



**FrISChe Luft an bayerischen Schulen**  
**Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität**

**Vorläufige Zusammenfassung**

Bearbeiter:

Fromme, H., Dietrich, S., Kiranoglu, M., Twardella, D.  
Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit  
Sachgebiet Umweltmedizin  
Veterinärstrasse 2, D-85764 Oberschleißheim

Schierl, R., Nowak, D.  
Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Heitmann, D., Körner, W.  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Stand September 2006

## Untersuchungsmethodik

Die Untersuchungen zur Luftqualität in bayerischen Schulen wurden in zwei Teiluntersuchungen durchgeführt. Die erste Messperiode (Wintermessung) erfolgte vom 2.12.2004 bis zum 16.3.2005 und die zweite Messperiode (Sommermessung) vom 2.5.2005 bis zum 28.7.2005. In die Sommer- und Wintermessungen sollten jeweils möglichst die gleichen Räume einbezogen werden. Im Winter konnte die Probenahme in 92 Schulklassenräumen von 46 Schulen und im Sommer in 76 Klassenräumen von 38 Schulen durchgeführt werden. Bei den Schulen handelt es sich um Grundschulen und weiterführende Schulen in der Landeshauptstadt München und im Landkreis Dachau.

In jedem Klassenraum wurde einen Schultag lang (Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsende) gemessen. 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. Dieses Messprotokoll für Innenraumlufmessungen wurde von Studienmitarbeitern zu Beginn der einzelnen Messtermine 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.

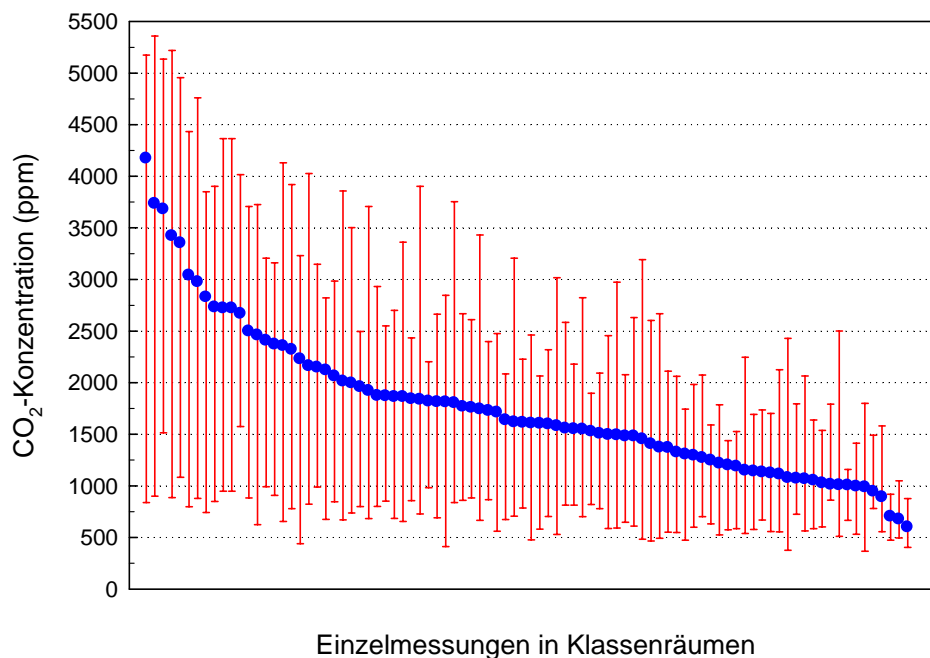
Im Zentrum der Studie stand die Bestimmung der Innenraumluftqualität auf der Basis des Indikatorparameters Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) (minütliche Messungen). Darüber hinaus wurden während der täglichen Unterrichtszeit in den Klassenräumen folgende weitere Parameter bestimmt:

- Temperatur und relative Feuchte (minütliche Messungen),
- flüchtige organische Verbindungen (VOC, volatile organic compounds),
- Carbonylverbindungen (Formaldehyd, Acetaldehyd, Aceton, Propionaldehyd, Crotonaldehyd, 2-Butanon, Butyraldehyd, Benzaldehyd, Hexaldehyd),
- gravimetrische Bestimmung der Partikelmasse (PM<sub>2,5</sub>),
- aerosolspektrometrische kontinuierliche Bestimmung der Partikelmasse (z.B. PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>4</sub>, PM<sub>10</sub>) (minütliche Messungen),
- Partikelanzahlkonzentration, Partikeloberflächenkonzentration und Partikelvolumenkonzentration (drei-minütliche Messungen),
- Katzenallergene (Fel d1) im sedimentierten Fußbodenstaub und
- Endotoxine (Lipopolysaccharide, LPS) im sedimentierten Fußbodenstaub.

## Innenraumluftqualität anhand des Indikators Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Zur hygienischen Beurteilung von Innenräumen wird oft die sogenannte „Pettenkoferzahl“ von 1.000 ppm herangezogen, die die Bestimmung eines lufthygienisch akzeptablen Bereiches erlaubt. Bei Überschreiten dieses Wertes ist eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens zu erwarten, die Leistungsfähigkeit der Raumnutzer lässt nach und unter Umständen kann eine zunehmende Müdigkeit festgestellt werden. Darüber hinaus soll nach der Lüftungsnorm DIN 1946 Teil 2 ein Wert von 1.500 ppm nicht überschritten werden, der zur Beurteilung einer Verschlechterung der Raumluft durch Geruchsstoffe und Ausdünstungen von Personen herangezogen werden kann.

Die medianen CO<sub>2</sub>-Innenraumluftgehalte der Klassenräume bewegten sich in einem Bereich von 598 bis 4172 ppm (Winter) bzw. von 480 bis 1875 ppm (Sommer) (siehe auch Abb. 1). Insgesamt ergab sich in der Sommermessperiode ein erheblich niedrigeres Belastungsniveau. Während in der Wintermessperiode die Tagesmediane in 92% der Klassenräume 1.000 ppm überschritten, waren es im Sommer lediglich 28%. Noch deutlicher ist die Reduktion bei den Werten über 1.500 ppm. Im Winter lagen noch 60% der Tagesmediane über diesem Wert, im Sommer aber nur noch 9%.



**Abb. 1:** Mediane Kohlendioxidgehalte (CO<sub>2</sub>), Minima und Maxima in den einzelnen Klassenräumen in der Wintermessperiode

Es zeigte sich, dass eine größere Zahl an Nutzern, eine kleinere Raumgröße und ein kleineres Raumvolumen mit der Verschlechterung der Luftqualität im Sinne eines Anstiegs des CO<sub>2</sub> einhergeht. In der Sommermessung sind diese Zusammenhänge allerdings nicht mehr als statistisch bedeutsam zu erkennen.

Im Vergleich zu Untersuchungsergebnissen von Gemeinschaftsräumen in Schulen und Kindergärten aus den Bundesländern Niedersachsen und Berlin ergibt sich eine vergleichbare Belastungssituation in bayerischen Schulen. Insgesamt deuten die vorliegenden CO<sub>2</sub>-Ergebnisse, insbesondere in der Winterzeit, auf eine häufig unbefriedigende Raumluftqualität hin, die aus lufthygienischer Sicht als nicht akzeptabel anzusehen ist.

### **Organische Verbindungen in der Innenraumluft**

Da derzeit noch nicht für alle Messungen in der Innenraumluft quantifizierte Ergebnisse vorliegen, kann nur eine vorläufige Einschätzung abgegeben werden. Die einzelnen gemessenen flüchtigen organischen Verbindungen können vereinfacht zu einem Summenparameter (TVOC, total volatile organic compounds) zusammengefasst werden, der eine erste orientierende Beurteilung der Belastungssituation erlaubt. Die bisher in 14 Klassenräumen im Sommer und im Winter gemessenen TVOC-Konzentrationen bewegten sich in einem Bereich von 160 bis 370 µg/m<sup>3</sup> bzw. von 110 bis 290 µg/m<sup>3</sup>. Diese Summengehalte deuten auf ein eher niedriges Belastungsniveau hin, das aus gesundheitlicher Sicht nicht zu beanstanden ist. Eine abschließende Bewertung der Messergebnisse der Einzelsubstanzen kann erst nach Ablauf der gesamten Auswertungen erfolgen.

### **Carbonylverbindungen in der Innenraumluft**

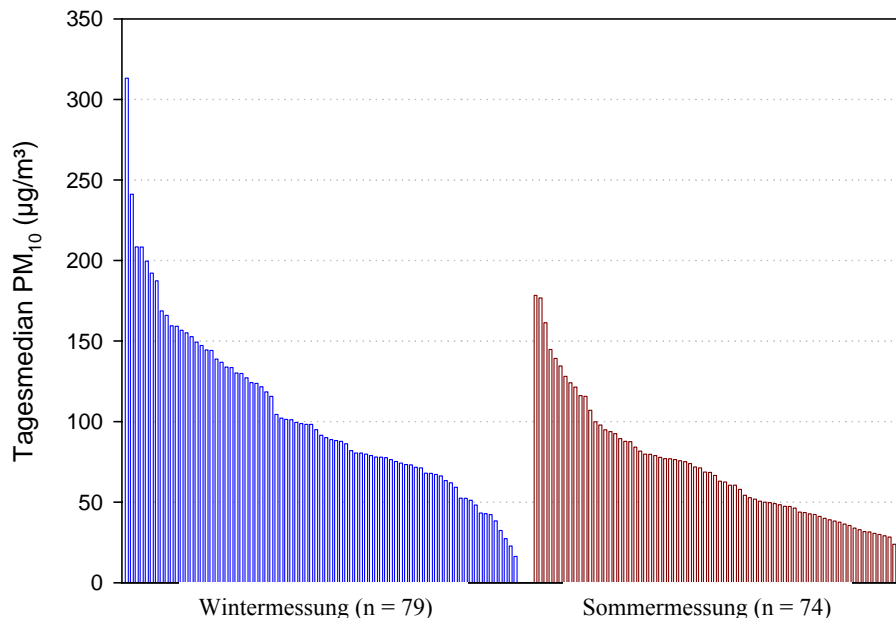
In beiden Messperioden wurden in der Innenraumluft im wesentlichen Aceton, Formaldehyd und Acetaldehyd gefunden. Die anderen bestimmten Verbindungen wurden nur in Einzelfällen gemessen und lagen sonst unter der Nachweisgrenze. Die Formaldehydkonzentrationen bewegten sich z.B. für die einzelnen Klassenräume zwischen 3,1 und 46,1 µg/m<sup>3</sup> (Winter) bzw. 4,6 und 72,4 µg/m<sup>3</sup> (Sommer) und lagen damit deutlich unter dem derzeitigen Richtwert des ehemaligen Bundesgesundheitsamtes von 120 µg/m<sup>3</sup>. Gesundheitlich sind die gefundenen Konzentrationen somit als unbedenklich einzuschätzen.

## Feinstaubgehalte

In der vorgelegten Untersuchung wurden erstmals für eine größere Anzahl von bayerischen Schulen Messergebnisse für verschiedene partikelbezogene Parameter in der Innenraumluft ermittelt. Dabei war von besonderer Bedeutung, die Exposition der Schüler während der Unterrichtszeit (ca. 5 Stunden pro Tag) abzubilden.

Die Feinstaubgehalte wurde mit zwei unabhängigen Messmethoden ermittelt. Mit dem gravimetrischen Messverfahren ergaben sich dabei in der Regel höhere Partikelmassenkonzentrationen als mit dem kontinuierlichen Messverfahren, auch wenn gleiche Probenahmezeiträume betrachtet wurden. Im direkten Vergleich ergab sich zwischen beiden Messverfahren jedoch eine hohe statistische Korrelation.

Die während eines Schultages bestimmten  $PM_{2,5}$ -Tagesmediane bewegten sich im Winter zwischen 2,5 und 79,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Median: 26,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und die  $PM_{10}$ -Konzentrationen im Bereich von 16,3 bis 313  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Median: 91,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Bei den Sommermessungen wurden hingegen für  $PM_{2,5}$  Tagesmediane zwischen 4,0 und 26,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Median: 13,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und für  $PM_{10}$  von 18,3 bis 178,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Median: 64,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) beobachtet. In der folgenden Abb. 2 sind die Tagesmediane in den einzelnen Klassenräumen für beide Messperioden dargestellt.



**Abb. 2:** Tagesmedianwerte der  $PM_{10}$ -Messungen in Klassenräumen in beiden Messperioden

Lediglich im Rahmen der Wintermessungen ließen sich positive Korrelationen zwischen den  $PM_{10}$ -Gehalten und der Anzahl der Nutzer im Raum bzw. negative Korrelationen zwischen  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Konzentrationen und der Raumgröße (Volumen, Fußbodenfläche, Volumen pro Raumnutzer) finden.

Keine Unterschiede wurden hingegen in beiden Messperioden zwischen den Feinstaubgehalten ( $PM_{2,5}$  und  $PM_{10}$ ) in der Luft von Klassenräumen mit einem glatten Bodenbelag (Linoleum oder Holz) und solchen mit Teppichböden beobachtet. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass lediglich 7 Schulräume mit Teppichböden in die Untersuchung einbezogen werden konnten.

Sowohl bei der Wintermessung als auch bei der Sommermessung lagen die  $PM_{2,5}$ - und  $PM_{10}$ -Konzentration in Grundschulen signifikant höher als in weiterführenden Schulen, der Zusammenhang ist im Sommer aber nicht so stark ausgeprägt.

Entsprechende Untersuchungen in Klassenräumen von Schulen in Berlin und Baden-Württemberg ergaben ein vergleichbares Belastungsniveau.

### **Partikelanzahlkonzentrationen**

In unserer Studie konnte in 36 Klassenräumen in der Sommerperiode die mediane Anzahlkonzentration an ultrafeinen Partikeln (aerodynamischer Durchmesser 10 bis 487 nm) bestimmt werden. Die Anzahlkonzentration reichte von 2.622 bis 12.145 Partikel/cm<sup>3</sup> und lag im Median bei 5.660 Partikel/cm<sup>3</sup>.

Messungen der Partikelanzahlkonzentrationen (unter Berücksichtigung der ultrafeinen Partikel) sind bisher nur in einer weiteren Studie in Schulen in Baden-Württemberg beschrieben. Die mediane Anzahlkonzentration lag in dieser Studie mit 10.200 (städtisch) bzw. 6.300 Partikel/cm<sup>3</sup> (ländlich) in einem vergleichbaren Bereich. Es wurden aber deutlich höhere Maximalwerte gemessen (75.500 Partikel/cm<sup>3</sup> (städtischer Bereich) bzw. 287.000 Partikel/cm<sup>3</sup> (ländliches Gebiet)).

### **Katzenallergene und Endotoxine**

Die Ergebnisse der Allergenbestimmungen in den sedimentierten Staubproben lagen im Winter zwischen 0,02 und 45,16 µg/g (Median: 0,48 µg/g) und im Sommer zwischen 0,04 und 7,47 µg/g (Median: 0,42 µg/g). Nur ein Wert überschritt den Schwellenwert von 8 µg/g, der international als eine Sensibilisierungsschwelle angenommen wird.

In einer Untersuchung zweier amerikanischer Schulen lagen die Medianwerte der Katzenallergene bei Wintermessungen mit 0,86 bzw. 1,10 µg/g ähnlich wie in unserer Studie. Auch in einem schwedischen Tageshort, der speziell für atopische Kinder ausgerichtet ist, war der Median mit 0,64 µg/g vergleichbar. In einer großen Studie in Deutschland, in der unter anderem die Katzenallergene in 777 Wohnungen bestimmt wurden, lagen der Median bei 0,26 µg/g, das 75. Perzentil bei 1,48 µg/g und das 90. Perzentil bei 49 µg/g.

Die Konzentration an Endotoxinen, die als Marker für die Belastung mit gramnegativen Bakterien gelten, lag in den untersuchten Schulräumen zwischen 6,6 und 154 EU/mg Staub (Winter) bzw. 9,7 und 219 EU/mg Staub (Sommer).

In der oben angesprochenen deutschen Studie in deutschen Wohnungen war die Spannweite der Endotoxingehalte mit 1,5 – 1476 EU/mg größer als in unserer Studie, aber der Median mit 27,8 EU/mg gut mit unseren Ergebnissen vergleichbar. So lagen in einer anderen Studie die Endotoxinkonzentrationen im Wohnbereich von Kindern, die auf Bauernhöfen lebten, mit 81,8 EU/mg fast doppelt so hoch, wie bei denjenigen, die im selben Dorf, aber nicht auf Bauernhöfen lebten (44,9 EU/mg).

## **Fazit**

In unserer Untersuchung wurde insbesondere in der Wintermessperiode häufig eine unbefriedigende Luftqualität in den Klassenräumen festgestellt. Unsere Ergebnisse, insbesondere zur partikulären Belastung in der Schulinnenraumluft, weisen auf zwei mögliche Erklärungen hierfür hin. Einmal ist aufgrund des unzureichenden Lüftungsverhaltens in den Schulen, belegt durch oft hohe CO<sub>2</sub> - Werte, eine Entfernung von (insbesondere größeren) Partikeln durch Transport von Innen nach Außen eingeschränkt. Darüber hinaus werden die Klassenräume heute seltener und in geringerem Umfang gereinigt (z.B. lediglich zweimaliges feuchtes Wischen des Bodenbelages pro Woche), so dass die sedimentierten Stäube nur noch begrenzt aus dem Innenraum entfernt werden. Aber auch andere Bereiche in Klassenräumen, z.B. die Oberflächen von Schränken, Regalen und Tischen stellen eine „Senke“ für Partikel dar und werden in der Regel noch deutlich schlechter gereinigt. Dies führt, kombiniert mit einer, bezogen auf die Raumgröße hohen Anzahl an Schülern, zu einer beständigen Aufwirbelung der Partikel von den Oberflächen des Raumes. Dazu kommt als Einflussfaktor die körperliche Aktivität der Schüler selbst. Dieser Einfluss wird auch bestätigt durch die höheren Gehalte während der Schulzeit im Vergleich zur schulfreien Zeit. Auch die höhere Belastungssituation in Klassenräumen mit jüngeren Schülern, die im Innenraum noch ein deutlich intensiveres Aktivitätsmuster als ältere zeigen, unterstreicht die Bedeutung der körperlichen Aktivität.

Im Gegensatz dazu ist die Anzahlkonzentration der besonders gesundheitskritischen feinen bzw. ultrafeinen Partikel in den Schulinnenräumen im Vergleich zu Wohnräumen aber auch der Außenluft eher niedrig und zeigt sich während der täglichen Unterrichtszeit auch wenig variabel.

Die Verbesserung der Raumluftqualität ist auf der Basis der erhobenen Ergebnisse erforderlich und erscheint auch mit vertretbarem Aufwand möglich. Im Vordergrund sollten hierbei Maßnahmen stehen, die zu einer Verbesserung der Lüftungssituation führen und die Reinigungsintensität und –qualität verbessern.

Mit Blick auf eine vertiefende Risikoabschätzung und ein konsequentes Risikomanagement stellen sich vor dem Hintergrund der Ergebnisse darüber hinaus folgende weitergehende (weitgehend offene) Fragen:

- Unterscheidet sich die chemische Zusammensetzung von Stäuben in Schulen im Vergleich zur Außenluft?
- Wie ausgeprägt ist das toxische Potential dieser Innenraumstäube, z.B. im Vergleich zu typischen Außenluftstäuben?
- Welche Quellen und Mechanismen sind für die Belastungssituation verantwortlich und wie kann die Exposition der Schüler minimiert werden?

Diesen Fragen wird derzeit in einem weiteren durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz geförderten Forschungsprojekt (PAMINA, Forschungsverbund zu Exposition und Wirkungen von Stäuben) nachgegangen. Eine Projektbeschreibung ist auf den Internetseiten des LGL (Gesundheit/Umweltmedizin/laufende Projekte-Schwerpunkte) zu finden.