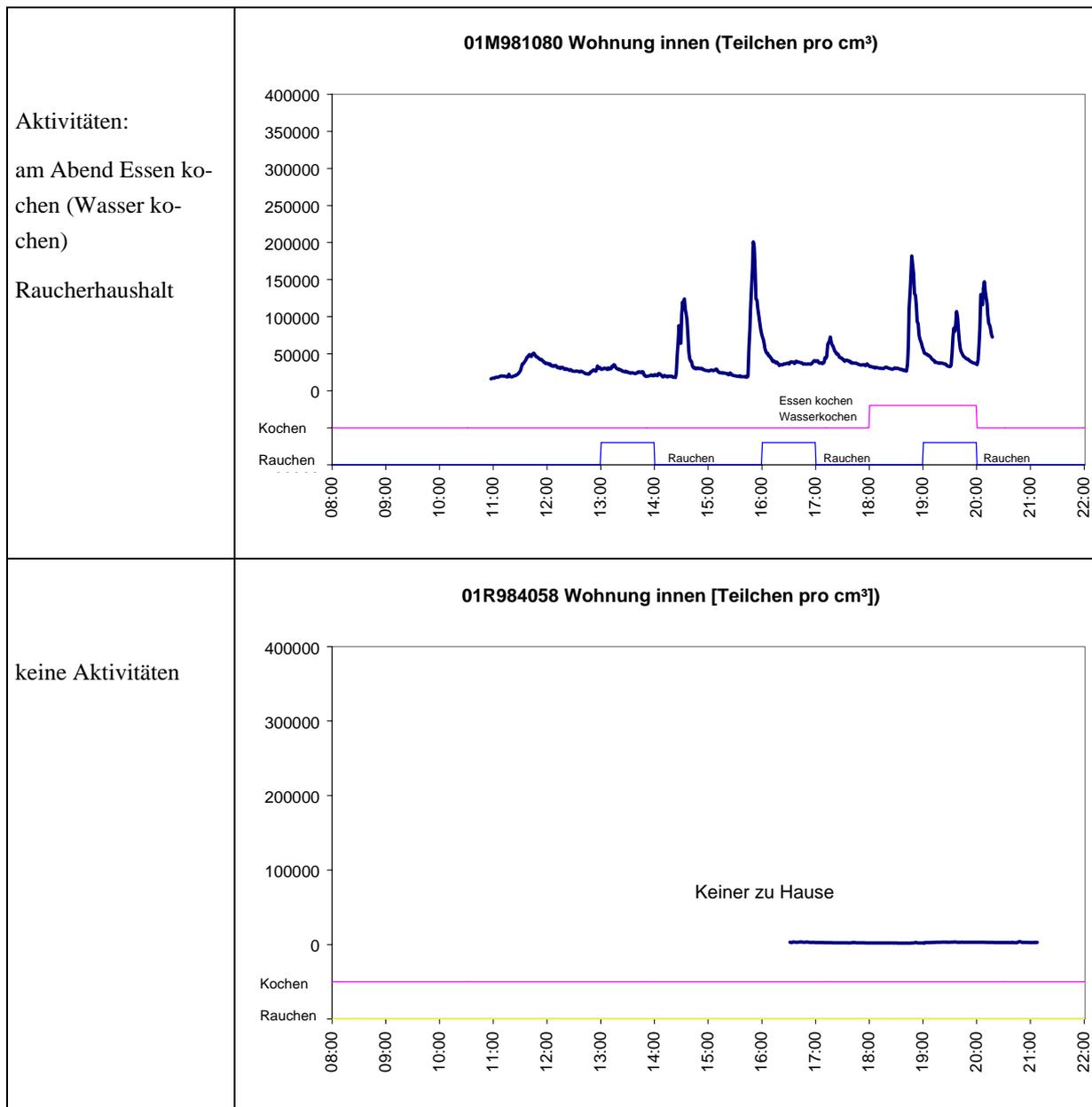
**Table 8:** Partikelanzahlkonzentration (> 10 nm) an den Schulen in Mannheim und Aulendorf in Partikel/cm<sup>3</sup>

	Mannheim		Aulendorf	
	außen	innen	außen	innen
Anzahl der Messreihen	10	29	4	20
Mittelwert aller 1-Minuten-Werte	40.665	10.202	6.116	6.258
Minimum aller 1-Minuten-Werte	6.740	2.390	1.870	1.720
Maximum aller 1-Min-Werte	172.000	75.500	19.000	47.100
5. Perzentil aller 1-Min-Werte	11.600	3.160	2.190	2.000
25. Perzentil aller 1-Min-Werte	22.800	5.060	2.610	2.990
Median aller 1-Min-Werte	32.600	8.310	3.440	4.070
75. Perzentil aller 1-Min-Werte	54.000	12.000	10.450	7.710
95. Perzentil aller 1-Min-Werte	91.595	27.000	13.600	15.730

Der zeitliche Verlauf der Partikelanzahlkonzentration war individuell sehr unterschiedlich ausgeprägt. In den Wohninnenräumen fielen häufig einzelne peakförmige Belastungen auf, die anhand der Aktivitätsprotokolle in verschiedenen Fällen mit dem Kochen von Wasser, der Zubereitung von Mahlzeiten (kochen, backen, braten) oder mit dem Rauchen von Zigaretten in Verbindung gebracht werden konnten (Abbildung 10). Dabei wurden Maximalwerte von mehreren 100.000 Partikel/cm<sup>3</sup> erreicht. In der Regel fielen die Konzentrationen exponentiell relativ rasch ab. Ein einheitliches durchgehendes Muster im Konzentrationsverlauf war nicht zu erkennen.

Verhalten, Vorkommen und gesundheitliche Aspekte von Feinstäuben in Innenräumen

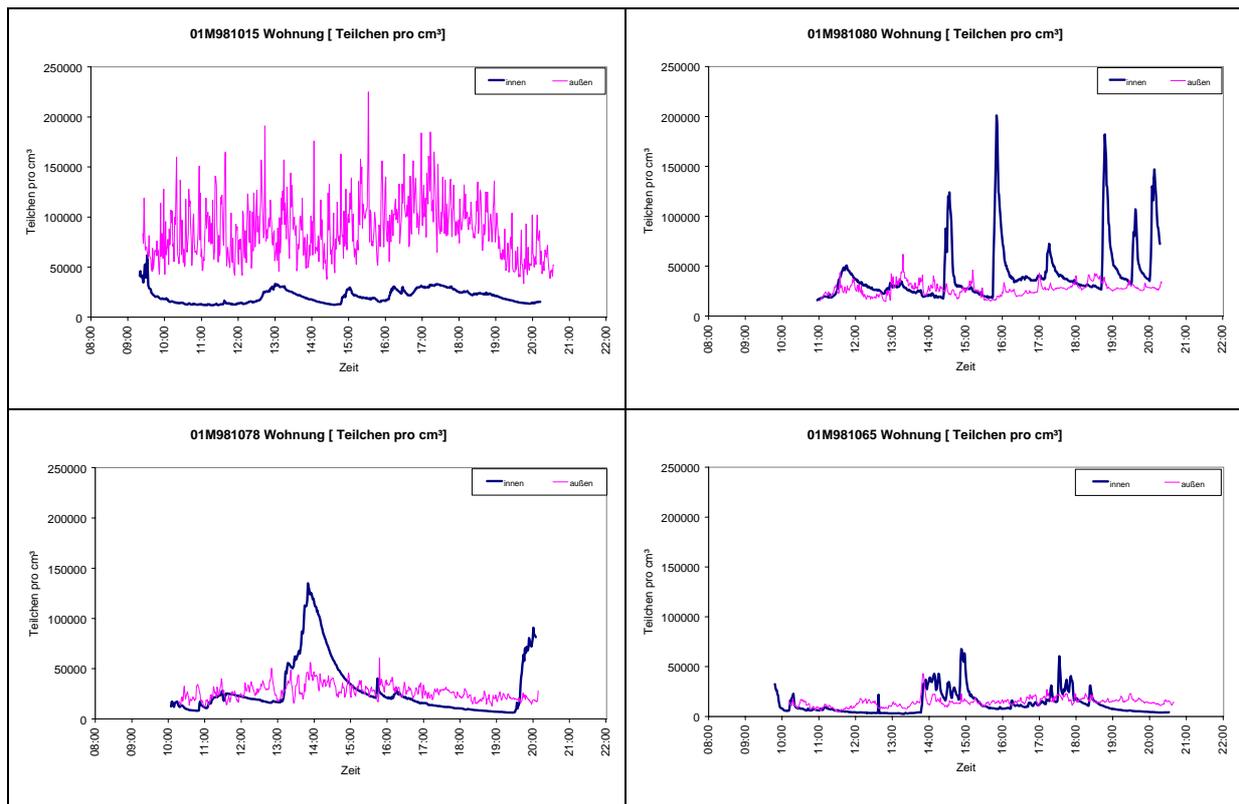




**Abbildung 10:** Zeitlicher Verlauf der Partikelkonzentration in verschiedenen Innenräumen mit unterschiedlichem Aktivitätsmuster

In der Außenluft war die Dauer von Belastungsspitzen deutlich geringer als in der Innenraumluft; insgesamt zeigte die Hintergrundbelastung der Partikelanzahlkonzentration einen größeren Rauschpegel als in der Innenraumluft (Abbildung 11). In der Umgebung verkehrsnaher Wohnungen traten höhere Partikelzahlen auf als an wenig verkehrsbelasteten Standorten. Das Maximum betrug in Mannheim in der Außenluft 225.000 Partikel/cm<sup>3</sup>, in Aulendorf 77.000 Partikel/cm<sup>3</sup>.

Ein Zusammenhang zwischen der Partikelkonzentration in der Außenluft und im Innern der Räume war bei den zeitgleich durchgeführten Messungen nicht zu erkennen (Abbildung 11). Hohe Partikelzahlen in der Außenluft machten sich in der Innenraumluft kaum bemerkbar; Quellen für eine erhöhte Partikelanzahl waren den Aktivitäten in den Innenräumen zuzuordnen.



**Abbildung 11:** Vergleich der Partikelanzahlkonzentration in der Außen- und Innenraum von Wohnungen

## A.4 Langzeituntersuchungen zu Auswirkungen von Reinigungsmaßnahmen

(modifiziert nach Gabrio)

### A.4.1 Auswahl und Charakterisierung der Messorte

Von Dezember 2005 bis Juli 2006 wurden innerhalb des Projektes Beobachtungsgesundheitsämter in Baden-Württemberg orientierende Untersuchungen zur Feinstaubbelastung in 38 Schulen (Abbildung 12) durchgeführt. Die Feinstaubbelastung wurde dabei mit verschiedenen Untersuchungsverfahren sowohl in den Klassenräumen als auch in der Außenluft ermittelt:

- Mit der Laserpartikelzählung (LPC) wurde die Anzahl der feinen bis gröberen Partikel (15 Partikelgrößen  $>0,30 \mu\text{m}$  bis  $20 \mu\text{m}$ ) in der Luft kontinuierlich bestimmt. Aus dieser Anzahl wurde das Volumen der einzelnen Partikelgrößenfraktionen errechnet. Das so errechnete Volumen ist proportional der Masse dieser Fraktionen.
- Mit der Kondensationspartikelzählung (CPC) wurde die Anzahl der ultrafeinen Partikel (UFP)  $>10 \text{ nm}$  kontinuierlich bestimmt. Dieses Messverfahren gibt Auskunft über die aktuelle örtliche Verkehrsbelastung.
- Mit der gravimetrischen Impaktionsmethode wurde die Masse der Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser  $< 2,5 \mu\text{m}$  diskontinuierlich jeweils in den Vormittagsstunden bestimmt ( $\text{PM}_{2,5}$ ). Diese Messergebnisse sollten einen Bezug zu den allgemein im Landesmessnetz erfassten  $\text{PM}_{10}$  herstellen. Von einigen Wissenschaftlern wird davon ausgegangen, dass sich die  $\text{PM}_{2,5}$ -Daten toxikologisch besser interpretieren lassen als die  $\text{PM}_{10}$ -Werte.
- Mit der Streulichtfotometrie wurde in einigen Schulen darüber hinaus die  $\text{PM}_{2,5}$ - und  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration kontinuierlich bestimmt.

Außerdem wurde in den Klassenzimmern die Temperatur, die relative Feuchtigkeit und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration ermittelt, um das Lüftungs- und Nutzungsverhalten abschätzen zu können.



**Abbildung 12:** Messorte der untersuchten Schulen

Aufgrund der anhaltenden Diskussion in der Öffentlichkeit über Möglichkeiten den Anstieg der Feinstaubkonzentration während des Unterrichtes zu reduzieren, wurde außerdem in der 4. Klasse einer Grundschule von November 2006 bis Juli 2007 eine Feinstaubmessung durchgeführt. Das Lüftungsverhalten wurde durch die Messung der Kohlendioxid-Konzentration verfolgt. Um den Einfluss der Reinigung auf die Feinstaubkonzentration zu ermitteln, wurde das Klassenzimmer im Wechsel von ein bis drei Wochen normal bzw. verstärkt gereinigt. In einem Untersuchungsabschnitt wurde das Klassenzimmer überhaupt nicht gereinigt.

#### **A.4.2 Messmethoden**

##### **Gravimetrische Bestimmung der PM<sub>2,5</sub>-Konzentration**

KleinfILTERgerät der Firma Derenda in Anlehnung an die VDI Richtlinie 2463 Blatt 7 und Blatt 8. Messzeitraum: in der Regel 5 Tage ohne zwischenzeitlichen Filterwechsel; Probenahmedauer: ca. 6 Stunden während der Nutzung (Unterricht).

##### **Bestimmung der Partikelanzahl in 15 Partikelgrößenfraktionen von 0,30 – 20 µm**

Laserpartikelzähler (LPC) - Portable Aerosol Spectrometer 1.108 der Firma Grimm. Die kontinuierlichen Messungen erfolgten in Zeitintervallen von 1 Min bzw. 10 Min; Messzeitraum: in der Regel eine Woche.

##### **Bestimmung der Gesamt-Partikelanzahl von ultrafeinen Partikel (UFP) größer 10 nm**

Kondensationspartikelzähler CPC 3007 der Firma TSI. Die kontinuierlichen Messungen erfolgten in Zeitintervallen von 1 Min; Messzeitraum: in der Regel 8 h bei Raumnutzung (Unterricht).

##### **Bestimmung der PM<sub>2,5</sub> - und PM<sub>10</sub> - Konzentration mittels Streulichtphotometrie**

zeitgleich mit dem Air Pollution Monitor APM-2 der Firma Derenda. Die kontinuierlichen Messungen erfolgten in Zeitintervallen von 15 Min bzw. 20 Min; Messzeitraum in der Regel eine Woche bzw. durchgehend von November 2006 bis Juli 2007.

##### **Bestimmung von Temperatur und Feuchte sowie CO<sub>2</sub>-Gehalt der Innenraumluft**

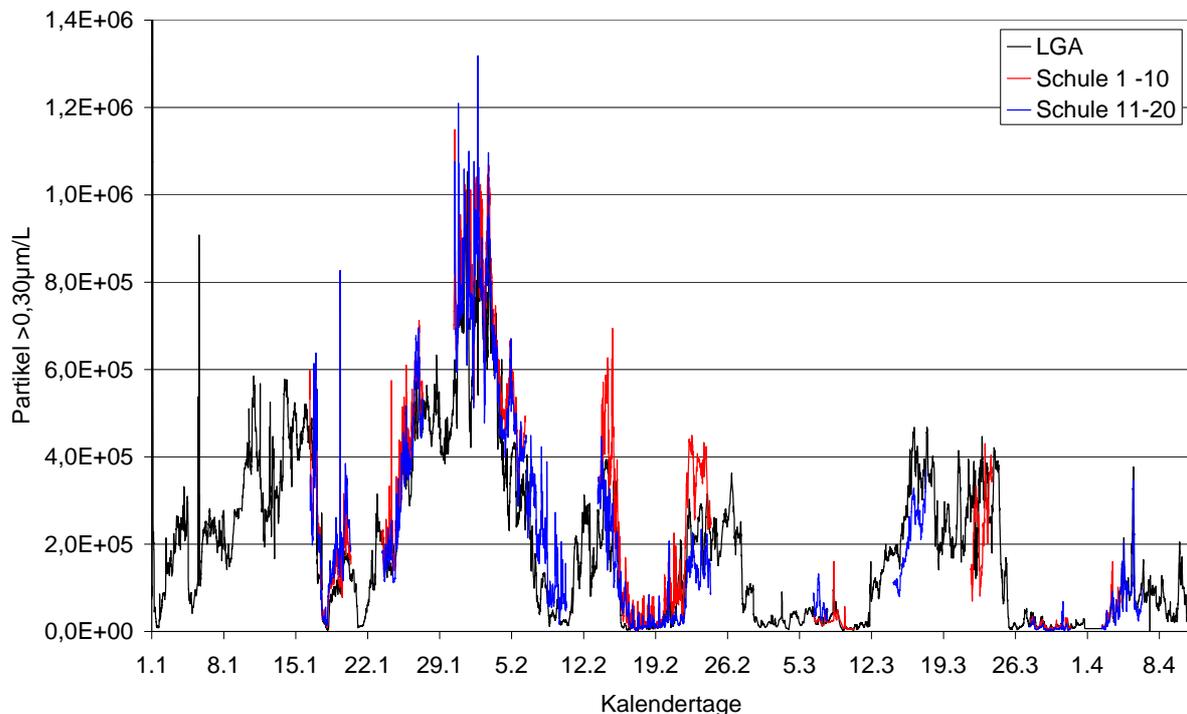
Temperatur und Feuchte wurden kontinuierlich mit dem Datenlogger Testostor 175 der Firma Testo (Zeitintervall 1 Min) gemessen. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt wurde ebenfalls jede Minute mit dem Testo 950 bestimmt.

Die Probenahme von Außenluft erfolgte 2005/06 in der Regel in einem Abstand von ca. 1 m von der Gebäudeaußenwand. Das entsprechende Messgerät stand dabei in einem Nebenraum (dasselbe Stockwerk, dieselbe Gebäudeseite). War dies nicht möglich, wurde ein Schlauch durch ein geöffnetes Fenster geführt, das Fenster abgedichtet und mit dem Messgerät verbunden. Die Messungen erfolgten zeitgleich mit den Innenraummessungen. Im Untersuchungsabschnitt 2006/07 wurde die Außenluftmessung im Garten eines Wohnhauses durchgeführt, das zu dem Schulkomplex gehört. Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Microsoft Excel Programm 2000.

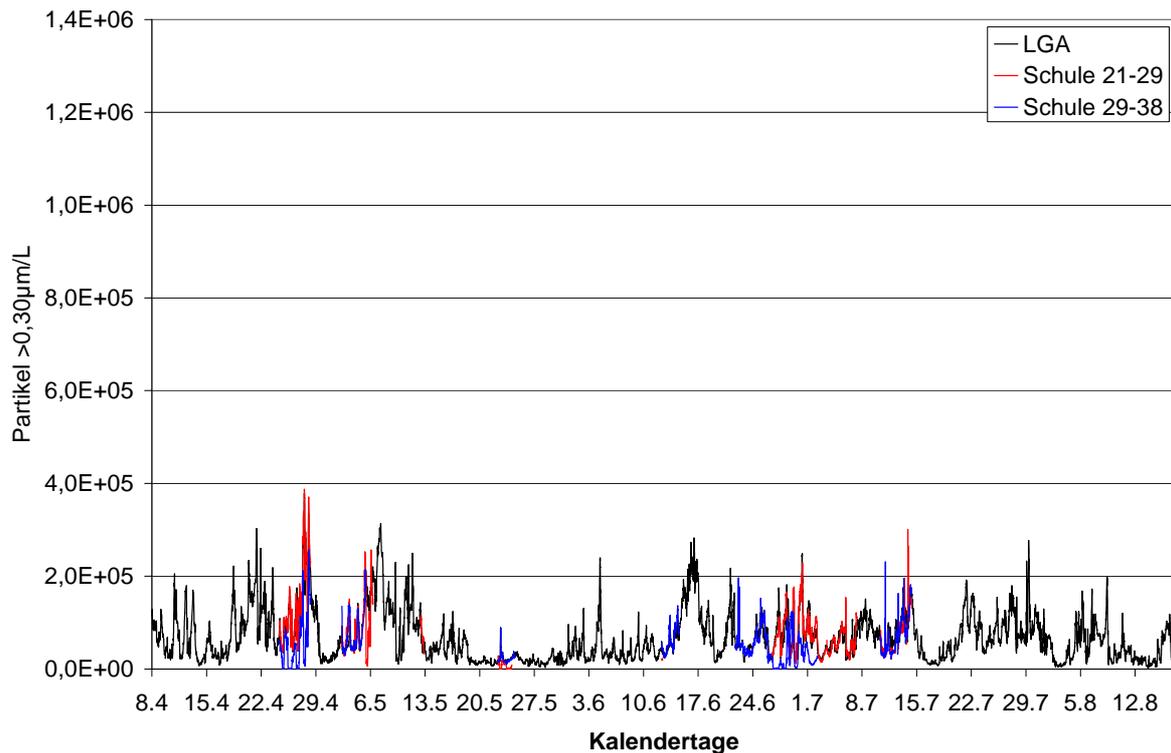
#### A.4.3 Ergebnisse zu Messungen in 38 Schulen 2005/06

Aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen (wie z.B. meteorologische Wetterlage, Jahreszeit, bauliche Gegebenheiten, Art des Fußbodens, Aktivitäten im Raum, Art und Häufigkeit der Reinigung, Verkehrseinfluss, Art und Häufigkeit der Lüftung) auf die Feinstaubkonzentration im Innenraum sowie der bisher geringen Anzahl durchgeführter Messungen, haben die durchgeführten Untersuchungen nur orientierenden Charakter.

Die Partikelanzahl in der Außenluft wird hauptsächlich von der meteorologischen Wetterlage bestimmt. So wurde festgestellt, dass sich die Partikelanzahl  $> 0,30 \mu\text{m}$  in der Außenluft im Bereich der verschiedenen Schulen nur geringfügig von der mittels einer Parallelmessung erhaltenen Partikelanzahl  $> 0,30 \mu\text{m}$  im Bereich des Landesgesundheitsamtes (LGA) in Stuttgart unterscheidet (Abbildung 13 und Abbildung 14).



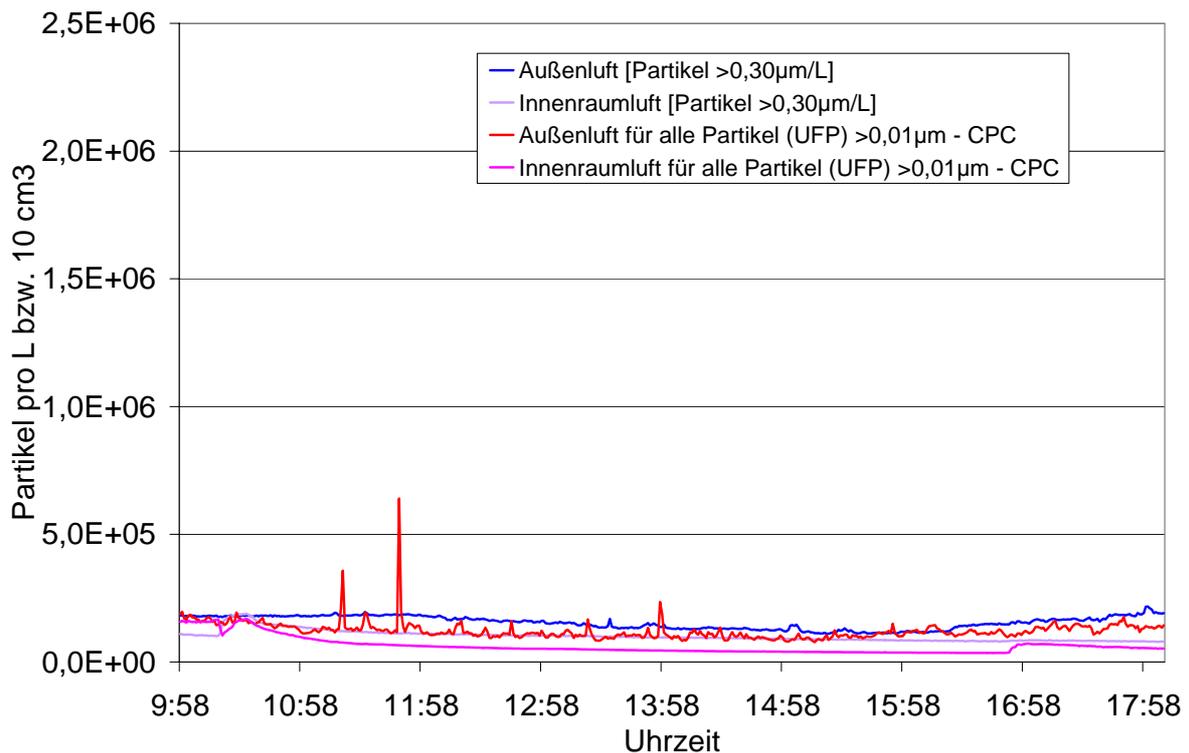
**Abbildung 13:** Partikel  $>0,30\mu\text{m}/\text{L}$  in Umgebungsluft von Schulen in Baden-Württemberg im Vergleich zur Umgebungsluft des LGA (Dezember 2005 bis April 2006)



**Abbildung 14:** Partikel >0,30µm/L in Umgebungsluft von Schulen in Baden-Württemberg im Vergleich zur Umgebungsluft des LGA (April 2006 bis Juli 2006)

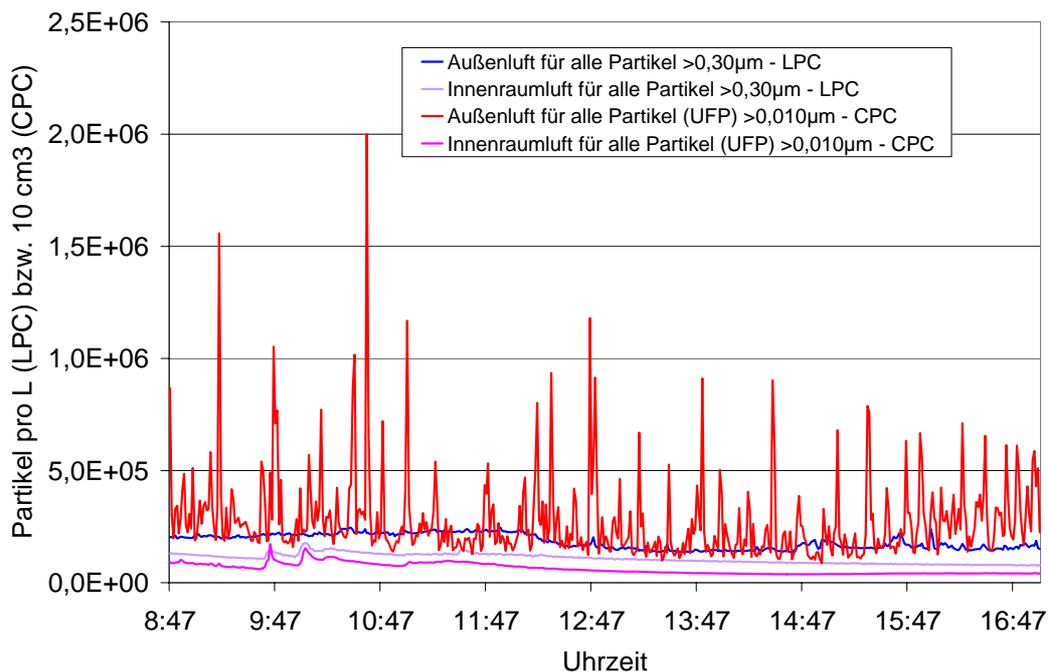
Dabei wurden jeweils 2 Schulen während einer Woche untersucht, diese Messungen sind in Abbildung 15 jeweils rot bzw. blau gekennzeichnet. Die Gesamtanzahl der Partikel > 0,30 µm im Außenluftbereich der Schulen liegt in der Regel in demselben Bereich wie die an der parallel gemessenen Schule und an der Referenzwertstelle in Stuttgart. Damit wird deutlich, dass unabhängig vom Ort und damit vom Verkehrseinfluss die verschiedenen meteorologischen Wetterlagen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtanzahl der Partikel > 0,30 µm haben.

Die Ergebnisse der Messungen mit dem Kondensationspartikelzähler zeigten, dass zumindest im Winter die verkehrsbedingten ultrafeinen Partikel nicht bzw. nur zu einem geringen Anteil in die Innenraumluft übergehen (Abbildung 15 bis Abbildung 19). Im Sommer lag aufgrund des häufigeren Lüftungsverhaltens eine andere Situation vor (Abbildung 20).

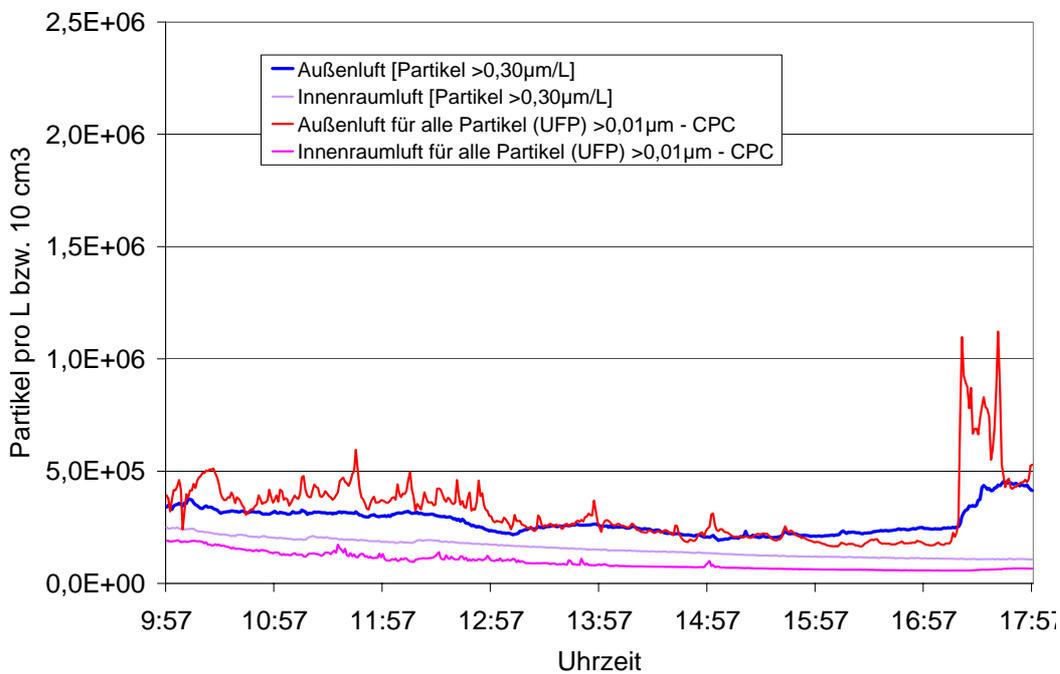


**Abbildung 15:** Feinstaubkonzentration ermittelt mit dem CPC [Partikel >0,01µm/10 cm³] und dem LPC [Partikel >0,30µm/L] – Ländliche Region

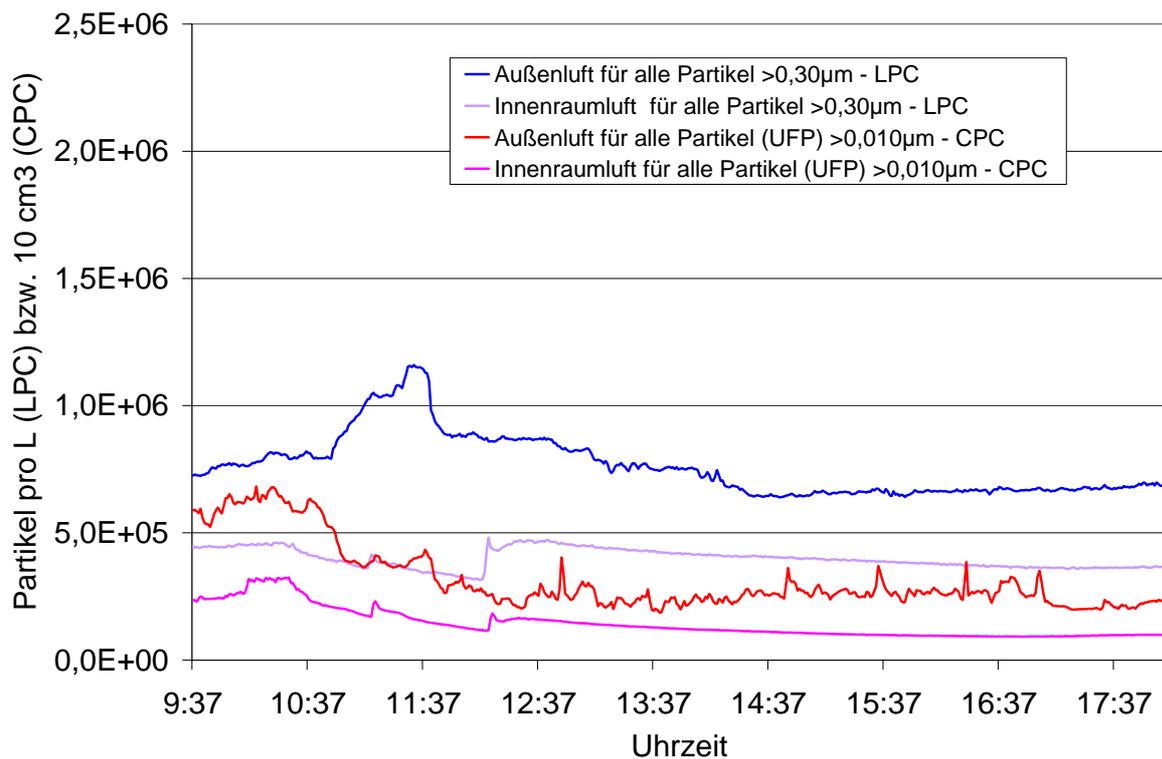
Die mit dem LPC ermittelte Gesamtanzahl der Partikel > 0,30 µm schwankt über den Tageslauf im Außenluftbereich deutlich weniger als die der UFP (Abbildung 15 bis Abbildung 19). Diese aus der Außenluft stammenden schwankenden UFP-Konzentrationen sind in den Wintermonaten in der Innenraumluft de facto nicht erkennbar. Für die Gesamtfinstaubpartikelanzahl > 0,3 µm liegen sowohl in der Außenluft als auch in der Innenraumluft über den Tagesverlauf weitgehend konstante Partikelzahlen vor.



**Abbildung 16:** Feinstaubkonzentration ermittelt mit dem CPC [Partikel >0,01µm/10 cm<sup>3</sup>] und dem LPC [Partikel >0,30µm/L] – Innerstädtische Verkehrsstraße



**Abbildung 17:** Feinstaubkonzentration ermittelt mit dem CPC [Partikel >0,01µm/10 cm<sup>3</sup>] und dem LPC [Partikel >0,30µm/L] – Schule geschützt durch einen Holzzaun neben einer Fernverkehrsstraße



**Abbildung 18:** Feinstaubkonzentration ermittelt mit dem Kondensationspartikelzähler [Partikel >0,01µm/10 cm<sup>3</sup>] und dem Laserpartikelzähler [Partikel >0.30µm/L]  
– Schule mit der, bedingt durch die Wetterlage, höchsten Feinstaubbelastung

In Abbildung 18 ist beispielhaft die Schule mit der höchsten PM<sub>2,5</sub>-Konzentration in der Außenluft dargestellt, hier zeigt sich eine relativ geringe Schwankung der Anzahlkonzentration der UFP in der Außenluft. Ursache dafür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit ein geringer Kfz-Verkehr im Umfeld der Schule, was sich bei der Ortsbegehung auch bestätigte. In diesem Beispiel ist jedoch das Niveau der Gesamtanzahl der Partikel > 0,30 µm sowohl in der Außenluft als auch in der Innenraumluft deutlich höher als in der Schule, die an einer verkehrsreicheren Straße liegt (Abbildung 16-Abbildung 17).

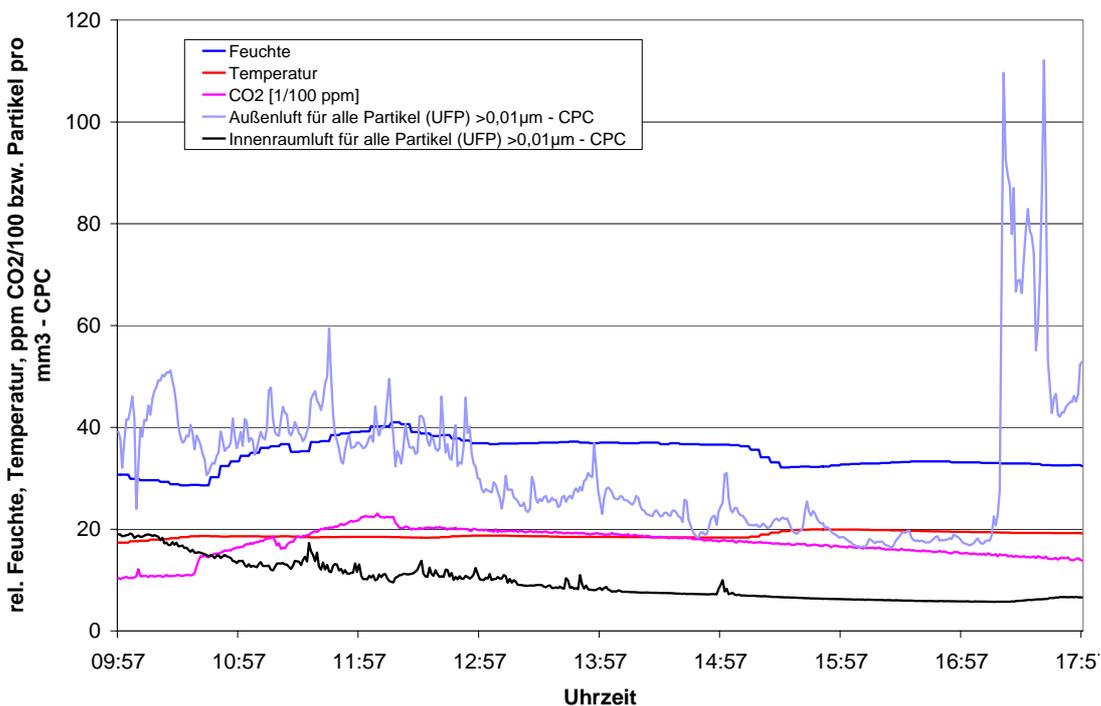


Abbildung 19: Feinstaubkonzentration [ $>0,01\mu\text{m}/\text{mm}^3$ ], außen und innen, Schule im städtischen Gebiet (Winter)

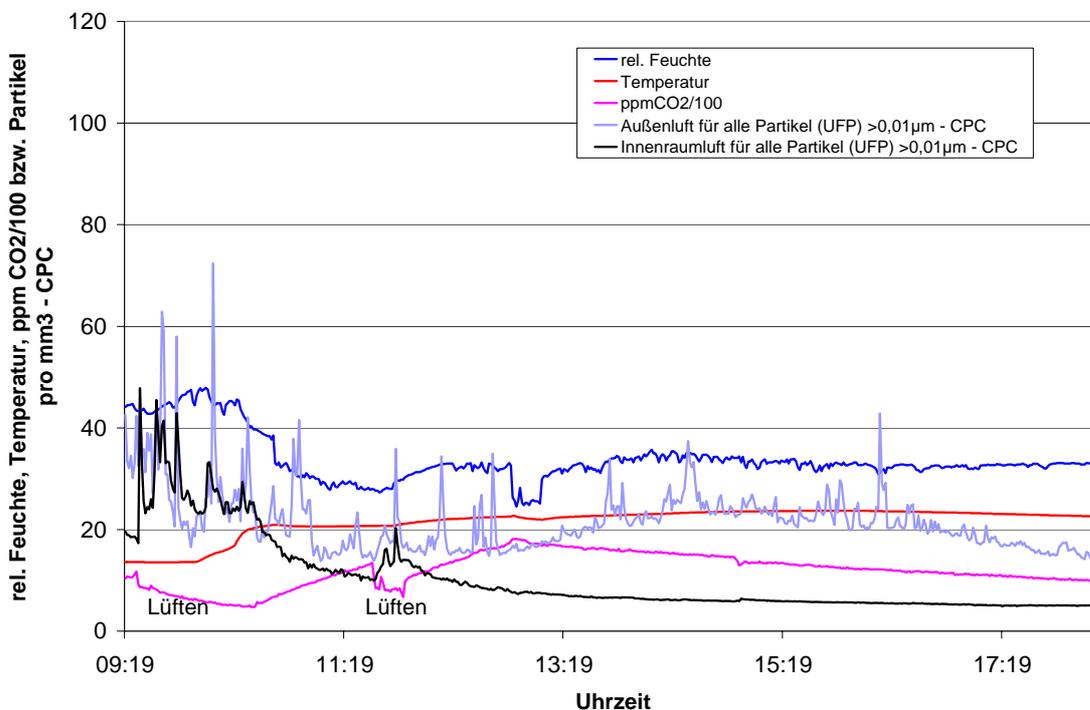
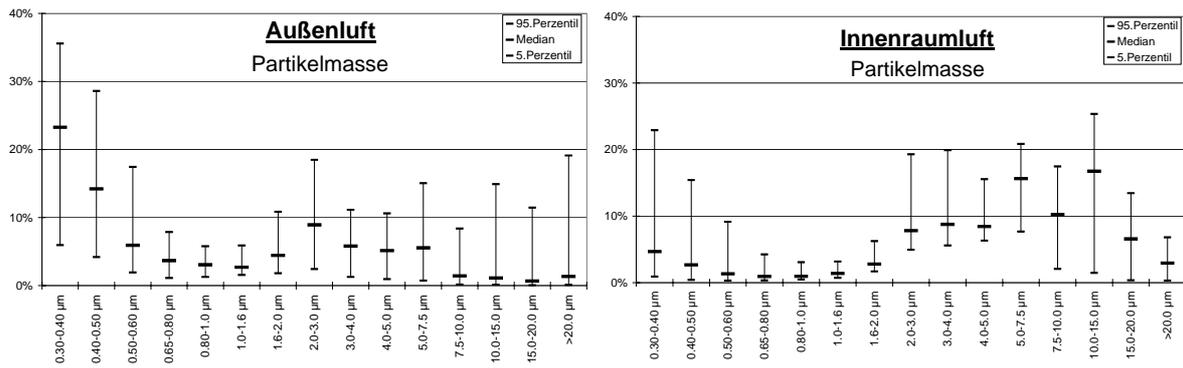


Abbildung 20: Feinstaubkonzentration [ $>0,01\mu\text{m}/\text{mm}^3$ ], außen und innen, Schule im städtischen Gebiet (Sommer)

Wird vermehrt gelüftet, wie dies in den Sommermonaten üblich ist, so zeigt sich in Abhängigkeit von den Lüftungsmaßnahmen, die durch parallele Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration erkannt werden, ein Einfluss der Außenluft. (Abbildung 20). Während des Lüftens sind im Innenraum die durch den Kfz-Verkehr bedingten lokalen Konzentrationsschwankungen der UFP in Korrelation zu denen der Außenluft zu erkennen. Es zeigt sich aber auch, dass eine wesentliche Abschwächung der Spitzenbelastung der Außenluft im Innenraum auftritt. Dieser Effekt wird auch deutlich, wenn man die Streubreite der Einzelmessungen der Konzentration der UFP an den 38 Schulen (Innenraumlufte und Außenluft) vergleicht. Bei Werten im Außenluftbereich treten erwartungsgemäß größere Schwankungen auf (Streuung der Spannweite des 5. bis 95. Perzentils 140 % vom Median). Im Innenraumbereich liegt diese Streuung unabhängig von der Jahreszeit in der Regel niedriger (120 %), wobei der Median der Konzentration der UFP im Innenraum im allgemeinen um den Faktor 0,4 niedriger liegt als in der Außenluft.

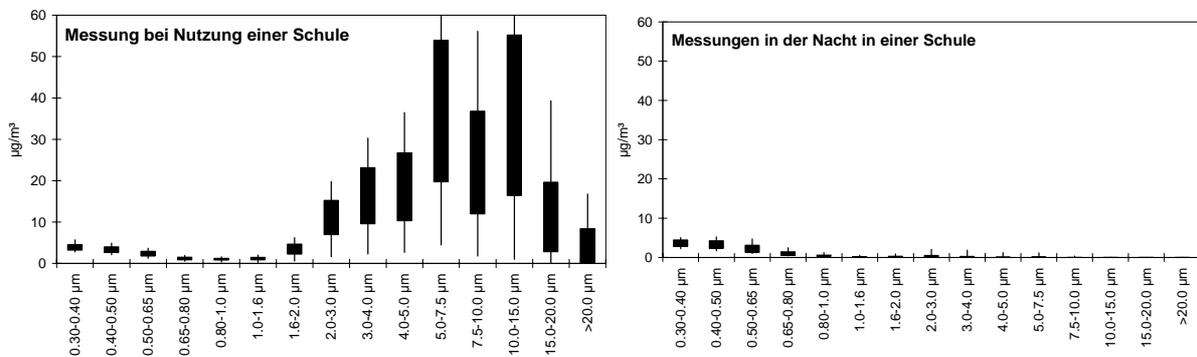
An 38 Schulen wurde die mittlere prozentuale Verteilung der Partikelanzahl in der Außenluft und der Innenraumlufte mittels LPC bestimmt. Dabei zeigt sich, dass bei allen 38 Schulen sowohl in der Außenluft als auch in der Innenraumlufte der mittlere prozentuale Anteil der Partikel der kleinsten Fraktion von 0,30 bis 0,40 µm mit geringer Streuung ca. 70 % der Gesamtpartikelzahl ausmacht. Dieser mittlere prozentuale Anteil nimmt mit steigender Partikelgröße stark ab, und liegt für Partikel von 1,0 bis 20 µm in der Außenluft bei insgesamt ca. 0,4 % und in der Innenraumlufte bei insgesamt ca. 1,3 %.

Die mittels LPC gemessene Partikelanzahl ist wegen der unterschiedlichen Messgröße nicht direkt mit den gravimetrisch bestimmten PM<sub>2,5</sub>- bzw. PM<sub>10</sub>-Werten vergleichbar. Eine Möglichkeit, diese Daten miteinander in Bezug zu setzen, besteht darin, aus der Partikelanzahl, dem Partikeldurchmesser und der Dichte die Partikelmasse der einzelnen Partikelfractionen zu berechnen. Hieraus lässt sich anschließend die Gesamtpartikelmasse näherungsweise errechnen. Aus der mittleren prozentualen Verteilung der Partikelanzahl an den 38 Schulen wurde die Partikelmasse der einzelnen Partikelfractionen in der Außenluft und in der Innenraumlufte berechnet und in Abbildung 16 dargestellt. Betrachtet man die so abgeleitete prozentuale Verteilung der Masse der einzelnen Partikelfractionen in der Außenluft, so fällt auf, dass der durchschnittliche prozentuale Anteil der Fraktion von 0,30 bis 0,40 µm nur noch ca. 20 - 25 % - und nicht 70 % wie bei Betrachtung der Partikelanzahl - ausmacht und die Fraktion von 1,0 bis 20 µm insgesamt ca. 35 - 40 % beiträgt. In der Innenraumlufte liegen die entsprechenden Werte bei ca. 5 % bzw. ca. 80 % (Abbildung 21). Im Gegensatz zur Partikelanzahl tritt bei der Betrachtung der berechneten Partikelmasse also eine deutlich unterschiedliche Verteilung der Partikelfractionen in der Außenluft und der Innenraumlufte auf.



**Abbildung 21:** Prozentuale Verteilung der mittels LPC berechneten Partikelmasse in den unterschiedlichen Fraktionen der Außen- und Innenraumluft

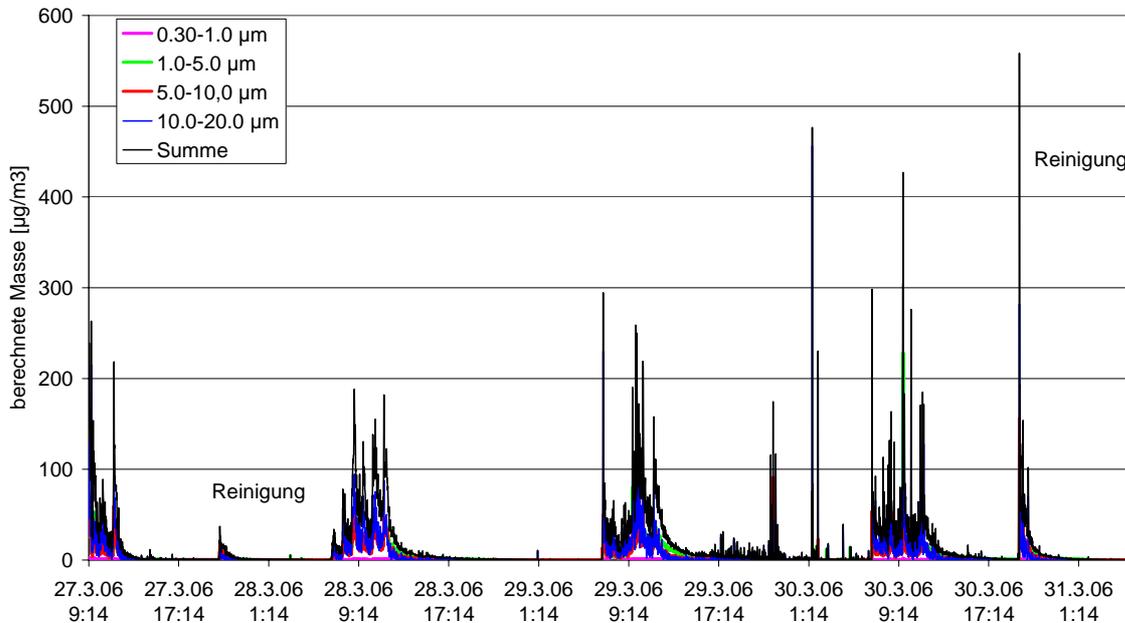
Der Effekt des Anstieges der Massenkonzentration während der aktiven Nutzung wird in Abbildung 22 deutlich. In den Phasen der aktiven Nutzung steigt die Konzentration der Partikel  $> 1,0 \mu\text{m}$  stark an. Die höchste Konzentration wurde bei der hier beispielhaft abgebildeten Schule für die Fraktion von 5,0 bis 7,5  $\mu\text{m}$  festgestellt. Der Median der Konzentration der parallel gemessenen Außenluft lag für die Fraktion 0,30 bis 0,40  $\mu\text{m}$  bei  $3,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (5. Perzentil  $1,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 95. Perzentil  $5,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und nahm für größere Fraktionen stark ab. Die während der Nacht in allen Schulen gemessene durchschnittliche Gesamtpartikelkonzentration liegt bei ca. 60% der zeitgleich gemessenen Konzentration der Außenluft.



**Abbildung 22:** Konzentration der aus LPC-Anzahlmessungen berechneten Partikelmasse der verschiedenen Feinstaubpartikelfraktionen tagsüber und in der Nacht in einer Schule

In Abbildung 23 ist zeitaufgelöst die aus der Partikelanzahl berechnete Partikelmasse der verschiedenen Partikelfraktionen im Laufe einer Woche für eine Schule dargestellt, wobei aus Gründen der Darstellbarkeit in dem Bild die 15 gemessenen Partikelfraktionen zu vier Fraktionen zusammengefasst wurden. Bei Schulbetrieb und bei Reinigungsarbeiten nahm

die Konzentration der größeren Partikel stark zu. Die Höhe der Zunahme der Staubkonzentration und ihre Partikelgrößenverteilung ist in den einzelnen Schulen unterschiedlich. Ein positiver (d.h. mindernder) Einfluss einer Reinigungsmaßnahme am Vorabend auf den Feinstaub im Innenraum unter Nutzungsbedingungen kann aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden (Abbildung 23).

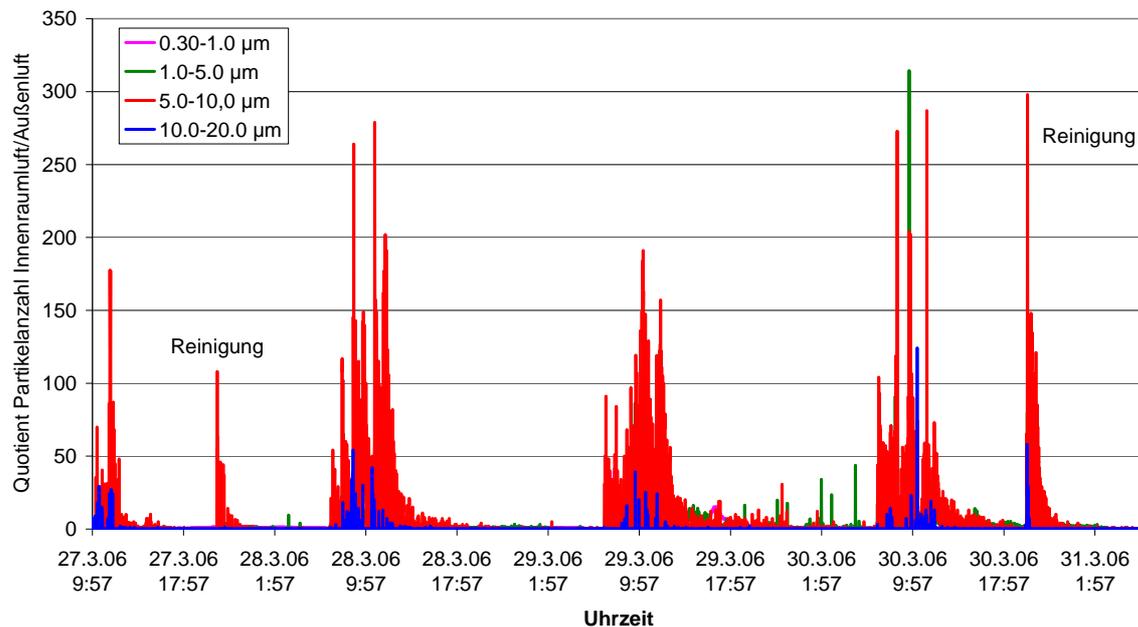


**Abbildung 23:** Feinstaubbelastung in einem Klassenzimmer während einer Woche. Dargestellt ist die aus den LPC-Partikelanzahlmessungen berechnete Massenkonzentration

Da sich die Partikelanzahlen in den einzelnen Partikelfractionen um mehrere Größenordnungen voneinander unterscheiden, ist es schwierig, alle Partikelfractionen gleichzeitig direkt grafisch darzustellen. Deshalb wurden in Abbildung 24 die Änderungen der Partikelanzahl der verschiedenen Partikelfractionen während der Nutzung in Form des Verhältnisses der Partikelanzahl in der Innenraumluft zu der in der Außenluft dargestellt. Diese Darstellungsmöglichkeit wurde gewählt, da wie oben beschrieben, die prozentualen Verteilungen der Partikelanzahlen für die Außenluft und die ungestörte Innenraumluft ähnlich sind und somit die Konzentrationsänderungen durch die Nutzung deutlich erkennbar sind. Voraussetzung ist darüber hinaus, dass die Partikelanzahl der verschiedenen Partikelfractionen in der Außenluft über den Tagesverlauf weitgehend konstant ist. Wenn sie sich ändert, ändert sich auch der durch die Außenluft bestimmte Anteil in der Innenraumluft. Aufgrund der besseren Übersicht wurden in Abbildung 24 auch die 15 gemessenen Partikelfractionen zu vier Fraktionen zusammengefasst. In Abbildung 24 wird der Konzentrationsverlauf über einen Tag darge-

stellt. Während der schulischen Nutzung und der Reinigung nimmt die Partikelanzahl der größeren Partikel im Innenraum stark zu.

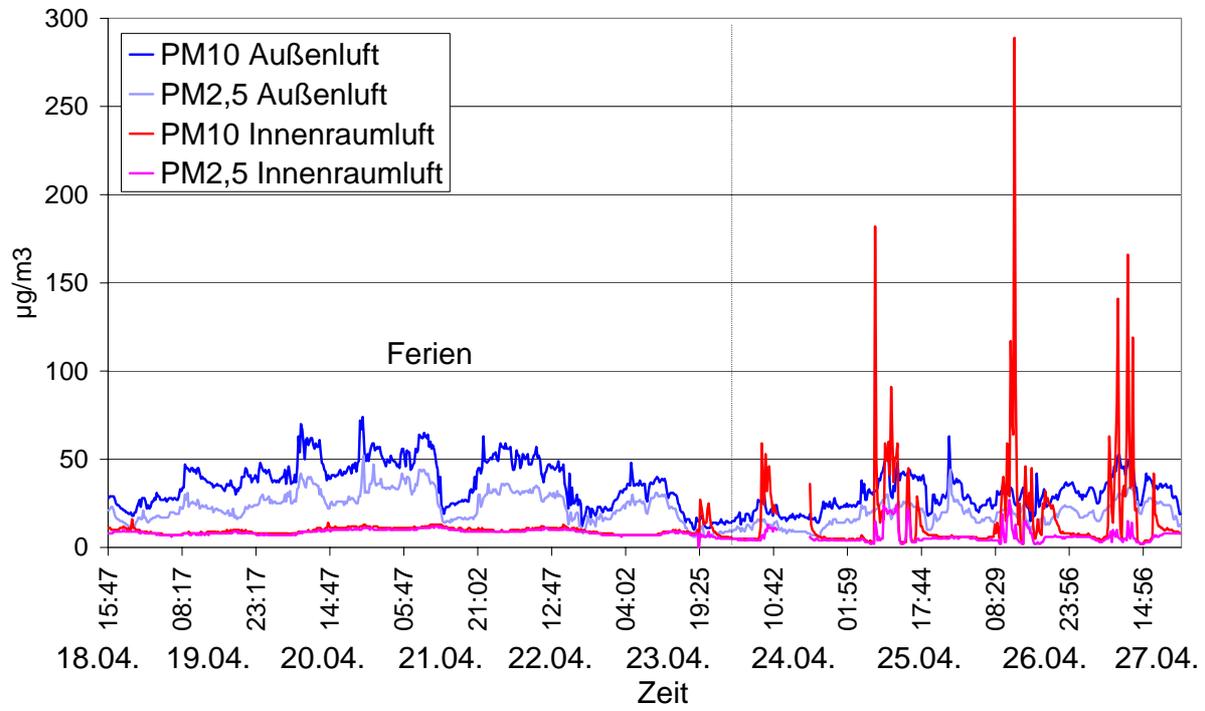
Die Veränderung der Feinstaubbelastung während der Nutzung kann also durch verschiedene Auswertemethoden, entweder durch Betrachtung der berechneten Partikelmasse (Abbildung 23) oder durch Betrachtung des Quotienten der Anzahlkonzentration Innenraumluft zu Außenluft (Abbildung 24), verdeutlicht werden. Abbildung 23 und Abbildung 24 weisen ähnliche Verläufe der Feinstaubbelastung während der Nutzung auf, sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der farbig dargestellten Partikelfractionen.



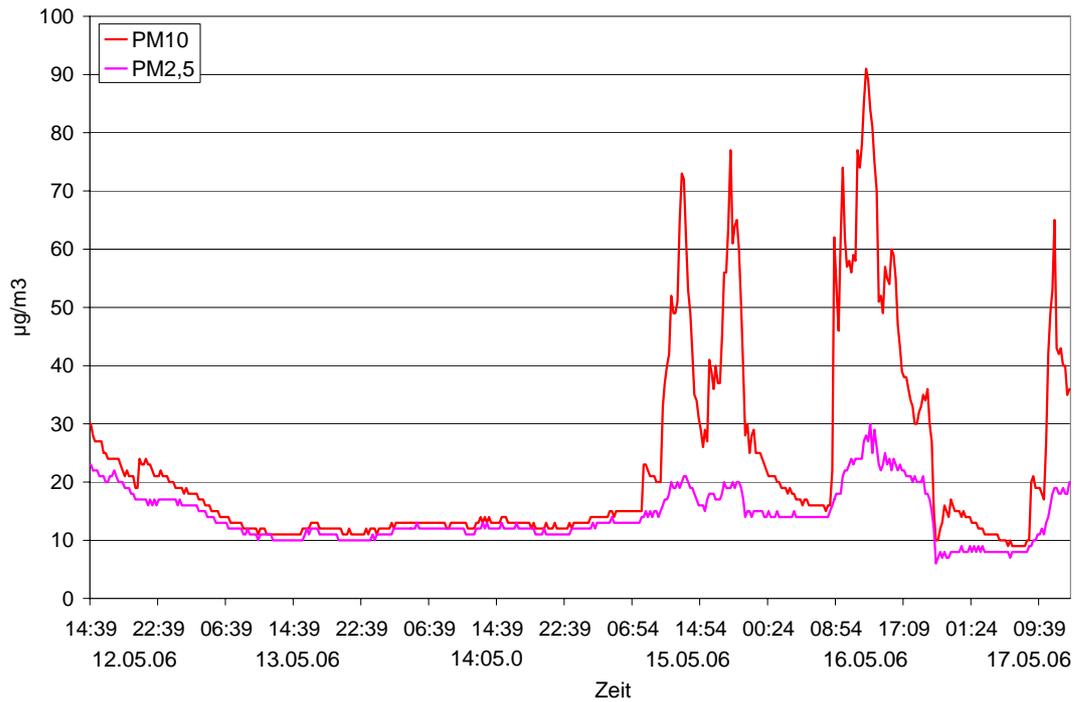
**Abbildung 24:** Feinstaubbelastung in einem Klassenzimmer während einer Woche – Quotient von Innenraum-Anzahlkonzentration zu Außenluft-Anzahlkonzentration

Mit relativ geringem Aufwand kann die Feinstaubbelastung ( $PM_{2,5}$  und  $PM_{10}$ ) zeitaufgelöst auch mit der Streulichtphotometrie erfasst werden. Abbildung 25 gibt die Ergebnisse der Messungen in einer Schule in den Ferien und in der Schulzeit wieder. Die Schwankungen der  $PM_{2,5}$ - und der  $PM_{10}$ -Konzentration in der Außenluft spiegeln sich in der Innenraumluft nicht wider, dies ist besonders während der Ferien deutlich zu erkennen. Während des Schulunterrichts kommt es zu deutlichen Erhöhungen, sowohl der  $PM_{10}$ - als auch in abgeschwächtem Maße der  $PM_{2,5}$ -Konzentration im Innenraum. Je nach Art der Nutzung konnte auch in anderen Innenräumen (Turnhallen, Messehallen, Kindergärten, Wohnungen usw. Abbildung 26 - Abbildung 29) eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration während der Nutzung nachgewiesen werden. Die Höhe und die Zusammensetzung dieser Feinstäube war

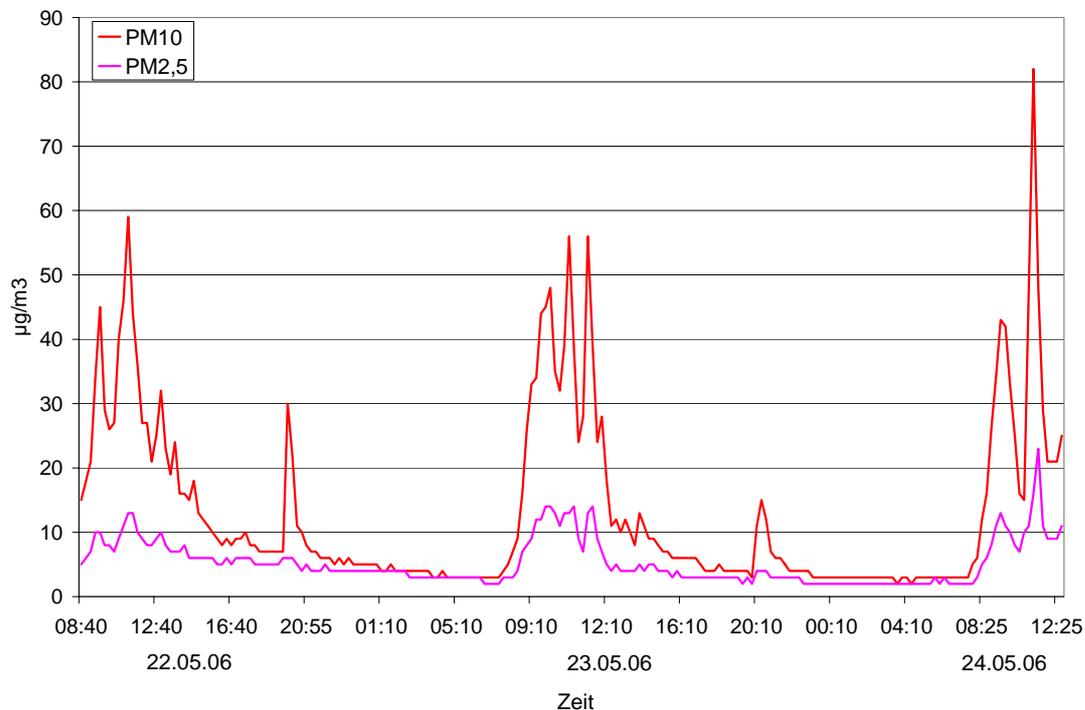
stark von den Aktivitäten, den baulichen Gegebenheiten und der Quellsituation in den jeweiligen Innenräumen abhängig.



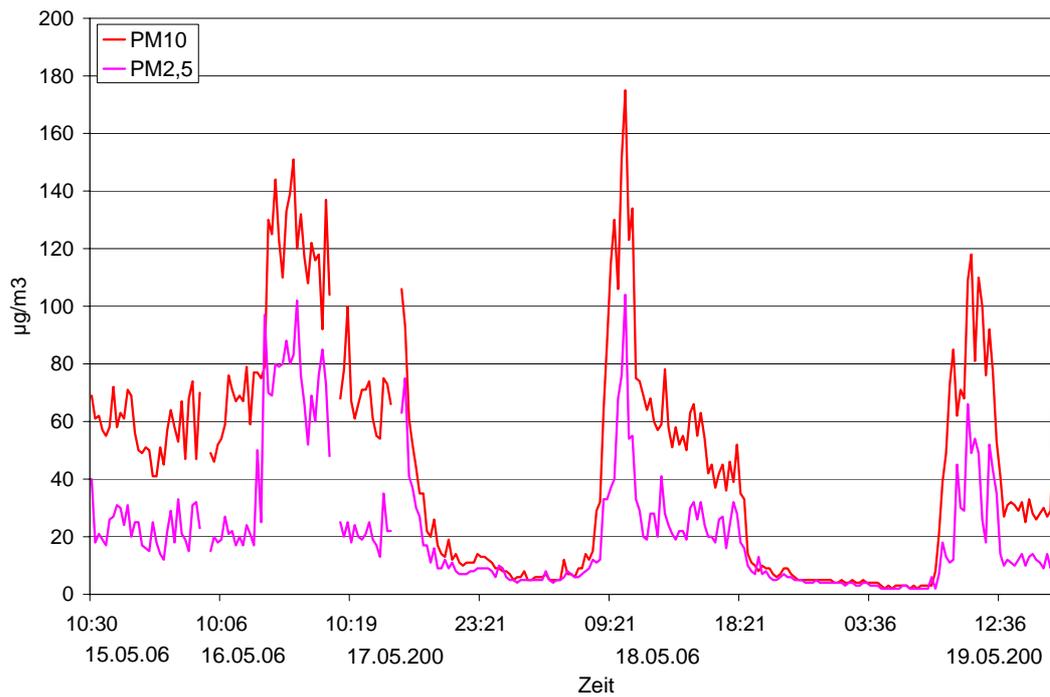
**Abbildung 25:** Bestimmung der  $\text{PM}_{2,5}$ - und  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration in der Außenluft und in der Innenraumluft in einer Schule mittels Streulichtfotometrie (Air Pollution Monitor APM-2)



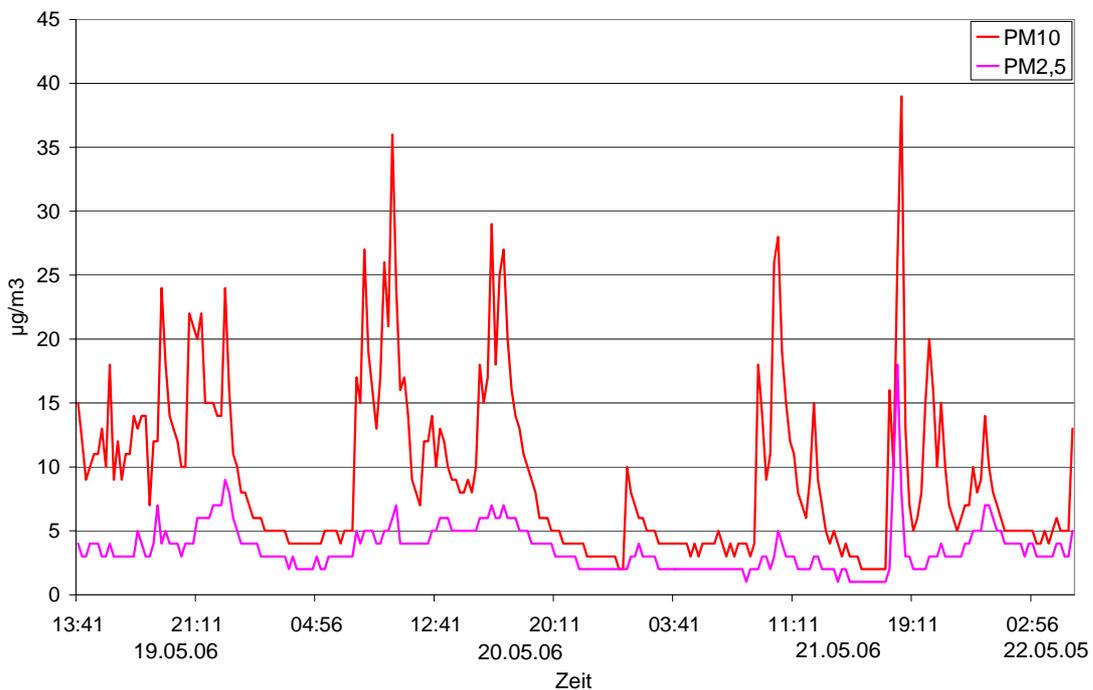
**Abbildung 26:** Bestimmung der  $\text{PM}_{2,5}$ - und  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration in der Innenraumluft in einer Turnhalle mittels Streulichtfotometrie (Air Pollution Monitor APM-2)



**Abbildung 27:** Bestimmung der  $\text{PM}_{2,5}$ - und  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration in der Innenraumluft in einem Kindergarten mittels Streulichtfotometrie (Air Pollution Monitor APM-2)



**Abbildung 28:** Bestimmung der  $\text{PM}_{2,5}$ - und  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration in der Innenraumluft in einer Messehalle mittels Streulichtfotometrie (Air Pollution Monitor APM-2)



**Abbildung 29:** Bestimmung der  $\text{PM}_{2,5}$ - und  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration in der Innenraumluft in einer Wohnung mittels Streulichtfotometrie (Air Pollution Monitor APM-2)

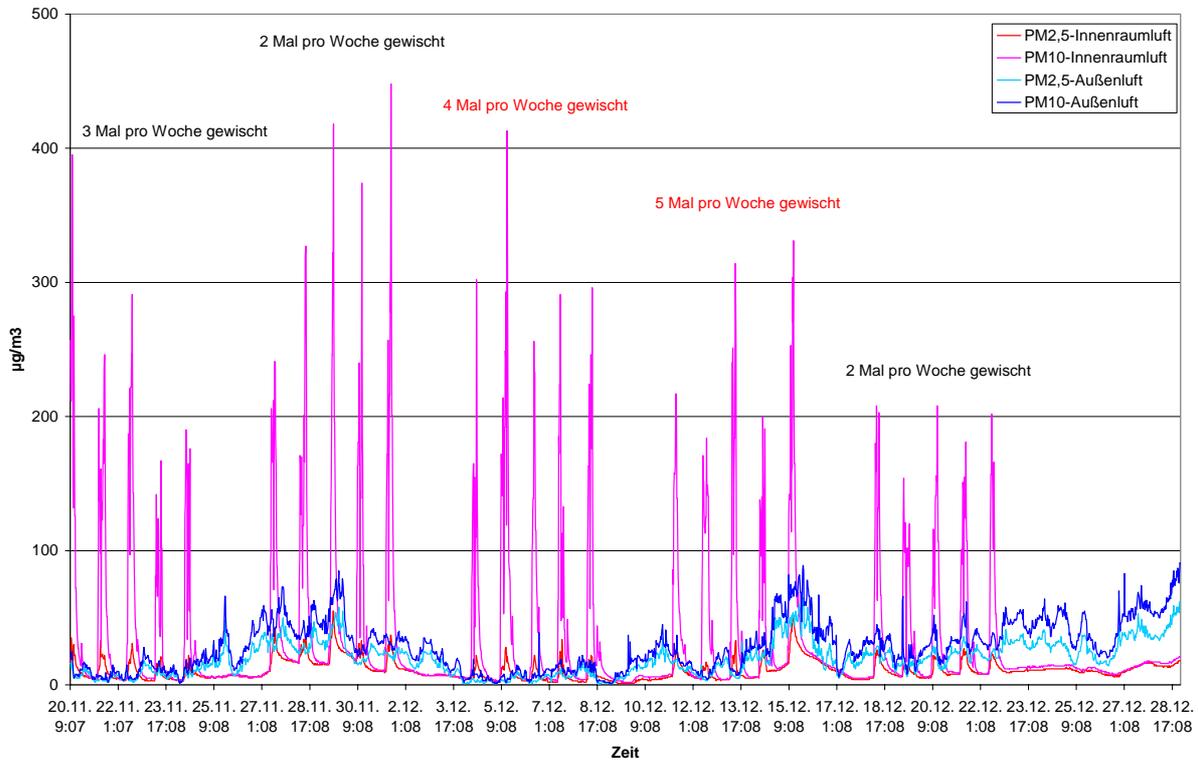
Die Ergebnisse der gravimetrischen Messungen der  $PM_{2,5}$  Konzentration in den untersuchten Schulen lagen in der Innenraumlufte und in der Außenluft im Mittel in einem ähnlichen Bereich (Tabelle 9). Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der kontinuierlichen Messverfahren bei denen es auch während des Schulbetriebes vor allem zu einer Erhöhung der Feinstaubkonzentration im Bereich der Partikelgröße von  $PM_{2,5}$  bis  $PM_{10}$  gekommen ist. Die höchsten  $PM_{2,5}$ -Konzentrationen in Klassenräumen wurden Ende Januar - Anfang Februar 2006 gemessen.

Tabelle 9: Gravimetrisch bestimmte PM<sub>2,5</sub>-Konzentration der Innenraumluft und der Umgebungsluft von Schulen

Beginn der Untersuchung	Innenraumluft	Außenluft	Innen/Außen
	[µg/m <sup>3</sup> ]	[µg/m <sup>3</sup> ]	
12.12.05	14,3	18,1	0,79
16.01.06	23,3	29,0	0,80
16.01.06	23,6	27,8	0,85
23.01.06	24,3	42,2	0,57
23.01.06	38,4	45,8	0,84
30.01.06	47,4	93,0	0,51
30.01.06	66,2	100,8	0,66
06.02.06	12,3	19,6	0,63
06.02.06	16,3	27,6	0,59
13.02.06	33,9	46,2	0,73
13.02.06	30,3		
20.02.06	24,5	7,9	3,10
20.02.06	16,4	29,7	0,55
06.03.06	33,7	11,0	3,06
06.03.06		13,4	
13.03.06	48,8	36,1	1,35
13.03.06	18,9	34,4	0,55
20.03.06	36,8	35,4	1,04
27.03.06	5,2	6,2	0,84
27.03.06	18,1	4,7	3,85
03.04.06	27,5	11,2	2,46
03.04.06	20,8	16,7	1,24
24.04.06	18,12	17,86	1,01
24.04.06	18,09	19,45	0,93
02.05.06	14,62	12,48	1,17
02.05.06	15,13	11,38	1,33
08.05.06	23,29	18,03	1,29
08.05.06	22,72	18,03	1,26
08.05.06	17,41	18,03	0,97
15.05.06	20,33		
15.05.06	18,70		
15.05.06	7,56		
22.05.06	5,58	4,95	1,13
22.05.06	13,32	5,38	2,48
12.06.06	15,97	13,35	1,20
12.06.06	7,89	12,20	0,65
19.06.06	10,72	10,68	1,00
19.06.06	8,19	10,68	0,77
19.06.06	8,89	10,68	0,83
26.06.06	15,13	11,38	1,33
26.06.06	15,13	11,38	1,33
03.07.06	7,87	9,14	0,86
10.07.06	8,49	11,16	0,76
<b>95. Perzentil</b>	<b>46,92</b>	<b>50,85</b>	<b>3,07</b>
<b>Median</b>	<b>18,1</b>	<b>16,7</b>	<b>0,95</b>
<b>5. Perzentil</b>	<b>7,6</b>	<b>5,3</b>	<b>0,6</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>20,8</b>	<b>22,6</b>	<b>1,19</b>

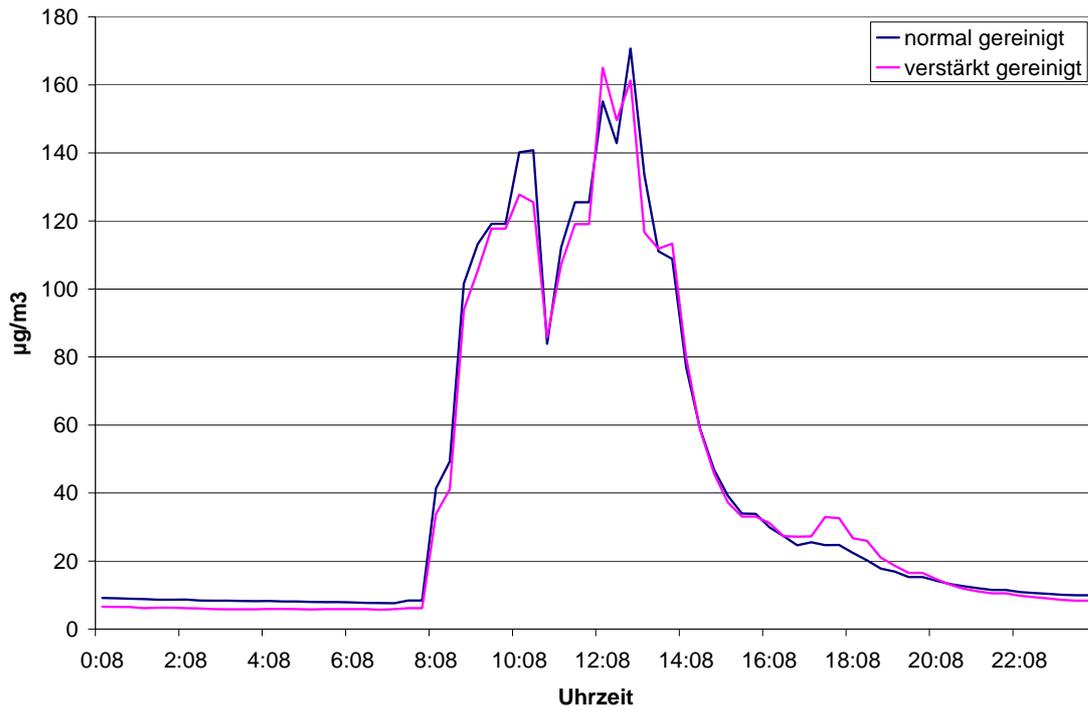
#### A.4.4 Ergebnisse zu Messungen in einer Schule von November 2006 bis Juli 2007

Während des Schulunterrichtes stieg die  $PM_{10}$ -Konzentration drastisch an und war deutlich höher als die der Außenluft. Auch die  $PM_{2,5}$ -Konzentration stieg in dieser Zeit an, aber in wesentlich geringerem Maße (Abbildung 30).

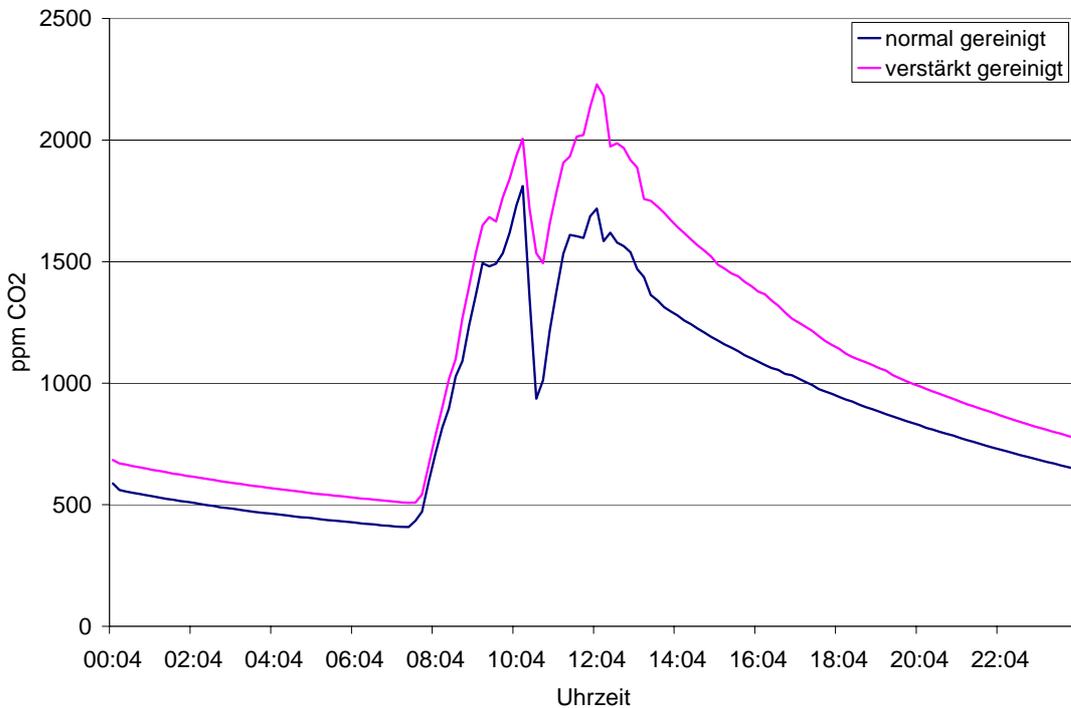


**Abbildung 30:**  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentration in der Innenraumluft und der Außenluft einer Schule (4. Klasse) im November/Dezember 2006

In der Außenluft lag das durchschnittliche Verhältnis von  $PM_{2,5}$  zu  $PM_{10}$  im gesamten Untersuchungsabschnitt bei 0,79, wobei dieses Verhältnis im Untersuchungsabschnitt November/Dezember bei 0,70 lag. In der Innenraumluft lag während des Unterrichts das durchschnittliche Verhältnis von  $PM_{2,5}$  zu  $PM_{10}$  im Untersuchungsabschnitt November/Dezember bei 0,17, wobei dieses Verhältnis in den anderen Untersuchungsabschnitten ähnlich war. Bezogen auf den Unterrichtstag konnte ein charakteristischer Verlauf der  $PM_{10}$ -Konzentration festgestellt werden. Mit Beginn des Unterrichts um 7:45 Uhr nahm die  $PM_{10}$ -Konzentration bis zur großen Pause um 10:10 zu (Abbildung 31). In der Regel wurde, wie in Abbildung 32 am Verlauf der Kohlendioxid-Konzentration zu erkennen ist, gelüftet. Parallel nahmen die  $PM_{10}$ - und die Kohlendioxid-Konzentration während der Pause ab. Mit der Wiederaufnahme des Unterrichts stieg die  $PM_{10}$ - und die Kohlendioxid-Konzentration wieder an.



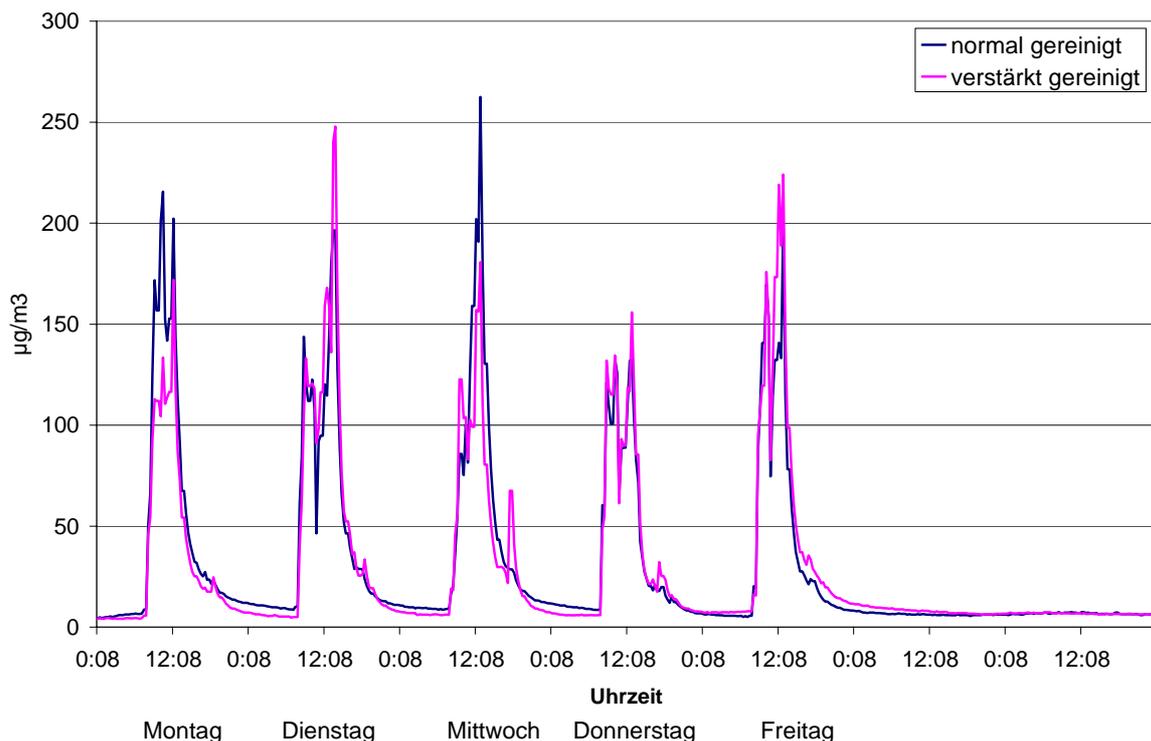
**Abbildung 31:** Durchschnittliche tägliche PM<sub>10</sub>-Konzentration während der Unterrichtstage (November bis Februar 2006/2007) bei normaler und verstärkter Reinigung



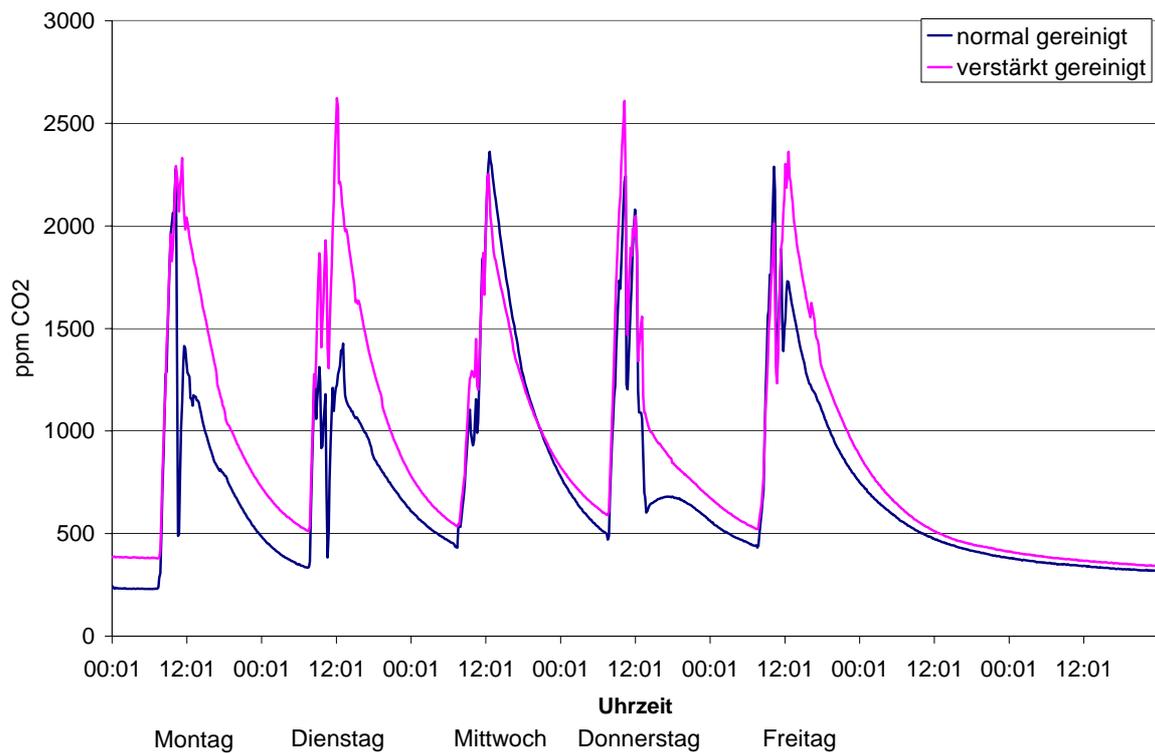
**Abbildung 32:** Durchschnittliche tägliche Kohlendioxid-Konzentration während der Unterrichtstage (November bis Februar) bei normaler und verstärkter Reinigung

Auch bezüglich der Wochentage war eine Charakteristik im Verlauf der  $PM_{10}$ - und der Kohlendioxid-Konzentration (Abbildung 33 und Abbildung 34) festzustellen. Außer am Mittwoch wurden die Unterrichtsstunden weitestgehend von der Klassenlehrerin gehalten, die in der Regel darauf geachtet hat, dass in der großen Pause gelüftet wurde. Am Mittwoch erfolgte der Unterricht durch eine andere Lehrerin, die offensichtlich weniger auf das Lüften in der großen Pause geachtet hat. Am Donnerstag war die Klasse während des Unterrichts geteilt, so dass sich nicht alle Kinder während der gesamten Unterrichtszeit im Klassenzimmer aufhielten.

Zwischen den normal gereinigten Abschnitten (jeden zweiten Tag gewischt) und den verstärkt gereinigten (jeden Tag gewischt), gab es bezüglich der Höhe der  $PM_{10}$ -Konzentration keine signifikanten Unterschiede. In einem Untersuchungsabschnitt wurde das Klassenzimmer nach den Ferien überhaupt nicht gereinigt. Das Zimmer war in dieser Zeit visuell wahrnehmbar stark verunreinigt. Die  $PM_{10}$ -Konzentration lag in dieser Zeit zwar höher, aber sie stieg nicht entsprechend der vorliegenden Verschmutzung an.

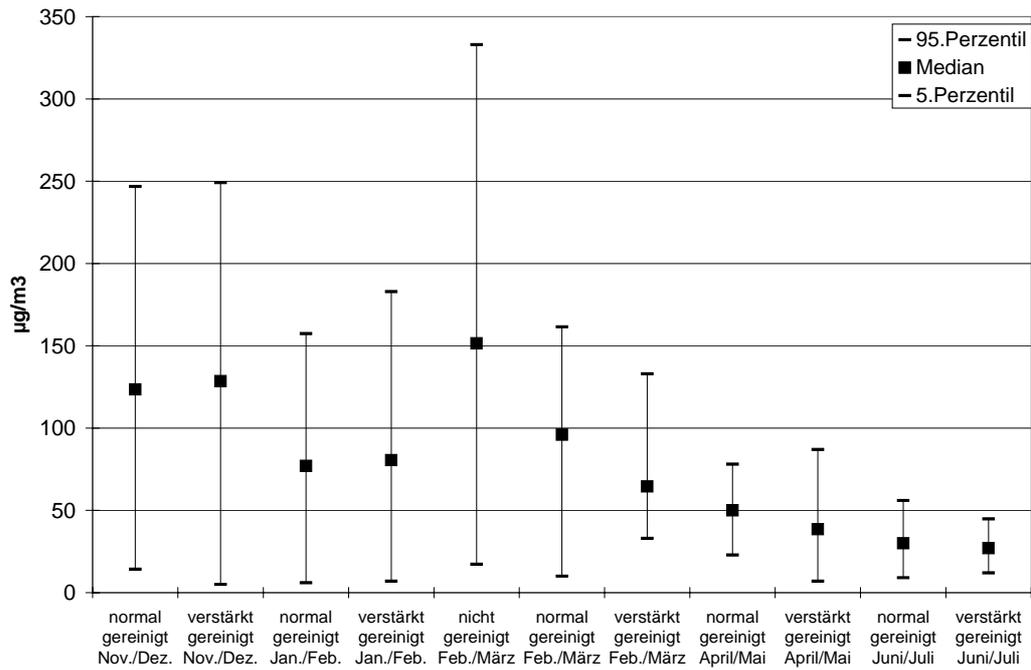


**Abbildung 33:** Durchschnittliche wöchentliche  $PM_{10}$ -Konzentration während der Unterrichtstage (November bis Februar 2006/2007) bei normaler und verstärkter Reinigung

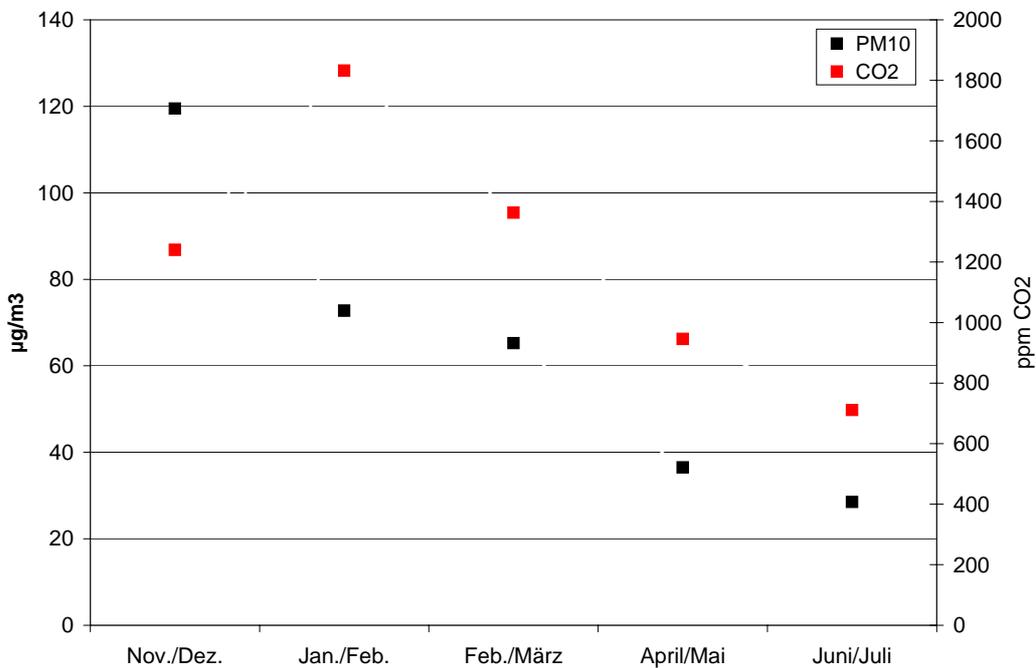


**Abbildung 34:** Durchschnittliche wöchentliche Kohlendioxid-Konzentration während der Unterrichtstage (November bis Februar) bei normaler und verstärkter Reinigung

In den Wintermonaten war die  $PM_{10}$ -Konzentration deutlich höher als in den Sommermonaten (Abbildung 35 und Abbildung 36). Auch die Höhe der Kohlendioxid-Konzentration war in den Wintermonaten aufgrund des Lüftungsverhaltens deutlich höher als in den Sommermonaten. Dies zeigt auch der Vergleich zwischen Abbildung 30, Abbildung 35 und Abbildung 36.



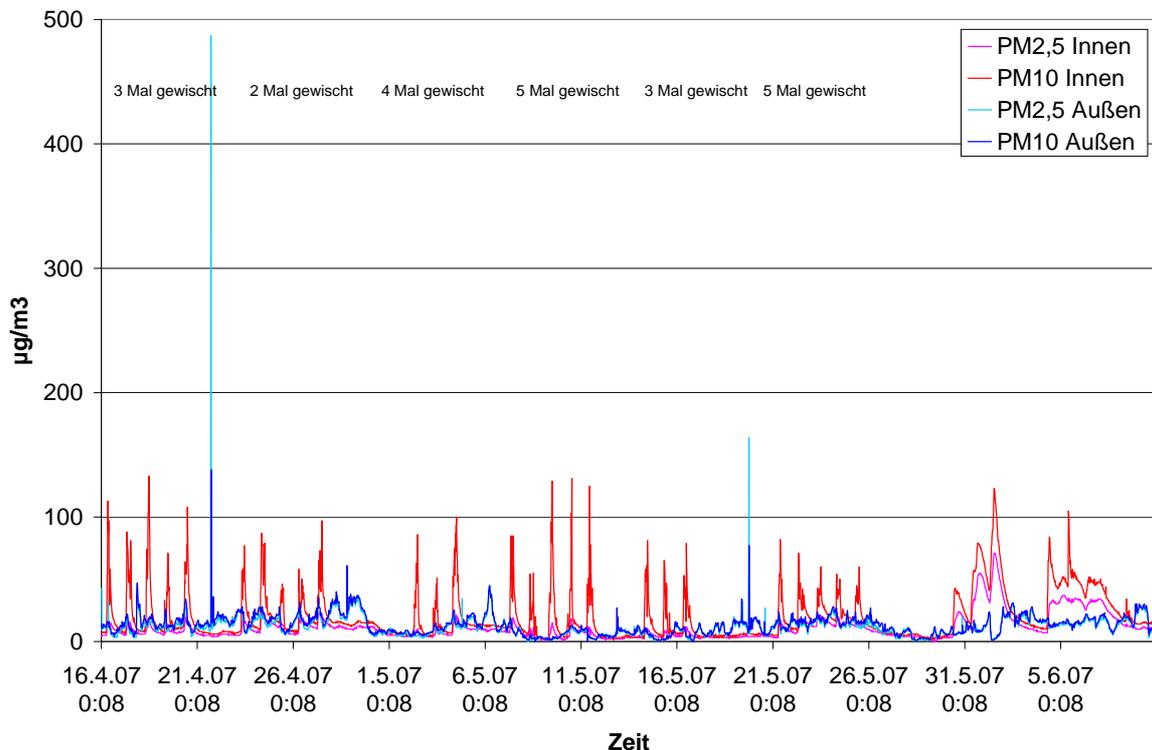
**Abbildung 35:** Durchschnittliche PM<sub>10</sub>-Konzentration während der Unterrichtstage bei normaler und verstärkter Reinigung bzw. Nicht-Reinigung in den einzelnen Untersuchungsabschnitten



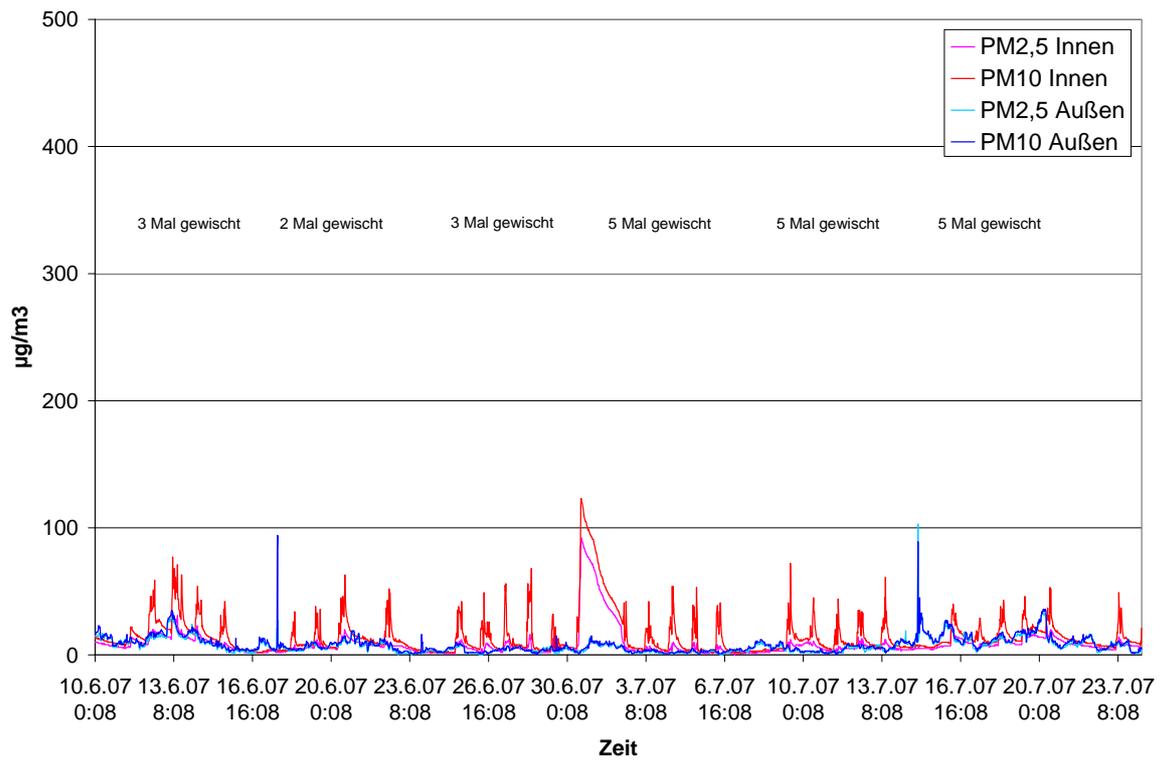
**Abbildung 36:** Durchschnittliche PM<sub>10</sub>- sowie Kohlendioxid-Konzentration während der Unterrichtstage in den einzelnen Untersuchungsabschnitten

In Abbildung 37 ist zu erkennen, dass es während der Pfingstferien Ende Mai / Anfang Juni zu einer Erhöhung der  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentration kam. In dieser Zeit wurden im Nebenraum des Klassenzimmers, in dem die Messungen stattfanden, Gipskartonplatten ausgewechselt. Auffällig war, dass das Verhältnis von  $PM_{2,5}$  zu  $PM_{10}$  mit 0,62 deutlich anders war als während des Schulunterrichts. Auffällig war auch der völlig andere Verlauf der Abnahme der  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentration zu den Zeiten, in denen keine neuen Partikel freigesetzt wurden. Ein anderes Sonderereignis verdeutlicht Abbildung 38. An dem Wochenende vom 30.06 - 01.07 veranstaltete die Schule einen Tag der offenen Tür. Dabei wurde bei geöffneten Türen und Fenstern unter einem Vorbau der Schule gegrillt. Das Verhältnis von  $PM_{2,5}$  zu  $PM_{10}$  zeigte mit 0,77 einen deutlichen Unterschied zum täglichen Schulbetrieb. Auch bezüglich der Abklingkurve war der Unterschied zwischen, vor und nach dem Schulunterricht klar zu erkennen.

In Abbildung 37 und Abbildung 38 ist außerdem zu erkennen, dass an den Wochenenden (21./22.04, 19./20.05, 16./17.06 und 14./15.07 in der Nähe des Außenluftmessplatzes gegrillt wurde. Während des Grillens kam es zu einem starken Anstieg der  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentration und nach dem Grillen zu einem schnellen Abfall der Belastung.



**Abbildung 37:**  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentration in der Innenraumluft und der Außenluft einer Schule



**Abbildung 38:** PM<sub>2,5</sub>- und PM<sub>10</sub>-Konzentration in der Innenraumluft und der Außenluft einer Schule



## **B Untersuchung des LGL in Bayern**

(modifiziert nach Fromme et al. 2006a, 2007, Twardella et al. 2007)

### **B.1 Auswahl und Charakterisierung der Messorte**

Die erste Messperiode (Wintermessung) erfolgte vom 02.12.2004 bis zum 16.3.2005 und die zweite Messperiode (Sommermessung) vom 02.5.2005 bis zum 28.7.2005. In die Sommer- und Wintermessung sollten jeweils möglichst die gleichen Räume einbezogen werden. Die hier dargestellten Ergebnisse zur Messung der partikulären Luftschadstoffe sind Teil einer größer angelegten Studie zur Qualität der Innenraumluft von Schulen, bei der zudem die flüchtigen organischen Substanzen und Carbonylverbindungen in der Raumluft sowie die Katzenallergene und Endotoxine im Fußbodenstaub bestimmt wurden.

Insgesamt erklärten sich 46 Schulen bereit, an der Untersuchung teilzunehmen. In 38 der Schulen konnten sowohl im Winter als auch im Sommer Messungen durchgeführt werden.

Die Schulen verteilten sich mit 60 % auf den nördlichen Teil der Stadt München und 40 % auf den Landkreis Dachau (33 % Stadt Dachau, 67 % Landkreis Dachau). Bei 12 Schulen handelte es sich um Grundschulen mit einer durchschnittlichen Unterrichtszeit von 3-5 Stunden, bei 22 um Haupt/Realschulen mit einer durchschnittlichen Unterrichtszeit von 4-6 Stunden, bei 10 um Gymnasien mit einer durchschnittlichen Unterrichtszeit von 5-6 Stunden und bei 2 um Förderschulen mit einer durchschnittlichen Unterrichtszeit von 3-6 Stunden. In allen Schulen konnten 2 Klassenräume gemessen werden.

17 Schulen (37 %) wurden im Zeitraum von 1950-1975 errichtet, im Zeitraum von 1975-1990 wurden 10 Schulen (22 %) gebaut und von 1990-2005 weitere 5 Schulen (11 %). Vor 1930 wurden 14 Schulen (30 %) erbaut, eine Schule ist in einem Kloster entstanden, dessen Gründungszeit auf das Jahr 1120 datiert werden kann. Bei 75 % der Schulen handelt es sich um Stein/Ziegelbauten und 25 % wurden aus Beton/Stahlbeton bzw. in Plattenbauweise errichtet.

In jedem Klassenraum wurde ein Schultag lang (Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsende) gemessen. Die für die Messungen erforderlichen Geräte wurden morgens vor Unterrichtsbeginn von Studienmitarbeitern aufgebaut und in Betrieb gesetzt und nach Unterrichtsende wieder abgebaut.

Um die Randbedingungen der Probenahme, die Kenngrößen der Raumarchitektur und Meteorologie und ggf. bedeutsame Einfluss- und Störfaktoren abschätzen zu können, wurde ein entsprechender Erfassungsbogen erarbeitet, der in einer kleineren Voruntersuchung auf seine Brauchbarkeit getestet wurde. Dieses Messprotokoll für Innenraumluftmessungen wurde von Studienmitarbeitern zu Beginn der einzelnen Messtermine ausgefüllt. Weiterhin wurde zu jedem Messtermin ein Erfassungsbogen Gebäude/Wohnumfeld von Studienmitarbeitern ausgefüllt.

Darüber hinaus wurden die in den gemessenen Klassenräumen unterrichtenden Lehrer gebeten an dem Messtermin einen standardisierten Erhebungsbogen auszufüllen. In diesem Bogen wurden die Anzahl der Personen im Raum und die Lüftungsbedingungen während jeder Unterrichtsstunde bzw. den Pausen erfragt.

## **B.2 Messmethoden**

### **B.2.1 Bestimmung von PM-Fraktionen mittels Aerosolspektrometer**

Zur kontinuierlichen Bestimmung der Partikelmasse von Stäuben in der Luft wurde ein tragbares Aerosolspektrometer der Firma GRIMM (Ainring, Deutschland) eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Messgerät der Modellreihe 1.108. Die Messwerte können als Massenkonzentration in der Einheit  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  oder als Partikelanzahlkonzentration in der Einheit Partikel/Liter erfasst werden. Das Grimm-Gerät erlaubt Einzelpartikelzählung und eine Größenklassifizierung in Echtzeit. Der Messbereich des Aerosolspektrometers 1.108 reicht von 0,3 bis  $>20 \mu\text{m}$ , die Massenkonzentration kann theoretisch in einem Bereich von 1 bis  $>100.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erfasst werden. Die Partikelzählung ist für den Bereich bis 2.000.000 Partikel/l möglich

### **B.2.2 Gravimetrische Bestimmung von $\text{PM}_{2,5}$ mittels Filtersammlung**

Zur gravimetrischen Bestimmung der  $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration in Innenräumen wurden zwei Kleinfiltergeräte Typ MVS 6.1 der Firma Derenda (Teltow, Deutschland) eingesetzt.  $\text{PM}_{2,5}$  beschreibt die Partikel, die einen gröbselektierten Lufteinlass ( $\text{PM}_{2,5}$  – Probenahmekopf) passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von  $2,5 \mu\text{m}$  einen Abscheidegrad von 50 % aufweist. Das Gerät ermöglicht einen geregelten Betrieb für die Luftdurchsätze 2,0 bis  $5,5 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw.  $\text{Nm}^3/\text{h}$  in Schritten von  $0,01 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw.  $\text{Nm}^3/\text{h}$ . Der Luftdurchsatz wurde bei allen im Rahmen der Studie durchgeführten Messungen auf  $2,3 \text{ Betriebs-}\text{m}^3$  je Stunde eingestellt.

Im Messbetrieb wurde  $PM_{2,5}$  gravimetrisch über einen Messzeitraum von ca. 300 min. erfasst. Täglich wurden die Daten (Zeitdauer, Volumenstrom) ausgelesen und zur weiteren Auswertung gespeichert und im Messprotokoll erfasst.

Die  $PM_{2,5}$ -Fraktion wurde mit 47 mm - Glasfaserfiltern gravimetrisch bestimmt. Dazu wurden die Filter vor der Messung konditioniert, gewogen sowie die Wägeraumbedingungen (entsprechend DIN/EN 12341) und Filtergewichte protokollarisch erfasst.

### **B.2.3 Messmethode der Partikelanzahlkonzentration**

Partikelanzahl, -oberfläche und -volumen wurden mit dem Scanning Mobility Particle Sizer™ (SMPS™) Spektrometer, Modell 3034, der Firma TSI gemessen. Das SMPS erfasst Partikel mit einem elektrischen Mobilitätsdurchmesser von 0,01 bis 0,487  $\mu\text{m}$ . Die Trennung der Partikel unterschiedlicher Größe erfolgt auf Basis ihrer Beweglichkeit im elektrischen Feld. Die aufgefangenen Partikel werden in dem SMPS durch ein elektrisches Feld geschickt, wo die Partikel unterschiedlicher Größe nach einem bekannten Verhältnis zwischen Größe und elektrischer Feldstärke aufgetrennt werden. So wird der elektrische Mobilitätsdurchmesser bestimmt.

Nach der Auftrennung werden die Partikel gezählt, in dem sie durch eine Laserquelle geschickt werden und das hierbei abgelenkte Licht erfasst wird. Um die Sichtbarkeit der Partikel zu verbessern, werden sie davor mit Butylalkohol-Dampf vermischt, wobei Dampf an den Partikeln kondensiert und diese damit zu einer erkennbaren Größe anwachsen.

Die Konzentrationsbestimmung erfolgt jeweils für Partikel definierter Größenkategorien, so genannter Kanäle (channels). Die Kanäle sind so definiert, dass sie auf der logarithmischen Skala den selben Abstand und die selbe Breite haben (sie sind logarithmisch äquidistant). Eine Differenz um den Faktor 10 wird auf der logarithmischen Skala Dekade genannt. Bei dem in der Untersuchung eingesetzten Gerät sind innerhalb einer Dekade (z.B. zwischen 10 nm und 100 nm) 32 Kanäle angelegt. Insgesamt umfasst das Gerät 54 Kanäle.

Nach erfolgter Zählung wird die Anzahlkonzentration berechnet, wobei Korrekturfaktoren für Luftdruck und Temperatur berücksichtigt werden. Von der zugehörigen Software wird weiterhin die Oberflächen-, Volumen- und Massenkonzentration bestimmt. Hierbei handelt es sich nicht um gemessene Werte sondern um Werte, die aus der Partikelgröße unter Annahme eines kugelförmigen Körpers und einer Dichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  berechnet werden.

Mit dem SMPS ist eine kontinuierliche Messung der Partikel über mehrere Stunden möglich. Die Erfassung eines gesamten Partikelgrößenspektrums dauert 3 Minuten, nach erfolgtem Scan werden die Messergebnisse abgespeichert.

Für einen Scan wird die Gesamt-Anzahl-Konzentration, also die Anzahl-Konzentration über alle Kanäle hinweg bestimmt, des gleichen die Gesamt-Oberflächen-Konzentration und die Gesamt-Volumen-Konzentration. Gleichzeitig werden für die einzelnen Kanäle (also Größenklassen der Partikel) gewichtete Anzahl-Konzentrationen, Oberflächen-Konzentrationen und Volumen-Konzentrationen bestimmt. Der Wichtungsfaktor ist jeweils die Breite des logarithmierten Partikelgrößenintervalls (= geometrische Breite des Intervalls,  $d\log D_p$ ). Aufgrund der logarithmisch äquidistanten Aufteilung der Kanäle ist dieser Wichtungsfaktor konstant und entspricht der Inversen der Auflösung des Gerätes, also im Falle des SMPS 3034 (bei der Auflösung von 32 Kanälen pro Dekade) der Zahl  $1/32$ . Die Normierung der Messwerte auf die Kanalbreite ermöglicht den Vergleich von Ergebnissen verschiedener Messgeräte, auch wenn die Auflösung (Anzahl an Kanälen pro Dekade und damit verbunden die Kanalbreite) unterschiedlich ist.

## **B.3 Ergebnisse von Messungen in Schulen**

### **B.3.1 Ergebnisse zur Partikelmasse in der Wintermessperiode**

Die statistischen Kennwerte für die beiden angewandten Messmethoden (gravimetrisch und kontinuierlich; siehe Methodenteil) sind in der folgenden Tabelle 10 zusammengefasst. Bei Vergleich der beiden Verfahren ist zu bedenken, dass bei dem gravimetrischen Messverfahren Ergebnisse für die gesamte Messdauer angegeben werden. Ein selektives Löschen von Zeiten, zu denen Schüler nicht anwesend sind, ist hier also nicht möglich. Den Ergebnissen der gravimetrischen Messung werden aus diesem Grunde Ergebnisse der kontinuierlichen Messung für den gesamten Messzeitraum, und nicht, wie in den übrigen Auswertungen, Ergebnisse für die Unterrichtszeit gegenübergestellt.

Mit dem gravimetrischen Messverfahren ergaben sich in der Regel höhere Partikelmassenkonzentrationen als mit dem kontinuierlichen Messverfahren, selbst wenn für diesen Vergleich dieselben Klassenräume und dieselbe Messzeit zugrunde gelegt wurde. Während sich die im Verlauf eines Schultages gemessenen  $PM_{2,5}$ -Gehalte beim gravimetrischen Verfahren zwischen  $4,3$  und  $73,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bewegten, lagen sie unter Zugrundelegung des kontinuierlichen Messverfahren zwischen  $2,5$  und  $79,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Tabelle 10:** Vergleich der Messwerte gewonnen mit gravimetrischer und kontinuierlicher (Tagesmedian) Messung (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Methode	Wintermessungen		Sommermessungen	
	gravimetrisch	kontinuierlich	gravimetrisch	kontinuierlich
Anzahl	40	40	49	49
Mittelwert	37,7	29,3	22,1	13,5
Stdabw.	15,7	16,5	8,1	5,4
Minimum	4,3	2,5	9,8	4,0
Maximum	73,1	79,1	55,1	26,2
5. Perzentil	8,6	10,1	13,2	5,2
10. Perzentil	19,8	12,4	14,6	6,3
25. Perzentil	29,1	16,1	17,6	10,2
Median	36,6	26,8	20,2	13,3
75. Perzentil	46,7	42,4	23,6	17,5
90. Perzentil	60,5	48,7	30,9	20,9
95. Perzentil	65,3	54,9	39,0	21,1

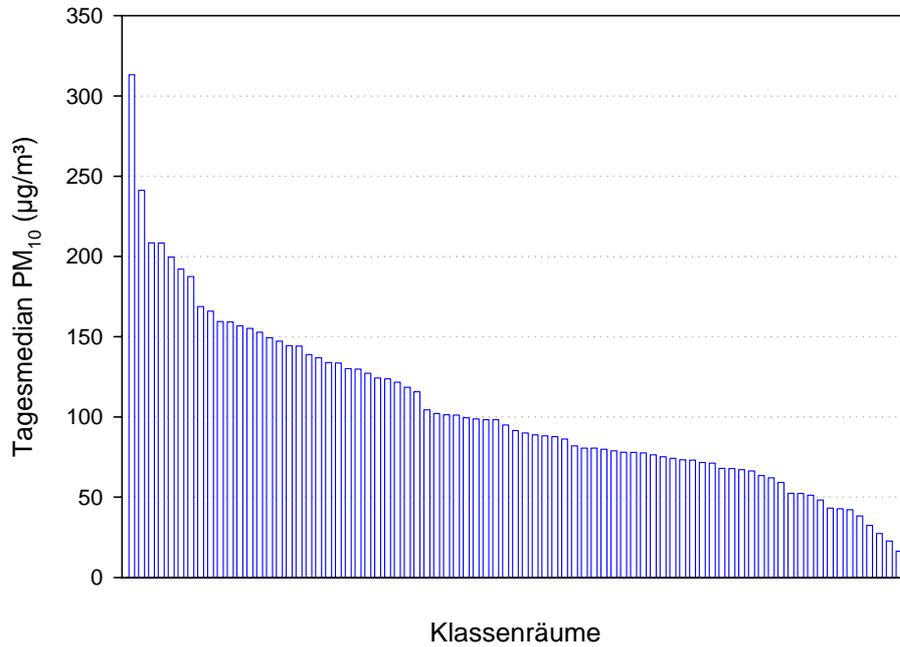
Werden nur die Unterrichtszeiten berücksichtigt, liegen die mit der kontinuierlichen Messmethode erfassten Partikelmassekonzentrationen im Median bei  $19,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ),  $63,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{PM}_4$ ) und  $91,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{PM}_{10}$ ) (Tabelle 11).

Für  $\text{PM}_{10}$  ergaben sich Tagesmedianwerte im Bereich von 16 bis  $313 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , die für die einzelnen Schulräume in der Abbildung 39 in ansteigender Reihung zusammengestellt sind. In der Abbildung 40 sind darüber hinaus die Tagesmediane der kontinuierlichen  $\text{PM}_{2,5}$ -Messungen grafisch dargestellt.

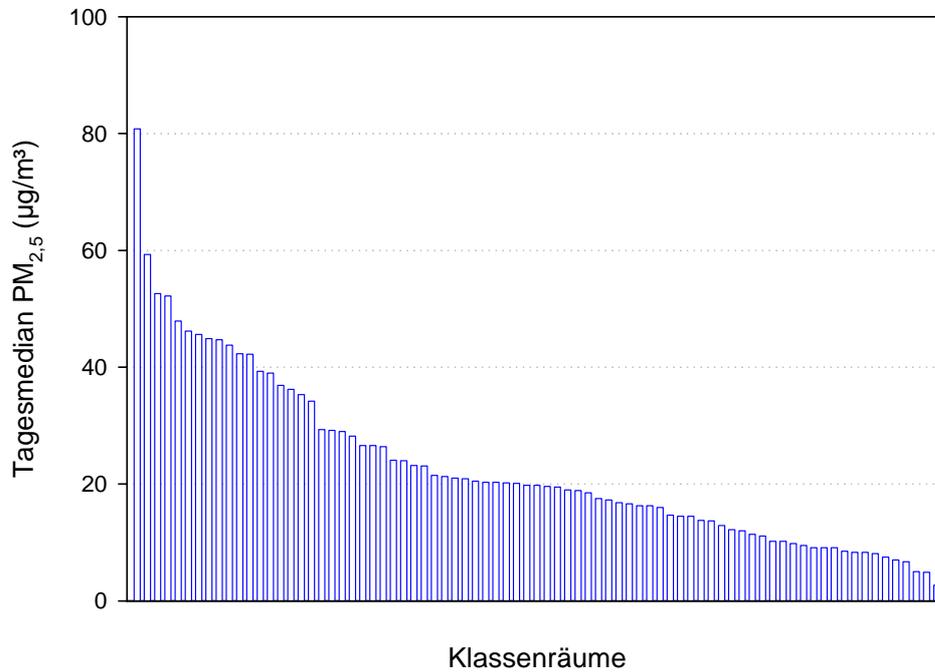
In der Wintermessperiode ergab sich eine statistisch signifikante Korrelation (siehe Tabelle 12) zwischen der Raumlufffeuchte und der kontinuierlich gemessenen  $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration. Unter Annahme eines linearen Zusammenhanges geht der Anstieg der Raumlufffeuchte um 10% mit einem Rückgang der  $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration um  $6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  einher. In einer zusätzlichen Analyse zeigte sich, dass die Raumlufffeuchte auch mit der  $\text{PM}_1$ -Konzentration korreliert ist. Die Raumlufffeuchte ist jedoch nicht mit der Konzentration größerer Partikel ( $\text{PM}_{10}$ ) verbunden.

**Table 11:** Statistische Kennwerte für unterschiedliche Partikelfractionen mit dem kontinuierlichen Messverfahren in der Wintermessperiode (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	Tagesmediane			Einzelmesswerte		
	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>4</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>1</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
Anzahl	79	79	79	22.849	22.849	22.849
Mittelwert	23,0	71,9	105,0	12,7	22,5	105,1
Stdabw.	14,7	40,6	53,2	-	-	-
Minimum	2,7	12,3	16,3	0,6	1,2	2,6
Maximum	80,8	243,8	313,2	819	2.351	3.779
5. Perzentil	6,7	17,7	32,5	-	-	-
10. Perzentil	8,3	27,2	43,2	2,7	6,5	28,2
25. Perzentil	12,0	42,9	71,3	4,2	10,6	54,3
Median	19,8	63,4	91,5	7,4	18,2	89,2
75. Perzentil	29,2	99,7	136,9	17,8	29,6	139,2
90. Perzentil	44,9	120,0	168,8	31,3	45,5	199,8
95. Perzentil	52,2	142,4	208,4	-	-	-



**Abbildung 39:** Tagesmediane der kontinuierlichen PM<sub>10</sub>-Messungen in Klassenräumen in der Wintermessperiode



**Abbildung 40:** Tagesmediane der kontinuierlichen PM<sub>2,5</sub>-Messungen in Klassenräumen in der Wintermessperiode

**Tabelle 12:** Korrelation verschiedener Parameter mit der Partikelmasse in den Klassenräumen, Wintermessung

	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
	kontinuierlich	kontinuierlich	gravimetrisch
	Spearman Rangkorrelation (p-Wert)		
Raumluftfeuchte (%)	-0,32 (0,004)*	-0,09 (0,42)	-0,14 (0,38)
Innenraum-Temperatur (°C)	0,05 (0,67)	0,12 (0,30)	0,03 (0,85)
Anzahl Nutzer	0,13 (0,24)	0,37 (0,0007)*	0,20 (0,21)
Fußbodenoberfläche (m <sup>2</sup> )	-0,08 (0,46)	-0,30 (0,007*)	-0,44 (0,003)*
Raumvolumen (m <sup>3</sup> )	-0,16 (0,17)	-0,25 (0,02)*	-0,38 (0,01)*
Volumen / Nutzer (m <sup>3</sup> )	-0,19 (0,09)	-0,41 (0,0002)*	-0,39 (0,01)*
CO <sub>2</sub> -Innenraumlufthalt	0,12 (0,28)	0,27 (0,02)*	0,28 (0,08)
	Wilcoxon Rangsummentest, $\chi^2$ (p-Wert)		
Bodenbelag (Teppich vs. glatt)	1,44 (0,23)	1,32 (0,25)	0,24 (0,62)
Klassenstufe (3 Kategorien)	21,80 (<0,0001)*	34,06 (<0,0001)*	11,14 (0,004)*

\* statistisch signifikant mit  $p < 0,05$

### B.3.2 Ergebnisse zur Partikelmasse in der Sommermessperiode

Werden nur die Unterrichtszeiten berücksichtigt, liegen die mit der kontinuierlichen Messmethode erfassten Partikelmassenkonzentrationen in der Sommermessperiode in einem Klassenraum im Mittel bei 13,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (PM<sub>2,5</sub>), bei 44,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (PM<sub>4</sub>) und bei 71,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (PM<sub>10</sub>) (Tabelle 13).

Für den PM<sub>10</sub> ergaben sich Tagesmedianwerte im Bereich von 18,3 bis 178,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , die für die einzelnen Schulräume in der Abbildung 41 in ansteigender Reihung zusammengestellt sind. In der Abbildung 42 sind darüber hinaus die Tagesmediane der kontinuierlichen PM<sub>2,5</sub>-Messungen grafisch dargestellt.

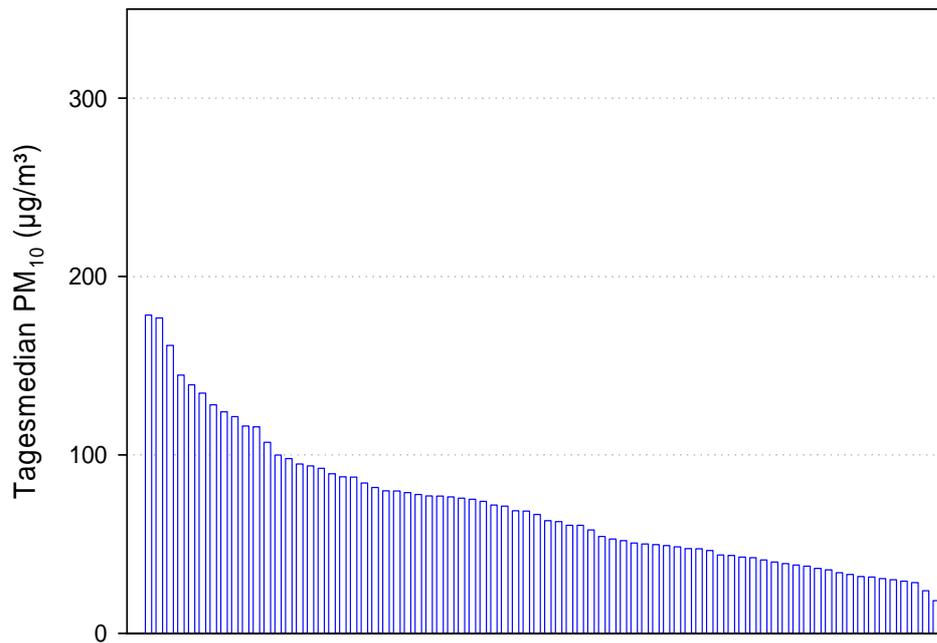
Zwischen den Sommer-Ergebnissen der kontinuierlich gemessenen PM<sub>2,5</sub>- und PM<sub>10</sub>-Messungen und der gravimetrisch gemessenen PM<sub>2,5</sub> und der Personenbelegung, der Innenraumtemperatur, der Personenzahl im Raum, dem Raumvolumen und der Raumfläche ließen sich in der Sommermessperiode keine statistisch signifikanten Korrelationen finden (Tabelle 14). Lediglich zwischen dem kontinuierlich gemessenen PM<sub>2,5</sub> und der Feuchte ( $r = 0,24$ ,  $p = 0,04$ ) ergab sich eine signifikante Korrelation. Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Feuchte und PM<sub>2,5</sub>-Konzentration steigt der PM<sub>2,5</sub>-Gehalt um 1,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  bei einem Anstieg der Luftfeuchte um 10 %. Weiterhin konnte eine signifikante

Korrelation zwischen dem gravimetrisch bestimmten  $PM_{2,5}$  und der Temperatur ( $r = 0,34$ ,  $p = 0,02$ ) beobachtet werden, hinter der jedoch kein linearer Zusammenhang liegt.

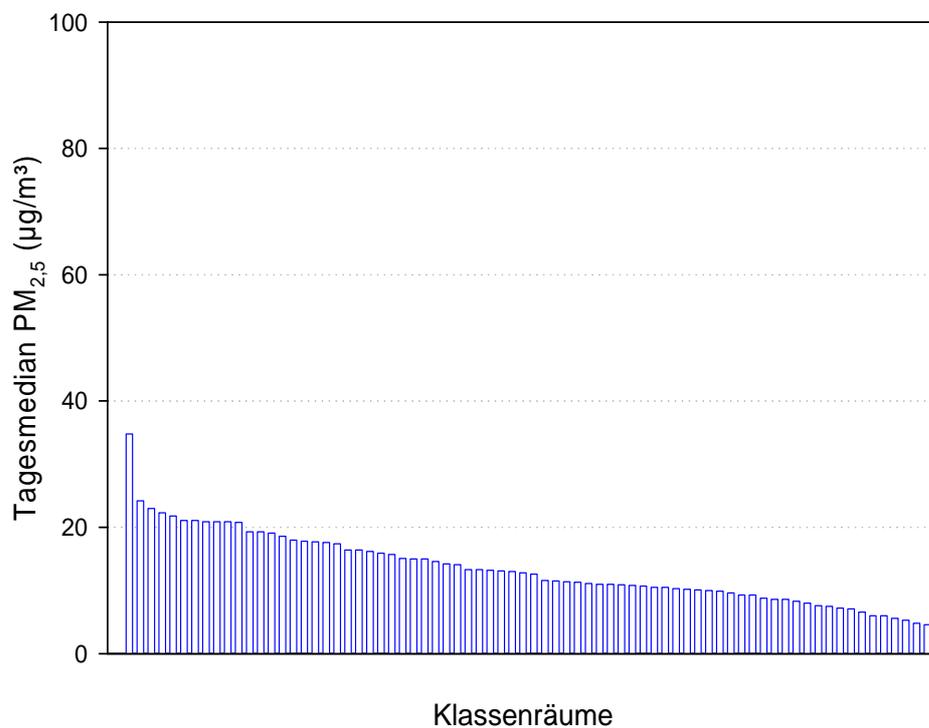
Die kontinuierlich gemessenen  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentrationen zeigten eine signifikante Korrelation mit den  $CO_2$ -Gehalten ( $r = 0,25$ ,  $p = 0,03$  bzw.  $r = 0,57$ ,  $p < 0,001$ ). Allerdings lag das Bestimmtheitsmaß nur bei  $R^2 = 0,29$ . Bei Annahme eines linearen Zusammenhangs geht ein Anstieg der  $CO_2$ -Konzentration um 100 ppm mit einem Anstieg des  $PM_{2,5}$ -Gehaltes um  $0,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und des  $PM_{10}$ -Gehaltes um  $5,76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  einher. Kein Zusammenhang war zwischen den Kohlendioxidgehalten und den Ergebnissen der gravimetrischen  $PM_{2,5}$ -Messungen erkennbar.

**Table 13:** Statistische Kennwerte für unterschiedliche Partikelfractionen mit dem kontinuierlichen Messverfahren in der Sommermessperiode (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	Tagesmediane			Einzelmessungen		
	$PM_{2,5}$	$PM_{4}$	$PM_{10}$	$PM_{1}$	$PM_{2,5}$	$PM_{10}$
Anzahl	74	74	74	22.003	22.003	22.003
Mittelwert	13,5	44,8	71,1	7,1	13,5	74,6
Stdabw.	5,6	22,4	36,6	-	-	-
Minimum	4,6	15,5	18,3	0,6	1,2	2,4
Maximum	34,8	121,5	178,4	92,2	165,9	1.758
5. Perzentil	5,6	18,8	29,2	-	-	-
10. Perzentil	7,1	20,0	31,8	2,7	5,4	18,0
25. Perzentil	9,6	28,2	42,7	3,9	8,3	32,8
Median	12,7	42,9	64,9	6,2	11,9	58,3
75. Perzentil	17,6	54,5	87,8	8,8	17,8	97,0
90. Perzentil	20,9	76,6	124,1	13,1	22,3	150,4
95. Perzentil	22,3	88,0	144,8	-	-	-



**Abbildung 41:** Tagesmediane der kontinuierlichen PM<sub>10</sub>-Messungen in Klassenräumen in der Sommermessperiode



**Abbildung 42:** Tagesmediane der kontinuierlichen PM<sub>2,5</sub>-Messungen in Klassenräumen in der Sommermessperiode

**Table 14:** Korrelation verschiedener Parameter mit der Partikelmasse in den Klassenräumen, Sommermessung

	PM <sub>2,5</sub> kontinuierlich	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub> gravimetrisch
	Spearman Rangkorrelation (p-Wert)		
Raumluftfeuchte (%)	0,24 (0,04)*	-0,06 (0,63)	-0,04 (0,79)
Innenraum-Temperatur (°C)	0,19 (0,10)	-0,02 (0,89)	0,34 (0,02)*
Anzahl Nutzer	0,11 (0,34)	0,20 (0,09)	-0,02 (0,90)
Fußbodenoberfläche (m <sup>2</sup> )	0,01 (0,94)	-0,08 (0,48)	0,17 (0,25)
Raumvolumen (m <sup>3</sup> )	0,14 (0,22)	0,15 (0,22)	0,20 (0,16)
Volumen / Nutzer (m <sup>3</sup> )	0,02 (0,84)	-0,02 (0,87)	0,12 (0,41)
CO <sub>2</sub> -Innenraumluftgehalt	0,25 (0,03*)	0,57 (<0,0001)*	0,14 (0,35)
	Wilcoxon Rangsummentest, $\chi^2$ (p-Wert)		
Bodenbelag (Teppich vs. glatt)	0,01 (0,96)	0,30 (0,59)	2,10 (0,15)
Klassenstufe (3 Kategorien)	22,7 (<0,0001)*	25,1 (<0,0001)*	5,33 (0,07)

\* statistisch signifikant mit  $p < 0,05$

### B.3.3 Zusammenfassende Ergebnisse über beide Messperioden

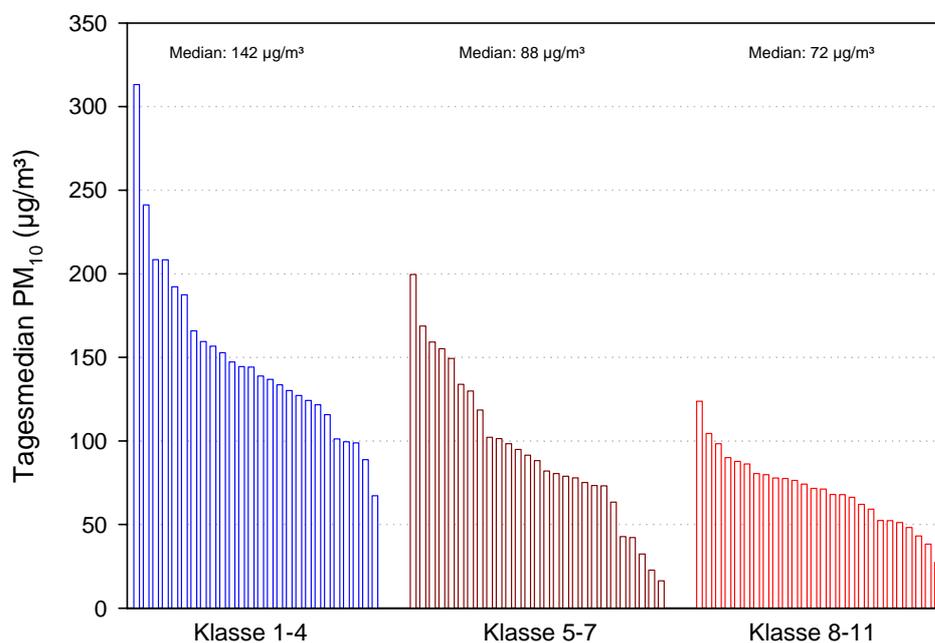
Die Ergebnisse aus beiden Messperioden machen deutlich, dass in der Sommermessperiode mit PM<sub>10</sub>-Medianwerten von 65 µg/m<sup>3</sup> (18 - 178 µg/m<sup>3</sup>) niedrigere Gehalte in den Schulen gemessen wurden als in der Wintermessperiode, wo sie noch bei 92 µg/m<sup>3</sup> (16 - 313 µg/m<sup>3</sup>) lagen.

In insgesamt 58 Schulräumen konnten sowohl in der Winter- als auch in der Sommermessperiode Untersuchungen durchgeführt werden. Betrachtet man die Reduktion für jeden einzelnen Klassenraum, wird deutlich, dass für 74% (bezogen auf PM<sub>10</sub>) bzw. 78% (bezogen auf PM<sub>2,5</sub>) der Klassenräume ein Rückgang der Gehalte zu beobachten ist. Werden alle Klassenräume zusammen betrachtet, liegt der Rückgang im Median bei ca. 36% (PM<sub>10</sub>) bzw. 35% (PM<sub>2,5</sub>). Im Durchschnitt liegt die PM<sub>2,5</sub>-Konzentration in Sommer um 10,4 µg/m<sup>3</sup> (95% Konfidenzintervall: 6,3 bis 14,4) und die PM<sub>10</sub>-Konzentration um 31,8 µg/m<sup>3</sup> (95% Konfidenzintervall: 20,0 bis 43,5) niedriger als im Winter.

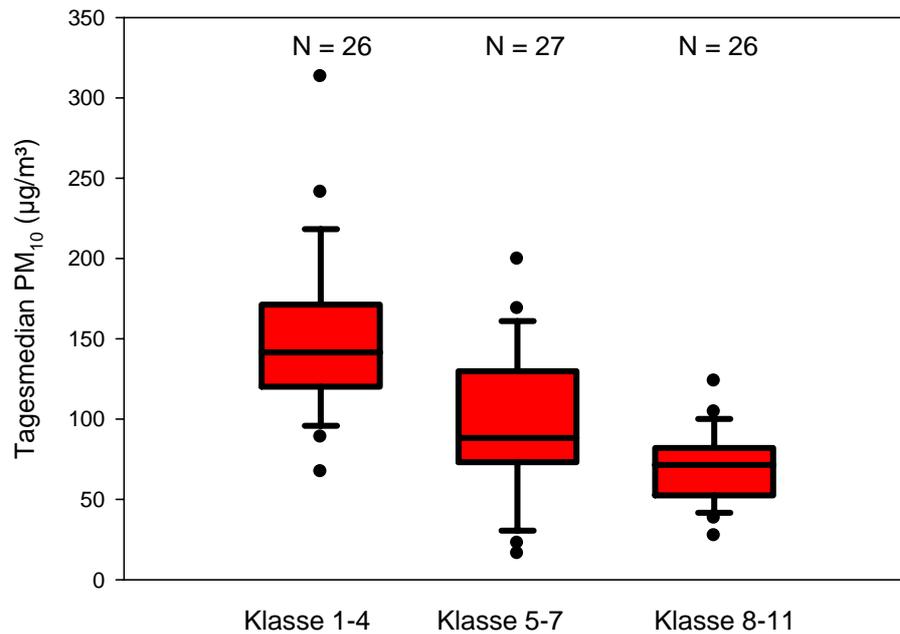
Keine Unterschiede fanden sich bei den Feinstaubgehalten (PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub>) in der Luft von Klassenräumen mit einem glatten Bodenbelag (Linoleum oder Holz) und solchen mit Tep-

pichböden. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass lediglich 7 Schulräume mit Teppichböden in die Untersuchung einbezogen wurden.

Statistisch signifikante Unterschiede zeigten sich aber in den Feinstaubgehalten für die verschiedenen Klassenstufen. So ließen sich insbesondere in den Grundschulklassen deutlich höhere Feinstaubgehalte finden als in den Klassenräumen von weiterführenden Schulen (siehe beispielhaft die Ergebnisse der Wintermessungen in der Abbildung 43 und Abbildung 44). Während sich die medianen  $PM_{10}$ -Gehalte in den Grundschulklassen zwischen 67 und 313  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Median: 142  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) bewegten, lagen sie in den Schulräumen der Klassenstufen 8 - 11 nur zwischen 27 und 124  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Median: 72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Die Unterschiede zwischen den drei Gruppen waren im Kruskal-Wallis Test statistisch signifikant. Keine Unterschiede zeigten die Schulformen hingegen in der Klassengröße und dem Raumvolumen. Auch die Anzahl der Schüler in den Klassenräumen war mit durchschnittlich 20 bis 21 annähernd gleich. In der Sommermessperiode ließ sich der gleiche Zusammenhang finden.



**Abbildung 43:** Tagesmediane der  $PM_{10}$ -Messungen in unterschiedlichen Klassenstufen in der Wintermessperiode



**Abbildung 44:** Verteilung der PM<sub>10</sub> –Gehalte nach Klassenstufen in der Wintermessperiode

### B.3.4 Ergebnisse zur Partikelanzahlkonzentration

In der Sommermessperiode wurde auch die Partikelanzahlkonzentration bestimmt. In der folgenden Tabelle 15 sind die statistischen Kennwerte zu den Messungen der Partikelanzahlkonzentration, der Partikeloberfläche und dem Partikelvolumen zusammengestellt. Zu Grunde liegen die medianen Messwerten der Gesamtergebnisse über alle erfassten Partikelgrößen hinweg aus den einzelnen Klassenräumen. Die mediane Gesamtpartikelanzahl lag bei 5.660 Partikel/cm<sup>3</sup>, die mediane Gesamtpartikeloberfläche bei 161 µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> und das mediane Gesamtpartikelvolumen bei 5,1 µm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

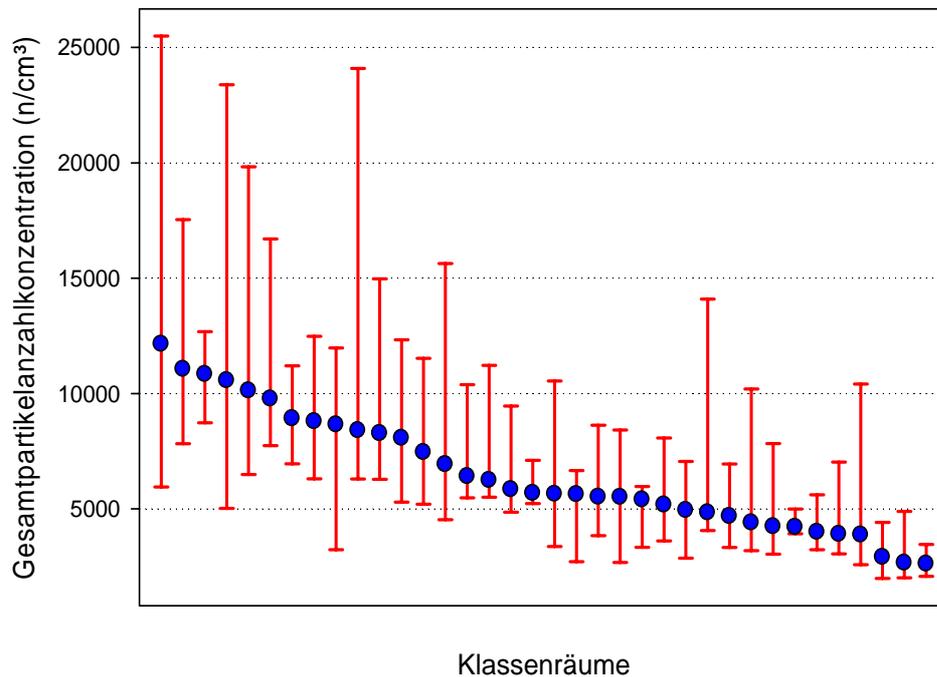
**Table 15:** Statistische Kennwerte der objektbezogenen Konzentrationen der Partikelanzahl, -oberfläche und des -volumens in Schulinnenräumen in der Sommermessperiode

	<b>Partikelanzahl (n/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Partikeloberfläche (µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Partikelvolumen (µm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>
Anzahl*	36	36	36
Mittelwert	6.509	175,7	5,44
Standardabw.	2.572	81,4	2,69
Minimum	2.622	49,9	1,33
Maximum	12.145	342,0	10,95
5. Perzentil	2.654	79,2	2,14
10. Perzentil	3.873	86,0	2,54
25. Perzentil	4.541	105,4	3,08
Median	5.660	161,2	5,10
75. Perzentil	8.527	231,7	6,76
90. Perzentil	10.566	313,8	10,16
95. Perzentil	11.062	325,9	10,60

\*: Tagesmediane der dreiminütige Messungen je Klassenraum

In der Abbildung 45 ist für jeden einzelnen Klassenraum der Median, das Minimum und das Maximum der Gesamt-Partikelanzahlkonzentration während der Unterrichtszeit aufgeführt. Aus der Darstellung wird deutlich, dass sich die Tagesmediane der Partikelanzahlkonzentrationen während der Unterrichtszeit in den jeweiligen Räumen zwischen ca. 2.622 Partikel/cm<sup>3</sup> bis 12.145 Partikel/cm<sup>3</sup> bewegten.

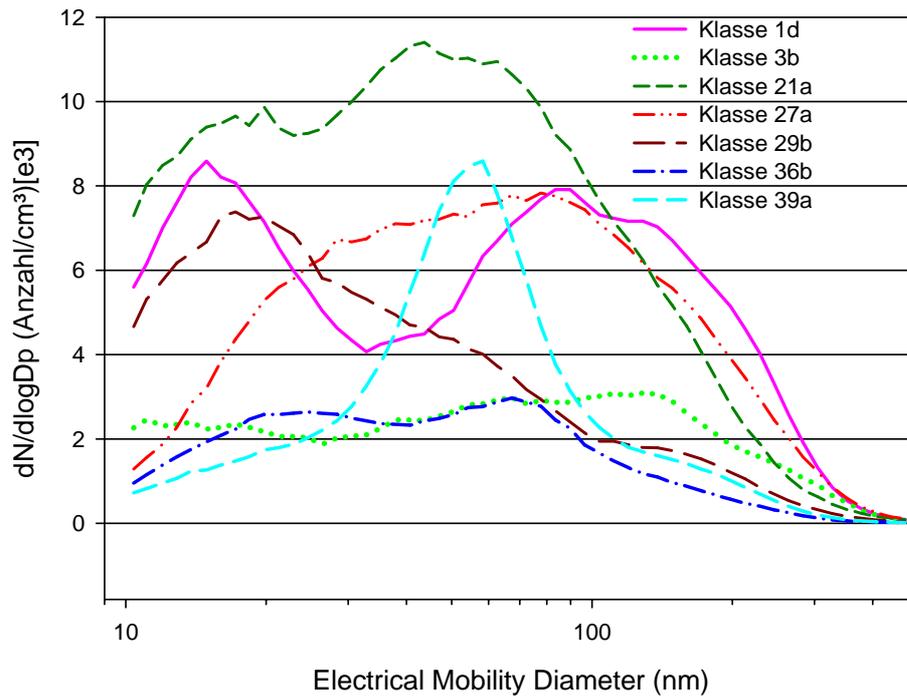
Die 3-minütigen Einzelmessungen hatten dabei eine Spannweite von 1.981 Partikel/cm<sup>3</sup> bis 25.501 Partikel/cm<sup>3</sup>. Die Tagesmediane der Gesamt-Partikeloberfläche bzw. des -volumens bewegten sich in einem Messbereich von 42 bis 723 µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> bzw. von 1,13 bis 23,6 µm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.



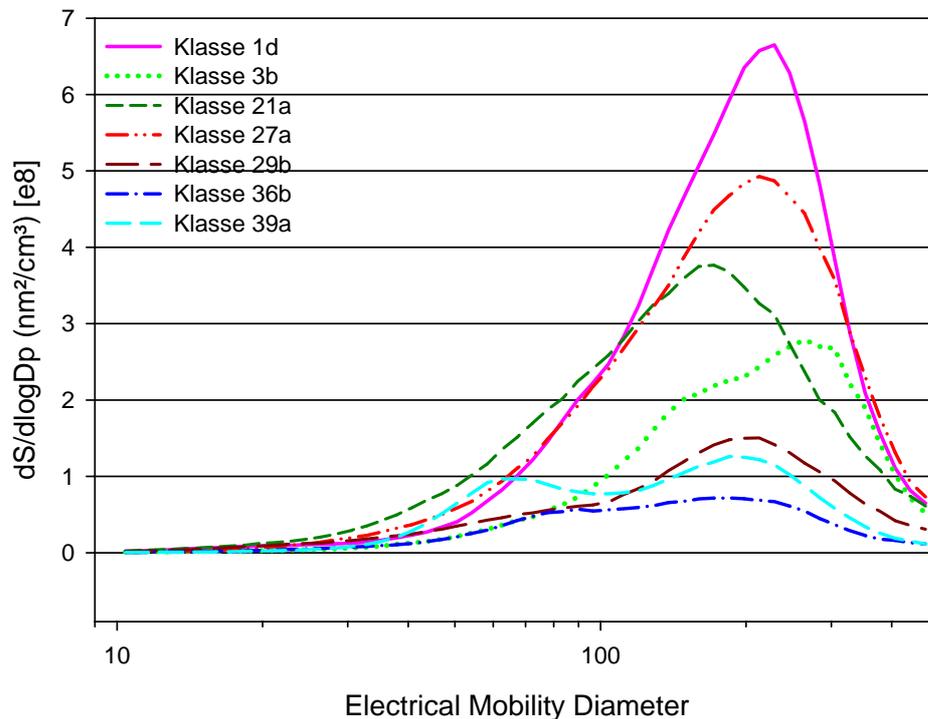
**Abbildung 45:** Minima, Tagesmediane und Maxima der Partikelanzahlkonzentrationen in den einzelnen Klassenräumen in der Sommermessperiode

In den folgenden drei Abbildungen sind für die Partikelanzahlkonzentration, die Partikeloberfläche und das Partikelvolumen typische Verteilungskurven (Mediane der Parameter in einem Klassenraum) über den Messbereich des SMPS dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung der Partikelanzahlkonzentration nach elektrischem Mobilitätsdurchmesser in den einzelnen Klassenräumen recht unterschiedlich ausfällt (Abbildung 46). Zum Teil sind Verteilungen mit 2 Hochpunkten zu beobachten, ein Hochpunkt in etwa zwischen 10 nm und 20 nm und ein weiterer Hochpunkt zwischen 40 nm und 100 nm. Diese Zweigipfligkeit würde auf 2 unterschiedliche Quellen der Partikel schließen lassen. In anderen Räumen findet sich nur der erste oder nur der zweite Gipfel, was auf eine Hauptquelle für Partikel hinweisen könnte. In manchen Klassenräumen bewegt sich die Anzahlkonzentration durchgehend auf niedrigem Niveau.

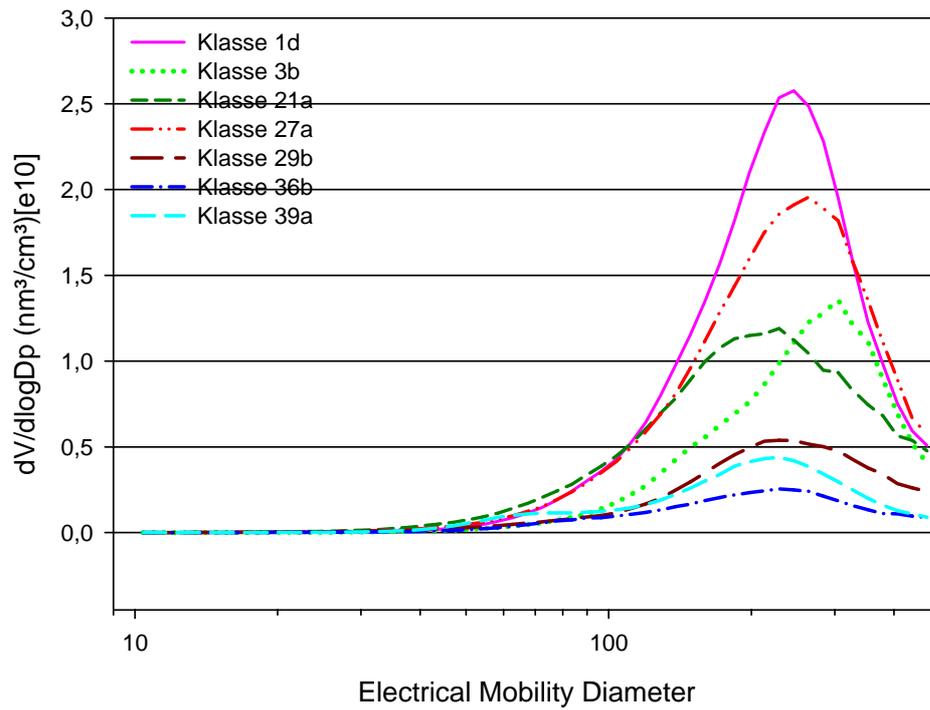
In Abbildung 47 und Abbildung 48 sind Ergebnisse hinsichtlich Partikeloberflächenkonzentration und Partikelvolumenkonzentration aus denselben Klassenräumen angegeben. Es wird deutlich, dass kleine Partikel nur sehr geringfügig zur Oberflächen- und Volumenkonzentration beitragen. In allen Klassenräumen liegen die Hochpunkte der Kurven zwischen 100 nm und 300 nm bzw. 200 bis 300 nm elektrischer Mobilitätsdurchmesser.



**Abbildung 46:** Verteilung der Partikelanzahlkonzentrationen (Median) nach dem Mobilitätsdurchmesser in 7 Klassenräumen



**Abbildung 47:** Verteilung der Partikeloberfläche (Median) nach dem Mobilitätsdurchmesser in 7 Klassenräumen



**Abbildung 48:** Verteilung des Partikelvolumens (Median) nach dem Mobilitätsdurchmesser in 7 Klassenräumen



## **C Untersuchungen des ILAT Berlin**

(modifiziert nach Fromme et al. 2002, Lahrz et al. 2003, Fromme et al. 2005)

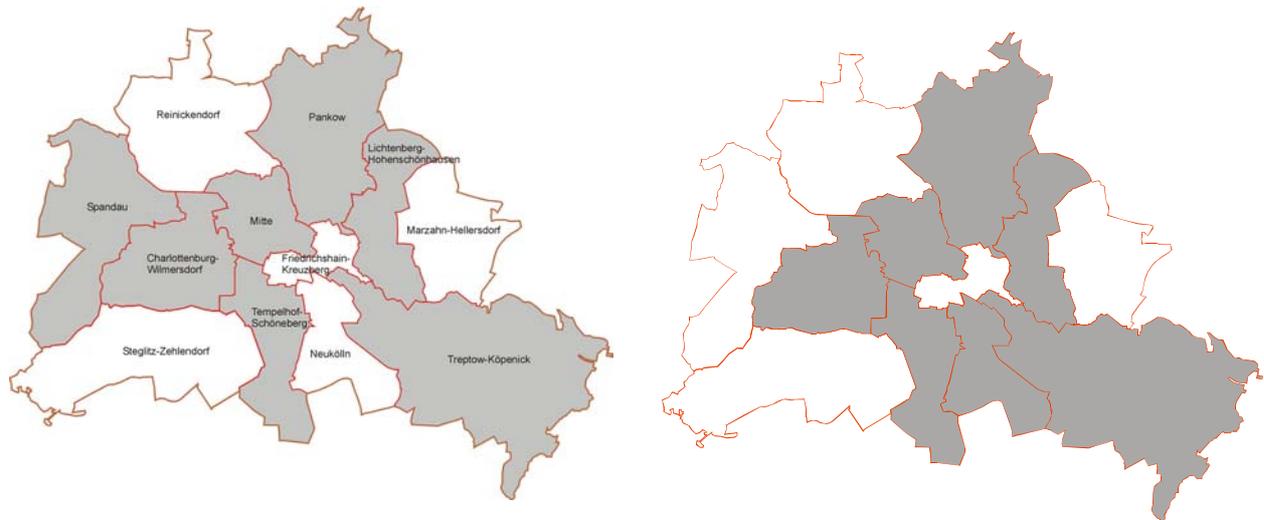
### **C.1 Auswahl und Charakterisierung der Messorte**

Vom Oktober 2000 bis zum April 2001 wurden 74 Kindertagesstätten im Berliner Stadtgebiet untersucht. Die Einrichtungen lagen in den Bezirken Charlottenburg-Wilmersdorf, Lichtenberg, Mitte, Neukölln, Pankow, Tempelhof-Schöneberg, Treptow-Köpenick (siehe Abbildung 49).

Im September 2002 bis zum Februar 2003 konnten in 33 Berliner Schulen im Stadtgebiet Feinstäube gemessen werden. Die Einrichtungen lagen in den Bezirken Charlottenburg-Wilmersdorf, Spandau, Tempelhof-Schöneberg, Lichtenberg, Mitte, Pankow, Treptow-Köpenick (siehe Abbildung 49).

In zwei Messperioden im Dezember 1997 bis März 1998 und im Februar 2000 bis Juni 2000 wurde in insgesamt 123 Berliner Wohnungen (62 im Jahr 1997/98 und 61 im Jahr 2000) der luftgetragene Feinstaub bestimmt. Die Untersuchungen der Wohnungen wurden jeweils in einem eng umgrenzten Bereich im Berliner Bezirk Steglitz durchgeführt. Es handelt sich um ein Gebiet, das sich dadurch auszeichnet, dass es sowohl stark befahrene als auch verkehrsberuhigte Straßenzüge mit erheblichen Unterschieden in der durchschnittlichen täglichen Verkehrsbelastung aufweist. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Straßenzüge möglichst eine für die Berliner Innenstadt typische geschlossene Randbebauung (Straßenschluchten) aufweisen.

Messungen in der Außenluft wurden nur in der 61 Wohnungen umfassenden Steglitzer Untersuchung vom Februar 2000 bis Juni 2000 durchgeführt. Hierbei wurde der Feinstaub vor dem Fenster bzw. auf dem Balkon der Wohnungen untersucht. Grundsätzlich wurden nur Fenster bzw. Balkone ausgewählt, die zur Straße der Wohnanschrift lagen.



**Abbildung 49:** Untersuchungsgebiete in Berlin (Schulen links, Kindertagesstätten rechts)

## C.2 Messmethoden

### C.2.1 Gravimetrische Bestimmung von alveolengängigem Staub ( $PM_{4}$ ) durch Filtersammlung

Für die Probenahme des alveolengängigen Feinstaubes, des Dieselrußes (EC, TC, OC) aus der Luft wurde das mobile Staubprobenahmesystem GRAVIKON PM 4 (Firma Ströhlein) eingesetzt. Das Sammeln des Feinstaubes erfolgte über einen speziellen Probenahmekopf, der den Anforderungen der Johannesburger Konvention entspricht und einen cut - off Punkt von  $7,1 \mu m$  hat. Es handelt sich definitionsgemäß um eine Partikelverteilung, die weitgehend mit der alveolengängigen Fraktion der DIN EN 481 bzw. der respirable particulate matter (RPM) der ACGHI übereinstimmt. Der Staub wurde auf einem Quarzfaserfilter (Munktell MK 360) über eine Probenahmezeit von 7 bis 8 Stunden ( $28 - 32 m^3$ ) im Verlauf des Messtages gesammelt. Die Filter wurden vor der Probenahme mindestens 5 Stunden bei  $800 ^\circ C$  geglüht und bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Die Bestimmung der Feinstaubmasse nach der Probenahme erfolgte gravimetrisch unter gleichen Bedingungen.

### C.2.2 Bestimmung des elementaren und organischen Kohlenstoffs im $PM_{4}$

Grundlage des Verfahrens gemäß VDI - Richtlinie 2465, Blatt 2 [VDI 1999] ist die Bestimmung des Kohlenstoffs durch thermische Desorption der organischen Verbindungen in einem sauerstofffreien Inertgasstrom und anschließende Verbrennung des im Feinstaub vorhandenen elementaren Kohlenstoffs (EC) im Sauerstoffstrom. Bei dem Verfahren wird die

höhere thermische Stabilität von EC im Vergleich zu der von organischen Kohlenstoffverbindungen ausgenutzt.

Zur Vermeidung einer Überbestimmung des elementaren Kohlenstoffs durch pyrolytische Umwandlung organischer Bestandteile des Feinstaubes wird vor der Thermodesorption ein zusätzlicher Extraktionsschritt in Anlehnung an die VDI - Richtlinie 2465, Blatt 1 (siehe Methode A) (VDI 1996), durchgeführt. Dabei wird eine Teilprobe des Filters mit einem Lösemitelgemisch aus Toluol und iso - Propanol (1 + 1) vorbehandelt. Danach erfolgt die Messung wie weiter beschrieben.

Hierdurch wird ein Vergleich der Methoden mit und ohne vorherige Extraktion ermöglicht.

Kern der Analyseneinheit ist ein Quarzrohr, welches in zwei Öfen eingebettet ist. Im Ofen I findet die thermische Behandlung und Verbrennung der Probe statt, im Ofen II befindet sich eine Katalysatormasse aus Kupfer- und Cer - IV - Oxid, die für eine vollständige Verbrennung der aus der Probe freigesetzten Produkte zu CO<sub>2</sub> sorgt. Der aus dem Quarzrohr austretende Abgasstrom wird kontinuierlich mit einem NDIR - Detektor auf seinen Gehalt an CO<sub>2</sub> analysiert.

Zur Bestimmung des Kohlenstoffanteils wird aus dem Filter eine repräsentative Teilprobe ausgestanzt.

Zuerst werden in einer inerten Atmosphäre (100 % Helium) die Kohlenstoffverbindungen verdampft bzw. pyrolysiert. Dazu wird die Temperatur des IR - Ofens so gesteigert, dass die an der Filterprobe gemessene Temperatur von 80 °C auf 620 °C ansteigt. Die leicht flüchtigen Kohlenstoffverbindungen werden im Heliumstrom bei Temperaturen bis zu 350 °C verdampft bzw. desorbiert, während schwererflüchtige Kohlenstoffverbindungen auf einem Temperaturniveau von 620 °C pyrolysiert bzw. desorbiert werden. Durch die hohen Aufheizraten von etwa 600 °C/ min. werden die Pyrolyseendprodukte als kurzkettige Verbindungen in die Gasphase freigesetzt und eine Verkokung langkettiger Kohlenwasserstoffe minimiert. Die unter diesen Bedingungen erfassten Kohlenstoffverbindungen werden in der Fraktion „Organischer Kohlenstoff“ (OC) zusammengefasst.

Im zweiten Teil der Analyse wird dem Inertgasstrom mindestens 20 % Sauerstoff zugemischt und die Temperatur von 300 °C auf 700 °C gesteigert. Der noch auf dem Filter befindliche elementare Kohlenstoff wird dadurch kontrolliert verbrannt und als EC bestimmt.

Der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) der Probe ermittelt sich somit nach der Gleichung

$$TC = EC + OC.$$

Anschließend erfolgt die Umrechnung der Kohlenstoffmasse in der Teilprobe auf die des gesamten Filters und unter Einbeziehung des Probenluftvolumens auf die Kohlenstoffkonzentration in der Luft (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### C.3 Ergebnisse der Messungen in Schulen und Kindertagesstätten

#### C.3.1 Ergebnisse zur Partikelmasse

In Tabelle 16 sind die statistischen Kennwerte der Feinstaubmessungen in den beiden untersuchten Gemeinschaftseinrichtungen aufgeführt. Darüber hinaus sind in den Abbildungen 23 und 24 die in der jeweiligen Schule bzw. Kindertagesstätte erhobenen Einzelmesswerte, geordnet nach der Höhe der Belastung, grafisch dargestellt. Die Gehalte bewegten sich für den Feinstaubgehalt zwischen  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Mittelwert:  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Median:  $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )

**Tabelle 16:** Statistische Kennwerte der  $\text{PM}_{4}$ -Messungen in Schulen und Kindertagesstätten in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	in Kindertagesstätten	in Schulen
Anzahl	73	33
Mittelwert	53,8	61,6
Standardabw.	23,3	21,7
Min.	13,1	23,6
Max.	128,4	106,3
5. Perzentil	15,5	25,9
10. Perzentil	22,1	32,8
25. Perzentil	36,4	45,5
Median	52,6	59,8
75. Perzentil	67,9	78,6
90. Perzentil	86,0	93,6
95. Perzentil	96,7	103,5

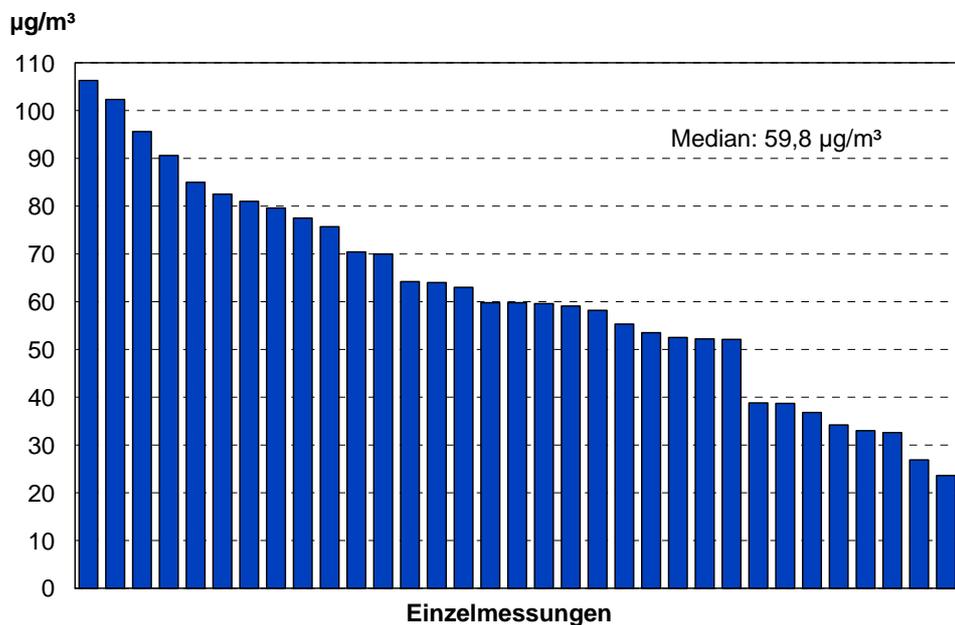


Abbildung 50: Verteilung der täglichen PM<sub>4</sub>-Messungen in Schulen (n: 33)

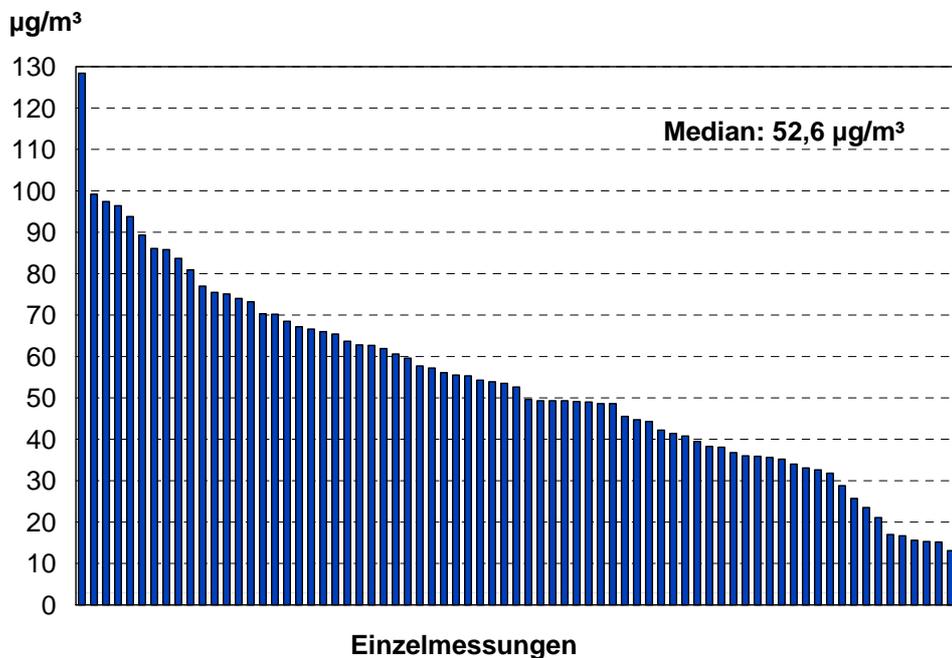


Abbildung 51: Verteilung der täglichen PM<sub>4</sub>-Messungen in Kindertagesstätten (n: 73)

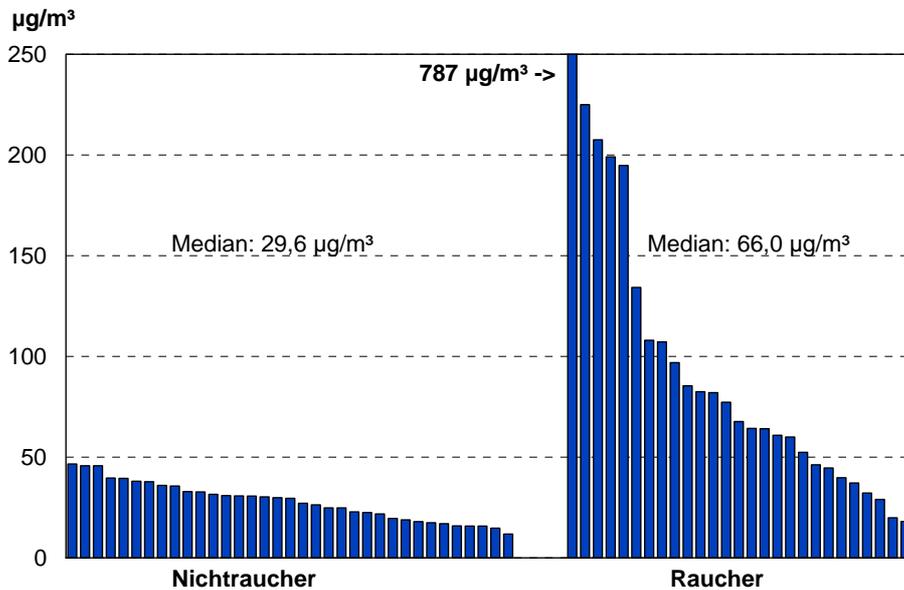
## C.4 Ergebnisse von Messungen in Wohnungen

### C.4.1 Ergebnisse zur Partikelmasse

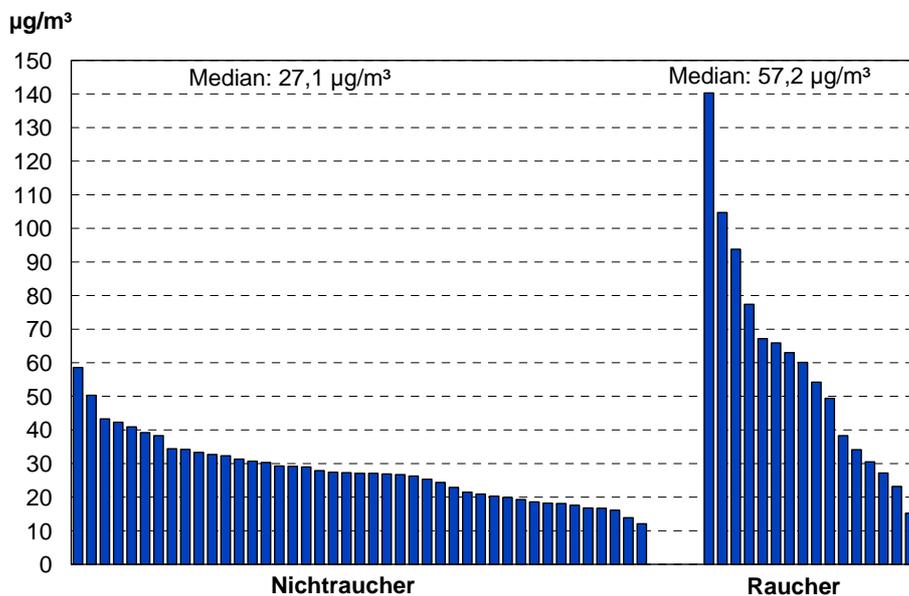
Die mittleren Gehalte (Mediane) für den Feinstaub (Tabelle 17) bewegten sich mit Konzentrationen von 66,0 µg/m<sup>3</sup> (1997/98) bzw. 57,2 µg/m<sup>3</sup> (2000) in Raucherhaushalten und mit 29,6 µg/m<sup>3</sup> (1997/98) bzw. 27,1 µg/m<sup>3</sup> in Nichtraucherhaushalten in beiden Messperioden in einem vergleichbaren Bereich. Lediglich in den Raucherhaushalten ist zwischen den beiden Untersuchungsperioden ein Rückgang bei den Spitzenkonzentrationen ersichtlich. Die Einzelergebnisse sind in den Abbildungen 25 und 26 grafisch dargestellt. Der Unterschied der Mittelwerte zwischen den Raucher- und Nichtraucherhaushalten ist auffällig und lässt sich auch statistisch ( $p < 0,001$ ) belegen. Auch die üblicherweise in der Wohnung gerauchte Anzahl an Zigaretten korreliert mit den Feinstaubgehalten der Innenraumluft ( $r = 0,314$ ;  $p < 0,05$ ).

**Tabelle 17:** Statistische Kennwerte von Feinstaub in Wohninnenräumen in Raucher- und Nichtraucherhaushalten in µg/m<sup>3</sup>

	Messperiode 1997/98		Messperiode 2000		Messperiode 2000
	innen		innen		außen
	Nicht-raucher	Raucher	Nicht-raucher	Raucher	außen
Anzahl	35	27	43	16	51
Mittelwert	28,0	112	27,9	59,0	28,4
Standardabw.	9,6	147	9,8	33,2	13,1
Minimum	11,8	18,1	12,1	57,2	10,1
Maximum	46,6	787	58,6	140,3	70,6
5. Perzentil	14,2	18,8	14,3	15,2	11,3
10. Perzentil	15,8	27,2	16,7	20,8	15,0
25. Perzentil	18,9	44,6	19,9	31,4	19,3
Median	29,6	67,7	27,1	57,2	24,3
75. Perzentil	35,7	108	32,7	74,9	36,5
90. Perzentil	42,0	211	41,7	115	47,9
95. Perzentil	45,9	562	48,9	140	57,9



**Abbildung 52:** Messergebnisse der täglichen PM<sub>4</sub>-Gehalte in Raucher- und Nichtraucherwohnungen in der Messperiode im Jahr 1997/98 (35 Nichtraucher-Whg.; 27 Raucher-Whg.)



**Abbildung 53:** Messergebnisse der täglichen PM<sub>4</sub>-Gehalte in Raucher- und Nichtraucherwohnungen in der Messperiode im Jahr 2000 (43 Nichtraucher-Whg.; 16 Raucher-Whg.)

In der Tabelle 18 sind die Kennwerte nach der jeweiligen Verkehrsbelastung für Nichtraucherwohnungen geordnet. Die mittleren Gehalte in den gering verkehrsbelasteten Wohnungen lagen tendenziell mit  $22,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  unter denen in verkehrsbelasteten Wohnungen ( $29,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Die Unterschiede zeigten sich statistisch jedoch als nicht bedeutsam.

Während für die Raucherwohnungen keine signifikante Korrelation zwischen dem Feinstaub in der Innenraumluft zu dem in der Außenluft beobachtet werden konnte, war diese Beziehung für die Untergruppe der Nichtraucherwohnungen statistisch signifikant ( $r = 0,666$ ;  $p < 0,001$ ).

**Tabelle 18:** Statistische Kennwerte von EC, OC und TC im  $\text{PM}_{10}$  in Nichtraucherinnenräumen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Anzahl 1997/98 und 2000 [hohe Verkehrsbelastung] = 34 - 39 und [geringe Verkehrsbelastung] = 25 - 40)

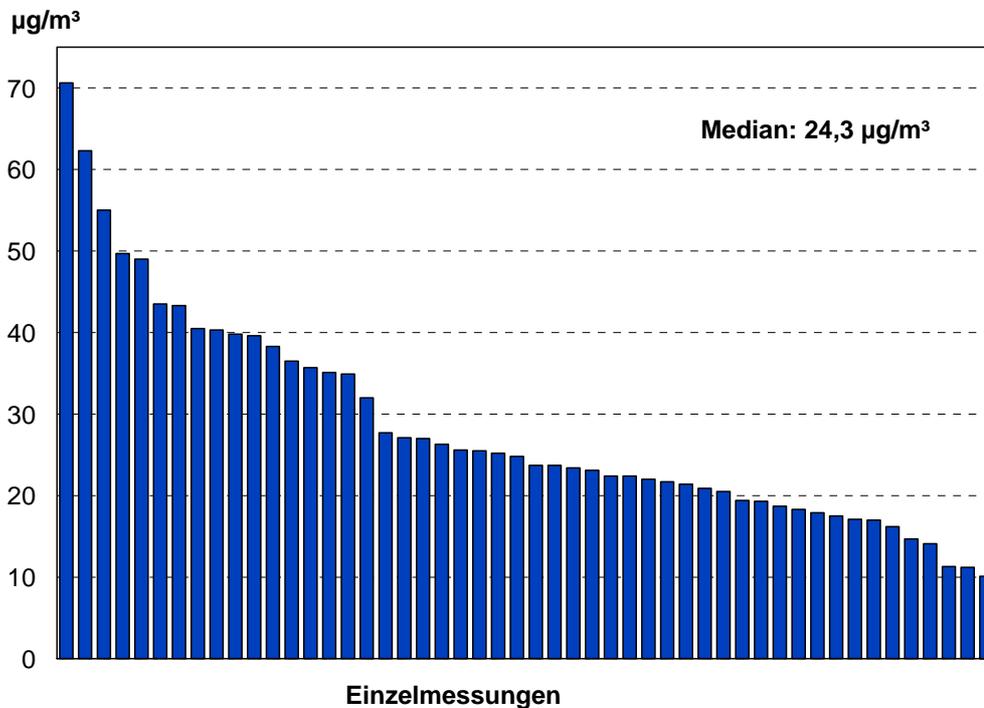
	Verkehrs- belastung	AM	Standabw.	Median	90. P.	Max
Feinstaub	hoch	29,8	9,4	29,3	39,8	58,6
	gering	26,0	9,6	22,5	40,1	45,7
Elementarer Kohlenstoff (EC) (ohne Extraktion)	hoch	3,8	2,2	3,6	6,7	10,6
	gering	3,4	1,9	2,7	5,9	8,7
Elementarer Kohlenstoff (EC) (mit Extraktion)	hoch	2,3	0,9	2,3	3,4	4,6
	gering	1,8	0,7	1,8	2,7	3,3
Gesamt - Kohlenstoff (TC)	hoch	17,8	6,0	16,0	26,2	40,6
	gering	15,8	5,5	13,9	22,1	32,9

Werte kleiner Bestimmungsgrenze sind mit der halben Bestimmungsgrenze berücksichtigt

In der Messperiode im Jahr 2000 (Februar bis Juni) wurde auch der Feinstaub, der Elementare Kohlenstoff (EC) und der Gesamt - Kohlenstoff (TC) vor dem Fenster bzw. auf dem Balkon der Wohnungen gemessen, in denen gleichzeitig die Innenraumluft untersucht wurde.

Für den Feinstaubgehalt ergaben sich vor den stark verkehrsbelasteten Wohnungen mit durchschnittlich  $26,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tendenziell höhere Gehalte (Median) als vor den gering durch den Straßenverkehr belasteten Wohnungen ( $22,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Diese Tendenz ließ sich durch eine statistisch signifikante Korrelation zwischen den Feinstaubkonzentrationen und der Verkehrsbelastung absichern ( $r = 0,31$ ;  $p < 0,05$ ). Die Einzelmesswerte sind in der folgenden Abbildung 54 geordnet nach der Verkehrsbelastung grafisch dargestellt. Aus der Abbildung

wird ersichtlich, dass bei hoher Verkehrsbelastung in einzelnen Fällen mit deutlich höheren Spitzenkonzentrationen gerechnet werden muss.



**Abbildung 54:** Messergebnisse der täglichen PM<sub>4</sub>-Gehalte in der Außenluft vor Wohnräumen

#### C.4.2 Ergebnisse der EC/OC Messungen

In den Tabelle 18 und Tabelle 19 sind die statistischen Kennwerte für den Feinstaub, den Elementaren Kohlenstoff (EC) und den Gesamt - Kohlenstoff (TC) für die beiden Messperioden von Dezember 1997 bis März 1998 und Februar 2000 bis Juni 2000 zusammengestellt. Dabei wurden die Ergebnisse nach der Verkehrsbelastung vor den Wohnungen (Tabelle 18) bzw. dem Rauchverhalten (Tabelle 19) aufgeschlüsselt. Es handelt sich um insgesamt 42 Raucher- und 78 Nichtraucherhaushalte bzw. 39 Wohnungen mit einer hohen und 39 mit einer geringen Verkehrsbelastung.

Die EC - Gehalte (siehe Tabelle 18) lagen im Durchschnitt (Median) ohne Extraktion bei 3,3 bzw. 2,7 µg/m<sup>3</sup> (hohe und geringe Verkehrsbelastung) und mit Extraktion bei 2,7 bzw. 2,0

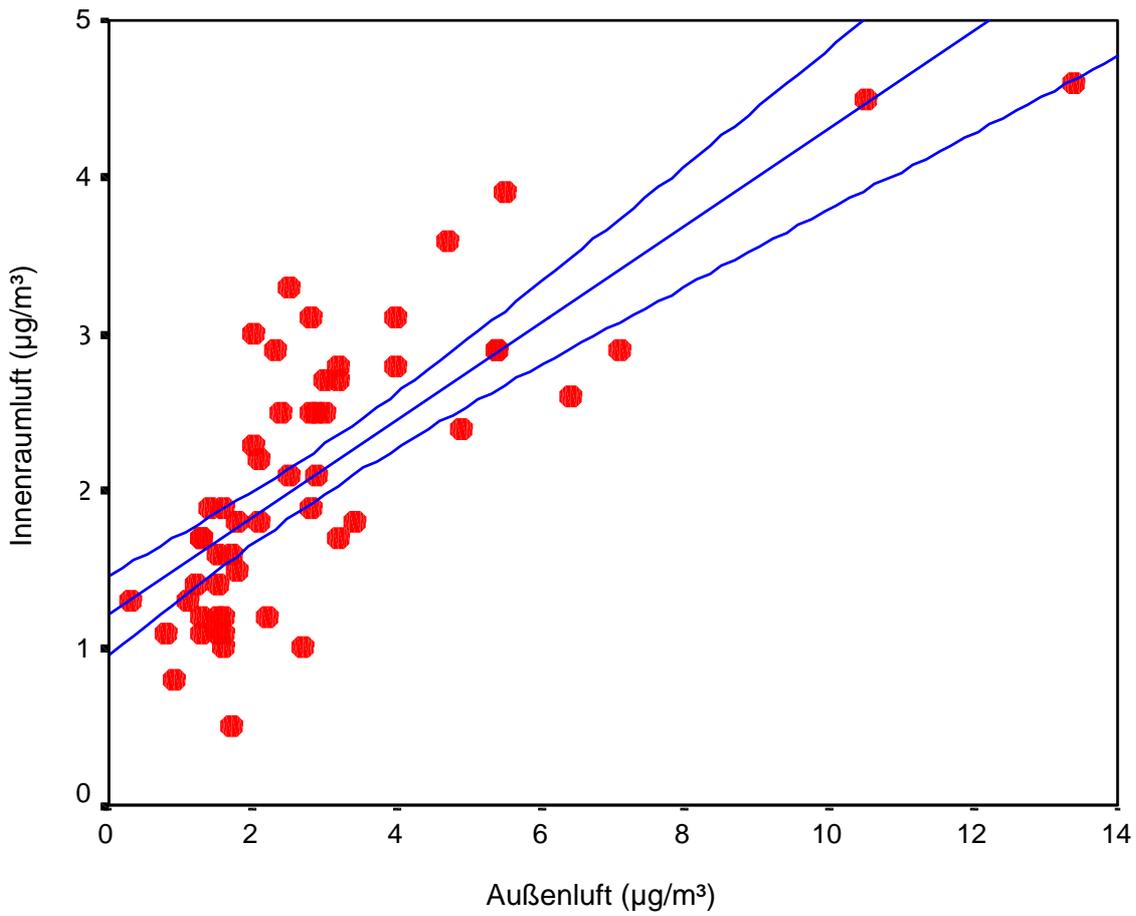
$\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Für den Gesamt - Kohlenstoffgehalt lagen die Werte entsprechend bei 13,0 bzw. 11,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Für den EC, sowohl für die Proben mit und ohne Extraktion, ließ sich eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der durchschnittlichen Verkehrsdichte des motorisierten Straßenverkehrs vor den Wohnungen und den jeweiligen Gehalten der Untersuchungsparameter (gemessen vor dem Wohnungsfenster / auf dem Balkon) ermitteln (jeweils  $r = 0,31$ ;  $p < 0,05$ ). Keine statistisch bedeutsame Beziehung konnte hingegen mit den TC - Gehalten vor den Wohnungen gefunden werden. In der Abbildung 55 ist der Vergleich der Innenraum- mit den Außenluftwerten an EC grafisch dargestellt, wobei sich ein Bestimmtheitsmaß von  $r^2$  von 0,61 ergab.

**Tabelle 19:** Statistische Kennwerte von EC, OC und TC im  $\text{PM}_{10}$  in Wohninnenräumen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Anzahl 1997/98 und 2000 [Raucherhaushalte] = 42 und [Nichtraucherhaushalte] = 78; mit Extraktion  $n = 15$  bzw. 43)

		AM	Standabw.	Median	90. P.	Max
<b>Untersuchung 1997/1998</b>						
Elementarer Kohlenstoff (EC) (ohne Extraktion)	Raucher	11,9	11,7	8,7	20,4	62,0
	Nichtraucher	4,6	2,2	4,0	7,8	10,6
Organischer Kohlenstoff (OC)	Raucher	55,8	75,6	27,6	122,3	385,3
	Nichtraucher	10,9	2,8	10,1	14,8	17,9
Gesamt - Kohlenstoff (TC)	Raucher	65,2	87,3	37,6	131,2	447,3
	Nichtraucher	15,4	4,6	15,8	21,6	28,5
<b>Untersuchung 2000</b>						
Elementarer Kohlenstoff (EC) (ohne Extraktion)	Raucher	4,6	1,9	4,1	7,4	8,3
	Nichtraucher	2,9	1,5	2,7	5,0	6,6
Elementarer Kohlenstoff (EC) (mit Extraktion)	Raucher	2,3	0,9	1,9	3,1	4,5
	Nichtraucher	2,1	0,9	2,1	3,1	4,6
Organischer Kohlenstoff (OC)	Raucher	34,1	22,1	30,0	72,5	80,4
	Nichtraucher	15,0	5,6	12,9	22,7	34,3
Gesamt - Kohlenstoff (TC)	Raucher	38,8	23,6	34,7	73,5	87,7
	Nichtraucher	17,9	6,5	15,6	26,3	40,6

Werte kleiner Bestimmungsgrenze sind mit der halben Bestimmungsgrenze berücksichtigt



**Abbildung 55:** Verhältnis der Innenraumluft zu den Außenluftgehalten für EC (Regressionsgrade und 95. Konfidenzintervall)



## D Interventionenstudien Feinstaub und Lüftung/Reinigung

### D.1 Untersuchung des ILAT in Berlin

(modifiziert nach Lahrz et al. 2006a, Lahrz et al. 2006b)

#### D.1.1 Untersuchungsbedingungen

Vom Oktober 2003 bis Ende Februar 2004 wurden 2 typische Klassenräume im Berliner Stadtgebiet sowohl unter ortsüblichen Bedingungen sowie verschiedenen Reinigungs- und Lüftungsbedingungen untersucht. Es handelte sich dabei jeweils um einen Raum in einem Neubau sowie in einem Altbau, deren Daten der Voruntersuchung eine eher überdurchschnittliche Belastung ausgewiesen haben.

Um jahreszeitlich bedingte Einflüsse im Vergleich zur vorangegangenen Studie zu minimieren, wurde auch dieses Untersuchungsprogramm im Winterhalbjahr durchgeführt, d.h. für die Schule A von Ende Oktober bis Anfang Dezember, für Schule B von Mitte Januar bis Ende Februar. Es wurde sowohl eine Neubau- (A) als auch eine Altbauschule (B) ausgewählt.

Die Messungen erfolgten in beiden Schulen nach demselben, im folgenden tabellarisch dargestellten Schema über jeweils 5 Wochen (Messperioden) an jeweils mindestens 4 Unterrichtstagen pro Woche unter realen Unterrichtsbedingungen:

**Tabelle 20:** Aufstellung der Untersuchungsparameter Lüftung und Reinigung

Woche	Schule A (Messbeginn)	Schule B (Messbeginn)	Lüftungs- bedingungen	Reinigungs- bedingungen
1	27.10.2003	12.01.2004	normal	normal
2	03.11.2003	20.01.2004	Stoßlüftung	normal
3	10.11.2003	26.01.2004	Dauerlüftung	normal
4	17.11.2003	10.02.2004	normal	nach DIN 77400 (Mindestanford.)
5	24.11.2003	17.02.2004	normal	feuchte Reinigung (täglich)

Hierbei bedeuten im Einzelnen:

1. Woche                      Normalbedingungen (Istzustand):

Ermittlung des üblichen Zustandes; keine Einflussnahme auf die in den Klassenräumen praktizierte Lüftung und Reinigung. Die Lüftung erfolgte nicht systematisch sondern individuell nach dem persönlichen Empfinden von Lehrern und Schülern. Die Reinigung wurde nach dem jeweiligen schulüblichen Reinigungsplan durchgeführt (siehe Tabellen mit den Charakteristika der jeweiligen Klassenräume).

2. Woche                      Stoßlüftung:

Gründliche Lüftung mit Fenster und Türöffnung vor und nach dem Unterricht, sowie in jeder Pause. Während des Unterrichtes wurden die Fenster geschlossen gehalten. Die individuelle Durchführung ist bei den Ergebnissen der jeweiligen Schule erläutert. In jedem Fall war darauf zu achten, dass während der Lüftung die CO<sub>2</sub>-Konzentration den Wert von 0,10 % deutlich unterschreitet.

3. Woche                      Dauerlüftung:

Ständige Öffnung von 2 Kippfenstern während des gesamten Unterrichts, gründliche Lüftung vor und nach dem Unterricht.

4. Woche                      Reinigung in Anlehnung an die Mindestanforderung der DIN 77400:

In der September 2003 veröffentlichten DIN 77400 „Schulgebäude – Anforderungen an die Reinigung“ ist als Mindeststandard („Mindestanforderung“) eine Reinigung für Klassenräume 2 mal wöchentlich vorgesehen. Dementsprechend wurden für die untersuchten Klassenräume 2 Reinigungen (jeweils fegen und feucht wischen) veranlasst.

5. Woche                      Reinigung feucht (staubbindend)

Tägliches staubbindend feuchtes Fegen, gefolgt von üblichem Nasswischen. Es sollte nicht trocken gefegt werden, auch nicht durch Schülerdienste (siehe Tabelle 20), um dadurch die Staublast und die Möglichkeit der Aufwirbelung als Beitrag zum Schwebstaubgehalt der Luft möglichst gering zu halten.

## **D.1.2 Messmethodik**

### Alveolengängiger Staub (Johannesburger Konvention)

Für die Bestimmung dieses Parameters wurde sowohl die klassische Sammelmethode des Abscheidens auf einem Filter mit anschließender Gravimetrie als auch eine kontinuierlich registrierende Lasermessmethode verwendet.

Da die Staubkonzentration der Außenluft auch die Qualität der Innenraumluft beeinflusst, wurde parallel an jedem Messtag über dieselbe Probenahmedauer der durchschnittliche alveolengängige Staubgehalt der Außenluft mit der gravimetrischen Sammelmethode in unmittelbarer Nähe des Klassenraumes bestimmt.

#### a) gravimetrische Sammelmethode

Für die Probenahme des alveolengängigen Staubes aus der Luft wurde das mobile Staubprobenahmesystem GRAVIKON PM 4 (Firma Ströhlein) und das Kleinfiltergerät MVS 6D (Derenda) eingesetzt. Der Probenahmekopf entspricht den Anforderungen der Johannesburger Konvention mit einem Abscheidegrad von 50 % bei 5 µm und einem cut - off Punkt von 7,1 µm. Der Staub wurde auf einem bindemittelfreien Glasfaserfilter (Macherey-Nagel 85/90 BF) über die Dauer von 4 bis 6 Unterrichtsstunden incl. Pausen im Verlauf des Schultages gesammelt. Das Verfahren liefert der Methode entsprechend einen durchschnittlichen Wert über den Messzeitraum eines Unterrichtstages.

#### b) Monitormessung (kontinuierlich registrierend)

Das verwendete Staubmessgerät der Fa. Grimm Aerosol Technik GmbH (Ainring) benutzt das Prinzip der Streulichtmessung von einzelnen Partikeln. Dabei dient ein Halbleiterlaser als Lichtquelle. Mit Hilfe von Partikelzahl- und Partikelgrößenbestimmung können über spezifische Rechenalgorithmen auch massebezogene Daten von Staubfraktionen, wie des alveolengängigen Staubes erhoben werden. Die gewonnenen Daten wurden anhand von Vergleichsuntersuchungen unter Realbedingungen (im Klassenraum während des Unterrichtes) mit der gravimetrischen Referenzmethode abgeglichen.

### PM<sub>10</sub> – Fraktion des Schwebstaubes

Zur Bestimmung der sogenannten thorakalen Fraktion des Schwebstaubes (DIN EN 12341), des Massenanteils eingeatmeter Partikel, die über den Kehlkopf hinaus vordringen (DIN ISO 7708), wurde dasselbe Laser-Staubmessgerät wie zur kontinuierlich registrierenden Bestimmung des alveolengängigen Staubes eingesetzt. Um vergleichbare PM<sub>10</sub> – Werte zu bestimmen, wurden unter Unterrichtsbedingungen parallele Vergleichmessungen mit dem gravimetrischen Referenzverfahren (DIN EN 12341) durchgeführt.

### Partikelzählung

Zur Zählung der luftgetragenen Partikel wurde ebenfalls das Aerosolspektrometer 1.108 der Fa. Grimm Aerosol Technik verwendet. Das Gerät verfügt über 15 verschiedene Größenkanäle mit einem Messbereich von 0,3 bis > 20 Mikrometer und erlaubt eine Partikelzählung bis zu 2 Millionen Partikel / Liter.

## **D.1.3 Ergebnisse zum alveolengängigen Feinstaub (~PM<sub>4</sub>)**

### Schule A

Die Konzentrationen der alveolengängigen Fraktion (Tabelle 21) bewegten sich während der Unterrichtszeit („Tagesmittelwerte“) in einem Bereich zwischen 41 und 89 µg/m<sup>3</sup>.

Der durchschnittliche Gehalt des alveolengängigen Staubes nach Johannesburger Konvention über alle Messungen in Schule A, ohne Unterscheidung zwischen den verschiedenen Lüftungs- und Reinigungsbedingungen, betrug 61 µg / m<sup>3</sup> bei einer mittleren innenraumbedingten Zunahme gegenüber der Außenluft von 29 µg/m<sup>3</sup>.

Der mittlere innenraumbedingte Beitrag zur Belastung mit alveolengängigem Staub war unter den Normalbedingungen und unter den Bedingungen der reduzierten Reinigungsaktivität nach DIN 77400 mit 41 bzw. 40 µg/m<sup>3</sup> am höchsten.

Bessere Bedingungen wurden durch die Maßnahmen der Lüftung in der 2. und 3. Woche mit einem Innenraumbeitrag von 26 und 29 µg/m<sup>3</sup> erreicht. Diese Aussage ist für den Parameter Dauerlüftung insofern eingeschränkt, da in dieser Woche aufgrund außergewöhnlich hoher Außenluftbelastungen (ca. 90 µg/m<sup>3</sup>) nur die Werte von zwei Messtagen berücksichtigt wer-

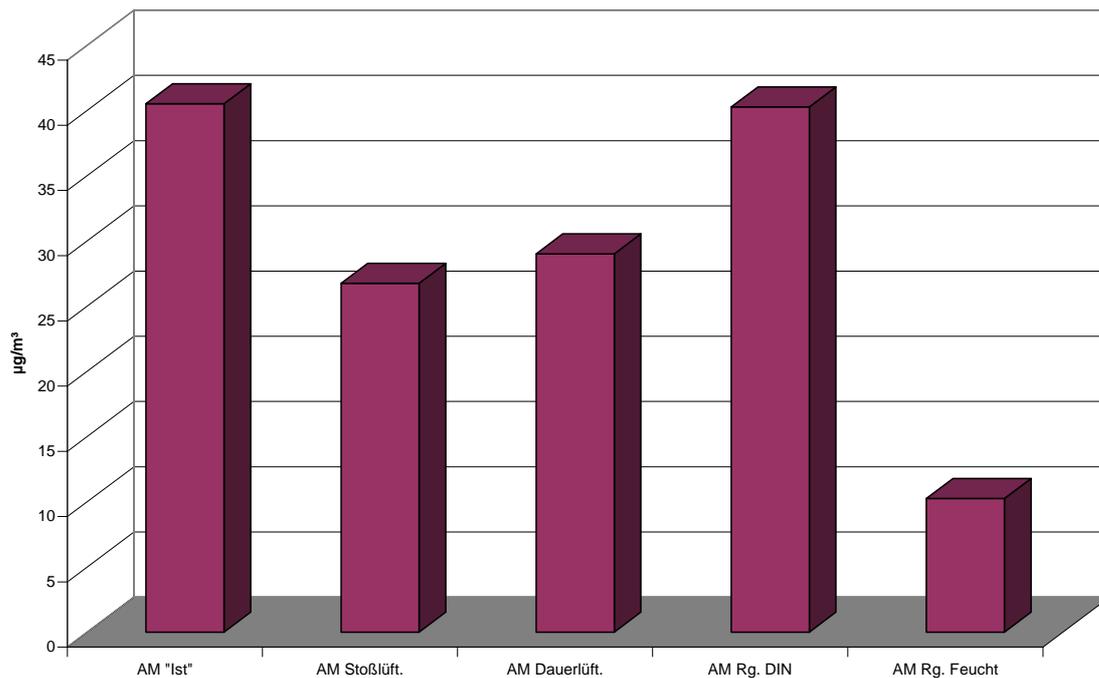
den konnten. Während dieser Ausnahmesituation trat sogar der seltene Zustand einer tendenziell geringeren Innenraumbelastung ein.

Die mit Abstand geringste Mehrbelastung ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) gegenüber der Außenluft wurde in der Woche mit der staubbindenden feuchten Reinigung festgestellt.

Abgesehen von der leichten Verbesserung der Staubsituation durch Frischluftzufuhr wird deutlich, dass nur durch die tägliche staubbindende Reinigung unabhängig von der Lüftungssituation die zusätzliche Staubbelastung im Klassenraum in der Nähe der Außenluftkonzentrationen gehalten werden konnte.

**Table 21:** Alveolengängiger Feinstaub nach Johannesburger Konvention (gravimetrisch) in Schule A in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Messwerte über die gesamte Unterrichtszeit		innen	außen	Beitrag innen	Beitrag innen
	Probenahmedatum	Mittelwert		Differenz $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Differenz %
1. Woche Ist-Zustand	27.-31.10.03	69	28	41	145%
2. Woche Stoßlüftung	03.-07.11.03	53	27	26	101%
3. Woche Dauerlüftung	10.-14.10.03	55	26	29	114%
4. Woche Reinigung „DIN“	17.-21.11.03	62	22	40	187%
5. Woche Reinigung tägl feucht	24.11.-01.12.03	51	41	10	25%



**Abbildung 56:** Innenraumbeitrag zum alveolengängigen Staub in Schule A

### Schule B

Die Konzentrationen der alveolengängigen Fraktion (Tabelle 22) bewegten sich während der Unterrichtszeit („Tagesmittelwerte“) in einem Bereich zwischen 30 und 213 µg/m<sup>3</sup>.

Der durchschnittliche Gehalt des alveolengängigen Staubes nach Johannesburger Konvention über alle Messungen in Schule B, ohne Unterscheidung zwischen den verschiedenen Lüftungs- und Reinigungsbedingungen, betrug 73 µg / m<sup>3</sup> Innenraumluft. Die mittlere Zunahme gegenüber der Außenluft lag bei 43 µg/m<sup>3</sup>.

Abgesehen von der 5. Woche ergaben sich sehr ähnliche Staubverhältnisse wie in Schule A.

Der mittlere innenraumbedingte Beitrag zur Belastung mit alveolengängigem Staub betrug in Schule B unter den Normalbedingungen 39 µg/m<sup>3</sup>.

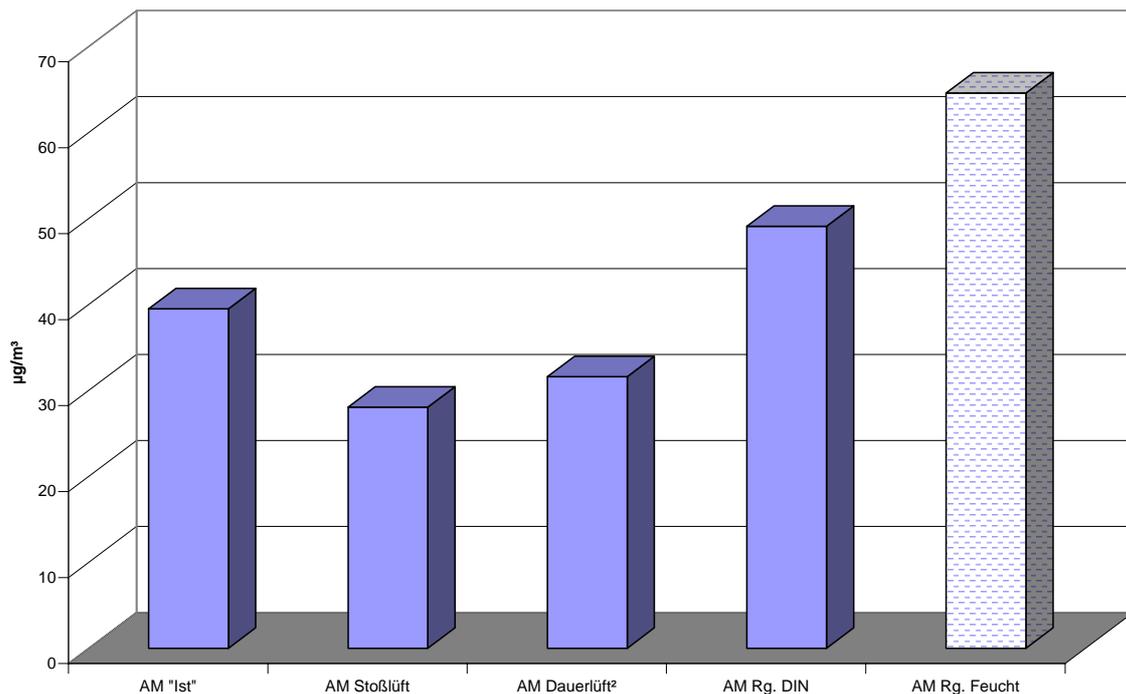
Bessere Bedingungen wurden durch die Maßnahmen der Lüftung in der 2. und 3. Woche mit einem Innenraumbeitrag von 28 und 32 µg/m<sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung von 2 Tagen, an denen die Außenluftwerte über 100 µg/m<sup>3</sup> lagen) erreicht. Trotz dieser extrem hohen Außenwerte wurden im Gegensatz zu Schule A im Klassenraum noch deutliche Zunahmen beobachtet.

Ein erhöhter Belastungsbeitrag mit durchschnittlich  $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ergab sich während der Woche mit reduzierter Reinigungsaktivität nach DIN 77400.

Entgegen unserer Erfahrung aus Schule A wurde überraschenderweise in der Woche mit der Vorgabe täglich feuchter Reinigung der höchste durchschnittliche Erhöhungsbeitrag mit  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  festgestellt. Auf Nachfrage bei der Reinigungsfirma wurde später eingeräumt, dass das Reinigungskonzept mit täglicher ausschließlich feuchter Reinigung nicht eingehalten wurde. Darüber hinaus fand eine zusätzliche abendliche Nutzung statt. Somit sind die Staubmesswerte dieser Woche nicht aussagekräftig zu bewerten.

**Table 22:** Alveolengängiger Feinstaub nach Johannesburger Konvention (gravimetrisch) in Schule B in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Messwerte über die gesamte Unterrichtszeit		innen	außen	Beitrag innen	Beitrag innen
	Probenahmedatum	Mittelwert		Differenz $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Differenz %
1. Woche Ist-Zustand	12.-16.01.04	62	22	39	177%
2. Woche Stoßlüftung	20.-23.01.04	46	18	28	159%
3. Woche Dauerlüftung	26.-29.01.04	68	37	32	86%
4. Woche Reinigung „DIN“	10.-13.02.04	60	11	49	465%
5. Woche Reinigung tägl feucht	17.-20.02.04	82	17	65	370%



**Abbildung 57:** Innenraumbeitrag zum alveolengängigen Staub in Schule B

#### D.1.4 Ergebnisse zum PM<sub>10</sub>

##### Schule A

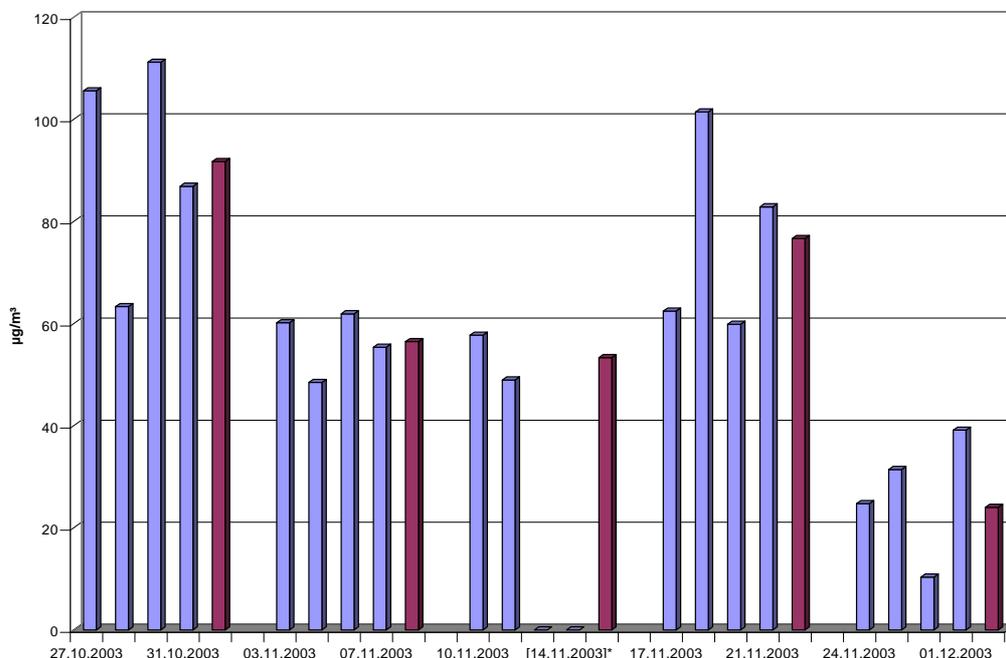
Die Konzentrationen der PM<sub>10</sub> Fraktion bewegten sich während der Unterrichtszeit („Tagesmittelwerte“) in einem Bereich zwischen 67 bis 153 µg/m<sup>3</sup>. Der durchschnittliche Gehalt dieser Partikelfraktion über alle Messungen in Schule A, ohne Unterscheidung zwischen den verschiedenen Lüftungs- und Reinigungsbedingungen, betrug 100 µg PM<sub>10</sub> / m<sup>3</sup> Innenraumluft. Die mittlere Zunahme gegenüber der Außenluft lag bei 62 µg/m<sup>3</sup>.

- Die höchsten Beiträge zur Staubbelastung wurden unter den Normalbedingungen (1. Woche: Zunahme 256 % / 92 µg/m<sup>3</sup>) und der reduzierten Reinigungsaktivität nach DIN 77400 (4. Woche: Zunahme 279 % / 77 µg/m<sup>3</sup>) festgestellt.
- In der 2. und 3. Woche mit verbesserten Lüftungsbedingungen lag der prozentuale Innenraumbeitrag mit ca. 165 % bzw. ca. 55 µg/m<sup>3</sup> immer noch auf hohem Niveau, signalisiert jedoch eine schon bessere Situation. (Die Daten der beiden Tage mit der extrem hoher Außenbelastung wurden auch hier nicht berücksichtigt)

- Lediglich in der 5. Woche unter den verbesserten staubbindenden Reinigungsbedingungen wurde ein deutlich geringerer Innenraumbeitrag mit einem relativ moderaten Anstieg von 45 % bzw. 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Wochenmittel beobachtet (Abbildung 58)

**Tabelle 23:** PM<sub>10</sub>-Schwebstaub in Schule A in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Messwerte über die gesamte Unterrichtszeit	innen	außen	Beitrag innen	Beitrag innen
	Mittelwert		Differenz $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Differenz %
	Probenahmedatum			
1. Woche Ist-Zustand	128	36	92	256%
2. Woche Stoßlüftung	90	34	56	166%
3. Woche Dauerlüftung	86	33	53	163%
4. Woche Reinigung „DIN“	104	28	77	279%
5. Woche Reinigung tägl feucht	77	53	24	45%



**Abbildung 58:** Innenraumbeitrag zur PM<sub>10</sub> Belastung in Schule A

### Schule B

Die Konzentrationen der PM<sub>10</sub> Fraktion bewegten sich während der Unterrichtszeit („Tagesmittelwerte“) in einem Bereich zwischen 56 bis 191 µg/m<sup>3</sup> (maximal bei 273 µg/m<sup>3</sup> bei extremer Außenbelastung am 27.01.04).

Der durchschnittliche Gehalt dieser Partikelfraktion über alle Messungen in Schule B, ohne Unterscheidung zwischen den verschiedenen Lüftungs- und Reinigungsbedingungen, betrug 124 µg PM<sub>10</sub> / m<sup>3</sup> Innenraumluft. Die mittlere Zunahme gegenüber der Außenluft lag bei 86 µg/m<sup>3</sup>.

- In der 1. Woche (Ist-Zustand) wurde in der Innenraumluft im Wochenmittel eine Zusatzbelastung von 89 µg/m<sup>3</sup> (311 %) gemessen. Dies entspricht weitgehend den Verhältnissen in Schule A.
- Noch höhere Beiträge zur Staubbelastung wurden unter den Bedingungen der reduzierten Reinigungsaktivität nach DIN 77400 (4. Woche: Zunahme 99 µg/m<sup>3</sup> bzw. 730 % bei sehr niedrigen Außenluftgehalten) festgestellt.
- Die höchste absolute Zunahme mit 118 µg/m<sup>3</sup> (526 %) ergab sich, wie schon für die alveolengängige Fraktion ausgeführt (nicht eingehaltenes Reinigungskonzept), in der nicht bewertbaren 5. Woche.
- In der 2. und 3. Woche mit verbesserten Lüftungsbedingungen lag der Innenraumbeitrag mit 57 bzw. 75 µg/m<sup>3</sup> ( 254 % / 160 %) immer noch auf hohem Niveau, bringt jedoch wie in Schule A eine Verbesserung. (Die Daten der beiden Tage mit der extrem hoher Außenbelastung wurden auch hier nicht berücksichtigt).

**Tabelle 24:** PM<sub>10</sub>-Schwebstaub in Schule B in µg/m<sup>3</sup>

Messwerte über die gesamte Unterrichtszeit	Probenahmedatum	innen	außen	Beitrag innen	Beitrag innen
		Mittelwert		Differenz µg/m <sup>3</sup>	Differenz %
1. Woche Ist-Zustand	12.-16.01.04	118	29	89	311%
2. Woche Stoßlüftung	20.-23.01.04	80	23	57	254%
3. Woche Dauerlüftung	26.-29.01.04	122	47	75	160%
4. Woche Reinigung „DIN“	10.-13.02.04	112	14	99	730%
5. Woche Reinigung tägl feucht	17.-20.02.04	140	22	118	526%

### D.1.5 Ergebnisse zur Partikelanzahlkonzentration / Partikelverteilung

#### Schule A

Die Gesamtzahl der Schwebstaubpartikel (> 0,3 µm) lag während des Unterrichtes in der Innenraumluft im „Tagesmittel“ zwischen ca. 40.000 und 450.000 / Liter.

Anders als beim alveolengängigem Staub oder der PM<sub>10</sub>-Fraktion wurden die höchsten Partikelzahlen in der 3. Woche (Dauerlüftung, zwei Tage mit sehr hoher Außenstaubkonzentration) und die niedrigsten in der 4. Woche mit der geringsten Staubkonzentration in der Außenluft (bei reduzierter Reinigungsaktivität) gemessen.

Ein Zusammenhang zu Reinigungsmaßnahmen ist nicht herzustellen, ebenso nicht zu verbesserten Lüftungsbedingungen.

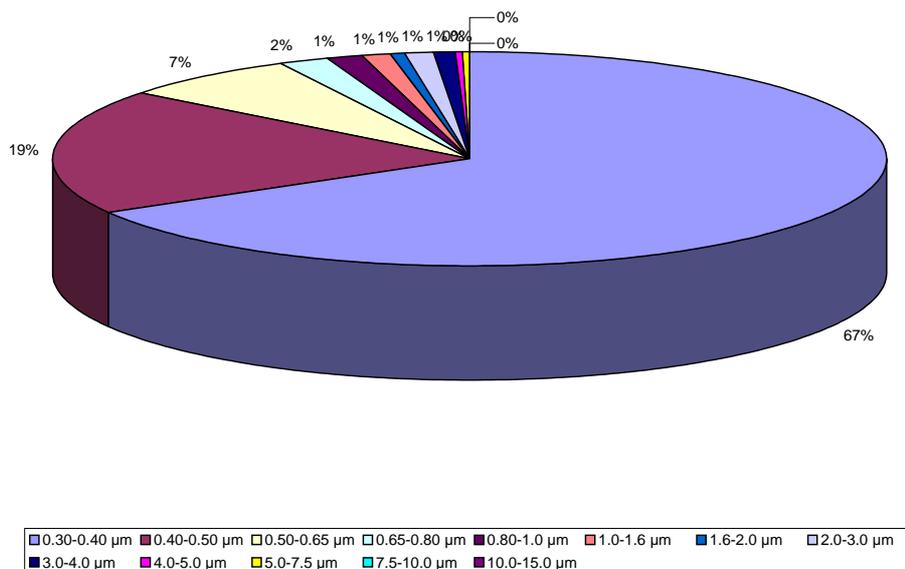
Dies legt nahe, dass die Parameter des Innenraumes hinsichtlich der Gesamtpartikelzahlen nur eine untergeordnete Bedeutung haben und der Haupteinflussfaktor im Bereich der Außenluft zu suchen ist. Dies wird bestätigt durch die Betrachtung der Partikelverteilung und der Korrelationen der Feinstaubmasse zu den Partikelzahlen.

Die Untersuchung der Partikelverteilung (Abbildung 59) machte deutlich, dass die Teilchenzahl des Schwebstaubes im Wesentlichen durch sehr feine Partikel mit relativ geringer Mas-

se geprägt ist. Allein der Partikelgrößenkanal 0,3 bis 0,4  $\mu\text{m}$  ergibt einen Anteil von durchschnittlich 67 % aller gezählten Partikel.

96 % aller Partikel werden von den „feinen“ Partikeln zwischen 0,3 und 1,0  $\mu\text{m}$  gestellt.

Stichproben von Messungen der Außenluft zeigen einen noch höheren Anteil bei den Partikeln von 0,3 bis 0,5  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 59:** Durchschnittliche Partikelverteilung in Schule A

### Schule B

Die Gesamtzahl der Schwebstaubpartikel ( $> 0,3 \mu\text{m}$ ) lag während des Unterrichtes in der Innenraumluft im „Tagesmittel“ zwischen ca. 20.000 und 1.200.000 / Liter.

Die Partikelzahlen unterlagen größeren Schwankungen als in Schule A, u.a. bedingt durch stärker schwankende Schwebstaubkonzentrationen der Außenluft mit z.T. extrem hohen Werten.

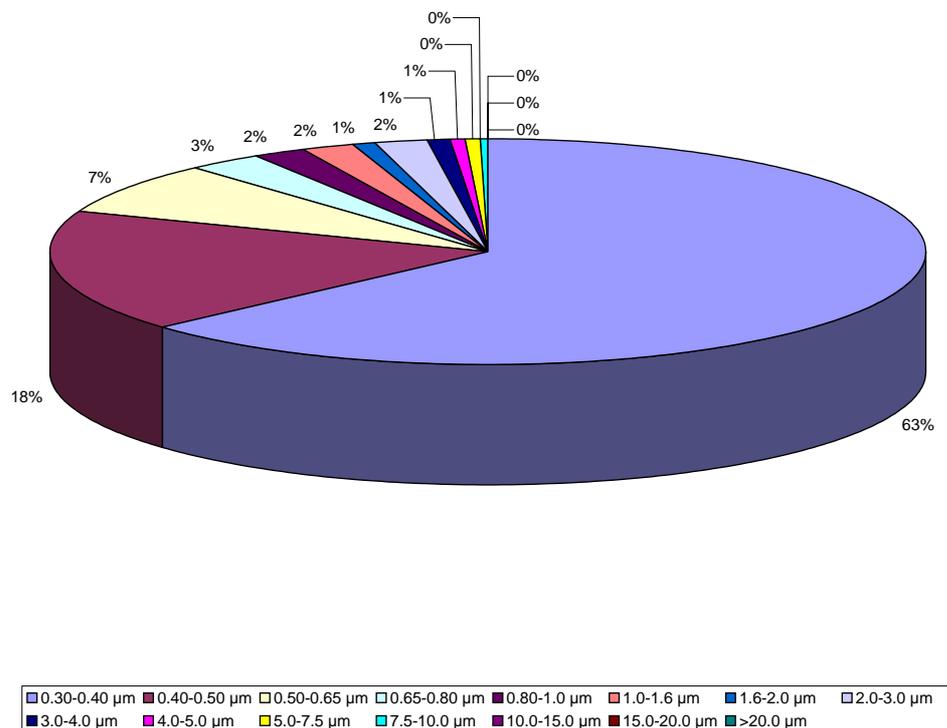
Wie schon in Schule A wurden die höchsten Partikelzahlen in der 3. Woche (Dauerlüftung, auch bei Vernachlässigung der beiden Extremtage) und die niedrigsten in der 4. Woche mit der geringsten Außenluftbelastung bei der reduzierten Reinigungsaktivität gemessen.

Ein Zusammenhang zu Reinigungs- und Lüftungsmaßnahmen ist auch im Klassenraum B nicht herzustellen.

Auch hier kann geschlossen werden, dass die Parameter des Innenraumes hinsichtlich der Gesamtpartikelzahlen nur eine untergeordnete Bedeutung haben und der Haupteinflussfaktor im Bereich der Außenluft zu suchen ist. Dies konnte wie für Schule A durch entsprechende Korrelationsrechnungen untermauert werden.

Die Untersuchung der Partikelverteilung (Abbildung 60) machte deutlich, dass auch in Schule B die Teilchenzahl des Schwebstaubes im Wesentlichen durch sehr feine Partikel mit relativ geringer Masse geprägt ist. Allein der Partikelgrößenkanal 0,3 bis 0,4 µm ergibt hier einen Anteil von durchschnittlich 63 % aller gezählten Partikel. Die „feinen“ Partikel zwischen 0,3 und 1,0 µm leisten mit einem Anteil von 93 % wieder den wesentlichen Beitrag zur Gesamtpartikelzahl.

Stichproben von Messungen der Außenluft zeigen auch hier den höheren Anteil bei den feineren Partikeln.



**Abbildung 60:** Durchschnittliche Partikelverteilung in Schule B

Die Messergebnisse in beiden Schulen lassen darauf schließen, dass die Partikel im Bereich von ca. 1 bis 10  $\mu\text{m}$  die für die massebezogene Betrachtung der alveolengängigen oder auch der thorakalen Fraktion entscheidenden Partikelgrößen sind. Diese Partikel sind überwiegend „innenraumbedingt“ und lassen sich am ehesten durch Lüftung und Reinigung beeinflussen, während die Anzahl sehr feiner Partikel, insbesondere die bis 0,5  $\mu\text{m}$ , in erster Linie von der Qualität der Außenluft (Wetterlage, Verkehr etc.) und der Lüftung abhängt. Dementsprechend wurden Anstiege der Partikelzahlen durch Eintrag von außen während der Lüftungsphasen registriert.

Dies wird bestätigt bei der Betrachtung der mit dem Monitor registrierten Tagesverläufe des alveolengängigen Staubes im Vergleich zum Verlauf der Partikelzahlen in den verschiedenen Größenklassen. Dabei verhalten sich die Partikelzahlen der Fraktionen zwischen ca. 1 und 7,5  $\mu\text{m}$  sehr ähnlich wie die Masse des alveolengängigen Staubes. Demgegenüber zeigen die feinen Staubfraktionen bis 0,5  $\mu\text{m}$  einen deutlich schwankungsärmeren Tagesverlauf, der weder dem alveolengängigen Staub noch den weniger feinen Partikeln entspricht. Der Anstieg der Gesamtpartikelzahlen korrelierte nicht mit der alveolengängigen Fraktion.

## D.2 Untersuchung der Stadt Frankfurt

(modifiziert nach Heudorf et al. 2006)

### D.2.1 Untersuchungsbedingungen

Die Untersuchungen fand im Februar und März 2006 über drei Wochen in jeweils 2 Klassenräumen je einer Innenstadt-Schule („Innenstadtschule I“) und einer eher peripher gelegenen Schule („Außenbereichsschule A“) statt: Die Messungen wurden jeweils von 8-14 Uhr durchgeführt und so die gemittelte Feinstaubkonzentration während dieser Zeit gemessen. In der **Tabelle 25** sind die eingestellten Reinigungsbedingungen bzw. das jeweilige Lüftungsverhalten dargestellt.

**Tabelle 25:** Einstellung der Untersuchungsparameter Lüftung und Reinigung:

Woche	Lüftungsbedingungen	Reinigungsbedingungen
1	normal	2x/Wo. Boden, Tische und Stühle feucht wischen 2x/Wo. Schränke, Fensterbänke, Kreideleisten abwischen
2	normal	5x/Wo. Boden, Tische und Stühle feucht wischen 5x/Wo. Schränke, Fensterbänke, Kreideleisten abwischen
3	Intensive Lüftung vor dem Unterricht und in den Pausen	5x/Wo. Boden, Tische und Stühle feucht wischen 5x/Wo. Schränke, Fensterbänke, Kreideleisten abwischen

### D.2.2 Messmethodik

Für die Probenahme des alveolengängigen Staubes aus der Luft wurde das mobile Staubprobenahmesystem GRAVIKON PM 4 (Firma Ströhlein) und das Kleinfltergerät MVS 6D (Derenda) eingesetzt und die Filter anschließend gravimetrisch vermessen. Das Staubmessgerät 1.106 bzw. 1.107 der Firma Grimm Aerosol Technik GmbH (Ainring) wurde zur kontinuierlichen Bestimmung der Partikelanzahlkonzentrationen ( $>0,3 \mu\text{m}$ ) und zur Bestimmung verschiedener Partikelmassenfraktionen benutzt.

Zudem wurde 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.

Die Aktivitäten im Raum wurde durch folgendes Schema charakterisiert: Pause oder Klasse leer: 1; Frontalunterricht : 2; Basteln, Werken: 3; Toben, Gerangel: 4.

### D.2.3 Ergebnisse der gravimetrischen Messungen

Die Ergebnisse der Raumluftuntersuchungen mittels gravimetrischer Messung auf Feinstaub in den vier Klassenräumen sind in Tabelle 26 zusammengestellt.

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 (Tabelle 26). 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 Klassenräumen der 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.

**Tabelle 26:** Messergebnisse Feinstaub – Gravimetrie  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - im Vergleich normale versus intensivierte Reinigung; alle Schulen sowie einzelne Schulen / Klassenräume

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

Mittelwert ± Standardabweichung

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert

#### D.2.4 Kontinuierliche Messungen der PM<sub>10</sub>-Gehalte

Betrachtet man die Wochenmittelwerte der kontinuierlichen Lasermessungen aller Schulen so zeigt sich - wie bei der Gravimetrie – die Abnahme von der ersten Woche („normale Reinigung“) zur zweiten und dritten Woche („verstärkte Reinigung“). Bei der Betrachtung einzelner Klassenräume ergibt sich ein unterschiedliches Bild: in den Klassenräumen der Innenstadtsschule und dem Altbauklassenraum der Außenbereichsschule A ist eine signifikante Verminderung der Feinstaubbelastung zu beobachten, wohingegen im Neubauklassenraum der Außenbereichsschule A ein signifikanten Anstieg in der zweiten/dritten Woche auffällt (Tabelle 27).

**Tabelle 27:** Feinstaub (Laserverfahren) in allen Schulen, sowie differenziert nach einzelnen Schulen / Klassenräumen – aggregiert in Wochen - Woche 1 (normal), 2 + 3 (vermehrte Reinigung)

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

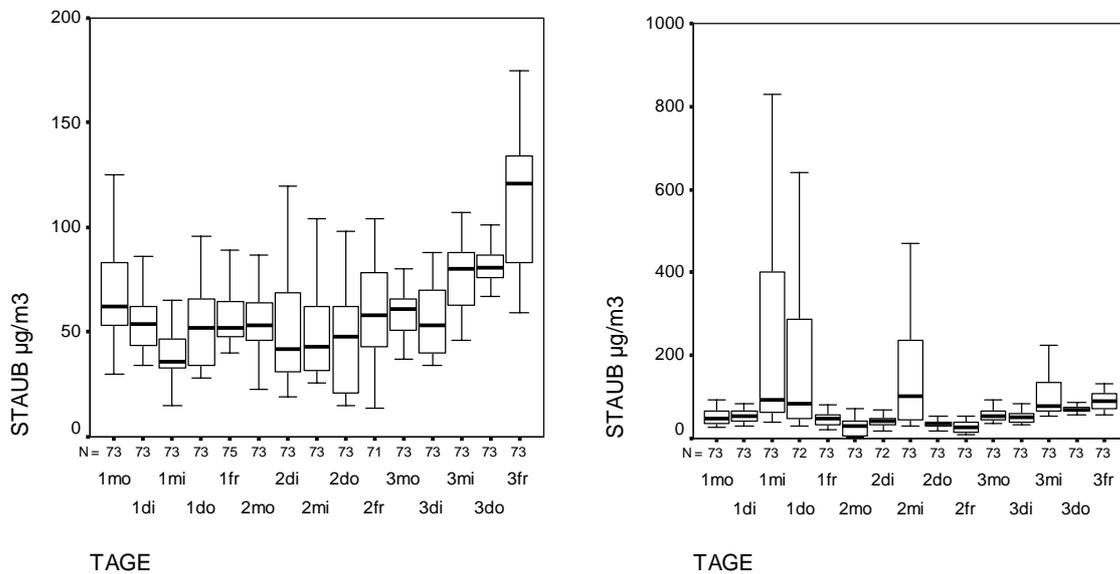
Mittelwert ± Standardabweichung

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert

Detaillierte Betrachtungen über die einzelnen Tage zeigen diesen Anstieg der Feinstaubbelastung im Neubauklassenraum der Außenbereichsschule insbesondere in der dritten Woche, als die Kinder mit Wolle bastelten (Abbildung 61-links).

Im Altbauklassentraum kam es an allen drei Mittwoch-Messtagen zu sehr hohen Spitzenbelastungen, als deren Ursache Kerzengiessen auszumachen war (Abbildung 61-rechts). Es fällt auf, dass nur in der ersten Woche auch am darauffolgenden Donnerstag ohne zwischenzeitliche Feuchtreinigung noch hohe Feinstaubbelastungen messbar waren (Re-

suspendierung der sedimentierten Stäube vom Vortag?), nicht aber in den nächsten beiden Wochen, in denen im Zuge der täglichen Feuchtreinigung der sedimentierte Feinstaub entfernt worden war und somit nicht mehr zur Resuspendierung zur Verfügung stand.



**Abbildung 61:** Feinstaubkonzentrationen an den einzelnen Messtagen in der Außenbereichsschule Neubau (links) und Altbau (rechts)

Parallel zu den Messungen der Feinstaubkonzentration in den Klassenräumen wurden weitere Parameter untersucht: Kohlendioxid, Lüftungssituation, Temperatur, Feuchte, Personen im Raum, Aktivität.

Die Zusammenhangsanalysen (bivariate Korrelationen) zeigen - über alle Schulen und die Messserie insgesamt - hochsignifikante Korrelationen zwischen der Feinstaubkonzentration und der CO<sub>2</sub>-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 (Tabelle 28). 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. - Vor diesem Hintergrund wurde eine Reinigungs-

Initiative für die Schulen in Frankfurt beschlossen: seit Herbst 2006 werden alle Klassenräume in den Wintermonaten täglich in den Sommermonaten 3/Woche feucht gereinigt.

**Tabelle 28:** Zusammenhangsanalysen zwischen der Feinstaubbelastung im Raum und der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Anzahl der Personen im Raum, der Lüftung und der Aktivitäten im Raum und der Intensität der Reinigung und Lüftung (Wochen)

	Alle Schulen	Außenbereichsschule A		Innenstadtschule I	
		Altbau	Neubau	Raum 15	Raum 38
<b>Feinstaub zu</b>					
CO <sub>2</sub>	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 ***
<b>Reinigung</b>					
Part. Korrelation*	-0,1035 ***	-0,0891 **	-0,0804 **	-0,3516 ***	-0,2398 ***
Woche Lüftung	0,132 ***	0,351 ***	0,432 ***	-0,103 ***	-0,099 **
<b>Lüftung</b>					
Part. Korrelation**	0,0693 **	0,0591 ns	0,4715 ***	0,0903 ns	0,0270 ns

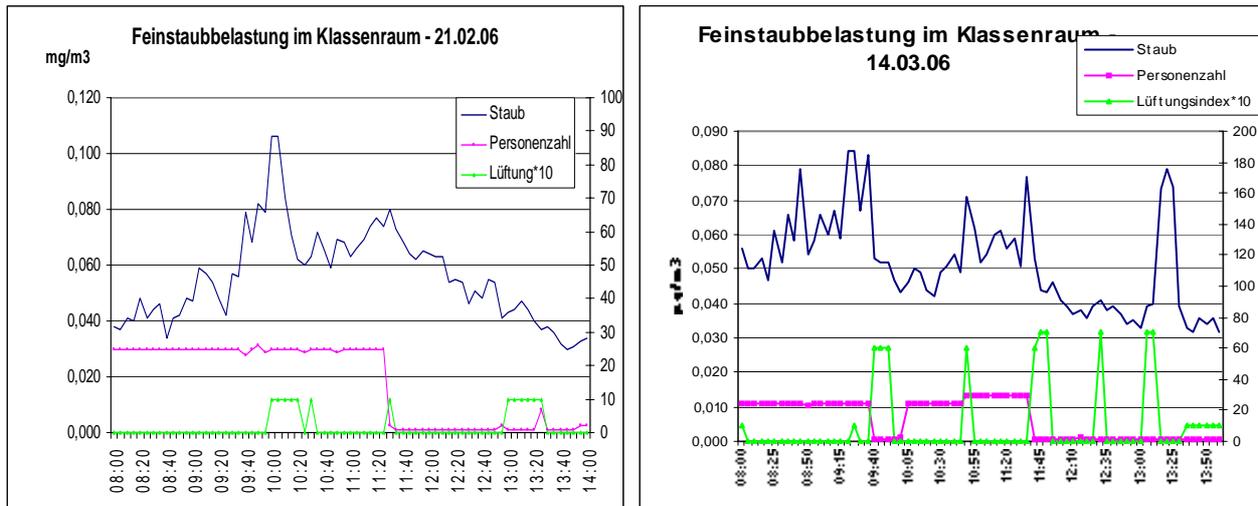
\* kontrolliert für Personen, Aktivität, Lüftung und CO<sub>2</sub>

\*\* kontrolliert für Personen, Aktivität, Woche Reinigung

Demgegenüber sind die Korrelationen zwischen der Feinstaubkonzentration und intensivierten Lüftung (dritte Woche, verglichen mit erster und zweiter Woche) niedriger; sie erreichen bei allen Schulen insgesamt gerade noch das Signifikanzniveau. Dies ist angesichts der in Abbildung 62 dargestellten Tagesbeispiele aus dem Altbauklassenraum und der oben beschriebenen weiteren Einflussfaktoren auch plausibel und nachvollziehbar. Die Tagesbeispiele (Abbildung 62) zeigen deutlich,

- dass die Feinstaubkonzentrationen in der Raumluft während Anwesenheit der Kinder stets höher sind und nach Unterrichtsende langsam abnehmen (Sedimentation)
- dass Lüften – während Anwesenheit der Kinder, aber auch nach Unterrichtschluss – stets zu einem teilweise sehr starken, aber kurz dauernden Anstieg der Feinstaubkonzentrationen führt.

Vor diesem Hintergrund ist die oben beschriebene geringe Korrelation gut nachvollziehbar.

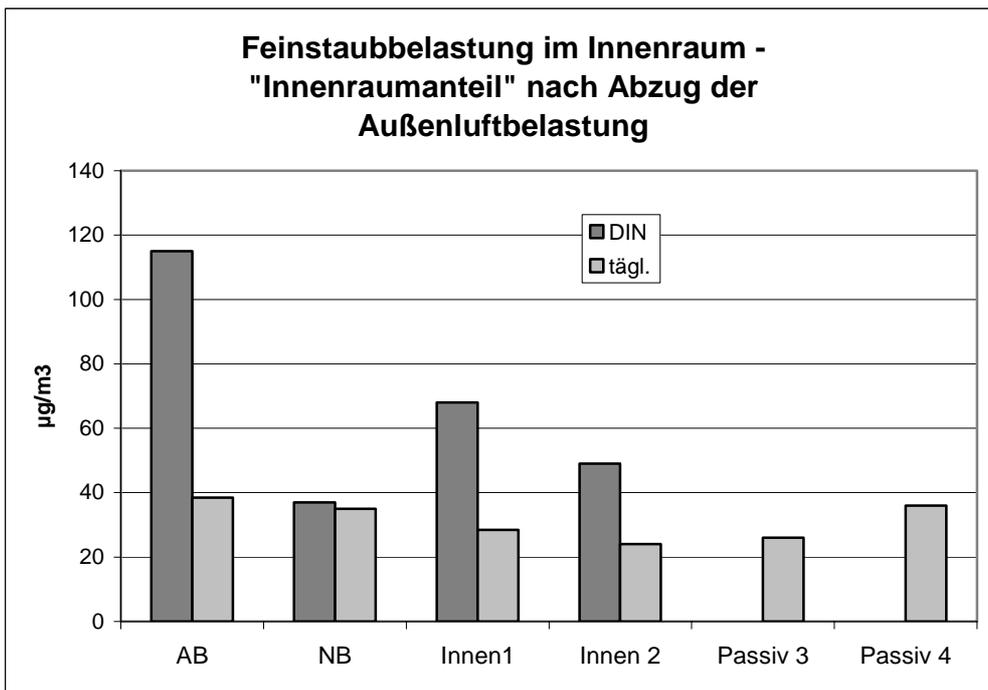


**Abbildung 62:** Verlauf der Feinstaubkonzentration in einem Klassenraum – jeweils an einem Tag ohne intensivierete Lüftung (nur Türen geöffnet) und mit intensivierter Lüftung

### D.2.5 Feinstaub-Untersuchungen in zwei weiteren Klassenräumen 2007

Im Winter 2007 wurden die Untersuchungen mit identischen Untersuchungsdesign (s. D.2.2) in zwei Klassenräumen einer Passivhausschule mit maschineller Grundlüftung über jeweils eine Woche fortgesetzt – während der seit Herbst 2006 intensivierten Reinigung. Während dieser Zeit herrschte eine deutlich niedrigere Feinstaubbelastung in der Außenluft als während der Mess-Phasen ein Jahr zuvor.

Um dennoch alle Feinstaub-Konzentrationen im Innenraum in allen Klassenräumen über alle Messphasen orientierend zu vergleichen, wurde der „Innenraumanteil“ berechnet, indem von der gemessenen Innenraumkonzentration die gleichzeitig gemessene Außenluftkonzentration abgezogen wurde. Die Gegenüberstellung der Messwoche in den 2006 untersuchten 4 Klassenräumen während DIN-Reinigung (2x wöchentlich) mit den Messdurchgängen in allen sechs untersuchten Klassenräumen während intensivierter Reinigung (5x wöchentlich) erbrachte neue Hinweise, dass die erhöhte Reinigungsfrequenz die Feinstaubbelastung im Klassenraum deutlich mindert – von im Mittel  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  über der Außenluftbelastung während seltener Reinigung auf im Mittel  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  während täglicher Feuchtreinigung.



**Abbildung 63:** Feinstaubbelastung im Innenraum – Innenraumanteil (Differenz Raumluftbelastung minus Außenluftbelastung) – während der Wochen mit DIN-Reinigung (zweimal wöchentlich) und mit täglicher Feuchtreinigung

Referenzen:

Stadtgesundheitsamt Frankfurt: Innenraumklima in Schulen. Dezernat für Umwelt, Bildung und Frauen sowie Stadtgesundheitsamt Frankfurt, 2006 ([www.frankfurt.de](http://www.frankfurt.de))

Stadtgesundheitsamt Frankfurt: Innenraumklima in Schulen – Passivhausschule im Vergleich mit konventionellen Schulen. Frankfurt, 2007 ([www.frankfurt.de](http://www.frankfurt.de))

## **D.3 Untersuchung des LGL Bayern**

(modifiziert nach Dietrich 2006, Twardella et al. 2007)

### **D.3.1 Untersuchungsbedingungen**

Die Untersuchungen fanden von Mitte Oktober bis Ende November über sechs Wochen in zwei Klassenräumen einer Grundschule im eher peripher gelegenen nördlichen Außenbereich von München statt. Die Grundschule ist Teil eines Schulkomplexes (Grundschule bis Gymnasium). Die Messungen wurden täglich, im Intervall von 60 sec (minütliche Datenerhebung), von 07:45 – 13:25 Uhr durchgeführt. Es wurden die Raumklimaparameter Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Temperatur (T) und die relative Luftfeuchte (% rF) sowie die Feinstaubkonzentrationen kontinuierlich und gravimetrisch erhoben. In Tabelle 29 sind die Rahmenbedingungen (Reinigung und Lüftung) dargestellt.

In Woche 1 + 2 wurde die Ist-Situation der beiden Klassenräume erfasst. Dieser Zeitraum stellt den Vergleichszeitraum in Bezug auf Interventionen dar. Die Lüftung und die Reinigung wurden nicht geändert. Die Feuchtreinigung wurde jeweils am Montag und Mittwoch durchgeführt. Diese beschränkte sich nach einer Trockenreinigung der Klassenräume durch die Schüler (händisches entfernen von Papier und trockenes Fegen des Fußbodens) auf feuchtes Wischen des Fußbodens. Stühle, Tische und Wandtafel (sowie andere einfach zu reinigende ebene Flächen) wurden nicht von den Angestellten der Reinigungsfirma gereinigt.

In Woche 3 + 5 wurden unterschiedliche Lüftungsbedingungen vorgegeben. In Woche 3 wurden die Klassenräume alle 45 min. (vor Unterrichtsbeginn und jeweils in den Pausen) für mindestens fünf Minuten quergelüftet (Fenster und Türen weit geöffnet), in den „großen“ Pausen (nach der vierten Stunde) für ca. 20 min. Die turnusmäßige Reinigung wurde, wie für Woche 1 + 2 beschrieben, durchgeführt.

In Woche 4 waren Schulferien, es wurden keine Messwerte ermittelt.

In Woche 5 wurden die Lüftungszeiten in den Pausen um eine Lüftung (Stoßlüftung - Fenster weit geöffnet) zur Stundenmitte (ca. 20 min. nach Stundenbeginn – jeweils fünf Minuten) ausgedehnt.

Am Ende der fünften Woche (Freitag, 11.11.05) wurden die zwei Klassenräume intensiv gereinigt. Die Schüler selbst reinigten feucht die zahlreichen Fächer und Regale sowie die Stühle und Schulbankunterbauten. Nach Unterrichtsende wurden die Leuchten sowie die Fenster und Schulbänke im Raum 140 feucht gereinigt und der Fußboden mit einem handelsüblichen Staubsauger mit Abluft – HEPA – Filterung gereinigt.

Der Tag der Reinigung (Intervention) wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da durch die Reinigungsaktivitäten selbst sehr hohe Feinstaubkonzentrationen der Innenraumluft während des Unterrichts (Reinigung durch die Schüler – große Aktivität und Staubaufwirbelungen) festgestellt wurden, die nicht in den „normalen“ Rahmen einzuordnen sind.

In den Wochen 6 + 7 wurde das Lüftungsregime beibehalten (vor Unterrichtsbeginn und alle 45 min. sowie zur Stundenmitte). An den Tagen der turnusmäßigen Reinigung (Montag und Mittwoch) wurde vor dem feuchten Reinigen des Fußbodens im Raum 140 dieser mit dem oben beschriebenen Staubsauger gereinigt. Am 16.11.05 (Mittwoch – Woche 6) wurde aufgrund des Feiertages (nur für Schüler) nicht gemessen und auch nicht intensiv gereinigt.

**Tabelle 29:** Planung der Lüftungs- und Reinigungsbedingungen

	Lüftungsbedingungen		Reinigungsbedingungen	
	Klasse 1 (Raum 140)	Klasse 3 (Raum 144)	Klasse 1 (Raum 140)	Klasse 3 (Raum 144)
Woche 1 (10.10.-14.10.05) Woche 2 (17.10.-21.10.05)	Keine Änderung (Lehrer öffnet Fenster bzw. Türen bei Bedarf)		Keine Änderung (Feuchtreinigung des Fußbodens Montag und Mittwoch; bei Notwendigkeit tägliche Trockenreinigung durch die Schüler)	
Woche 3 (24.10.-28.10.05)	Alle 45 min Türen und Fenster für jeweils 20 min öffnen (Querlüftung vor dem Unterricht und in den Pausen)		Keine Änderung (Feuchtreinigung des Fußbodens Montag und Mittwoch; bei Notwendigkeit tägliche Trockenreinigung durch die Schüler)	
Woche 4 (31.10.-04.11.05)	<b>Schulferien (keine Messungen)</b>			
Woche 5 (07.11.-11.11.05)	Alle 20 min Türen und Fenster für jeweils 20 min öffnen (Querlüftung vor dem Unterricht, in den Pausen und auch während des Unterrichts)		Keine Änderung (Feuchtreinigung des Fußbodens Montag und Mittwoch; bei Notwendigkeit tägliche Trockenreinigung durch die Schüler)	
			<b>Intensivreinigung am 11.11.05</b> durch die Schüler (Ablagen, Fächer, Tische, Stühle, etc.) und Projektteam (Gardinen entfernt, Leuchten, Fenster, Fußboden)	<b>Reinigung am 11.11.05</b> durch die Schüler (Ablagen, Fächer, Tische, Stühle, etc.)
Woche 6 (14.11.-18.11.05) Woche 7 (21.11.-25.11.05)	Alle 20 min Türen und Fenster für jeweils 20 min öffnen (Querlüftung vor dem Unterricht, in den Pausen und auch während des Unterrichts)		Montag und Mittwoch - Reinigung Fußboden mit HEPA-Staubsauger vor normaler Feuchtreinigung	Keine Änderung (Feuchtreinigung des Fußbodens Montag und Mittwoch; bei Notwendigkeit tägliche Trockenreinigung durch die Schüler)

### **D.3.2 Messmethodik**

In beiden Klassenräumen wurden die Temperatur, relative Luftfeuchte, CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> sowie die Partikelanzahlkonzentration (0,23 – 20 µm) bestimmt.

Im Außenbereich wurden PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> (analog zum Innenraum) sowie zu Unterrichtsbeginn und –ende Temperatur, relative Luftfeuchte, CO<sub>2</sub> (je 20 Messwerte im 15 sec. Intervall) erhoben.

Für die Bestimmung der Raumklimaparameter (Temperatur, relative Luftfeuchte und Kohlendioxid) wurde das Messgerät Testo 445 (Firma Testo, Lenzkirch) eingesetzt.

Der alveolengängige Staub aus der Raum- und Außenluft wurde mit einem Kleinfiltergerät MVS 6.1 (Fa. Derenda, Teltow) gravimetrisch bestimmt. Es wurde mit einem Volumenstrom von 2,3 m<sup>3</sup>/h gesammelt.

Mit dem kontinuierlich messenden Laser-Aerosol-Spektrometer 1.108 (Firma. Grimm, Ainring) wurde die Partikelanzahlkonzentration (> 0,23 µm) sowie verschiedene Partikelmassenfractionen bestimmt. Die minütlichen Messungen wurden zu Tagesmedianen zusammengefasst, wobei nur solche Zeiten berücksichtigt wurden, zu denen Schüler im Raum waren.

Zudem wurde über ein Mess- bzw. Lüftungsprotokoll (auszufüllen durch die jeweiligen Lehrer) die Lüftung, die anwesenden Schüler und die Aktivität der Schüler erfasst. Die Angaben der Lehrer über anwesende Schüler und Lüftungsbedingungen (z.B. Einhaltung der Vorgaben nach Plan – s. Tabelle 29) wurden aufgrund der CO<sub>2</sub> – und Aktivitätsmesswerte für die Auswertung abgeglichen.

Angaben über die Aktivität der Raumnutzer wurden durch den Einsatz von Akzelerometer - Actiwatch activity monitors (Mini Mitter Computer Inc.) ermittelt. Insgesamt konnten 46 Akzelerometer (23 je Raum) eingesetzt werden. Diese 23 Akzelerometer wurden jeden Tag vor Unterrichtsbeginn an die Schüler verteilt (Einverständniserklärungen der Eltern lagen vor). Die Schüler (und Lehrer) wurden gebeten, bei Verlassen des Klassenraumes (Toilette bzw. Pause oder Sportunterricht) die Geräte abzulegen, so dass die Aktivität der Schüler im Raum erfasst werden konnte. Die Akzelerometer wurden täglich ausgelesen und für den nächsten Tag neu programmiert, die Ausgabe der Geräte an die Schüler erfolgte zufällig, personenbezogene Daten wurden nicht erfasst. Während der Messperiode wurde festgestellt, dass die Zuverlässigkeit der Akzelerometer bei einigen Geräten nicht gegeben war. Es wurden teils konstante Werte angezeigt bzw. unplausibel hohe oder Null-Werte. Diese Werte wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die verbleibenden Messwerte aller Schüler aus einem

Raum wurden über den Tag aufsummiert, um die Gesamtaktivität in dem Raum an diesem Tag zu bestimmen (im folgenden Raumaktivität genannt).

### **D.3.3 Ergebnisse der gravimetrischen Messungen**

Die Ergebnisse der gravimetrischen Innenraumluft- und Außenluftuntersuchungen sind in Tabelle 30 und in Tabelle 31 dargestellt. In Abbildung 64 und in Abbildung 65 sind die zeitlichen Verläufe grafisch für  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  dargestellt. Der Messzeitraum war unabhängig von anwesenden Raumnutzern jeweils von 07:45 bis 13:15 Uhr.

Im Raum 140 ergaben die gravimetrischen Messungen in den Wochen 1 + 2 (Ermittlung der Ist-Situation) für  $PM_{10}$   $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (87; 209) und für  $PM_{2,5}$   $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (38; 148) – (Werte in Klammern stellen den Minimal- bzw. Maximalwert in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dar). Die Feinstaubkonzentrationen im Raum 144 für  $PM_{10}$  waren  $152 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (98; 218) sowie für  $PM_{2,5}$   $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (32; 96).

In den Wochen 3 + 5 (Einfluss der Lüftung auf Feinstaubgehalt) wurden für  $PM_{10}$   $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (91; 138) und für  $PM_{2,5}$   $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (35; 55) Feinstaubkonzentrationen festgestellt. Im Raum 144 wurden für  $PM_{10}$   $131 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (87; 210) und für  $PM_{2,5}$   $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (21; 51) Feinstaubkonzentrationen gemessen.

Bei der Analyse der Mittelwerte ergaben sich Hinweise auf eine Reduktion des Feinstaubgehaltes bei  $PM_{10}$  um  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (31 %) und bei  $PM_{2,5}$  um  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (52 %) im Raum 140. Im Raum 144 konnte eine Reduktion der  $PM_{10}$  – Konzentrationen um  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (14%) und der  $PM_{2,5}$  - Konzentrationen um  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (35 %) festgestellt werden.

In den Wochen 6 + 7 (Einfluss der Reinigung auf Feinstaubgehalt) konnten im Raum 140 für  $PM_{10}$   $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (58; 110) und für  $PM_{2,5}$   $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (19; 38) Feinstaubgehalte festgestellt werden. Im Raum 144 ergaben die Messungen für  $PM_{10}$   $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (67; 123) sowie für  $PM_{2,5}$   $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (21; 36).

Die Mittelwerte der Messungen stellen eine Reduzierung der  $PM_{10}$  – Konzentration von  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (33 %) und der  $PM_{2,5}$  – Konzentration von  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (36 %) im Raum 140 dar. Im Raum 144 wurde eine Reduzierung der  $PM_{10}$  – Konzentrationen von  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (17 %) sowie der  $PM_{2,5}$  – Konzentrationen von  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (20 %) festgestellt.

Die Außenluft-Konzentrationen des Feinstaubes sinken von der ersten Messperiode (Median  $PM_{10}$   $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2,5}$   $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) auf (Median  $PM_{10}$   $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2,5}$   $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in der zweiten Messperiode und auf (Median  $PM_{10}$   $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2,5}$   $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in der dritten Messperiode (Tabelle 30 und Tabelle 31 sowie Abbildung 64 und Abbildung 65).

Während in Raum 144 keine wesentliche Änderung der körperlichen Aktivität der Schüler zu erkennen ist, sinkt diese in Raum 140 von anfangs 1.518.141 Counts/Unterrichtstag auf 1.063.864 Counts/Unterrichtstag in der zweiten und 623.871 Counts/Unterrichtstag in der dritten Messperiode.

**Tabelle 30:** Messergebnisse Feinstaub (gravimetrische Messungen [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]) und Raumaktivität für Raum 140 im Messperiodenvergleich

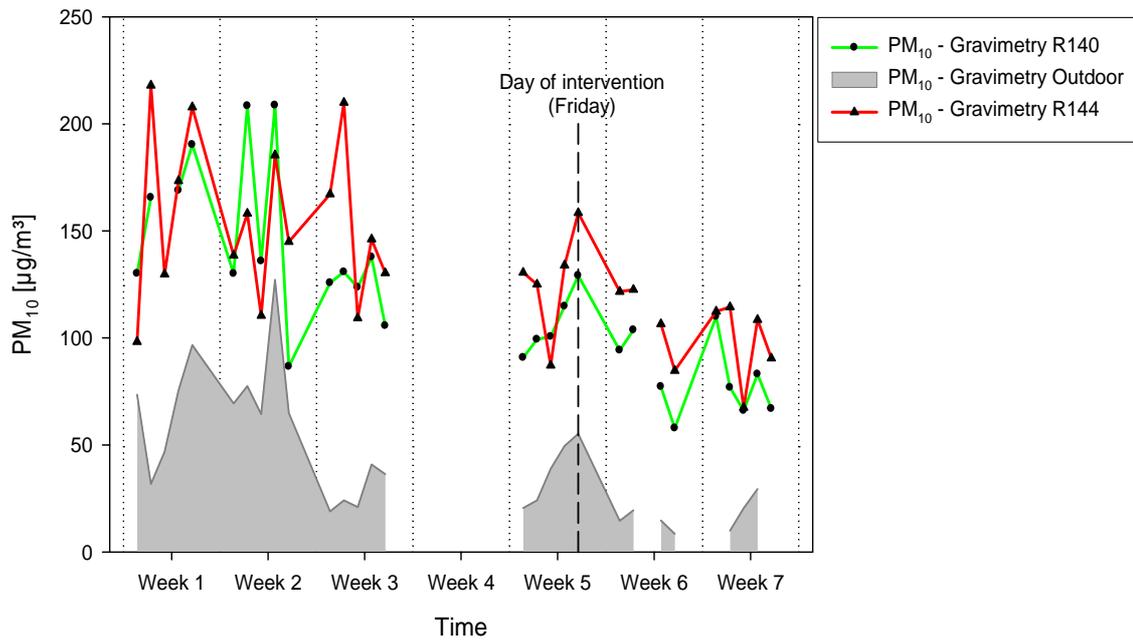
<b>Raum 140</b>	<b>Woche 1 + 2</b>	<b>Woche 3 + 5</b> (ohne 11.11.05)	<b>Woche 6 + 7</b>
PM <sub>10</sub> (Gravimetrie)	87 – 166 – 209	91 – 115 – 138	58 – 77 – 110
PM <sub>2,5</sub> (Gravimetrie)	38 – 85 – 233	35 – 42 – 55	19 – 29 – 38
PM <sub>10</sub> (Gravimetrie, außen)	32 – 71 – 127	19 – 24 – 50	5 – 15 – 29
PM <sub>2,5</sub> (Gravimetrie, außen)	43 – 57 – 76	10 – 16 – 39	2 – 11 – 25
Raumaktivität (Summe)	891.875 – 1.518.141 – 1.931.948	561.955 – 1.063.864 – 1.627.516	172.834 – 623.871 – 1.781.515

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert (bezogen auf Mittelwerte)

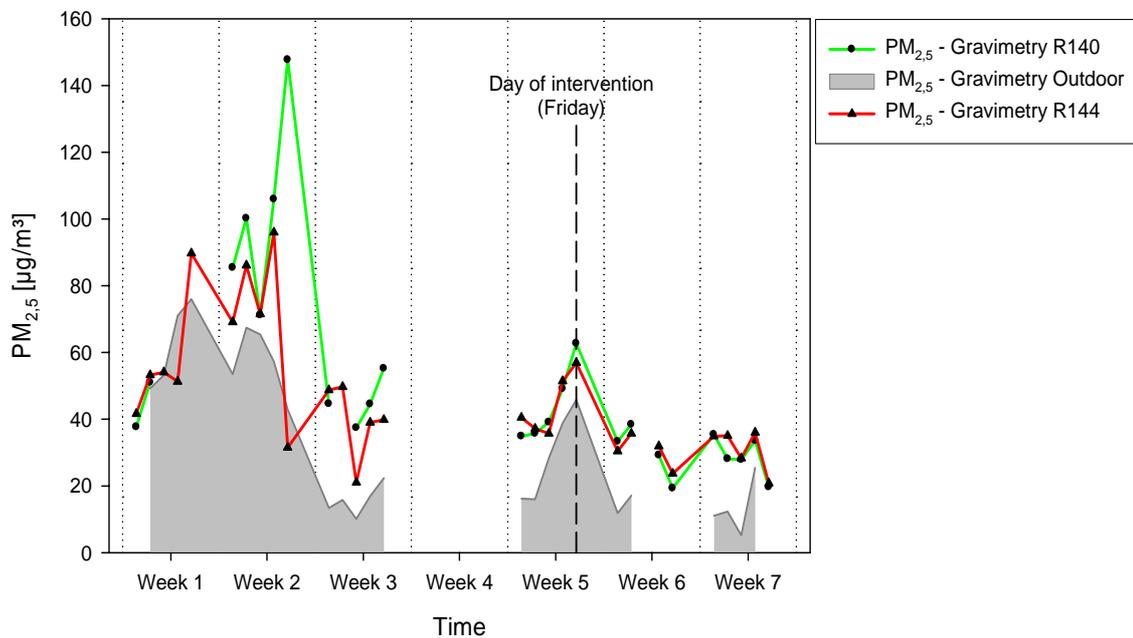
**Tabelle 31:** Messergebnisse Feinstaub (gravimetrische Messungen [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]) und Raumaktivität für Raum 144 im Messperiodenvergleich

<b>Raum 144</b>	<b>Woche 1 + 2</b>	<b>Woche 3 + 5</b> (ohne 11.11.05)	<b>Woche 6 + 7</b>
PM <sub>10</sub> (Gravimetrie)	98 – 152 – 218	87 – 131 – 210	67 – 109 – 123
PM <sub>2,5</sub> (Gravimetrie)	32 – 62 – 96	21 – 40 – 51	21 – 32 – 36
PM <sub>10</sub> (Gravimetrie, außen)	32 – 71 – 127	19 – 24 – 50	5 – 15 – 29
PM <sub>2,5</sub> (Gravimetrie, außen)	43 – 57 – 76	10 – 16 – 39	2 – 11 – 25
Raumaktivität (Summe)	607.944 – 1.862.426 – 3.308.721	644.161 – 1.999.659 – 2.754.798	614.785 – 1.956.842 – 3.111.269

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert (bezogen auf Mittelwerte)



**Abbildung 64:** Verlauf von den gravimetrisch ermittelten täglichen Werten (Mittelwerte)  $PM_{10}$  für Raum 140 und Raum 144 sowie die Außenwerte



**Abbildung 65:** Verlauf von den gravimetrisch ermittelten täglichen Werten (Mittelwerte)  $PM_{2,5}$  für Raum 140 und Raum 144 sowie die Außenwerte

### D.3.4 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen

Die Ergebnisse der Raumlufthuntersuchungen mittels kontinuierlicher Messungen des Feinstaubes im Raum 140 und Raum 144 sind in Tabelle 32 bzw. Tabelle 33 zusammengefasst.

Für den Raum 140 (Tabelle 32) sind für die Wochen 1+ 2 Feinstaubfraktionen für  $PM_{10}$  (Medianwerte) von  $225 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (90; 260), für  $PM_{2,5}$  von  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (14; 47) und für  $PM_1$  von  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (6; 22) gemessen worden (Werte in Klammern stellen den Minimal- bzw. Maximalwert in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dar). Im Raum 144 (Tabelle 33) wurden für  $PM_{10}$   $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (176; 291), für  $PM_{2,5}$   $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (23; 54) und für  $PM_1$   $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (7; 26) Feinstaubkonzentrationen festgestellt.

In den Wochen 3 + 5 wurden die Lüftungsbedingungen geändert, dadurch sollte der Einfluss der gezielten Lüftung auf den Feinstaubgehalt der Innenraumlufth beobachtet werden, es wurden für Raum 140 (Tabelle 32) eine  $PM_{10}$  – Konzentration von  $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (131; 256), eine  $PM_{2,5}$  – Konzentration von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (20; 33) sowie eine  $PM_1$  – Konzentration von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (5; 15) festgestellt. Im Raum 144 (Tabelle 33) wurde eine  $PM_{10}$  – Konzentration von  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (146; 308), eine  $PM_{2,5}$  – Konzentration von  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (25; 39) sowie eine  $PM_1$  – Konzentration von  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (7; 17) gemessen.

Die Betrachtung der Mediane ergeben Hinweise auf eine Reduktion der Feinstaubbelastung in Bezug auf gezielte Lüftung in den Klassenräumen. Für den Raum 140 ergab sich eine Reduktion für  $PM_{10}$  um  $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (23 %), für  $PM_{2,5}$  um  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (32 %) sowie für  $PM_1$  um  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (41 %). Im Raum 144 konnte für  $PM_{10}$  eine Reduktion von  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (5 %), für  $PM_{2,5}$  von  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (11 %) sowie für  $PM_1$  von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (28 %) verzeichnet werden.

In den Wochen 6 +7 wurde der Einfluss der Reinigung auf den Feinstaubgehalt der Innenraumlufth untersucht. Im Raum 140 (Tabelle 32) wurde eine  $PM_{10}$  – Konzentration von  $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (101; 165), eine  $PM_{2,5}$  – Konzentration von  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (13; 30) sowie eine  $PM_1$  – Konzentration von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (4; 18) ermittelt. Im Raum 144 (Tabelle 33) waren die Ergebnisse für  $PM_{10}$   $177 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (127; 193), für  $PM_{2,5}$   $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (19; 31) sowie für  $PM_1$   $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (6; 19).

Wie erwartet ergaben sich Hinweise auf eine Reduktion des Feinstaubes in Bezug auf Lüften und (intensiv) Reinigen bei der Betrachtung der Mediane. Im Raum 140 wurde eine Reduktion für  $PM_{10}$  um  $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (34 %), für  $PM_{2,5}$  um  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (24 %) und keine Reduktion bei  $PM_1$  festgestellt. Für den Raum 144 ergab sich eine Reduktion für  $PM_{10}$  um  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (10 %), für  $PM_{2,5}$  um  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (16 %) sowie für  $PM_1$   $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (8 %).

Durch die kontinuierliche Erfassung der Feinstaubgehalte besteht die Möglichkeit, z.B. in Zeitperioden besonders hoher Raumaktivität den zeitlich hochaufgelösten Verlauf (minütlicher Tagesgang) der unterschiedlichen Feinstaubfraktionen darzustellen.

**Tabelle 32:** Messergebnisse Feinstaub (kontinuierliche Messungen [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]) für Raum 140 im Messperiodenvergleich

Raum 140	Woche 1 + 2	Woche 3 + 5 (ohne 11.11.05)	Woche 6 + 7
PM <sub>10</sub> (kont.)	90 – 225 – 260	131 – 166 – 256	101 – 109 – 165
PM <sub>2,5</sub> (kont.)	14 – 37 – 47	20 – 25 – 33	13 – 19 – 30
PM <sub>1</sub> (kont.)	6 – 17 – 22	5 – 10 – 15	4 – 10 – 18

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert (bezogen auf Mediane)

**Tabelle 33:** Messergebnisse Feinstaub (kontinuierliche Messungen [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]) für Raum 144 im Messperiodenvergleich

Raum 144	Woche 1 + 2	Woche 3 + 5 (ohne 11.11.05)	Woche 6 + 7
PM <sub>10</sub> (kont.)	176 – 208 – 291	146 – 195 – 308	127 – 177 – 193
PM <sub>2,5</sub> (kont.)	23 – 35 – 54	25 – 31 – 39	19 – 26 – 31
PM <sub>1</sub> (kont.)	7 – 18 – 26	7 – 12 – 17	6 – 12 – 19

Minimalwert – Median (mittlerer Wert) – Maximalwert (bezogen auf Mediane)

### D.3.5 Lüftungs- und Reinigungseffekte

In Tabelle 34 und Tabelle 35 sind die Ergebnisse zu den Lüftungs- und Reinigungsmaßnahmen dargestellt.

#### Lüftungseffekte

Die mittlere PM<sub>10</sub> – Konzentration lag in Woche 1+ 2 bei 157,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  und in Woche 3 + 5 bei 126,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Unter Berücksichtigung des Klassenraumes ergibt sich im linearen Modell 1 eine Reduktion von 31,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , die statistisch signifikant ist. Wenn im Weiteren die Aktivität der Schüler und die Außenluftwerte berücksichtigt werden (Modell 2), reduziert sich die Abnahme auf 2,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  und ist auch nicht mehr signifikant.

Die mittlere PM<sub>2,5</sub> – Konzentration lag in Woche 1+ 2 bei 80,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  und in Woche 3 + 5 bei 41,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Unter Berücksichtigung des Klassenraumes ergibt sich im linearen Modell 1 eine Reduktion von 39,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , die statistisch signifikant ist. Wenn im Weiteren die Aktivität der

Schüler und die Außenwerte berücksichtigt werden (Modell 2), erhöht sich zwar die Abnahme auf  $48,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ist aber statistisch nicht mehr signifikant.

Die Änderung der Lüftungsbedingung hat somit keinen Einfluss auf die  $\text{PM}_{10}$  – Konzentration. Bei der  $\text{PM}_{2,5}$  – Konzentration kann eine Reduktion erzielt werden, die jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

**Tabelle 34:** Lüftungseffekt für  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$  für Raum 140 und Raum 144

	Mittelwert <b>vor</b> Änderung der Lüftung (Woche 1 + 2) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Mittelwert <b>nach</b> Änderung der Lüftung (Woche 3+ 5) (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Modell 1* Lüftungseffekt (95 % Konfidenzintervall)	Modell 2** Lüftungseffekt (95 % Konfidenzintervall)
$\text{PM}_{10}$	$157,3 \pm 39,2$	$126,0 \pm 29,0$	-31,0 (-54,2; -7,8)	-2,4 (-31,8; 27,0)
$\text{PM}_{2,5}$	$80,6 \pm 46,6$	$41,4 \pm 8,2$	-39,1 (-61,8; -16,4)	-48,5 (-104,7; 7,7)

\* adjustiert für Klassenraum

\*\* adjustiert für Klassenraum, Aktivität und Außenwerten

### Reinigungseffekte

Die mittlere  $\text{PM}_{10}$  – Konzentration lag in Woche 3 + 5 bei  $126,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und in Woche 6 + 7 bei  $92,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Unter Berücksichtigung des Klassenraumes ergibt sich im linearen Modell 1 eine Reduktion von  $33,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , die statistisch signifikant ist. Wenn im Weiteren die Aktivität der Schüler und die Außenwerte berücksichtigt werden (Modell 2), reduziert sich die Abnahme auf  $29,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ist weiterhin signifikant.

Die mittlere  $\text{PM}_{2,5}$  – Konzentration lag in Woche 3 + 5 bei  $41,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und in Woche 6 + 7 bei  $30,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Unter Berücksichtigung des Klassenraumes ergibt sich im linearen Modell 1 eine Reduktion von  $11,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , die statistisch signifikant ist. Wenn im Weiteren die Aktivität der Schüler und die Außenwerte berücksichtigt werden (Modell 2), reduziert sich die Abnahme auf  $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ist weiterhin signifikant.

Bei Berücksichtigung des Klassenraumes ergibt sich im linearen Modell 1 eine Reduktion des  $\text{PM}_{2,5}$  um  $11,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Durch die zusätzliche Berücksichtigung von Raumaktivität und Außenwerten verringert sich dieser Effekt auf  $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , bleibt aber statistisch signifikant.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Verbesserung der Reinigungsbedingungen mit einer signifikanten Reduktion der PM<sub>2,5</sub> - Gehalte und insbesondere der PM<sub>10</sub> - Konzentrationen einhergeht.

**Table 35:** Reinigungseffekt für PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> für Raum 140 und Raum 144

	Mittelwert <b>vor</b> Reinigung (Woche 3 + 5) (Mittelwert ± Standardabweichung in µg/m <sup>3</sup> )	Mittelwert <b>nach</b> Reinigung (Woche 6 + 7) (Mittelwert ± Standardabweichung in µg/m <sup>3</sup> )	Modell 1* Reinigungseffekt (95 % Konfidenzintervall)	Modell 2** Reinigungseffekt (95 % Konfidenzintervall)
PM <sub>10</sub>	126,0 ± 29,0	92,5 ± 20,8	-33,6 (-49,0; -18,1)	-29,7 (-45,7; -13,6)
PM <sub>2,5</sub>	41,4 ± 8,2	30,1 ± 6,0	-11,3 (-16,3; -6,3)	-6,0 (-10,2; -1,8)

\* adjustiert für Klassenraum

\*\* adjustiert für Klassenraum, Aktivität und Außenwerten

## **D.4 Länderuntersuchungsprogramm in öffentlichen Einrichtungen (LUPE I)**

(erste Ergebnisse der Länder Bayern, Baden- Württemberg, Berlin, Niedersachsen)

Auf Anregung des LAUG wurde von den Ländern Bayern, Baden-Württemberg, Berlin und Niedersachsen eine Arbeitsgruppe gebildet, aus der das gemeinsam abgestimmte Länderuntersuchungsprogramm in öffentlichen Einrichtungen (LUPE) resultiert.

Wesentliche erste Ziele sind die Ermittlung der partikulären Feinstaubkonzentration in Schulinnenräumen in Abhängigkeit vom Reinigungsverfahren sowie fehlende notwendige Erkenntnisse zu Quellen des Feinstaubes zu sammeln.

Es sollen Hinweise für in der Praxis auch flächendeckend umsetzbare Reinigungsverfahren erarbeitet werden, welche die Feinstaubkonzentration in Schulinnenräumen unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit vermindern.

Das zwischen den Bundesländern abgestimmte Messprogramm ist zugunsten von Untersuchungsdauer, einer hohen Untersuchungstiefe und unter dem Aspekt möglichst valider und vergleichbarer Messergebnisse auf wenige, dafür exemplarische Klassenräume ausgelegt. Die Untersuchungen werden in Klassenräumen von Grundschulen unter üblichen Bedingungen und über die Unterrichtsdauer durchgeführt.

Die Grundschulen in Bayern und Niedersachsen befinden sich in Schulzentren, die 1978 bzw. 1970 im städtischen Gebiet mit überwiegender Wohnnutzung abseits vielbefahrener Hauptstrassen errichtet wurden.

In der Regel befinden sich als Sonnenschutz im Klassenzimmer Vorhänge. Die Räume haben eine Größe von ca. 60 -70 m<sup>2</sup> (Volumen: ca. 190 -220 m<sup>3</sup>) und sind im Durchschnitt mit 25 Schülern belegt (Jahrgangsabhängig). In den Klassenräumen befindet sich ausschließlich glatter Bodenbelag, in den Räumen sind Teppichelemente und Polstermöbel in Form von Sitzecken bzw. „Kuschelecken“ vorhanden. Die Raumlüftung erfolgt über weit zu öffnende Fenster, eine Querlüftung zum Flur ist möglich. In Niedersachsen erfolgt die Raumlüftung zusätzlich zur Fensterlüftung über eine tagsüber laufende Abluftanlage. Die Decken sind meist mit Platten abgehängt, in den Räumen befinden sich Regale und andere Ablagemöglichkeiten für Unterrichtsmittel.

Die jeweils 4-wöchigen Messungen bestehen aus der Erfassung des Ist-Zustandes (die ersten 2 Wochen jeder Serie) und nachfolgend des Zustandes unter optimierten Reinigungsbedingungen. Es sollen vier Messintervalle (ein Intervall je Jahreszeit) durchgeführt werden, um auch den Einfluss der Jahreszeiten auf die Feinstaubbelastung zu erfassen und je nach gesammelten Erfahrungen z.B. die Reinigungsstrategie anzupassen.

Neben der kontinuierlichen Messung der Partikelkonzentration und –masse werden auch die Raumklimaparameter (Kohlendioxid, Temperatur, relative Feuchte) erfasst. Dies wird wegen des Einflusses der Außenluft mit entsprechenden Parallelmessungen flankiert.

Zur Erfassung von toxikologisch relevanten Potentialen, die über die reine Partikelwirkung hinausgehen, werden filterbasierte Sammelverfahren zur Gravimetrie und Untersuchung von Luftinhaltsstoffen wie Endotoxinen, Allergenen und anorganischen Inhaltsstoffen im Feinstaub durchgeführt.

Der erste Teil der LUPE-Interventionsstudien beinhaltete den Versuch mit möglichst geringem Reinigungsaufwand eine Reduzierung der Feinstaubkonzentration zu erreichen. Ausgehend von einer Mindestlüftung (möglichst vor und nach dem Unterricht sowie in den Pausen) sollte geprüft werden, ob, ausgehend von der meistens 2x pro Woche routinemäßig durchgeführten Reinigung (jeweils trocken / nass), durch ein tägliches „Feuchtwischen“<sup>1</sup> und einem Nasswischens pro Woche (Reinigungsintervention) eine Verbesserung der Feinstaubsituation erreicht werden kann.

In Bayern wurde durch ein Protokoll, dass von den Lehrern auszufüllen war, die täglich anwesenden Personen je Unterrichtsstunde, soweit es ging die Aktivität der Schüler (Frontalunterricht: leichte Aktivität; Gruppenarbeit: mäßige Aktivität; Spiele: intensive Aktivität), die Fensterstellung während des Unterrichts und der Pausen sowie die Anwesenheit der Schüler in den großen Pausen erfasst. In Niedersachsen wurden annähernd ähnliche Parameter von anwesenden Mitarbeitern des NLGA dokumentiert.

Die ersten Untersuchungsintervalle fanden in der Zeit von Dezember 2006 bis März 2007 statt:

Bayern	20.11.2006 bis 15.12.2006
Baden-Württemberg	20.11.2006 bis 23.07.2007
Berlin	05.03.2007 bis 30.03.2007
Niedersachsen	05.02.2007 bis 02.03.2007

---

<sup>1</sup> Feuchtwischen ist ein staubbindendes Wischen des Bodenbelages in einer Arbeitsstufe mit nebelfeuchten oder präparierten Reinigungstextilien zur Beseitigung von lose aufliegendem Feinschmutz (Staub, Flaum) und in geringem Umfang auch für aufliegenden Grobschmutz (Papierknäuel, Pappbecher etc.). Es ist die kostengünstigste manuelle Reinigungsmethode für glatte Böden und nicht zu verwechseln mit dem aufwändigeren Nasswischen.

Die Ergebnisse der Feinstaubmessungen ( $PM_{10}$ ) mit kontinuierlich registrierenden Streulichtmessgeräten sind in den folgenden Diagrammen mit den Tagesmedianen, sowie dem 5. und dem 95. Perzentil dargestellt. Die Tagesmediane lagen über alle Bundesländer betrachtet in einem Bereich von ca. 90 bis  $380 \mu\text{g } PM_{10}/\text{m}^3$ .

**Tabelle 36:** Zusammenfassung der Mediane für  $PM_{10}$

	Woche 1 + 2* – IST-Zustand			Woche 3 + 4* – Intervention		
	$PM_{10}$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] (bezogen auf Tagesmediane)			$PM_{10}$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] (bezogen auf Tagesmediane)		
Bundesland	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.
BY R1	252	190	276	245	212	297
BY R2	216	165	260	217	145	280
BE	258	170	385	290	180	383
NI R1	170	105	291	181	87	304
NI R2	186	122	290	145	95	250
BW 11. - 12.06	210	129	34	221	124	24
BW 01. - 02.07	114	75	18	135	78	19
BW 02.07 nicht gereinigt	267	169	62			
BW 03.07	145	106	32	130	67	44
BW 04. - 05.07	81	52	33	59	35	22
BW 06. - 07.07	42	28	18	43	26	16

\* in einigen Fällen erfolgte die Messung über andere Zeitabstände (s. Abbildungen 69 - 73)

Die Untersuchungen bestätigen die sowohl gegenüber der Außenluft als auch üblicher Innenraumluft vergleichsweise hohen Feinstaubkonzentrationen in Klassenräumen, wie sie auch aus den vorangegangenen Studien bekannt sind.

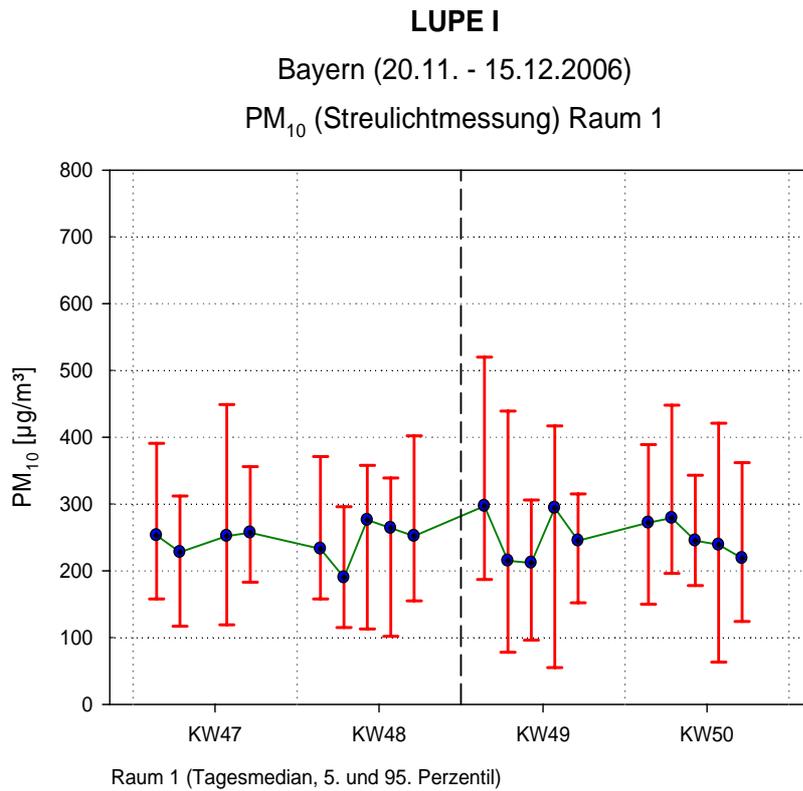
Die zeitgleich vor dem Klassenraum untersuchte Außenluft lag im Mittel bei  $30 \mu\text{g } PM_{10}/\text{m}^3$  mit einer Spannweite von 8 bis  $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Berlin), in Bayern lagen die Außenluftwerte während der Intervention bei  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (5 – 35) und in Niedersachsen war der Außenluftmittelwert  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (10 – 65).

Im Vorgriff auf die vollständigen Ergebnisse der Untersuchungen ergab sich bei der alleinigen Betrachtung der Feinstaubkonzentrationen ( $PM_{10}$ , Abbildung 66 - Abbildung 75) keine Verbesserung durch die beschriebene moderate Änderung der Reinigungsstrategie.

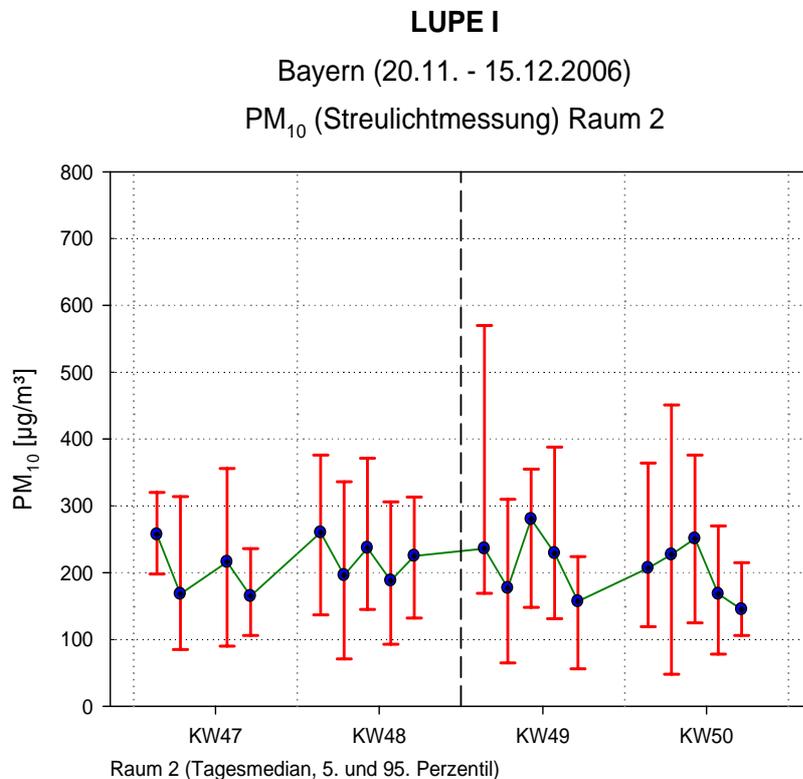
Der Verzicht auf eine Nassreinigung je Woche zugunsten des einfachen täglichen Feuchtwischens ergab keine signifikante Minderung des Feinstaubes in der Luft der Klassenräume. Die Effekte der intensivierten Reinigung werden vermutlich von anderen komplexen Effekten wie Raumaktivität, allgemeiner Grundreinigungszustand des Raumes, subjektives Lüftungsverhalten der Lehrer sowie Raumausstattung (z.B. Vorhänge) und verwendete Baumaterialien überlagert.

Verhalten, Vorkommen und gesundheitliche Aspekte von Feinstäuben in Innenräumen

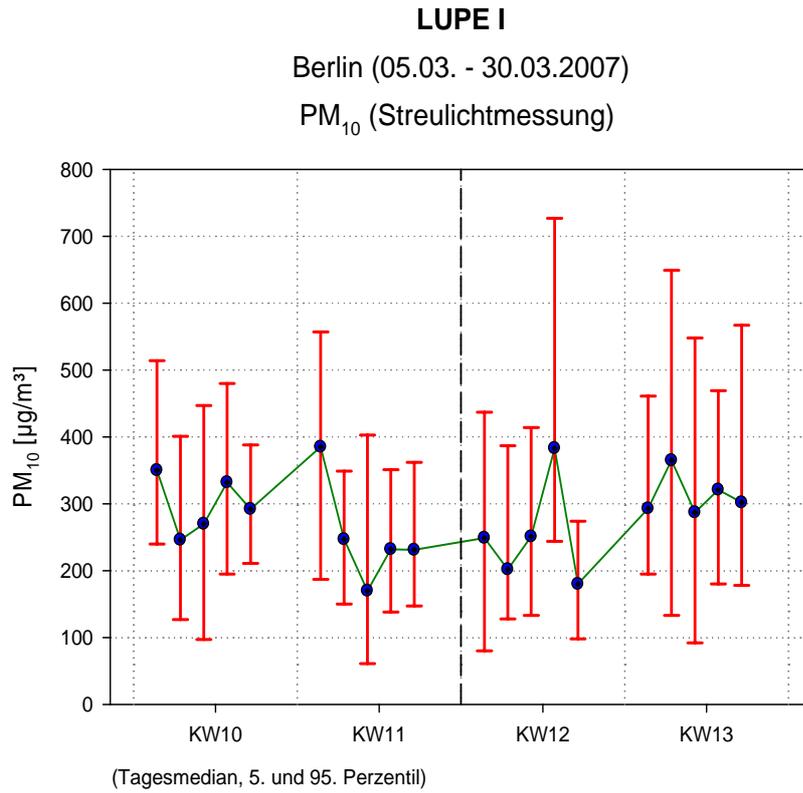
Die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen, wie z.B. der Endotoxin- und Allergenbestimmung etc. müssen allerdings noch abgewartet werden.



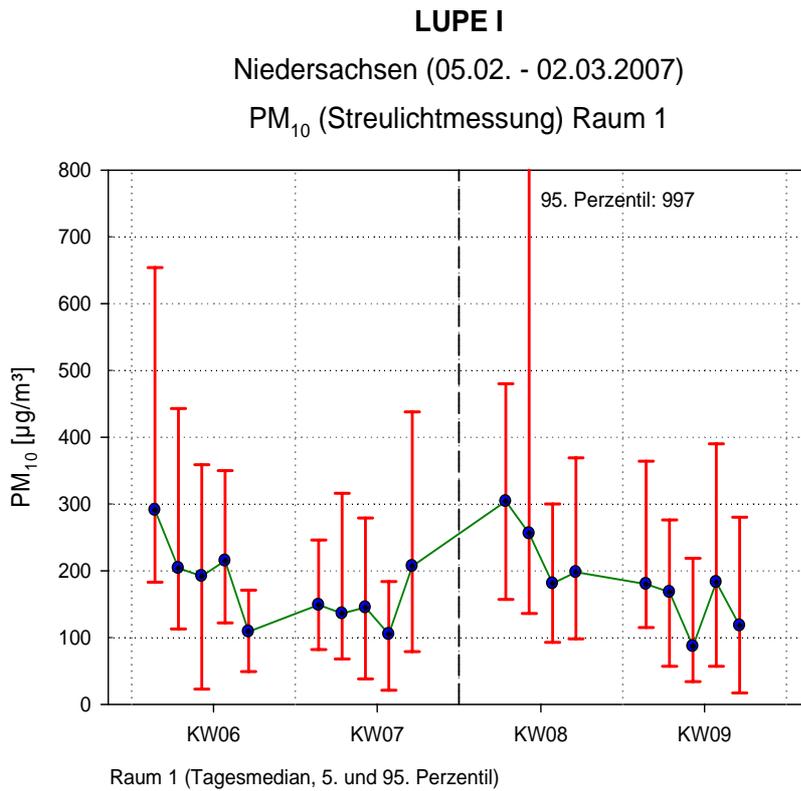
**Abbildung 66:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)



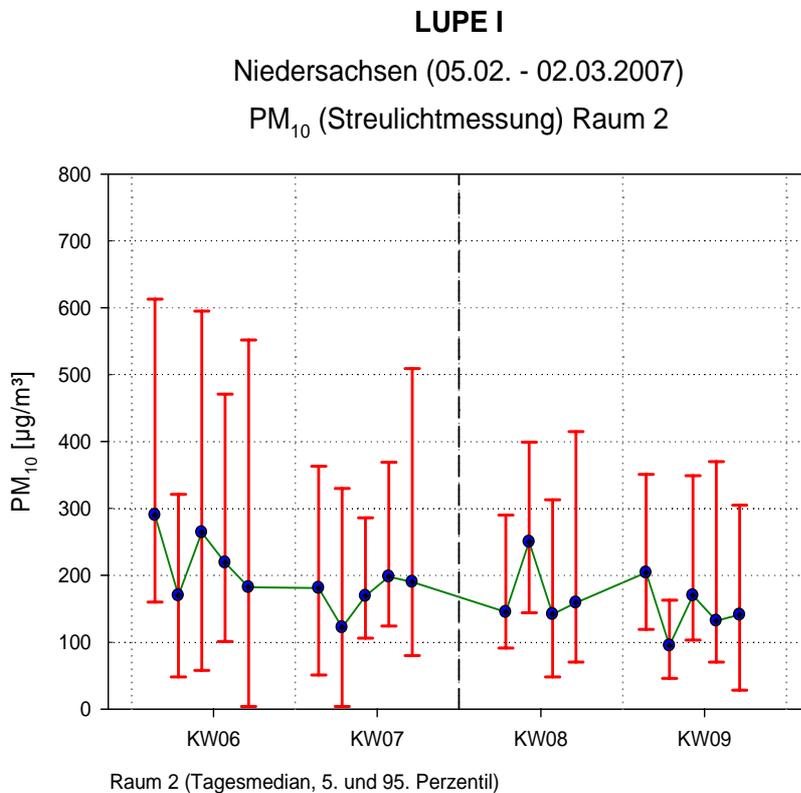
**Abbildung 67:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)



**Abbildung 68:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)



**Abbildung 69:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)



**Abbildung 70:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)

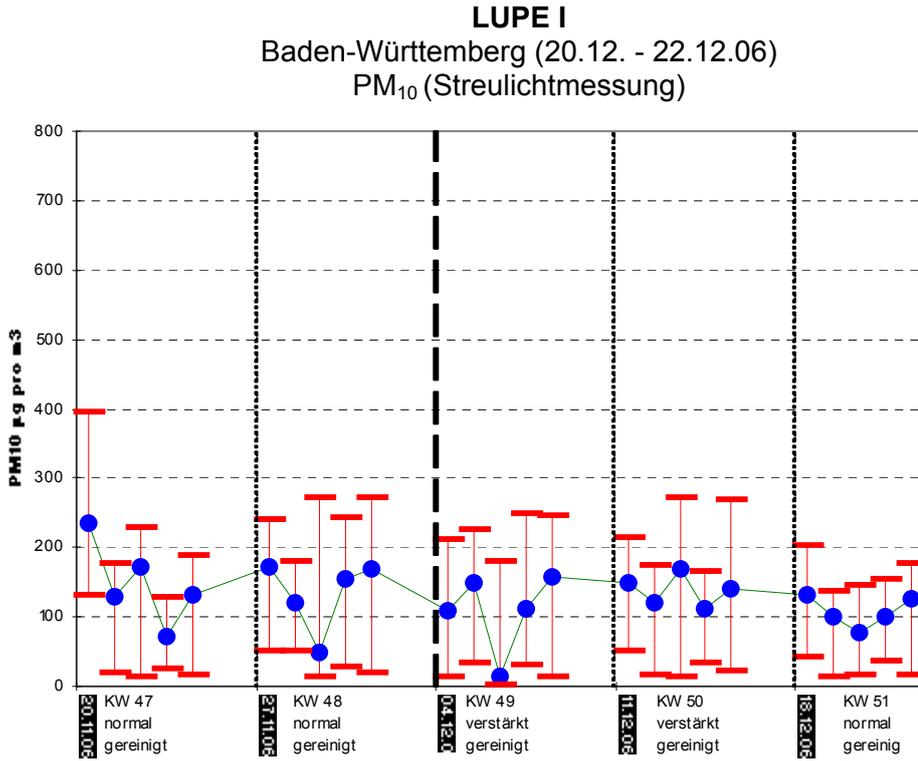


Abbildung 1: PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)

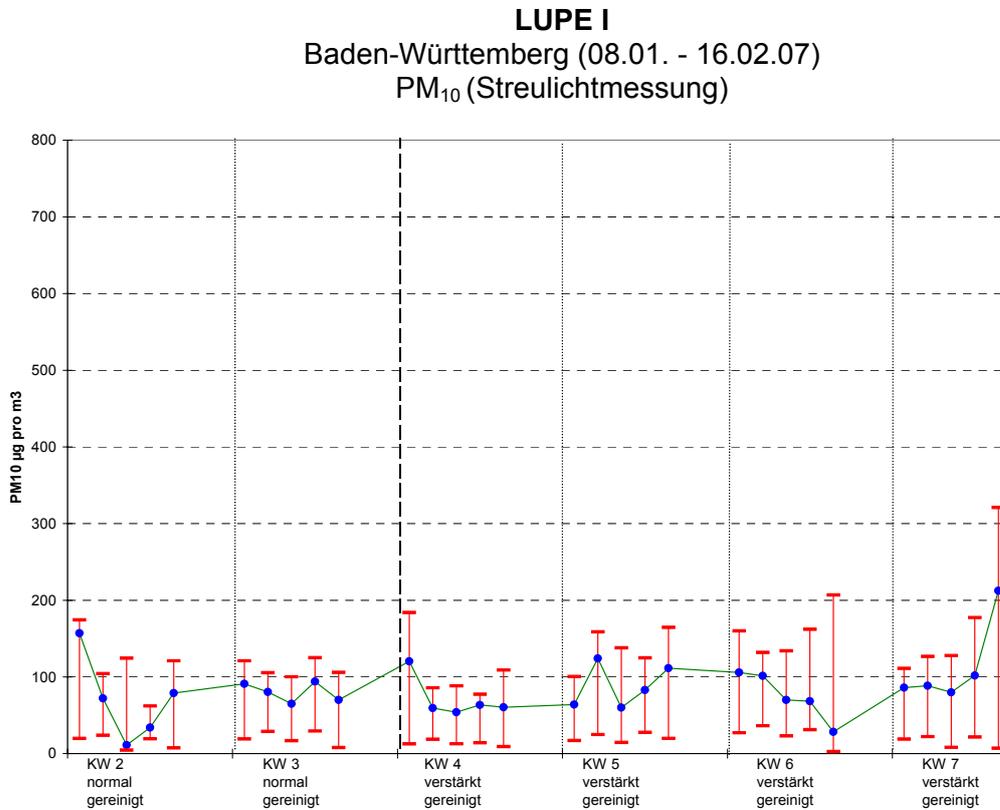
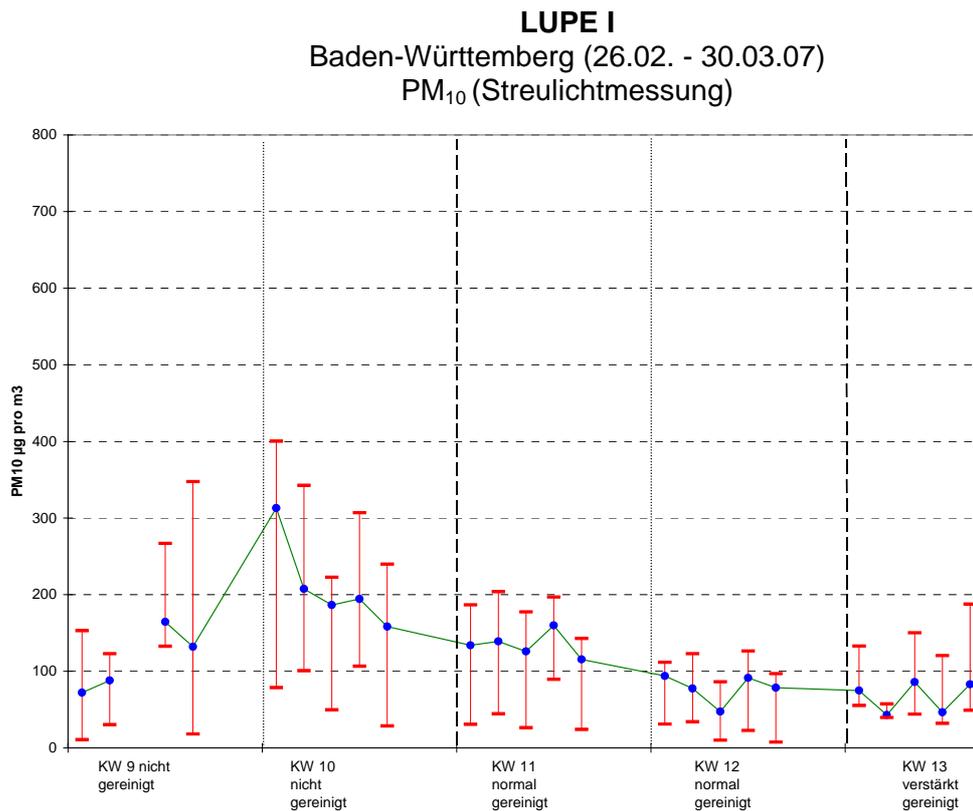
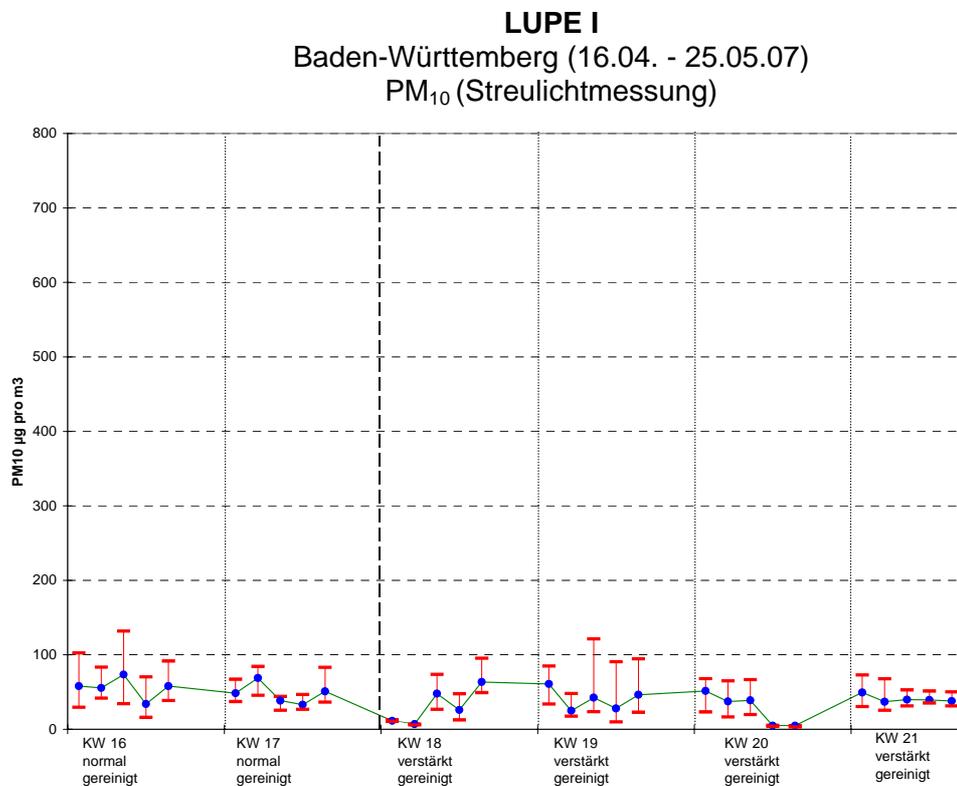


Abbildung 2: PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)

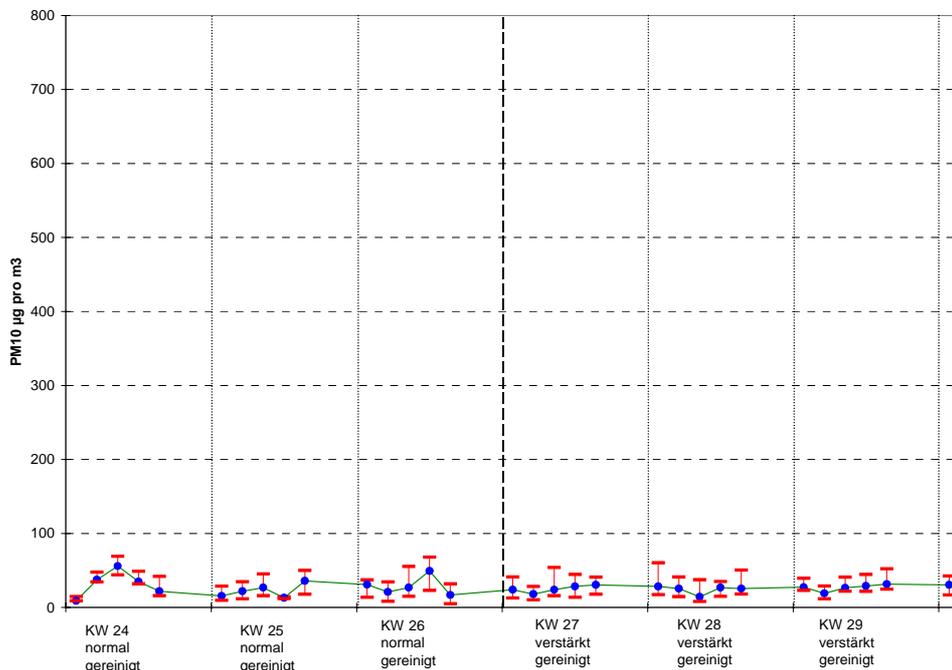


**Abbildung 73:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)



**Abbildung 74:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)

**LUPE I**  
Baden-Württemberg (11.06. - 23.07.07)  
PM<sub>10</sub> (Streulichtmessung)



**Abbildung 75:** PM<sub>10</sub>-Konzentration (Tagesmedian, 5. und 95. Perzentil)

Messungen unter sommerlichen Bedingungen, ausgehend vom gleichen Ist-Zustand und unter intensivierten Reinigungsbedingungen (tägliche Nassreinigung) wurden durchgeführt.

Die umfangreichen Auswertungen sind noch in Arbeit. Erste Teilergebnisse bestätigen die für die warme Jahreszeit (Sommer) erwartete niedrigere Feinstaubbelastung.

Der wesentliche Beitrag zu dieser im Sommer deutlich geringeren Belastungssituation wird durch die verbesserte Lüftung geleistet.

Eine Überprüfung des Reinigungseffektes mit anderen noch näher zu bestimmenden Reinigungsmethoden (z.B. Reinigung mit Staubsauger (Abluft HEPA-Filter)) ist notwendig.

Andere Fachinformationen zur Umweltmedizin

## **Gesundheit und Umwelt – Materialien zur Umweltmedizin**

Erstmals im Jahr 2001 hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz eine Reihe „Gesundheit und Umwelt - Materialien zur Umweltmedizin“ herausgegeben. Diese Reihe wird, beginnend mit dem Band 9, durch das Sachgebiet Umweltmedizin des Bayerischen Landesamtes für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) fortgeführt.

Die Materialien zur Umweltmedizin dienen der allgemeinen Information und im Besonderen der Fachinformation der bayerischen Gesundheitsbehörden zu Themen aus den Bereichen Umweltmedizin, Umwelthygiene, Umwelttoxikologie und Umweltepidemiologie.

### **Bisher sind in dieser Schriftenreihe folgende Bände erschienen:**

- Band 1 Mobilfunk: Ein Gesundheitsrisiko? (2001)
- Band 2 PCB – Polychlorierte Biphenyle (2001)
- Band 3 Fortbildung Umweltmedizin (Material der Fortbildung der Bayerischen Akademie für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin am 20./21.11.2001)
- Band 4 Untersuchung und Bewertung der PCB-Belastung von Schülern und Lehrern in der Georg-Ledebour-Schule, Nürnberg (2002)
- Band 5 Aufgaben bei der Altlastenbehandlung (Material der Fortbildung der Akademien für Gesundheit, Ernährung und Verbraucherschutz am 19./21.11.2002)
- Band 6 Schutz vor der Entstehung allergischer Krankheiten: Protektive Faktoren des bäuerlichen Lebens (2003)
- Band 7 Umwelt und Gesundheit im Kindesalter. Ergebnisse einer Zusatzerhebung im Rahmen der Schuleingangsuntersuchung 2001/2002 in 6 Gesundheitsämtern (2004)
- Band 8 Projektbericht Schuleingangsuntersuchungen 2003: Umwelt und Gesundheit (2004)
- Band 9 Grundlagen und Bewertungen im Rahmen des Human-Biomonitorings (2005)
- Band 10 Longitudinale Kohortenstudie zur Erfassung akuter pulmonaler, kardialer und hämatologischer/hämostaseologischer Wirkungen von Feinstaub unter realen Umweltbedingungen (CorPuScula) (2005)
- Band 11 Umweltmedizinische Bedeutung von Dieselruß / Feinstaub (2005)
- Band 12 Kind und Umwelt - Teilprojekt Umweltperzeption und reale Risiken (2005)
- Band 13 Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 1 (2005)
- Band 14 Literaturstudie zu Acrylamid und aromatischen Aminen (2006)
- Band 15 Aktuelle umweltmedizinische Probleme in Innenräumen, Teil 2 (2007)
- Band 16 Umweltmedizinische Bedeutung perfluorierter Kohlenwasserstoffe (PFC) (2006)

sowie der vorliegende

- Band 17 Verhalten, Vorkommen und gesundheitliche Aspekte von Feinstäuben in Innenräumen (2007)



91058 **Erlangen**  
Eggenreuther Weg 43  
Telefon: 09131 764-0



85764 **Oberschleißheim**  
Veterinärstraße 2  
Telefon: 089 31560-0



97082 **Würzburg**  
Luitpoldstraße 1  
Telefon: 0931 41993-0



80538 **München**  
Pfarrstraße 3  
Telefon: 089 2184-0

[www.lgl.bayern.de](http://www.lgl.bayern.de)

**Bayerisches Landesamt für  
Gesundheit und Lebensmittelsicherheit**  
Eggenreuther Weg 43, 91058 Erlangen

Telefon: 09131 764-0  
Telefax: 09131 764-102

E-Mail: [poststelle@lgl.bayern.de](mailto:poststelle@lgl.bayern.de)  
Internet: [www.lgl.bayern.de](http://www.lgl.bayern.de)

Druck: StMUGV, München

ISSN 1862-8052

ISSN 1862-9601

ISBN 978-3-939652-45-8

ISBN 978-3-939652-46-5

(Print Ausgabe)

(Online Ausgabe)

(Print Version)

(Online Version)