

# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

Innenraumlufqualität in Berliner Schulen

## Schwerpunktprogramm

Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin  
Untersuchung der Innenraumlufqualität in Berliner Schulen



Untersuchung der Innenraumluf in Klassen-  
räumen von insgesamt 40 Schulen und fünf  
Turnhallen im Berliner Stadtgebiet  
(2002 / 2003)

### Durchgeführte Untersuchungen:

- Kohlendioxid
- „Feinstaub“ (alveolengängig und PM<sub>10</sub>)
- Flüchtige organische Verbindungen (VOC)
- Formaldehyd
- Polycyclische aromatische KW (PAK)
- Dieselruß (elementarer Kohlenstoff)
- Benzol
- Kohlenmonoxid
- Temperatur
- Relative Luftfeuchte



### Ergebnisse:

- Bezogen auf die organischen Schadstoffe aus dem Bereich der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH), der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC / TVOC), der Carbonyle (Formaldehyd, Aceton etc.) sowie des Dieselrußes (EC) zeigten die Ergebnisse abgesehen von einigen Ausnahmen eine überwiegend befriedigende Qualität der Innenraumluf.
- Hinsichtlich der Konzentrationen des klassischen Leitparameters für die Luftqualität in Innenräumen, dem **Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**, und der Gehalte des **alveolengängigen Feinstaubes** in der Luft der untersuchten Schulräume ergab sich in fast allen Fällen ein mangelhafter Zustand.

# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

## Innenraumlufthqualität in Berliner Schulen



### Problemfeld: Lüftung (Kohlendioxid , CO<sub>2</sub>) Teil I

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) entsteht als Produkt des Stoffwechsels von Menschen, Tieren und aus Umsetzungen mineralischen und aquatischen Ursprunges und ist ein normaler Bestandteil atmosphärischer Luft. Durch die Verbrennung kohlenstoffhaltiger Stoffe werden darüber hinaus Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre eingebracht, die mitverantwortlich für klimatische Veränderungen („Treibhauseffekt“) gemacht werden. Die Kohlendioxidkonzentration in Außenluft beträgt ca. 0,03 bis 0,04 Vol.-%. (300 – 400 ppm).

Die Bedeutung von CO<sub>2</sub> als eine Leitsubstanz für menschliche Ausdünstungen (Stoffwechselprodukte, Gerüche) in Innenräumen wurde schon Mitte des 19. Jahrhunderts von Pettenkofer erkannt, verbunden mit der Empfehlung, einen Wert von 0,1 Vol.-% (Pettenkoferzahl) aus Gründen der Hygiene nicht zu überschreiten. Diese Empfehlung wird auch heute noch als Richtwert verwendet.

Eine etwas höhere Toleranz beinhaltet die DIN 1946 Teil 2 (VDI-Lüftungsregeln, Raumlufttechnik-gesundheitstechnische Anforderungen) für Räume mit raumlufthtechnischen Anlagen nach der 0,15 Vol.-% nicht überschritten werden sollen.

Der Bereich zwischen diesen Werten wird meist als Interpretationsbereich angesehen.

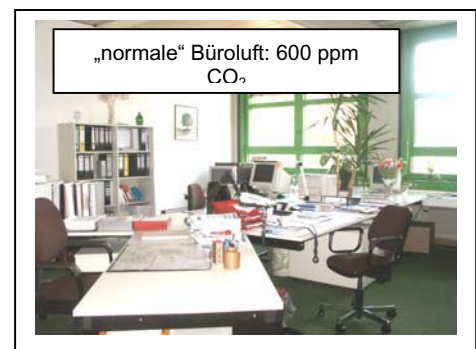
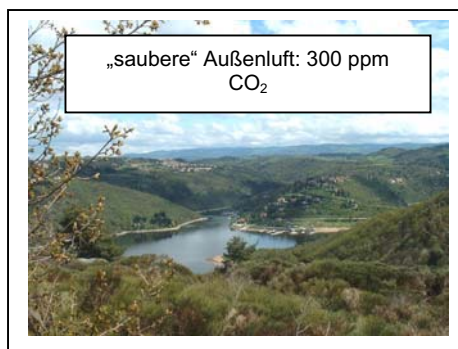
Ein aktueller Entwurf zur Novellierung der Arbeitsstättenrichtlinie sieht hinsichtlich der Lüftung einen Handlungswert von gerundet 0,14 Vol.-% vor, ab dem sofort Maßnahmen zur Reduzierung durchgeführt werden müssen.

Mittlere Konzentrationen z.B. in Büroräumen liegen im Bereich von 0,06 (ProKlima-Studie) bis 0,08 Vol.-% (BIA).

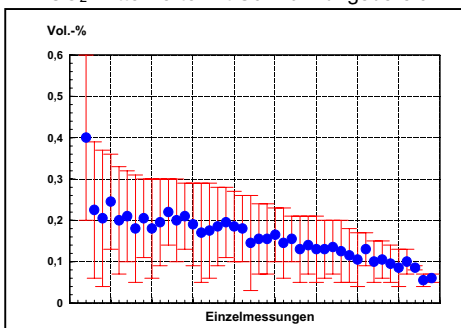
Ab 0,07 bis 0,08 Vol.-% CO<sub>2</sub> können bereits Klagen über eine unzureichende Raumlufthqualität auftreten.

Der „Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden“ der Innenraumlufthygiene - Kommission des Umweltbundesamtes (Berlin, Juni 2000) bezieht sich auf die o.g. DIN 1946 mit dem hygienischen Richtwert von 0,15 Vol.-% CO<sub>2</sub>. Bei höheren Konzentrationen ist mit Müdigkeit, Konzentrationsschwäche etc. sowie einer Belästigung durch Körpergerüche zu rechnen.

Bei 0,15 Vol.-% CO<sub>2</sub> geben bereits ca. 35 % der Raumnutzer Unzufriedenheiten mit der Luftqualität an.



CO<sub>2</sub>-Mittelwerte mit Schwankungsbereich



Gesamtmittelwert und Richtwerte

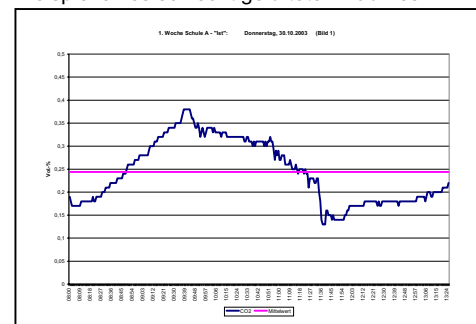
#### CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenräumen:

€ Mittelwert	1600 ppm
€ Minimum	300 ppm
€ Maximum	11000 ppm

#### Richtwerte:

€ Pettenkoferzahl	1000 ppm
€ DIN 1946 Teil 2	1500 ppm
€ Arbeitsstättenrichtlinie (Entwurf)	1400 ppm

Beispiel eines schlecht gelüfteten Raumes



Die Messwerte für den Lüftungsparameter CO<sub>2</sub> (gemittelte Werte über einen Unterrichtstag) lagen in einem Bereich von 0,05 bis 0,42 Vol.-%, wobei sich ein Median von 0,16 Vol.-% ergab. Dabei wurde die sog. „Pettenkoferzahl“ von 0,1 Vol.-% CO<sub>2</sub> in ca. 90 % der Klassenräume überschritten.

# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

## Innenraumluftqualität in Berliner Schulen

### Problemfeld: Lüftung (Kohlendioxid , CO<sub>2</sub>) Teil II

Dieser unbefriedigende schlechte Lüftungszustand wurde unter variierten Bedingungen in 2 Schulklassen bestätigt und die Auswirkungen von Maßnahmen erforscht, um Hinweise für sinnvolle und machbare Maßnahmen zur Verbesserung zu erhalten.

Es wurde sowohl unter verschiedenen Lüftungs- als auch Reinigungsbedingungen jeweils an 4 Tagen über den gesamten Anwesenheitsbereich eines Unterrichtstages gemessen:

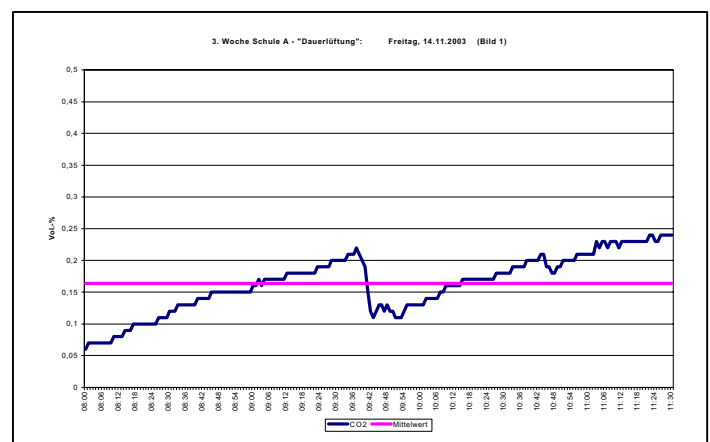
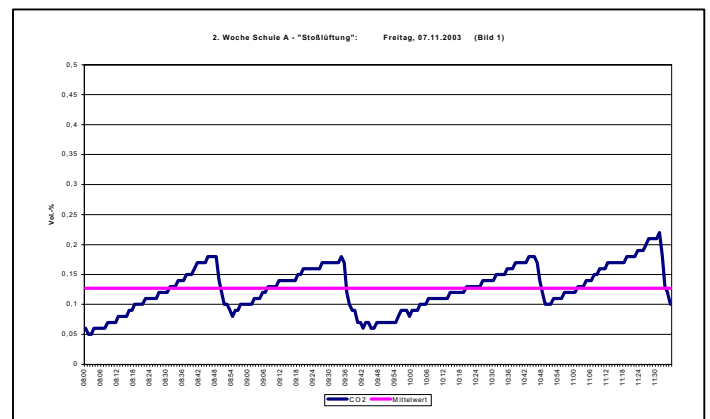
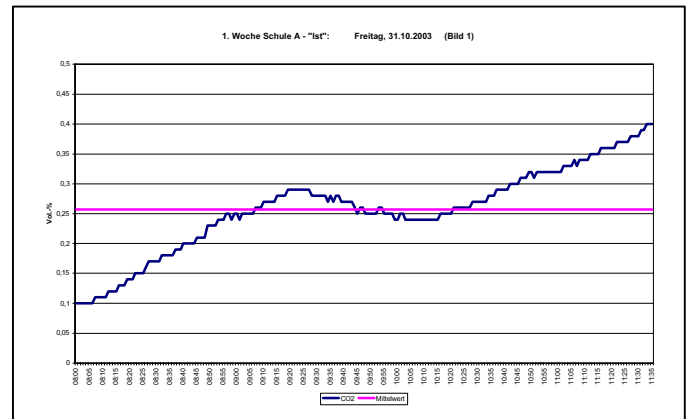
- Übliches normales Lüftungsverhalten
- Stoßlüftung (Öffnung von Fensterflügeln, Tür)
- Dauerlüftung (Öffnung von Kippfenstern)
- Übliche normale Reinigung
- Reinigung nach DIN 77400 (2 x wöchentlich)
- Reinigung täglich feucht

Die 3 typischen und beispielhaft gewählten Abbildungen stellen normale Bedingungen (19 Kinder, 11 m<sup>2</sup>Kind, 4 h Unterricht, jeweils der gleiche Wochentag) dar und veranschaulichen folgendes:

- Normales übliches Lüftungsverhalten resultiert im bekannten unbefriedigenden Zustand, d.h. die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt im Lauf des Tages bis zu 0,4 % bei einem durchschnittlichen Gehalt von 0,25 %, der Pettenkoferwert ist während des gesamten Unterrichts überschritten, der Richtwert nach DIN (0,15 %) ist zu ca. 90 % überschritten.
- Stoßlüftung vor und nach dem Unterricht sowie in den Pausen bewirkt eine starke Erniedrigung der Kohlendioxidkonzentration hin zu einem durchschnittlichen Wert von 0,13 %. Der Richtwert nach Pettenkofer wird immer noch zu 2/3 der Unterrichtszeit überschritten, und auch der Richtwert nach DIN noch zu ca. einem Drittel .
- Dauerlüftung mit 1 – 3 Kippfenstern führt nur bei längerer Türöffnung zur großen Pause zu einer deutlichen Reduzierung, der Durchschnittswert liegt bei 0,16 %, also über dem DIN-Wert. Der Pettenkoferwert ist zu ca. 90 % über dem DIN-Wert. Der DIN-Wert noch während nahezu 2/3 der Unterrichtszeit.

#### Fazit:

Nur mit konsequenter mehrfacher Stoßlüftung vor und nach dem Unterricht sowie während der Pausen konnte hier der Kohlendioxidgehalt auf einem erträglichen Niveau gehalten werden.



# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

## Innenraumlufthqualität in Berliner Schulen

### Problemfeld: „Feinstaub“ – PM<sub>10</sub>

Die in der Luft enthaltenen Schwebstoffe können in Abhängigkeit von der Luftbewegung, der Einatemgeschwindigkeit, von Nasen- oder Mundatmung und insbesondere in Abhängigkeit von den Partikeleigenschaften über die Atemwege in den menschlichen Körper gelangen. Am Ort ihrer Ablagerung können sie aufgrund chemisch-physikalischer Eigenschaften schädliche Auswirkungen haben.

In Zusammenhang mit einem Anstieg der Schwebstaubbelastung einatembarer Partikel, die über den Kehlkopf hinaus vordringen (die thorakale Partikelfraktion entspricht der Partikelgrößenkonvention PM<sub>10</sub>) wurden in einer quantitativen Risikoabschätzung [Künzli et al. 2001] Auswirkungen insbesondere hinsichtlich Bronchitis und Asthmaanfällen ermittelt.

Aufgrund welcher Wirkungsmechanismen ein schädigender Effekt durch feine Partikel hervorgerufen wird, ist Gegenstand aktueller toxikologischer Diskussion. Unabhängig von der exakten Kenntnis der genauen Wirkungsweise fand in den letzten Jahren das gesundheitsschädigende Potential in verstärktem Maße Anerkennung. So läßt sich in epidemiologischen Untersuchungen klar feststellen, daß die Schwebstaubkonzentration in der Umgebungsluft (PM<sub>10</sub> oder PM<sub>2,5</sub>) mit Gesundheitseffekten assoziiert ist [Peters, Heinrich, Wichmann, 2002].

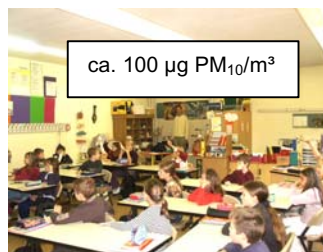
„Langzeit-Exposition gegenüber PM (particulate matter) über Jahre oder Jahrzehnte ist mit ernstesten gesundheitlichen Auswirkungen assoziiert. In Hinblick auf die Sterblichkeit gilt dies für die Gesamtmortalität, die kardiopulmonale und die Lungenkrebsmortalität ebenso wie für die Kindersterblichkeit, woraus sich eine relevante Verkürzung der Lebenserwartung ergibt. Auswirkungen von PM auf die Morbidität wurden für Atemwegssymptome, das Lungenwachstum und die Funktion des Immunsystems gefunden.“

Hinsichtlich von Kurzeffekten haben zahlreiche Studien „signifikante Assoziationen zwischen PM-Exposition und Mortalität und Morbidität gezeigt. Kardiovaskuläre und respiratorische Erkrankungen sind dabei am wichtigsten. Schon eine kleine Reduktion der PM- assoziierten respiratorischen und kardiovaskulären Erkrankungen würde eine große Zahl von Fällen vermeiden.“

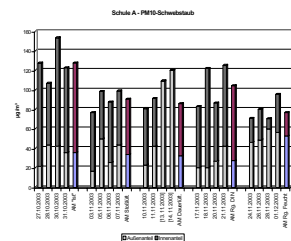
[KRdL im VDI/DIN, AG „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“, Kappos et al. 2003]



Außenluft (Stadtgebiet)



übliche Innenraumlufthqualität in Klassenräumen



beispielhafte Staubbelastung in einer Schule

**„Schwebstaub (PM 2.5 und PM 10) ist ein wesentlicher Risikofaktor und eine weitergehende Reduktion der Exposition ist somit geboten.“ (WHO)**

In Anbetracht der Aufenthaltsdauer in Innenräumen und der sensiblen Personengruppe Kinder wird die besondere gesundheitliche Bedeutung des Schwebstaubes in der Luft von Innenräumen allgemein und speziell in Kindertagesstätten und Schulen besonders deutlich.

#### Grenzwerte für Außenluft: PM<sub>10</sub>-Staub

24 Stundenmittelwert: 50 µg/m<sup>3</sup> (mit maximal 35 Überschreitungen / Jahr)  
Jahresmittelwert: 40 µg/m<sup>3</sup>  
Bundesimmissionsschutzverordnung (22.BimSchV, 01.01.2005)

#### Grenzwerte für Innenraumlufthqualität:

keine !

Die „Feinstaub“-konzentrationen in Klassenräumen würden in der Außenluft Maßnahmen erforderlich machen ! (Luftreinhalteplan)

**Verkehrsverbote für Klassenräume ???      Verbesserung der Reinigung ???**

Der Begriff „Feinstaub“ ist keiner definierten Staubfraktion oder Partikelgröße zugeordnet und sollte daher nicht oder nur mit entsprechendem Zusatz verwendet werden. Da im Rahmen der Ableitung der neuen EU-Grenzwerte für die Außenluft die PM<sub>10</sub>-Fraktion als geeignete Messgröße angesehen wurde, wird in Europa der Begriff Feinstaub häufig im Sinne von PM<sub>10</sub> (thorakale Partikel, die über den Kehlkopf hinaus vordringen) verwendet.

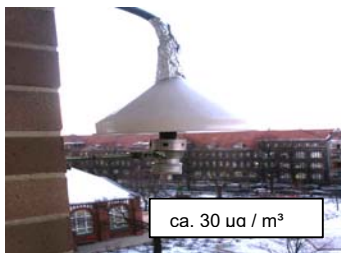
# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

## Innenraumlufqualität in Berliner Schulen

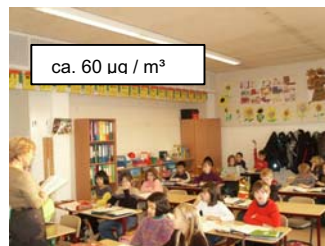
### Problemfeld: alveolengängiger „Feinstaub“

Die in der Luft enthaltenen Schwebstoffe können in Abhängigkeit von der Luftbewegung, der Einatemgeschwindigkeit, von Nasen- oder Mundatmung und insbesondere in Abhängigkeit von den Partikeleigenschaften über die Atemwege in den menschlichen Körper gelangen. Am Ort ihrer Ablagerung können sie aufgrund chemisch-physikalischer Eigenschaften schädliche Auswirkungen haben.

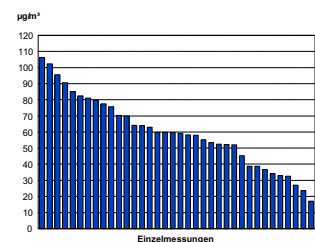
**Von besonderer gesundheitlicher Relevanz sind dabei die Partikel, die aufgrund ihrer Eigenschaften bis in den alveolären Bereich der Atemwege vordringen und dort wirken können. Der Massenanteil dieser eingeatmeten Partikel wird daher als alveolengängige Fraktion bezeichnet.**



Außenluft vor dem Klassenraum



übliche Belastung in Klassenräumen



Einzelmessergebnisse in Schulen

#### Übliche Konzentrationen von alveolengängigem „Feinstaub“ (ca.):

Außenluft vor Wohnungen (Straßenseite):	30 µg/m <sup>3</sup>
Innenraumluf (Wohnungen, Nichtraucher):	30 µg/m <sup>3</sup>
<b>Innenraumluf (Wohnungen, Raucher):</b>	<b>60 µg/m<sup>3</sup></b>
<b>Klassenräume:</b>	<b>60 µg/m<sup>3</sup></b>

Im Bereich des Arbeitsschutzes wurde in der Vergangenheit der Begriff „Feinstaub“ für die alveolengängige Fraktion des einatembaren Staubes verwendet (heute: A-Staub oder alveolengängige Fraktion).

Die Probenahme dieses Staubkollektives folgt in Deutschland bis heute überwiegend der Johannesburger Konvention von 1959. Es wurde eine Kurve definiert, die durch folgende Punkte läuft:

D (µm)	0	1	2	3	4	5	6	7,07
%	100	98	92	82	68	50	28	0

Dabei werden 50 % der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 5,0 µm erfasst. Die Erfassungskurve dieser Konvention geht für eine Partikelgröße von 7,1 µm zurück auf 0% („cut-off – point“).

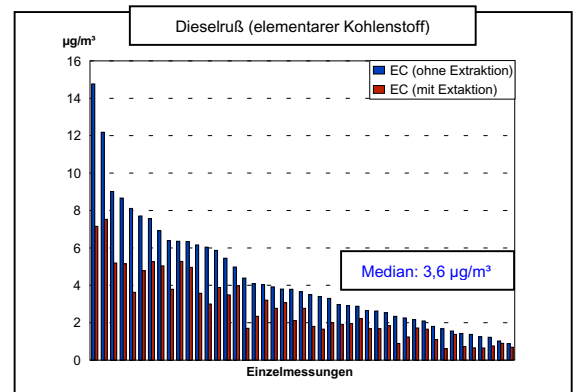
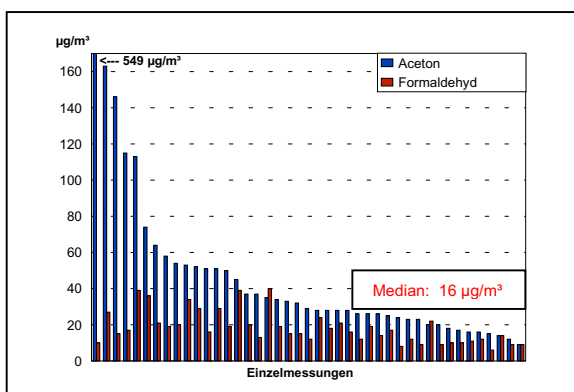
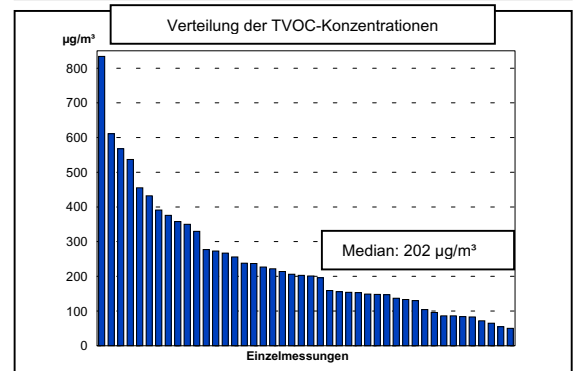
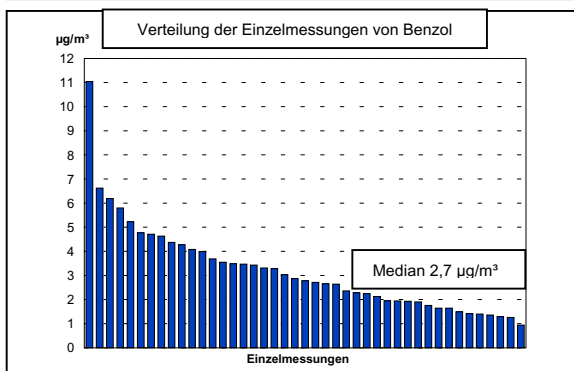
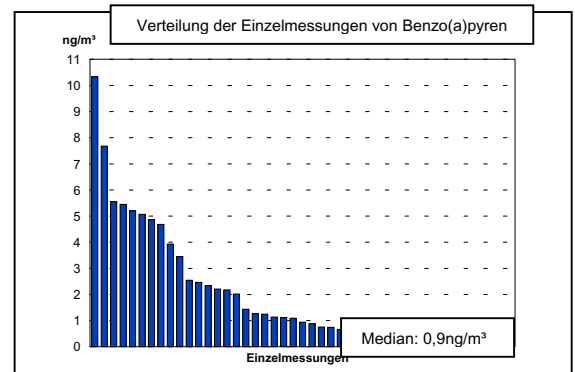
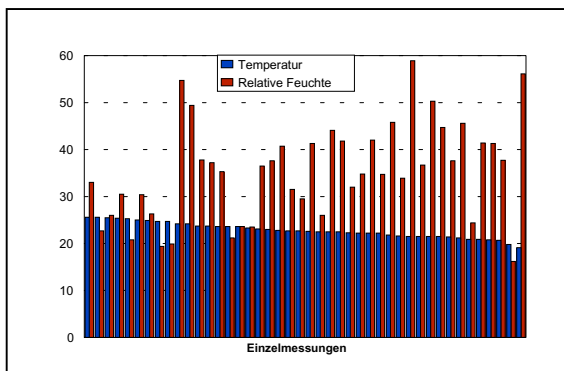
In der DIN EN 481 wurde für die Luft an Arbeitsplätzen die Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel im Rahmen der europäischen Harmonisierung neu festgelegt. Die hier enthaltene Konvention für alveolengängige Partikel unterscheidet sich in Ihrem Kurvenverlauf zwar etwas, jedoch liegen die Abweichungen unter Praxisbedingung im Rahmen von ca. 20 %, so dass bislang Übereinstimmung besteht, dass auch weiterhin mit Probenahmeverrichtungen gemäß Johannesburger Konvention die Bestimmung der alveolengängigen Fraktion durchgeführt werden kann.

# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

## Innenraumlufqualität in Berliner Schulen

### Ergebnisse ausgewählter Parameter

- € Flüchtige organische Verbindungen (VOC)
- € Formaldehyd
- € Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- € Dieselruß (elementarer Kohlenstoff)
- € Benzol
- € Kohlenmonoxid
- € Temperatur
- € Relative Luftfeuchte



Bezogen auf die organischen Schadstoffe aus dem Bereich der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH), der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC / TVOC), der Carbonyle (Formaldehyd, Aceton etc.) sowie des Dieselrußes (EC) zeigten die Ergebnisse abgesehen von einigen Ausnahmen eine überwiegend befriedigende Qualität der Innenraumluft.

# „Dicke Luft im Klassenzimmer ?“

## Innenraumluftqualität in Berliner Schulen

### Schwebstaub – Partikel – Problem von Morgen ?

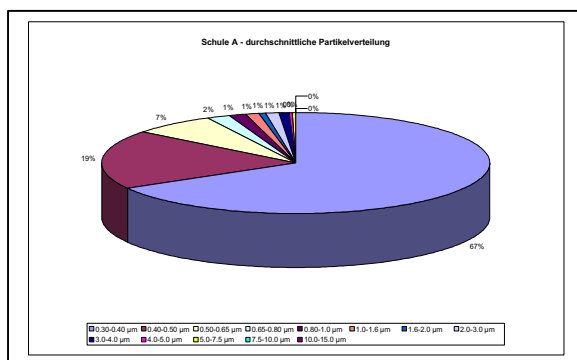
Neue Erkenntnisse der Epidemiologie über die Wirkung von Feinstaub und die Bedeutung von Nanopartikeln weisen darauf hin, daß feine und ultrafeine Partikel als Schadstoffe aufzufassen sind [UBA 2000].

In Schulklassen lag die mittlere Belastung mit Partikeln von 0,3 bis 20 µm in der Größenordnung von 150.000 bis 200.000 Partikeln pro Liter Atemluft !

Es wurden jedoch auch Tagesmittelwerte in der Größenordnung von 1.000.000 Partikeln pro liter gemessen.

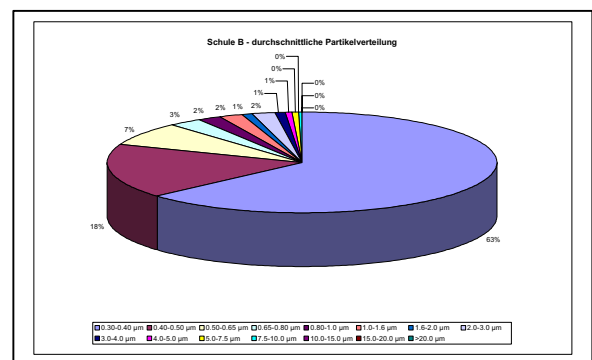
#### Durchschnittliche Partikelverteilung in einem Klassenraum (A)

Partikelzahlen (0,3 – 20µm) :  
Tagesmittelwerte: ca. 40.000 - 450.000 / liter  
96 % aller Partikel werden von den „feinen“ Partikeln zwischen 0,3 und 1,0 µm gestellt.



#### Durchschnittliche Partikelverteilung in einem Klassenraum (B)

Partikelzahlen (0,3 – 20µm) :  
Tagesmittelwerte: ca. 20.000 – 1.200.000 / liter  
93 % aller Partikel werden von den „feinen“ Partikeln zwischen 0,3 und 1,0 µm gestellt.



Feine Partikel mit einem Durchmesser unter 2,5 µm und ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser unter 0,1 µm entstammen vorwiegend Verbrennungsprozessen. Umweltepidemiologische Studien zeigen einen Anstieg von Morbidität und Mortalität hinsichtlich von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Es konnten bisher keine Anhaltspunkte für eine Risikoschwelle gefunden werden. Negative Auswirkungen auf die Gesundheit wurden auch unterhalb der geltenden Grenzwerte festgestellt. Tierexperimentelle Daten weisen darauf hin, dass feine und ultrafeine Partikel Entzündungen auszulösen und bei Tieren mit Vorschädigungen der Lunge zum Tode zu führen können. Welche pathophysiologischen Mechanismen für diese Wirkungen verantwortlich sind, ist zur Zeit noch ungeklärt.

Daneben gibt es eine Vielzahl toxischer, kanzerogener und mutagener Wirkungen durch die chemische Zusammensetzung und die an den Partikeln absorbierten Substanzen.

Für die gesundheitlichen Auswirkungen der Partikel sind sowohl die Größe, die Form als auch ihre chemischen Komponenten von Bedeutung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ultrafeine Partikel zwar eine kleine Masse haben, jedoch in großer Anzahl vorliegen. Bei nur auf die Partikelmasse bezogenen Regelungen werden somit die feinen und ultrafeinen Partikel bisher nicht angemessen in die Bewertungen einbezogen.

Die Verweildauer von Partikeln im alveolaren Bereich kann gegenüber Partikeln, die in den extrathorakalen Atemwegen, der Trachea und den Bronchien durch den Mucus gebunden werden, deutlich länger sein und sogar die Dimension von Jahren annehmen. Ob die üblichen Außenluftkonzentrationen ultrafeiner Partikel entscheidend zu den gesundheitlichen Wirkungen von Schwebstaub beitragen, kann aufgrund der gegenwärtigen toxikologisch-empirischen Erkenntnisse jedoch noch nicht eindeutig beantwortet werden.

Um Grenzwerte für feine und ultrafeine Partikel in Form einer Begrenzung der Anzahlkonzentration festzulegen, ist die Datenlage zur Zeit noch nicht ausreichend. Die Arbeitsgruppe „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“ der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN empfiehlt deshalb „gezielt Untersuchungen zu fördern, die eine bessere Einschätzung der Expositionssituation und der gesundheitlichen Bedeutung ultrafeiner Partikel ermöglichen.“