

**Bayerisches Landesamt für
Gesundheit und Lebensmittelsicherheit**



Landeslabor Berlin-Brandenburg



Niedersächsisches Landesgesundheitsamt



Landesuntersuchungsprogramm in öffentlichen Einrichtungen (LUPE I)

Interventionsstudie zur Verminderung der Feinstaubkonzentration in Grundschulen

Kurzbericht

2010

Bearbeiterinnen / Bearbeiter:

S. Dietrich¹, T. Lahrz², H. Grams³, D. Twardella¹, U. Schwegler¹, H. Fromme¹

¹ Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit,
Sachgebiet Chemikaliensicherheit und Toxikologie, Pfarrstrasse 3, D-80538 München
(Federführung)

² Landeslabor Berlin-Brandenburg, Fachbereich IV-4 – Umweltbezogener
Gesundheitsschutz, Landesmessstelle für Gefahrstoffrecht und Innenraumhygiene,
Invalidenstraße 60, D-10557 Berlin

³ Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Luft-/ Innenraumhygiene, Roesebeckstr. 4-6,
D-30449 Hannover

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Ziel der Untersuchung.....	7
3	Untersuchungsdurchführung.....	8
3.1	Auswahl der Klassenräume	8
3.2	Untersuchungszeiträume und Messstrategie.....	8
3.3	Material und Methoden	9
3.4	Reinigungsintervention.....	9
4	Ergebnisse der Untersuchung	12
4.1	Temperatur und Luftfeuchtigkeit	12
4.2	Kohlendioxid	14
4.3	Außenluftwerte	14
4.4	Partikelverteilung in der Innenraumluft.....	17
4.5	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Feinstaubkonzentration (PM ₁₀)	19
4.5.1	Einfluss der Lüftung auf die Feinstaubkonzentration Korrelationen von CO ₂ und PM ₁₀	21
4.5.2	Analyse des Interventionseffektes unter Berücksichtigung der Kohlendioxidkonzentration und der Anzahl von Personen im Klassenraum	24
4.5.2.1	Ergebnisse PM ₁₀	25
4.5.2.2	Ergebnisse PM _{2,5}	27
4.6	PM _{2,5}	28
5	Ergebnisse anderer Untersuchungen zur Feinstaubreduktion in Schulen	29
5.1	Lüftung und Feinstaubbelastung.....	29
5.2	Reinigung und Feinstaubbelastung.....	30
6	Hinweis für die Praxis	32
7	Zusammenfassung	33

1 Einleitung

Hohe Feinstaub-Konzentrationen in der Außenluft sind mit gesundheitlichen Folgen wie Schädigung des Herz-Kreislauf-Systems und der Atemwege und damit verbunden erhöhter Mortalität assoziiert [1, 2]. Entsprechend wurden Grenzwerte für die Außenluft-Konzentration von Feinstaub entwickelt. Da Menschen einen Großteil ihrer Zeit in Innenräumen verbringen, könnte die Feinstaub-Konzentration in Innenräumen von noch größerer gesundheitlicher Relevanz sein als die Konzentration in der Außenluft. Insbesondere die Luftqualität in Schulen ist von Interesse, da sich Kinder im schulpflichtigen Alter, die als besonders empfindlich gegenüber Umweltfaktoren einzuschätzen sind, ungefähr 30 % ihrer Tageszeit in Schulinnenräumen aufhalten. Die bisher vorliegenden Studien in diesem Bereich zeigen, dass in Schulen vergleichsweise hohe Konzentrationen an Feinstaub vorliegen [3, 6, 13, 14]

In Innenräumen stammt der Feinstaub aus anderen Quellen als in der Außenluft und kann eine andere Zusammensetzung haben. Typische Quellen für Feinstaub in der Außenluft sind der Straßenverkehr und Industrieprozesse, während in Wohninnenräumen insbesondere Zigarettenrauch, andere Verbrennungsprozesse (z. B. Kochen und Heizen) sowie Aufwirbelungen von sedimentiertem Hausstaub eine Rolle spielen können. Untersuchungen zeigen, dass Feinstaub aus unterschiedlichen Quellen bzw. mit unterschiedlicher Zusammensetzung unterschiedlich stark mit Gesundheitseffekten verbunden ist [4, 5].

Aus hohen Konzentrationen in Innenräumen muss somit nicht zwingendermaßen gefolgert werden, dass eine Gesundheitsgefährdung vorliegt. Die Ad-hoc-AG Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden stellt hierzu fest: „Das derzeitige Fehlen geeigneter Bewertungsmaßstäbe, die für alle Innenräume anwendbar sind, bedeutet jedoch in keinem Fall, dass Feinstaub in der Innenraumluft als „gesundheitlich unbedenklich“ einzustufen ist. Solange noch keine gültige Bewertung in Form von Richt- oder Grenzwerten möglich ist, sollte auf die üblichen Maßnahmen zur Verbesserung der Innenraumluftqualität verwiesen werden. So dürften in vielen Fällen geeignete Lüftungsregime auch zur Minderung der Feinstaubproblematik beitragen. Die Kohlendioxid-Konzentration der Innenraumluft kann hierbei als geeigneter Luftqualitätsindikator für die Lüftungssituation herangezogen werden [11]“. Unabhängig von der Bewertung der gesundheitlichen Folgen stellt sich die Frage, welche Faktoren eine hohe Feinstaubbelastung in Schulinnenräumen begünstigen und wo Ansatzpunkte für eine Reduktion dieser hygienisch in jedem Fall unerwünschten Belastung bestehen.

Lupe I – Interventionsstudie zur Verminderung der Feinstaubkonzentration in Grundschulen

Die intensive öffentliche Diskussion, die durch das Thema Feinstaub in der Außenluft ausgelöst wurde, weitete sich nach kurzer Zeit auf die Frage aus, welche Relevanz Feinstäube auch in nicht gewerblich genutzten Innenräumen haben.

Zur Abklärung dieser Frage erfolgten unter anderem Feinstaubmessungen in Bayern, Baden-Württemberg und Berlin in schulischen Innenräumen. Es zeigte sich allerdings, dass eine Bewertung der Ergebnisse nur sehr eingeschränkt möglich war, da anders als für den Außenluftbereich weder die Messtechnik, Details der Probenahme noch die Beurteilungszeiträume festgelegt waren und toxikologisch einschätzbare Informationen über die Zusammensetzung von Innenraumstäuben nur in geringerem Maße vorlagen.

Von den für gesundheitliche Fragestellungen zuständigen Landesämtern der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Berlin und Niedersachsen wurde eine Arbeitsgruppe gebildet, aus der das gemeinsam abgestimmte "Länderuntersuchungsprogramm in öffentlichen Einrichtungen (LUPE)" hervorging.

2 Ziel der Untersuchung

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

Es sollten Hinweise für in der Praxis auch flächendeckend umsetzbare Reinigungsverfahren erarbeitet werden, welche die Feinstaubkonzentration in Schulinnenräumen unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit (eingeschränkte finanzielle Möglichkeiten der Schulträger) vermindern und gleichzeitig unter gesundheitlichen und hygienischen Aspekten sinnvoll sind.

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

Des Weiteren war es Ziel, auf Basis von Untersuchungsergebnissen Empfehlungen für dringend notwendige Maßnahmen zur Verbesserung der Innenraumluftqualität, wie sie z.B. im Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden [10] gegeben werden, mit Messdaten aus der Praxis mehr Gewicht zu verleihen. Um eine Sensibilisierung vor Ort zu erreichen, sollten die Ergebnisse den verantwortlichen Behörden und Schulen in aufbereiteter Form zur Veranschaulichung zur Verfügung gestellt werden.

3 Untersuchungsdurchführung

3.1 Auswahl der Klassenräume

Die Grundschulen in Bayern (Baujahre: 1978, 1972 und 1964) und Niedersachsen (Baujahr: 1970) befanden sich in Schulzentren, die im städtischen Gebiet mit überwiegender Wohnnutzung abseits vielbefahrener Hauptstraßen errichtet wurden.

Die Berliner Grundschule lag im innerstädtischen Bezirk Mitte. Die Umgebung war gekennzeichnet durch die Lage am Rande eines großen Park- und Grünanlagenbereiches jedoch auch in der Nähe (ca. 100 m) einer relativ stark befahrenen Straße.

In der Regel befanden sich als Sonnenschutz im Klassenzimmer Vorhänge. Die Räume hatten eine Größe von ca. 60 -70 m² (Volumen: ca. 190 -220 m³) und waren im Durchschnitt mit 20-25 Schülern belegt (jahrgangsabhängig). In den Klassenräumen befanden sich ausschließlich glatte Bodenbeläge, in den Räumen waren aber z.T. Teppichelemente und Polstermöbel in Form von Sitzcken bzw. „Kuschelecken“ vorhanden. Als Mindestanforderung hinsichtlich Lüftung war vereinbart worden, dass vor und nach dem Unterricht sowie in den Pausen gelüftet wird. Die Raumlüftung erfolgte im Rahmen der örtlichen Möglichkeiten über Fenster in Dreh- oder Kippstellung, eine Querlüftung zum Flur war möglich. In Niedersachsen erfolgte die Raumlüftung zusätzlich zur Fensterlüftung über eine tagsüber laufende Abluftanlage. Die Decken waren meist mit Platten abgehängt, in den Räumen befanden sich Regale und andere Ablagemöglichkeiten für Unterrichtsmittel.

3.2 Untersuchungszeiträume und Messstrategie

Als wesentlicher Beurteilungsparameter für die Feinstaubsituation in Klassenräumen wurde die Messung der Partikelfraktion PM₁₀ als einheitlicher Basisparameter vereinbart.

Zum Ausgleich von Tagesschwankungen und Zufallsbefunden sowie zur besseren Vergleichbarkeit der Messergebnisse wurde festgelegt, dass jede Phase der Untersuchung (ohne/mit Intervention) mindestens zwei Wochen andauern soll, bei täglicher Erfassung der Feinstaubkonzentrationen (10 Messungen [Tage] über den Unterrichtszeitraum je Klasse und Reinigungsbedingung). Somit wurden auch weitestgehend gleiche Unterrichtsbedingungen (Unterrichtsart, Aktivitäten, Stundenplan etc.) gewährleistet.

Die jeweils 4-wöchigen Messperioden setzte sich aus der Erfassung des Ist-Zustandes (die ersten 2 Wochen jeder Serie) und nachfolgend des Zustandes unter optimierten Reinigungsbedingungen zusammen. Es sollten vier Messperioden (eine Periode 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.

Die Messungen in den Klassenräumen erfolgten von Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsende. Die erforderlichen Messgeräte wurden morgens vor Unterrichtsbeginn von Studienmitarbeitern für die tägliche Messung vorbereitet und in Betrieb gesetzt und nach Unterrichtsende dokumentiert abgeschaltet. Die Untersuchungsperioden sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Untersuchungszeiträume der Länder

	Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4
Bayern	20.11.-15.12.06	25.06.-20.07.07		18.02.-14.03.08
Berlin	05.03.-30.03.07	11.06.-09.07.07	08.10.-14.11.07	06.02.-11.03.08
Niedersachsen	05.02.-02.03.07			

3.3 Material und Methoden

Neben der kontinuierlichen Messung der Partikelkonzentration (optisch, Laserpartikelzähler) und der Partikelmasse (PM₁₀, gravimetrisch) wurden auch die Raumklimaparameter Kohlendioxid (CO₂), Temperatur (T) und relative Feuchte (rF) erfasst. Dies wird wegen des möglichen Einflusses der Außenluft mit entsprechenden Parallelmessungen flankiert.

Im Außenbereich wurde je nach technischer Möglichkeit analog zum Innenraum kontinuierlich die Partikelkonzentration und –masse sowie zu Unterrichtsbeginn und –ende Temperatur, relative Luftfeuchte, CO₂ (je 20 Messwerte im 15 sec. Intervall) erhoben.

3.4 Reinigungsintervention

Die erste LUPE-Intervention untersuchte, ob mit möglichst geringer Änderung des Reinigungsaufwandes eine Reduzierung der Feinstaubkonzentration zu erreichen ist. Ausgehend von einer Mindestlüftung (Querlüftung für drei bis fünf Minuten – 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“¹ aber nur einem Nasswischen pro Woche (Reinigungsintervention) eine Verbesserung der Feinstaubsituation erreicht werden kann.

¹ 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

Bei den durch die Länder Berlin und Bayern durchgeführten vertiefenden Untersuchungen sollte aufgrund dieser ersten Ergebnisse, die keine Verbesserung zeigten, durch erhöhten Reinigungsaufwand eine Reduktion der Feinstaubgehalte erreicht werden. Die Lüftungsbedingungen wurden nicht geändert, die Reinigung wurde auf tägliches Feuchtwischen (Entfernung von losen, trockenen Verschmutzungen) mit anschließendem Nasswischen geändert.

In Bayern wurden jeweils zwei Klassenräume einer Grundschule parallel untersucht. Vor dem Beginn der Reinigungsintervention wurde in Zusammenarbeit mit der Schulleitung, der zuständigen Verwaltungsstelle für die Gebäudereinigung sowie der Reinigungsfirma eine intensive Reinigung der Klassenräume geplant und durch die Reinigungsfirma ausgeführt. Während der Untersuchungszeiträume fand kein Fegen durch die Schüler statt. In Bayern wurde für die Untersuchungsperiode 2 die KW 26 und KW 28 als Ist-Zustand sowie KW 27 und KW 29 als Intervention definiert (siehe auch Tabelle 2).

(Papierknäuel, Pappbecher etc.). Es ist die kostengünstigste manuelle Reinigungsmethode für glatte Böden und nicht zu verwechseln mit dem aufwändigeren Nasswischen.

Tabelle 2: Übersicht der Reinigungsbedingungen für die Untersuchungszeiträume

Schule/Zeitraum	Reinigungsbedingungen	
	Raum 1	Raum 2
BY – Periode 1 Ist-Zustand (20.11.-01.12.06)	Turnusmäßige Unterhaltsreinigung (Montag und Mittwoch, Feuchtwischen, nach "Bedarf" Tische, tägliches Entleeren der Müllbehälter Lüftung vor und nach dem Unterricht sowie in den Pausen Intensivreinigung am 01.12.06 nach Unterrichtsende	
BY – Periode 1 Intervention (04.12.-15.12.06)	tägliches feuchtes Wischen des Fußbodens, tägliches Entleeren der Müllbehälter, 1 x Woche Reinigung der Tische, Stühle, Fensterbänke, Regale, etc.	
BY – Periode 2 Ist-Zustand KW 26 (25.06.-29.06.07)	Erfassung Ist-Zustand, Reinigung entsprechend des gültigen Hygieneplans der Schule	
BY – Periode 2 Intervention KW 27 (02.07.-06.07.07)	tägliches zweistufiges nasses Wischen des Fußbodens; tägliches Entleeren der Müllbehälter, 1 x Woche Reinigung der Tische, Stühle, Fensterbänke, Regale, etc.	
BY – Periode 2 Ist-Zustand KW 28 (09.07.-13.07.07)	wie KW 26 (Herstellung Ist-Zustand), turnusgemäße Reinigung nach Plan	
BY – Periode 2 Intervention KW 29 (16.07.-20.07.07)	Intensivreinigung am 16.07.07 nach Unterrichtsende Reinigung entsprechend des gültigen Hygieneplans der Schule	
BY – Periode 4 Ist-Zustand (18.02.-29.02.08)	Erfassung Ist-Zustand, Reinigung entsprechend des gültigen Hygieneplans der Schule Intensivreinigung am 29.02.08 nach Unterrichtsende	
BY – Periode 4 Intervention (03.03.-14.03.08)	Tägliche Bodenreinigung im zweistufigen Wischsystem : 1. Vorverfahren: Feuchtwischen (Beläge mit Gazetüchern feucht abwischen) 2. Hauptverfahren: Nasswischen (zweistufige System) Wöchentlich: staubbundene Reinigung aller frei zugänglichen horizontalen Flächen (Schul- und Fensterbänke, Stühle, Regale, Heizung, ...)	
Berlin – Periode 1 Ist-Zustand (05.03.-16.03.07)	Standardreinigung, 2 x / Woche (Montag und Mittwoch) jeweils trocken- gefolgt von Nasswischen, 1 x / Woche incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen	
Berlin – Periode 1 Intervention (19.03.-30.03.07)	tägliches feuchtes Wischen des Fußbodens bei Reduzierung des Nasswischens auf 1 x / Woche (dienstags) incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen wie Fensterbänke etc.	
Berlin – Periode 2 Ist-Zustand (11.06.-22.06.07)	Standardreinigung, 2 x / Woche (Montag und Mittwoch) jeweils trocken- gefolgt von Nasswischen, 1 x / Woche incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen	
Berlin – Periode 2 Intervention (25.06.-09.07.07)	tägliches feuchtes Wischen gefolgt vom Nasswischen des Fußbodens. 1 x / Woche (Mittwoch) incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen wie Fensterbänke etc.	
Berlin – Periode 3 Ist-Zustand (08.10.-26.10.07)	Standardreinigung, 2 x / Woche (Montag und Mittwoch) jeweils trocken- gefolgt von Nasswischen, 1 x / Woche incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen	
Berlin – Periode 3 Intervention (29.10.-09.11.07)	tägliches feuchtes Wischen gefolgt vom Nasswischen des Fußbodens. 1 x / Woche (Mittwoch) incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen wie Fensterbänke etc.	
Berlin – Periode 4 Ist-Zustand (06.02.-22.02.08)	Standardreinigung, 2 x / Woche (Montag und Mittwoch) jeweils trocken- gefolgt von Nasswischen, 1 x / Woche incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen	
Berlin – Periode 4 Intervention (26.02.-11.03.08)	tägliches feuchtes Wischen gefolgt vom Nasswischen des Fußbodens. 1 x / Woche (Mittwoch) incl. Reinigung der Tische, Stühle, und freier Oberflächen wie Fensterbänke etc.	

4 Ergebnisse der Untersuchung

In Untersuchungsperiode 1 wurde in Bayern, Berlin und Niedersachsen, wie bereits beschrieben, der Reinigungsaufwand nur moderat erhöht (siehe Tabelle 2). Die Untersuchungsergebnisse des Bundeslandes Baden-Württemberg konnten nicht berücksichtigt werden, da die Untersuchungszeiträume, die Messstrategie und die resultierenden Daten nicht vergleichbar mit denen der anderen drei Bundesländer waren.

Untersuchungsperiode zwei (Sommer) und vier (Winter) wurden von den Bundesländern Berlin und Bayern durchgeführt, für Untersuchungsperiode drei (Herbst) liegen Ergebnisse nur aus dem Bundesland Berlin vor.

Für jeden Klassenraum wurden in der statistischen Auswertung Verteilungsparameter (Minimum, Maximum, Median usw.) der kontinuierlich gemessenen Werte der Luftqualität bestimmt. Dabei wurden nur die Zeiten von Unterrichtsbeginn bis Unterrichtsende berücksichtigt.

Bei den PM_{10} – Werten handelt es sich um die von den Geräten aus den Partikelzählungen umgerechneten Massekonzentrationen, die nicht mit gravimetrisch erhobenen Daten gleichzusetzen sind. Sie dienen lediglich dem Vergleich des jeweiligen Ist- und Interventionszustandes. Aufgrund der unterschiedlichen Messmethodik ergaben sich höhere Konzentrationswerte gegenüber dem gravimetrischen Referenzverfahren (siehe auch getrennte Ergebnistabellen im Ergebnisteil)

4.1 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

In den Tabelle 3 und 4 sind die statistischen Kennwerte für die Temperatur und die relative Feuchte in der Innenraumluft der Klassenräume zusammengestellt.

Die mittleren Temperaturen in den Klassenräumen bewegten sich im Jahresverlauf in einer Spannweite von 20 bis 30 °C mit den jahreszeitlich bedingt höchsten Temperaturen im Sommer. Während der Messperiode 4 (Winter) wurden sehr ausgeglichene mittlere Temperaturen zwischen 20 und 24 °C gemessen. Abgesehen von der Sommerperiode (P2) mit Temperaturunterschieden von 3 °C (Mediane der Untersuchungszeiträume) lag die mittlere Temperatur (Median) zwischen dem jeweiligen Ist-Zustand und der Intervention auf gleichem Niveau.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Mediane der Temperatur

Temperatur	Ist-Zustand			Intervention		
	Temperatur [°C] (bezogen auf die Tagesmediane)			Temperatur [°C] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1-R1	22	20	24	22	21	23
BY-P1-R1	23	22	24	23	22	23
BY-P1-R2	22	21	23	22	21	22
B-P2-R1	28	24	30	25	23	27
BY-P2-R1	23	22	28	26	22	29
BY-P2-R2	24	23	26	27	24	30
B-P3-R1	22	20	22	22	21	23
B-P4-R1	21	20	23	22	21	23
BY-P4-R1	23	23	24	23	22	23
BY-P4-R2	22	20	23	22	21	23

Tabelle 4: Zusammenfassung der Mediane der Luftfeuchte

Rel. Luftfeuchtigkeit	Ist-Zustand			Intervention		
	Rel. Luftfeuchtigkeit [% rF] (bezogen auf die Tagesmediane)			Luftfeuchtigkeit [% rF] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1-R1	46	39	53	40	36	43
BY-P1-R1	43	40	47	43	37	50
BY-P1-R2	39	36	48	37	32	46
B-P2-R1	52	42	58	52	36	62
BY-P2-R1	49	39	61	52	44	59
BY-P2-R2	52	39	58	52	47	55
B-P3-R1	49	41	55	51	48	61
B-P4-R1	46	39	51	42	35	46
BY-P4-R1	36	29	44	32	26	43
BY-P4-R2	36	32	46	38	31	44

In den untersuchten Klassenräumen bewegten sich die mittleren rel. Luftfeuchtigkeitswerte im Studienverlauf in einem Bereich von 36 bis 52 %. Jahreszeitlich bedingt wurden im Sommer (Periode 2) die höchsten und im Winter (Periode 4) die niedrigsten Werte festgestellt.

4.2 Kohlendioxid

In der Tabelle 5 sind die statistischen Kennwerte für die Kohlendioxidgehalte (CO₂) in der Innenraumluft der Klassenräume zusammengestellt.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Mediane für Kohlendioxid

Kohlendioxid	Ist-Zustand			Intervention		
	Kohlendioxid [CO ₂] (bezogen auf die Tagesmediane)			Kohlendioxid [CO ₂] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1-R1	1493	783	1963	1224	953	1686
BY-P1-R1	1825	1570	2095	1946	1619	2297
BY-P1-R2	1383	968	1775	1252	1046	2031
B-P2-R1	722	423	848	690	461	903
BY-P2-R1	966	443	1267	601	458	1396
BY-P2-R2	1344	769	1741	905	647	1953
B-P3-R1	1178	823	1363	1386	1162	1618
B-P4-R1	1540	967	1717	998	804	1407
BY-P4-R1	1095	821	1207	1034	845	1402
BY-P4-R2	1054	707	1186	1250	934	1809

Die Lüftung ist in der Regel nur während der Sommerperiode als ausreichend anzusehen. Zu allen anderen Jahreszeiten wurden die gesundheitlich hygienischen Leitwerte für Kohlendioxid, erstellt von der Ad-hoc-AG Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden [12] z. T. deutlich überschritten.

4.3 Außenluftwerte

In den Tabelle 6, 7 und 8 sind die statistischen Kennwerte der Außenluftgehalte an PM₁₀ (kontinuierlich), PM_{2,5} (kontinuierlich) und PM₁₀ (gravimetrisch) zusammengestellt.

Zur Beschreibung der Feinstaubsituation in der Außenluft während der Messungen in den Klassenräumen sind in erster Linie die gravimetrisch ermittelten PM₁₀-Konzentrationen geeignet, da sie mit dem Referenzverfahren der Immissionsschutzmessungen erhoben wurden und mit den Werten von Außenluftmessstationen vergleichbar sind. Insgesamt bewegen sich die Feinstaubkonzentrationen (Mediane der Messperioden) in der üblichen Größenordnung von ca. 10 bis 30 µg PM₁₀/m³.

Tabelle 6: Außenluftwerte PM₁₀ (kontinuierlich)

PM ₁₀ (OPC)	Ist-Zustand			Intervention		
	PM ₁₀ [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)			PM ₁₀ [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1						
BY-P1	.	.	.	20	5	35
B-P2						
BY-P2	8	3	10	13	2	25
B-P3						
B-P4						
BY-P4	26	5	41	8	2	27

Tabelle 7: Außenluftwerte PM_{2,5} (kontinuierlich)

PM _{2,5} (OPC)	Ist-Zustand			Intervention		
	PM _{2,5} [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)			PM _{2,5} [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1						
BY-P1	.	.	.	13	2	23
B-P2						
BY-P2	4	2	6	6	1	17
B-P3						
B-P4						
BY-P4	17	4	30	4	1	19

Tabelle 8: Außenluftwerte PM₁₀ (gravimetrisch)

PM ₁₀ (gravi.)	Ist-Zustand			Intervention		
	PM ₁₀ [µg/m ³] (gravimetrisch)			PM ₁₀ [µg/m ³] (gravimetrisch)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1	25	15	39	28	8	81
BY-P1						
B-P2	21	8	52	15	9	33
BY-P2						
B-P3	25	15	64	21	11	48
B-P4	22	6	74	14	10	34
BY-P4	23	6	40	7	3	26

In den folgenden Tabelle 9, 10 und 11 sind die statistischen Kennwerte der Außenluftgehalte für das Kohlendioxid, die Temperatur und die relative Feuchte zusammengestellt.

Tabelle 9: Außenluftwerte Kohlendioxid

Kohlendioxid	Ist-Zustand			Intervention		
	Kohlendioxid [ppm] (bezogen auf die Tagesmediane)			Kohlendioxid [ppm] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1						
BY-P1	337	298	432	356	306	470
B-P2						
BY-P2	348	334	356	359	331	410
B-P3						
B-P4						
BY-P4	527	480	615	513	454	592

Tabelle 10: Außenluftwerte Temperatur

Temperatur	Ist-Zustand			Intervention		
	Temperatur [°C] (bezogen auf die Tagesmediane)			Temperatur [°C] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1						
BY-P1	7	5	12	7	4	13
B-P2						
BY-P2	17	12	25	19	12	26
B-P3						
B-P4						
BY-P4	9	5	13	6	-2	13

Tabelle 11: Außenluftwerte relative Luftfeuchtigkeit

Rel. Luftfeuchtigkeit	Ist-Zustand			Intervention		
	Rel. Luftfeuchtigkeit [% rF] (bezogen auf die Tagesmediane)			Rel. Luftfeuchtigkeit [% rF] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1						
BY-P1	71	59	85	61	48	82
B-P2						
BY-P2	62	47	81	74	48	90
B-P3						
B-P4						
BY-P4	54	31	75	56	46	70

Die Werte belegen, dass die Untersuchungsbedingungen für den ist-Zustand und der Intervention vergleichbar sind. Entsprechend den Jahreszeiten und der Lage der Untersuchungsorte (städtischer Hintergrund) wurden durchaus übliche Werte ermittelt.

4.4 Partikelverteilung in der Innenraumluf

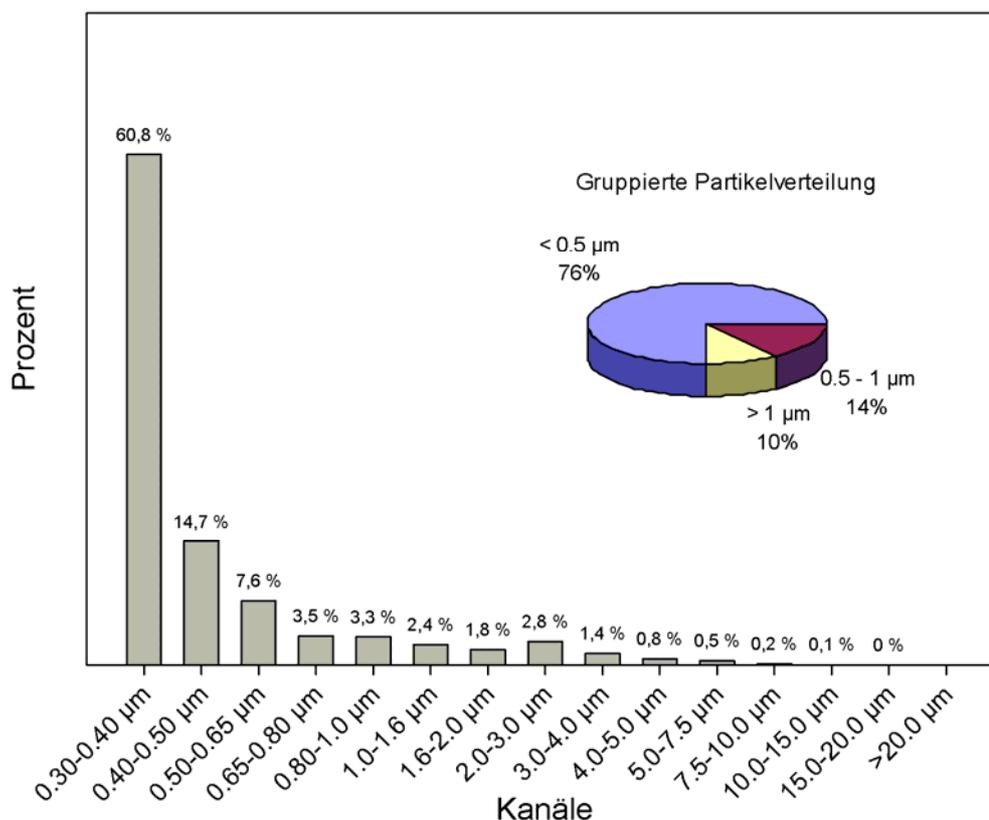


Abbildung 1: relative Partikelverteilung – Summe aller Untersuchungen der optischen Partikelmessgeräte für den Gesamtuntersuchungszeitraum – Anzahl Partikel pro Kanal

Gegenüber der Außenluft mit üblicherweise ca. 90 % der Partikelfraktion kleiner 0,5 µm, 5 bis 10 % der Fraktion 0,5 bis 1 µm und sehr geringem Anteil an Partikeln größer 1 µm (ca. 1 %) zeigte sich in der Luft der Klassenräume ein höherer Anteil der „gröberen“ Fraktionen mit ca. 10 % an Partikeln größer 1 µm.

In der Innenraumluf lag der mittlere Anteil der Partikel kleiner 0,5 µm bei 76 %, zwischen 0,5 und 1 µm bei 14 % und größer 1 µm bei 10 %. Der Vergleich zwischen Ist-Zustand und Intervention zeigte für die mittlere Partikelverteilung in den Klassenräumen einen tendenziell

geringeren Anteil der sehr feinen Partikel (< 0,5 µm) in der Untersuchungsphase der intensiveren Reinigung.

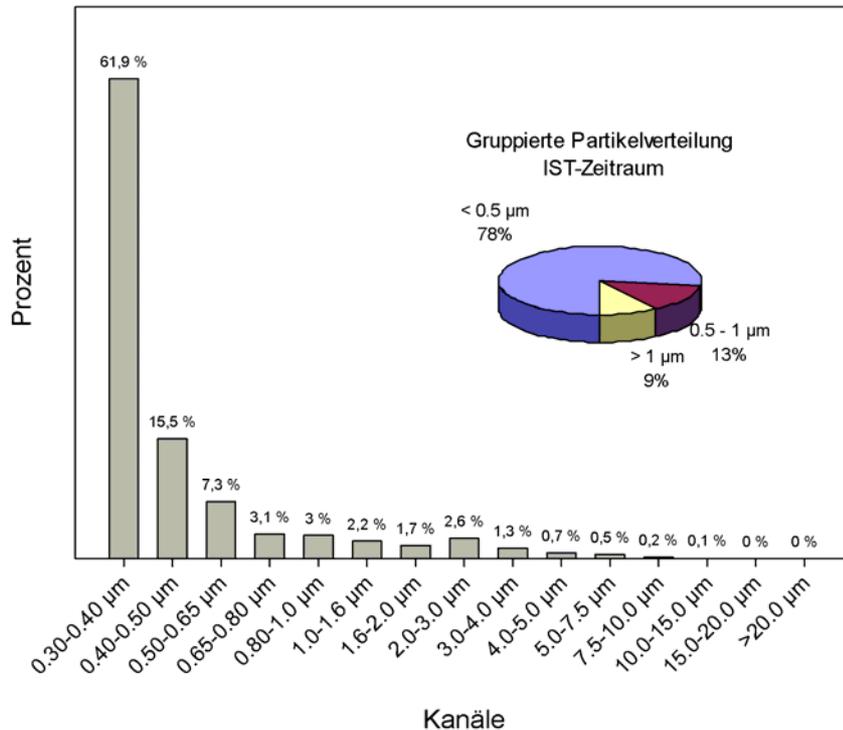


Abbildung 2: relative Partikelverteilung – Summe aller Untersuchungen der optischen Partikelmessgeräte für den Ist-Zeitraum – Anzahl Partikel pro Kanal

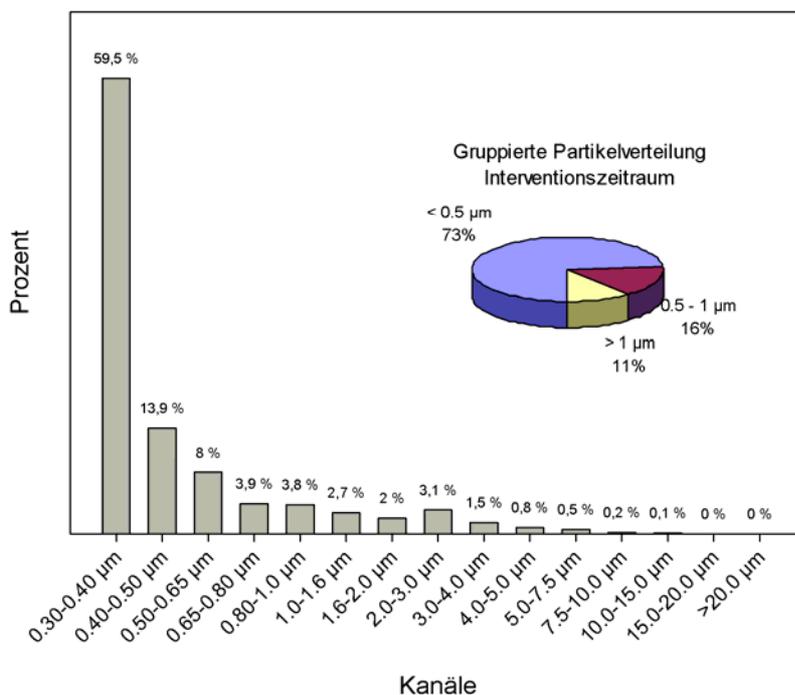


Abbildung 3: relative Partikelverteilung – Summe aller Untersuchungen der optischen Partikelmessgeräte für den Interventionszeitraum – Anzahl Partikel pro Kanal

4.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Feinstaubkonzentration (PM₁₀)

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

Tabelle 12: Zusammenfassung der Mediane für PM₁₀ (optische Messung)

Schule	Ist-Zustand			Intervention		
	PM ₁₀ [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)			PM ₁₀ [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)		
	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1-R1	258	170	385	290	180	383
BY-P1-R1	251	189	265	243	212	301
BY-P1-R2	215	166	262	216	143	263
NI-P1-R1	170	105	291	181	87	304
NI-P1-R2	186	122	290	145	95	251
B-P2-R1	138	73	347	148	98	169
BY-P2-R1	151	48	243	74	32	228
BY-P2-R2	133	74	227	99	33	224
B-P3-R1	271	203	374	343*	283*	443*
B-P4-R1	442	257	742	270	200	338
BY-P4-R1	388	178	477	238	176	443
BY-P4-R2	269	120	378	255	179	477

* Messproblem mit Überbefunden bei der optischen Messung

Tabelle 13: PM₁₀ Interventionseffekte

Schule	PM ₁₀ [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)			
	Median-IST	Median-INT	Interventions-Effekt	Interventions-Effekt in %
B-P1-R1	258	290	32	+12
BY-P1-R1	251	243	-8	-3
BY-P1-R2	215	216	1	+0
NI-P1-R1	170	181	11	+6
NI-P1-R2	186	145	-41	-22
B-P2-R1	138	148	10	+7
BY-P2-R1	151	74	-77	-51
BY-P2-R2	133	99	-34	-26
B-P3-R1	271	343*	(72*)	(+27*)
B-P4-R1	442	270	-172	-39
BY-P4-R1	388	238	-150	-39
BY-P4-R2	269	255	-14	-5

* Messproblem mit Überbefunden bei der optischen Messung

Tabelle 14: Zusammenfassung der gravimetrischen PM₁₀- Werte

Schule	Ist-Zustand			Intervention		
	PM ₁₀ [µg/m ³] (gravimetrisch)			PM ₁₀ [µg/m ³] (gravimetrisch)		
	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1-R1	169	121	207	193	87	220
BY-P1-R1	124	94	161	125	79	161
BY-P1-R2	129	102	165	116	84	173
NI-P1-R1	.	.	.	.	.	.
NI-P1-R2	.	.	.	.	.	.
B-P2-R1	90	55	204	89	57	148
BY-P2-R1	70	47	210	54	42	117
BY-P2-R2	98	45	135	65	41	147
B-P3-R1	189	138	248	197	153	245
B-P4-R1	259	128	390	171	136	206
BY-P4-R1	213	150	238	134	51	247
BY-P4-R2	165	114	176	145	44	277

Tabelle 15: PM₁₀ (gravi.)-Interventionseffekt

Schule	PM ₁₀ [µg/m ³] (gravimetrisch)			
	Median- IST	Median- INT	Interventions- Effekt	Interventions- Effekt in %
B-P1-R1	169	193	24	+14
BY-P1-R1	124	125	1	+1
BY-P1-R2	129	116	-13	-10
NI-P1-R1	.	.		
NI-P1-R2	.	.		
B-P2-R1	90	89	-1	-1
BY-P2-R1	70	54	-17	-24
BY-P2-R2	98	65	-33	-34
B-P3-R1	189	197	8	+4
B-P4-R1	259	171	-89	-34
BY-P4-R1	213	133	-80	-38
BY-P4-R2	165	145	-20	-12

Durch die moderate Änderung der Reinigungsstrategie in den Klassenräumen der Bundesländer Bayern, Berlin und Niedersachsen (Interventionsperiode 1) mit dem Verzicht auf eine Nassreinigung je Woche zugunsten des einfachen täglichen Feuchtwischens ergab sich lediglich in einem Klassenraum eine Abnahme (22 %) insgesamt jedoch keine signifikante Minderung des Feinstaubes in der Innenraumluft. Mögliche Effekte dieser nur wenig aufwändigeren Reinigung werden vermutlich von anderen komplexen Faktoren wie

Lüftungsverhalten, Schüleranzahl und -aktivität, allgemeiner Grundreinigungszustand des Raumes, sowie Raumausstattung und verwendete Baumaterialien überlagert.

Für die folgenden Untersuchungsperioden (Bayern und Berlin) mit intensivierter Reinigung (tägliche Feucht-/Nassreinigung) ergab sich folgendes Bild:

In den Untersuchungsperioden 2 und 3 (Sommer und Herbst) zeigte sich in Berlin keine Minderung der Feinstaubkonzentrationen während in Bayern eine Abnahme von 26 und 51 % bei der Streulichtmessung sowie 24 und 34 % bei den gravimetrischen Messungen zu erkennen war.

In der Untersuchungsperiode 4 (Winter) konnte in allen Fällen eine Reduzierung der mittleren Feinstaubkonzentrationen erreicht werden. In einem Fall nur in sehr geringem Umfang 5 % bzw. 12 % (optisch bzw. gravimetrisch) in den anderen Räumen jedoch deutlich mit 39 bzw. 38 % (Bayern) und 39 bzw. 34 % (Berlin).

Inwieweit die beobachteten Feinstaubminderungen sich auf die intensivierte Reinigung zurückführen lassen, wird später (siehe Kapitel 4.5.2 – Analyse des Interventionseffektes) unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren Lüftung und Personenanzahl geprüft.

Deutlich ersichtlich wird die jahreszeitliche Abhängigkeit der Feinstaubbelastung (PM_{10}) mit den höchsten Konzentrationen im Winter und den niedrigsten im Sommer. Dieser Effekt ist in hohem Maße mit der sommerlich besseren Lüftung der Klassenräume in Verbindung zu bringen (siehe Kapitel 4.5.1 – Einfluss der Lüftung auf die Feinstaubkonzentration).

4.5.1 Einfluss der Lüftung auf die Feinstaubkonzentration Korrelationen von CO_2 und PM_{10}

Eine wesentliche Ursache für die jahreszeitlich unterschiedliche Innenraumluftqualität in Klassenräumen ist bedingt durch das temperaturabhängige Lüftungsverhalten der Nutzer.

In Abbildung 4 sind die Mediane der Kohlendioxid- und der Feinstaubkonzentrationen (PM_{10} optisch), gemessen über den Unterrichtszeitraum, aufgetragen.

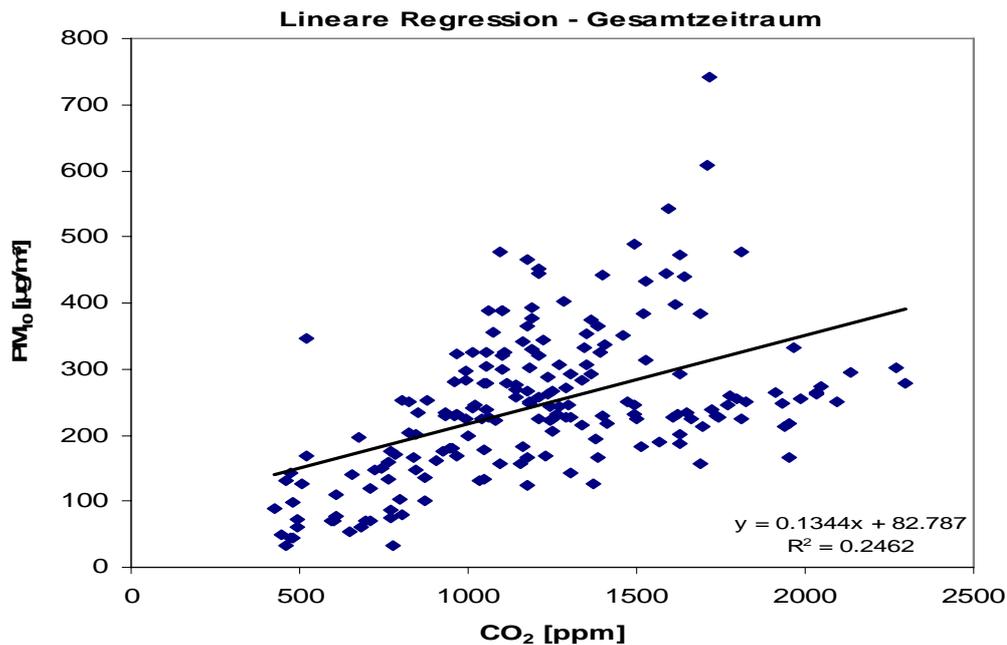


Abbildung 4: PM₁₀ und CO₂ Streudiagramm (Gesamtzeitraum)

Bei Betrachtung der linearen Korrelation und der statistischen Kenndaten (Tabelle 16) zeigt sich eine hochsignifikante Abhängigkeit sowohl der optischen als auch gravimetrisch ermittelten Feinstaubkonzentrationen von der Lüftung bzw. der CO₂-Konzentration.

Tabelle 16: Pearson Korrelationskoeffizienten (Kohlendioxid vs. Feinstaubkonzentrationen)

		PM ₁₀ (Mediane)	PM _{2.5} (Mediane)	PM ₁₀ (Gravimetrisch)
Gesamtzeitraum	r	0.4962	0.60142	0.35802
	p	<.0001	<.0001	<.0001
	N	192	192	186
IST-Zeitraum	r	0.43627	0.53353	0.36186
	p	<.0001	<.0001	0.0005
	N	93	93	88
Intervention	r	0.56891	0.66338	0.34868
	p	<.0001	<.0001	0.0004
	N	99	99	98

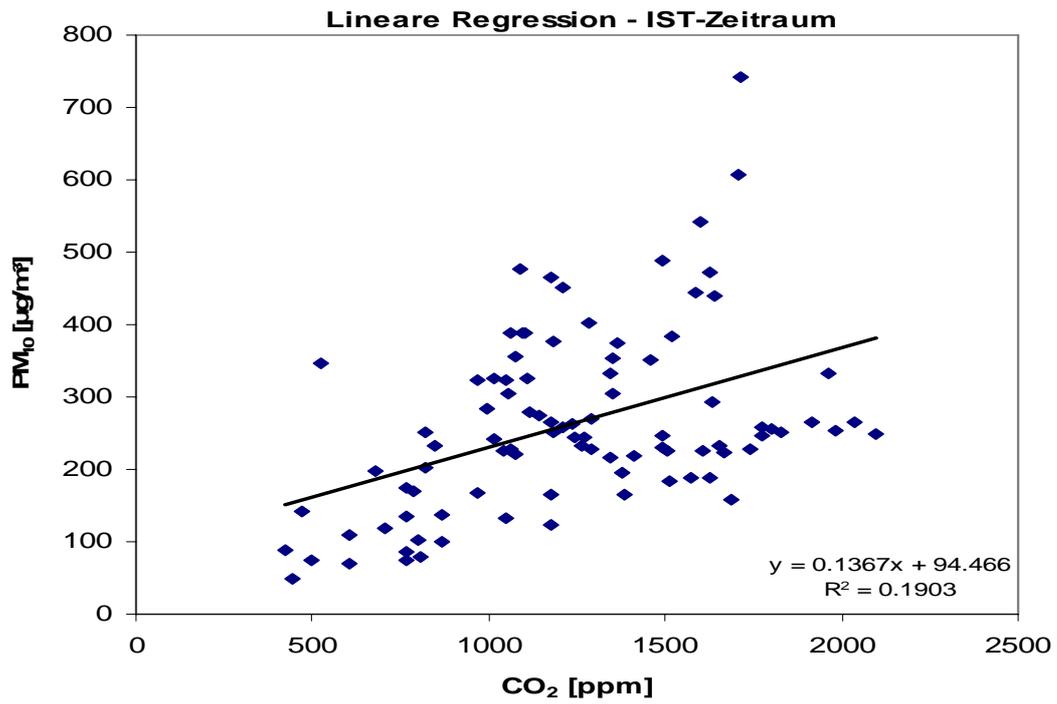


Abbildung 5: PM₁₀ und CO₂ Streudiagramm (Ist-Zeitraum)

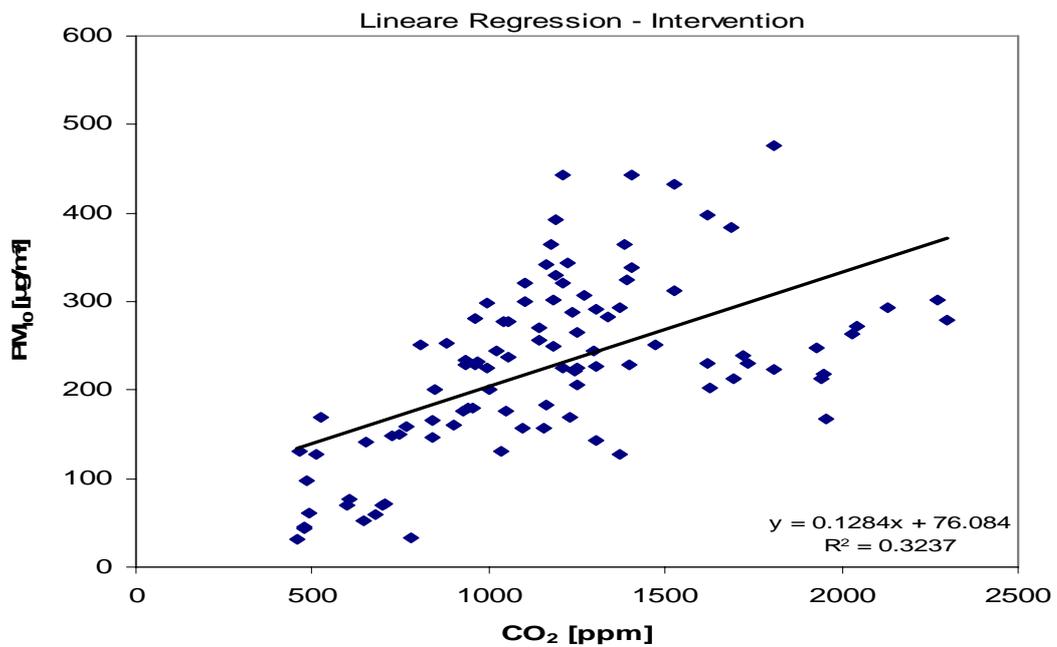


Abbildung 6: PM₁₀ und CO₂ Streudiagramm (Interventionszeitraum)

Die Steigungen signalisieren eine Veränderung der PM_{10} -Konzentration um ca. $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (bzw. $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gravimetrisch bestimmter PM_{10} -Fraktion) bei einer Änderung der CO_2 -Konzentration von 100 ppm. Allerdings handelt es sich um eine bivariate Analyse ohne Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren und wiederholter Messung der untersuchten Klassenräume. Eine multivariate Analyse erfolgt unter 4.6.2.1.

4.5.2 Analyse des Interventionseffektes unter Berücksichtigung der Kohlendioxidkonzentration und der Anzahl von Personen im Klassenraum

Zur Analyse des Interventionseffektes ist bei dem vorliegenden Studiendesign ein Mehrebenen-Modell zu wählen. In diesem Modell wird berücksichtigt, dass dieselben Klassenräume mehrfach untersucht werden und somit die einzelnen Beobachtungen in demselben Klassenraum miteinander korrelieren. Statistische Methoden, die diese Korrelationen nicht berücksichtigen sind bei dem vorliegenden Design nicht adäquat.

Als Zielgröße des vorgenannten Modells werden die mit dem OPC (Optical Particle Counter – Laser Aerosol Spectrometer) gemessenen PM_{10} - und $PM_{2,5}$ -Konzentrationen (Tagesmediane) und gravimetrisch bestimmten PM_{10} -Konzentrationen herangezogen. Zur Berücksichtigung der Korrelation der Beobachtungen in demselben Klassenraum wird ein zufälliger Effekt (random intercept) für den Klassenraum in das Modell aufgenommen. Dieser random intercept ist als zufällige Schwankung der Feinstaubkonzentration zwischen den Klassenräumen zu interpretieren.

Der Haupteinflussfaktor ist die Interventionsbedingung (Ist-Zustand im Vergleich zu verbessertem Reinigungsverfahren). Zur Berücksichtigung der tagesmedianen Kohlendioxidkonzentration und der medianen Personenanzahl im Klassenraum wird nach Singer [9] folgendes Verfahren gewählt: Es wird die Abweichung der mittleren Konzentration im Klassenraum von dem Gesamtmittelwert der Tagesmediane bestimmt. Parallel wird die Abweichung des individuellen Messtags in dem Klassenraum von dem Klassendurchschnitt berechnet. Diese beiden Kovariablen sind folgendermaßen zu interpretieren:

1. Welchen Einfluss hat eine Erhöhung des durchschnittlichen Klassenwertes (von Kohlendioxid oder Personenanzahl) auf die Feinstaubkonzentration?
2. Welchen Einfluss hat eine Erhöhung des individuellen Wertes (von Kohlendioxid oder Personenanzahl) auf die Feinstaubkonzentration?

Grundsätzlich ist es möglich, eine zufällige Schwankung des Einflusses der Kohlendioxidkonzentration und der Personenanzahl auf den Feinstaubgehalt in das Modell mit Hilfe von „random intercepts“ zu integrieren. Bei Aufnahme von random intercepts in das Modell

konnte SAS jedoch nicht konvergieren, so dass keine random intercepts in dem Modell berücksichtigt werden konnten.

Der Einfluss der Interventionsbedingung auf die Feinstaubkonzentration wurde in einem bivariaten Modell und in einem multivariaten Mehrebenen-Modell unter Berücksichtigung der o.g. 4 Kovariablen bestimmt. In die Berechnung gehen nur solche Messungen ein, zu denen Angaben über Kohlendioxidkonzentrationen und Personenanzahl vorliegen (n = 186).

4.5.2.1 Ergebnisse PM₁₀

Aus dem Mehrebenen-Modell ohne Einflussfaktor lässt sich ein Intraclusterkorrelationskoeffizient von 0,319 ableiten. Dies zeigt, dass ein erheblicher Anteil der gesamten Varianz in der Feinstaubkonzentration auf die Variabilität zwischen den Klassenräumen zurückzuführen ist.

Im bivariaten Modell zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Interventionsbedingung (Tabelle 17). Bei verbesserter Reinigung sinkt der Tagesmedian des PM₁₀ im Durchschnitt um ca. 28,27 µg/m³. Durch Aufnahme der Kovariablen in das Modell verringert sich der Effekt, bleibt aber weiterhin signifikant und liegt nun bei einer Verringerung um 19,87 µg/m³. Im multivariaten Modell ist weiterhin zu erkennen, dass die durchschnittlichen Kohlendioxidkonzentrationen und Personenanzahlen keine Bedeutung für die PM₁₀-Konzentration haben. Es zeigt sich aber ein signifikanter Einfluss der Kohlendioxidkonzentration am Messtag: Die Veränderung der Kohlendioxidkonzentration um 100 ppm geht mit einer Veränderung des PM₁₀ um 20 µg/m³ einher.

Tabelle 17: Ergebnisse der Mehrebenenanalyse mit PM₁₀ aus der OPC-Messung als Zielgröße

	Effektschätzer mit 95% Konfidenzintervall	
	Bivariates Modell	Multivariates Modell
Feste Effekte auf Messtagebene		
Intervention	-28,27 (-55,53; -1,01)	-19,87 (-39,19; -0,54)
Kohlendioxidkonzentration am Messtag		0.20 (0,17; 0,23)
Personenanzahl am Messtag		2.66 (-0,84; 6,16)
Feste Effekte auf Raumebene		
Durchschnittliche Kohlendioxidkonzentration im Raum		-0.01 (-0,37; 0,35)
Durchschnittliche Personenanzahl im Raum		13.68 (-51,17; 78,52)
Varianzkomponenten		
Raum	4319,16	6111,44
Residual	8719,95	4259,66
ICC	0,331	0,589

Wird das gravimetrisch bestimmte PM₁₀ als Zielgröße herangezogen zeigen sich vergleichbare Ergebnisse (Tabelle 18). Der Effekt der verbesserten Reinigung wird als etwas geringer eingeschätzt, die Konfidenzintervalle der beiden Effektschätzer überschneiden sich aber stark.

Der Einfluss der Kohlendioxidkonzentration am Messtag tritt bezüglich gravimetrisch gemessenen PM₁₀ weniger deutlich hervor als bezüglich mit dem OPC gemessenem PM₁₀. In diesem Modell geht der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration um 100 ppm mit einem Anstieg des PM₁₀ um 9 µg/m³ einher.

Tabelle 18: Ergebnisse der Mehrebenenanalyse mit gravimetrisch bestimmtem PM₁₀ als Zielgröße

	Effektschätzer mit 95% Konfidenzintervall	
	Bivariates Modell	Multivariates Modell
Feste Effekte auf Messtagebene		
Intervention	-21,73 (-36,63; -6,82)	-16,93 (-29,59; -4,28)
Kohlendioxidkonzentration am Messtag		0,09 (0,06; 0,11)
Personenanzahl am Messtag		-0,42 (-2,71; 1,97)
Feste Effekte auf Raumebene		
Durchschnittliche Kohlendioxidkonzentration im Raum		-0,00 (-0,19; 0,19)
Durchschnittliche Personenanzahl im Raum		3,33 (-31,18; 37,85)
Varianzkomponenten		
Raum	1119,54	1702,62
Residual	2606,04	1826,00
ICC	0,301	0,483

Die Analyse bestätigt, dass durch eine bessere Lüftung von Klassenräumen ein signifikanter Beitrag zur Minderung der Feinstaubkonzentration (PM₁₀) geleistet werden kann.

Die Prüfung, in wieweit bessere Lüftungsbedingungen während des Interventionszeitraumes mit intensiverer Reinigung Anteil an der Feinstaubminderung haben, ergibt folgendes Bild:

Die in zwei bayerischen Klassenräumen im Sommer beobachteten Feinstaubabnahmen bei intensivierter Reinigung sind demnach lüftungsbedingt. Somit konnte im Sommer kein feinstaubmindernder Reinigungseffekt nachgewiesen werden.

Jedoch ergibt sich für alle Klassenräume der Untersuchungsperiode 4 (Winter), wie schon bei der deskriptiven Betrachtung, auch unter Berücksichtigung der verschiedenen Lüftungsverhältnisse eine Reduzierung der mittleren Feinstaubkonzentrationen.

Dabei verbleiben nach Abzug der Lüftungsbedingten Veränderungen weiterhin reinigungsbedingte Abnahmen der Feinstaubkonzentrationen zwischen 14 und 36 % bzw. ca. 50 bis 140 µg/m³ der optisch gemessenen PM₁₀-Fraktion.

Die statistische Analyse zeigte zudem keinen signifikanten Einfluss der im Raum befindlichen Personenzahl auf die PM₁₀ – Feinstaubgehalte.

4.5.2.2 Ergebnisse PM_{2,5}

Aus dem Mehrebenen-Modell ohne Einflussfaktor lässt sich ein Intracluster-Korrelationskoeffizient von 0,394 ableiten. Dies zeigt, dass auch bezüglich PM_{2,5} ein erheblicher Anteil der gesamten Varianz in der Feinstaubkonzentration auf die Variabilität zwischen den Klassenräumen zurückzuführen ist.

Weder im bivariaten noch im multivariaten Modell ist ein signifikanter Effekt der verbesserten Reinigung auf die PM_{2,5}-Konzentration zu sehen (Tabelle 19). Im multivariaten Modell zeigt sich aber ein Zusammenhang mit der Kohlendioxidkonzentration am Messtag: Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration um 100 ppm geht mit einem Anstieg des PM_{2,5} um 2 µg/m³ einher.

Tabelle 19: Ergebnisse der Mehrebenenanalyse mit PM_{2,5} aus der OPC-Messung als Zielgröße

	Effektschätzer mit 95% Konfidenzintervall	
	Bivariates Modell	Multivariates Modell
Feste Effekte auf Messtagebene		
Intervention	-2,46 (-5,61; 0,68)	-1.26 (-3,62; 1,10)
Kohlendioxidkonzentration am Messtag		0.02 (0,02; 0,03)
Personenanzahl am Messtag		-0.02 (-0,45; 0,41)
Feste Effekte auf Raumebene		
Durchschnittliche Kohlendioxidkonzentration im Raum		0.01 (-0,03; 0,05)
Durchschnittliche Personenzahl im Raum		0.53 (-6,71; 7,77)
Varianzkomponenten		
Raum	77,1608	75,6819
Residual	116,17	63,7478
ICC	0,399	0,543

Die durchschnittliche Anzahl der anwesenden Personen in den Klassenräumen war mit +/- einem Schüler während der Messperioden des Ist-Zustandes und der Intervention jeweils vergleichbar (einzige Ausnahme: durchschnittlich 3 Schüler mehr während der Intervention der Periode 1 in Berlin).

4.6 PM_{2,5}

In der Tabelle 20 sind die statistischen Kennwerte für die PM_{2,5}-Gehalte in der Innenraumluft der Klassenräume zusammengestellt.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Mediane für PM_{2,5}

PM _{2,5}	Ist-Zustand			Intervention		
	PM _{2,5} [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)			PM _{2,5} [µg/m ³] (bezogen auf die Tagesmediane)		
Schule	Median	Min.	Max.	Median	Min.	Max.
B-P1-R1	38	24	45	46	29	55
BY-P1-R1	41	29	48	41	28	54
BY-P1-R2	41	20	50	32	23	45
NI-P1-R1	27	19	46	24	16	55
NI-P1-R2	28	16	42	26	13	41
B-P2-R1	21	11	36	19	10	28
BY-P2-R1	17	4	31	16	7	31
BY-P2-R2	17	9	28	16	10	32
B-P3-R1	37	31	64	50	42	57
B-P4-R1	44	23	70	32	21	44
BY-P4-R1	43	28	56	30	18	54
BY-P4-R2	36	28	47	32	24	54

In Ergänzung zu den optisch ermittelten (aus den Partikelzahlen berechneten) PM₁₀-Konzentrationen sind in der Tabelle 20 die mit gleichem Verfahren gemessenen PM_{2,5}-Konzentrationen zusammengefasst. Auch für diese Feinstaubfraktion ist eine jahreszeitliche Abhängigkeit mit niedrigeren Werten im Sommer zu erkennen.

In der Messperiode 4 (Winter) zeigte sich in ähnlicher Weise wie für PM₁₀ in allen Räumen eine Abnahme der PM_{2,5}-Konzentration (Berlin von 44 auf 32 µg/m³ [27 %], Bayern Raum 1 von 43 auf 30 µg/m³ [30 %] und Bayern Raum 2 von 36 auf 32 µg/m³ [11 %]).

5 Ergebnisse anderer Untersuchungen zur Feinstaubreduktion in Schulen

5.1 Lüftung und Feinstaubbelastung

Dass eine verbesserte Lüftung grundsätzlich auch einen Einfluss auf die Feinstaubgehalte in Innenräumen haben muss, belegen die Erfahrungen, die in anderen Innenräumen gesammelt wurden. Zur Abschätzung eines veränderten Lüftungsverhaltens und seiner Auswirkungen auf die partikuläre Belastungssituation in Klassenräumen liegen insbesondere Ergebnisse aus Berlin [21], Frankfurt [20] und München [7] veröffentlicht vor.

In Berlin wurden im Oktober/November 2003 bzw. im Januar/Februar 2004 zwei typische Klassenräume über jeweils 5 Wochen untersucht. Eine gründliche Stoßlüftung durch Öffnen von Fenstern und Türen vor und nach dem Unterricht sowie in jeder Pause führte in beiden Klassenräumen zu einer Reduktion der Wochenmittelwerte der alveolengängigen Staubfraktion (\sim PM₄) um ca. 25 % und des PM₁₀ zu ca. 30 %. Noch deutlicher war der Rückgang der Maximalgehalte in den Klassenräumen. Für beide Partikelfractionen ließ sich kein darüber hinaus gehendes Minderungspotential finden, wenn statt der Pausenlüftung eine Öffnung von 2 Kippfenstern während der gesamten Unterrichtszeit erfolgte.

In einer Studie in Bayern wurde die Entwicklung der Feinstaubgehalte in 2 Klassenräumen über 6 Wochen im Oktober / November 2005 verfolgt. Zur verstärkten Lüftung wurden Türen und Fenster vor dem Unterricht bzw. in allen Pausen weit geöffnet und eine Querlüftung durchgeführt. Darüber hinaus erhielten die Schüler Akzelerometer, die die körperliche Aktivität während der Unterrichtszeit aufzeichneten. Bei den kontinuierlich messenden Feinstaubgeräten war eine mit der Lüftung einhergehende Abnahme der Feinstaubmittelwerte um ca. 20 % zu beobachten. Hierbei zeigte sich, dass verstärktes Lüften nur dann die PM₁₀-Innenraumgehalte signifikant reduzieren konnte, wenn keine hohe physische Aktivität der Schüler vorherrschte. Wurde dieser Faktor mit in das statistische Modell hinein genommen, ergab sich kein eigenständiger Effekt mehr für die Lüftung. Die PM_{2,5}-Konzentrationen in den Klassenräumen ließen sich durch Lüftung nicht signifikant beeinflussen.

Im Februar/März 2006 wurden 4 Klassenräume in Frankfurt über 3 Wochen untersucht. Im Rahmen einer verstärkten Lüftung wurden über eine Woche in den Klassenräumen vor Beginn des Unterrichts und in allen Pausen die Fenster ganz geöffnet und die Oberlichter in Kippstellung gebracht. Als Ergebnis war ein signifikant positiver Einfluss auf die PM₁₀-Innenraumluftgehalte durch ein verbessertes Lüftungsverhalten nur in einem der vier Klassenräume zu beobachten.

5.2 Reinigung und Feinstaubbelastung

Für Wohninnenräume ist beschrieben, dass Reinigungsaktivitäten selbst eine Feinstaubquelle darstellen können [15, 19, 18]. So ist beim Staubsaugen insbesondere eine Zunahme an größeren Partikeln mit einem Durchmesser von $>2,5 - 4 \mu\text{m}$ in der Innenraumluft zu beobachten. Andere Messungen ergaben beim Staubsaugen zwar einen reproduzierbaren Anstieg der PM_{10} -Gehalte, nicht aber der $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentrationen [18]. Bezogen auf die ultrafeinen Partikel wurde lediglich ein geringfügiger, nicht signifikanter Anstieg der Partikelanzahl während der vorgenannten Reinigungsaktivitäten beschrieben [17, 16, 18]. Wichtig ist dabei die Benutzung eines Staubsaugers mit integriertem HEPA-Filter. Aber auch der Einsatz eines handelsüblichen Reinigungsmittels, z.B. zur Bodenreinigung, kann zur Partikelbildung führen. So wiesen Long et al. [22] nach, dass während der Benutzung eines Reinigungsmittels mit einem 15 %igen Pinienölanteil die Partikelanzahl im Raum von anfangs 2.000 Pt./cm^3 auf ein Maximum von bis 190.000 Pt./cm^3 (Partikel $> 20 \text{ nm}$) und die $\text{PM}_{2,5}$ -Gehalte von 5 auf $38 \mu\text{g/m}^3$ anstiegen.

Eine Verbesserung der partikulären Belastungssituation durch entsprechende Reinigungsaktivitäten war bisher kaum Gegenstand entsprechender Forschung. Für Schulinnenräume liegen hierzu insbesondere erste Ergebnisse aus Berlin [21], Frankfurt [20] und München [7] vor.

Die Ergebnisse der Berliner Untersuchung aus dem Jahr 2003 deuten darauf hin, dass ein tägliches staubbindend-feuchtes Wischen und anschließendes Nasswischen der Böden zu einer Reduktion der alveolengängigen Staubfraktion (PM_4) und des PM_{10} führt (an einer Schule ca. 25 % für PM_4 und ca. 40 % für PM_{10}). Darüber hinaus wurden in einer Woche die Reinigungsvorgaben gemäß Anhang A der DIN 77400 erfüllt, bei der als Mindeststandard für optimale Gebäudezustände eine Reinigung von Klassenräumen zweimal wöchentlich vorgesehen ist. Dieser Reinigungsstandard zeigte sich nicht in der Lage, die Feinstaubgehalte positiv zu beeinflussen.

Auch bei der Untersuchung von 4 Klassenräumen in Frankfurt wurde eine verstärkte Reinigung durchgeführt, indem fünfmal pro Woche Tische, Stühle und der Boden feucht gewischt und zudem Schränke, Fensterbänke und Kreideleisten täglich abgewischt wurden. Grundsätzlich führte diese intensivierete Reinigung zu einer Verringerung der PM_{10} -Konzentrationen. Allerdings war die Reduktion der PM_{10} -Gehalte (gravimetrisch bestimmt) nur in einem der 4 Klassenräume statistisch signifikant. Das parallel angewandte laseroptische Verfahren belegte eine signifikante Verminderung in 3 Klassenräumen und einen signifikanten Anstieg in einem Klassenraum.

In der bayerischen Studie wurde eine normale Schulreinigung (zweimal pro Woche feuchtes Reinigen) mit einer verstärkten Reinigung (zweimal pro Woche Staubsaugen und

anschließendes nasses Wischen) verglichen. Es ergab sich eine signifikante Verminderung der PM_{10} -Gehalte, der bezogen auf die Wochenmittelwerte ca. 28 % betrug. Auch für die $PM_{2,5}$ -Werte ließ sich eine signifikante Reduktion erzielen. Der Einfluss der Reinigung auf die PM_{10} -Konzentrationen im Raum blieb auch dann bestehen, wenn die Aktivität der Schüler und die Außenluftwerte berücksichtigt wurden. Dies traf grundsätzlich auch auf die $PM_{2,5}$ -Gehalte zu, allerdings waren diese stark von den Außenluftgehalten abhängig.

6 Hinweis für die Praxis

Auch wenn die bisher durchgeführten Studien nicht immer einheitliche Ergebnisse geliefert haben, stellt eine ausreichende Reinigung den zweiten wichtigen Ansatzpunkt für Minderungsmaßnahmen dar. Es hat sich dabei bisher gezeigt, dass mit der derzeit üblichen Klassenraumreinigung, mit einem lediglich zweimaligen feuchten Wischen pro Woche, genau so wie mit der Mindestreinigungsfrequenz nach der DIN 77400, eine Abnahme der Feinstaubgehalte nicht erreicht werden kann. Bessere Erfolge zeigen demgegenüber eine tägliche Nassreinigung der Bodenflächen und eventuell auch die zusätzliche Benutzung eines Staubsaugers mit Feinstaubfilter (HEPA-Filter). In jedem Fall sind staubaufwirbelnde Reinigungsverfahren (z.B. Fegen der Räume) zu vermeiden. Insgesamt darf durch diese Maßnahmen allein allerdings nur eine begrenzte Reduktion der Feinstaubgehalte erwartet werden.

Eine angemessene Lüftung und Reinigung von Klassenräumen sind essentielle Grundbedingungen um die gesundheitlichen und hygienischen Voraussetzungen für die schulische Nutzung zu gewährleisten. Dies wurde von der Innenraumlufthygienekommission des Umweltbundesamtes im aktuellen „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ [10] bestätigt.

Dieser Leitfaden bündelt die Erkenntnisse von Experten aus wissenschaftlichen Einrichtungen und fachlich zuständigen Landesbehörden unter Beteiligung des Bundesumweltministeriums, des Bundesgesundheitsministeriums und des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung sowie des Umweltbundesamtes und sollte als allgemeingültige Richtlinie für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden herangezogen werden.

Als weitere Maßnahmen sollte die Reinigung nicht nur in den Klassenräumen, sondern darüber hinaus noch in den Vorräumen der Klassen und in den Fluren ausgeweitet werden, um den Effekt der Reinigung zu intensivieren. Zudem sind alle Interventionen sinnvoll, die einen Eintrag von Bodenpartikeln in die Schule reduzieren, z.B. entsprechende Bodenmatten in den Eingangsbereichen und vor den Klassenräumen. Weiterhin ist eine regelmäßige Grundreinigung vor Beginn jedes Schuljahres notwendig, bei der alle zugänglichen Oberflächen des Raumes gereinigt werden sollten. In diesem Zusammenhang ist auch auf andere Feinstaubquellen wie z.B. Vorhänge, sogenannte Kuschecken in Grundschulen oder Bastelbereiche zu achten.

7 Zusammenfassung

Nach Auswertung der LUPE I - Untersuchungsergebnisse ergeben sich hinsichtlich der Möglichkeiten die Feinstaubexposition von Schulkindern zu vermindern folgende Erkenntnisse:

- Die Untersuchungen bestätigen die sowohl gegenüber der Außenluft als auch üblicher Innenraumluft vergleichsweise hohen Feinstaubkonzentrationen in den Klassenräumen, wie sie aus den vorangegangenen Studien bekannt sind.
- Die Feinstaubbelastung (PM_{10}) zeigt eine eindeutige jahreszeitliche Abhängigkeit mit den höchsten Konzentrationen im Winter und den niedrigsten im Sommer.
- Durch eine bessere Lüftung von Klassenräumen ergibt sich eine signifikante Minderung der Feinstaubkonzentration.
- Die natürliche Lüftung ist in der Regel nur während der Sommerperiode als ausreichend anzusehen. Zu allen anderen Jahreszeiten werden die gesundheitlich-hygienischen Leitwerte der Ad-hoc-AG Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden oft deutlich überschritten.
- Eine Verminderung der Feinstaubkonzentration durch verstärkte tägliche Reinigung (feucht / nass) wurde nur in der Winterperiode sichtbar. Es konnte kein signifikanter Minderungseffekt während der anderen Jahreszeiten nachgewiesen werden.
- Für die Reinigungshäufigkeit von Klassenräumen ist somit eine jahreszeitabhängige Leistungserbringung mit staubbindender täglicher Reinigung im Winter zu empfehlen, während zu den anderen Jahreszeiten auch eine Reinigung an jedem zweiten Tag aus Sicht der Feinstaubbelastung ausreicht, wenngleich aus hygienischer Sicht auch hier eine häufigere Reinigung anzustreben wäre. Der ausdrückliche Hinweis der DIN 77400 auf eine häufigere Leistungserbringung u.a. in Abhängigkeit der Jahreszeit wird somit bestätigt.

8 Literatur

- 1 *Pope CA, Burnett RT, Thurston GD et al.* Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation* 2004; 109 (1): 71 – 77
- 2 *Samet JM, Dominici F, Currier FC et al.* Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987 – 1994. *N Engl J Med* 2000; 343 (24): 1742 – 1749
- 3 *Fromme H.* Partikuläre Belastungssituation in Innenräumen, unter besonderer Berücksichtigung von Wohninnenräumen, Gemeinschaftseinrichtungen und Gaststätten. *Gesundheitswesen* 2006; 68: 714 – 723
- 4 *Laden F, Neas LM, Dockery DW et al.* Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. *Environ Health Perspect* 2000; 108 (10): 941 – 947
- 5 *Schwarze PE, Ovrevik J, Lag M et al.* Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. *Hum Exp Toxicol* 2006; 25 (10): 559 – 579
- 6 *Fromme H, Twardella D, Dietrich S et al.* Particulate matter in the indoor air of classrooms – exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmos Environ* 2007; 41: 854 – 866
- 7 *Twardella D, Fromme H, Dietrich S et al.* Reduktion der Feinstaubbelastung in Klassenräumen durch verbesserte Reinigung: Ausmaß der Belastung und Ergebnisse einer Pilotstudie in Bayern. *Gesundheitswesen* 2009; 71: 70 – 76
- 8 *Keeler GJ, Dvonch T, Yip FY et al.* Assessment of personal and community-level exposures to particulate matter among children with asthma in Detroit, Michigan, as part of Community Action Against Asthma (CAAA). *Environ Health Perspect* 2002; 110 (Suppl 2): 173 – 181
- 9 *Singer JD.* Using SAS PROC MIXED to fit multilevel models, hierarchical models and individual growth models. *Journal of Educational and Behavioural Statistics*, 1998; 24: 323-355.
- 10 *Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) des Umweltbundesamtes.* Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden.
<http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/irk.htm>

- 11 *Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene –Kommission des Umweltbundesamtes*. Gesundheitliche Bedeutung von Feinstaub in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitsschutz, 2008; 51: 1370-1378
- 12 *Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene –Kommission des Umweltbundesamtes*. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitsschutz, 2008; 51: 1358-1369
- 13 *Lahrz T, Piloty M, Oddoy A, Fromme H*. Untersuchungen zur Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Bericht des Instituts für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen, FB Umwelt- und Gesundheitsschutz. Berlin, 2003
- 14 *Fromme H, Gabrio T, Lahrz T, Dietrich S, Sagunski H, Grams H, Link B, Twardella D*. Verhalten, Vorkommen und gesundheitliche Aspekte von Feinstäuben in Innenräumen. Materialien zur Umweltmedizin, Band 17, München, 2007
- 15 *Abt E, Suh HH, Allen G, Koutrakis P*. Characterization of indoor particle sources: a study conducted in the metropolitan Boston area. Environ Health Perspect 2000; 108: 35-44.
- 16 *Afshari A, Matson U, Ekberg LE*. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. Indoor Air 2005; 15: 141-150.
- 17 *Bake D, Moriske H-J, Süßenbach B*. Feine und ultrafeine Partikel im Innenraum. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 2004; 64: 84-87.
- 18 *Corsi RL, Siegel JA, Chiang C*. Particle resuspension during the use of vacuum cleaners on residential carpet. J Occup Environ Hyg 2008; 5: 232-238.
- 19 *Ferro AR, Kopperud RJ, Hildemann LM*. Source Strengths for Indoor Human Activities that Resuspend Particulate Matter. Environ Sci Technol 2004; 38: 1759-1764.
- 20 *Heudorf U, Neitzert V, Spark J*. Particulate matter and carbon dioxide in classrooms – the impact of cleaning and ventilation. Int J Hyg Environ Health 2009; 212: 45-55.
- 21 *Lahrz T, Piloty M, Pfeiler P, Honigmann I*. Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin. Abwehr gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch Luftschadstoffe in Berliner Schulen. Berlin, 2006

22 Long CM, Suh HH, Koutrakis P. Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors.

J Air & Waste Manage Assoc 2000; 50: 1236-1250.