

12.4 Spezifische Informationen zu einzelnen Stoffen und Stoffgruppen

U. Bagschik, Düsseldorf

J. Fauss, Mannheim

H. Fröhlich, Mannheim

H. Kleine, Sankt Augustin

H.-D. Neumann, Düsseldorf

K. Pohl, Mainz

I. Thullner, Frankfurt am Main

T. von der Heyden, Sankt Augustin

N. von Hahn, Sankt Augustin

12.4.1 Kohlendioxid

In Innenräumen stellt der Mensch durch seine Atmung in der Regel die Hauptemissionsquelle für Kohlendioxid (CO_2) dar. Selbst unter ungünstigen Bedingungen wie z. B. bei geringer Luftwechselrate werden dadurch jedoch keine toxisch relevanten CO_2 -Konzentrationen erreicht. Da die Emission von Geruchsstoffen in der Regel proportional zur CO_2 -Abgabe des Menschen ist, bildet die CO_2 -Konzentration einen brauchbaren Indikator für die Raumluftqualität, soweit nicht weitere CO_2 -Emissionsquellen oder andere Geruchsquellen vorhanden sind. Gleichzeitig ist sie auch ein Maß für die Effektivität der Raumlüftung.

Neben den in Abschnitt 12.2.2 beschriebenen Messungen mit Prüfröhrchen oder direkt anzeigenden Messgeräten kann die CO_2 -Konzentration in Innenräumen auch aus der CO_2 -Abgabe des Menschen in Abhängigkeit von der Anzahl anwesender Personen, ihren Tätigkeiten und dem Luftwechsel (Lüftungseffektivität) berechnet werden [1]. Bei leichten Tätigkeiten beträgt die CO_2 -Abgabe des Menschen ungefähr 20 000 ml/h. Mit diesem Wert kann man die maximal sich

einstellende CO_2 -Konzentration nach Gl. (1) (siehe gegenüberliegende Seite) berechnen.

Beträgt z. B. das Raumvolumen eines von zwei Personen genutzten Büros 100 m^3 und wird für dieses Büro eine natürliche Luftwechselrate λ von $0,5 \text{ h}^{-1}$ angenommen, dann beträgt die erreichbare CO_2 -Konzentration – unter Berücksichtigung einer mittleren Außenluftkonzentration an CO_2 von 400 ml/m^3 [2] – maximal 1200 ml/m^3 (siehe Gleichung 2 auf der gegenüberliegenden Seite).

Als Beurteilungsmaßstab gilt allgemein, dass eine Konzentration von

$0,1 \text{ Volumen-\% CO}_2$
(1000 ppm bzw. 1800 mg/m^3)

(*Pettenkoferzahl*, siehe z. B. [3; 4]) nicht überschritten werden sollte. Im Jahr 2008 hat die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte aus Interventionsstudien folgende gesundheitlich-hygienisch begründeten Leitwerte für die Momentankonzentration von CO_2 abgeleitet, die inzwischen auch in die ASR A3.6 eingeflossen sind [2]:

12 Chemische Einwirkungen

- Kohlendioxidkonzentration unter 1000 ppm = hygienisch unbedenklich
- Kohlendioxidkonzentration zwischen 1000 und 2000 ppm = hygienisch auffällig
- Kohlendioxidkonzentration über 2000 ppm = hygienisch inakzeptabel

Demnach soll bei Überschreitung der Momentankonzentration von 1000 ppm Kohlendioxid gelüftet werden. Bei Überschreitung eines Wertes von 2000 ppm muss gelüftet werden. Reichen die Lüftungsmaßnahmen (ggf. Einführung eines Lüftungsplans) nicht aus, um den Leitwert von 2000 ppm zu unterschreiten, so sind weitergehende organisatorische, lüftungstechnische oder bauliche Maßnahmen erforder-

lich. Hierzu zählen z. B. die Verringerung der Personenzahl im Raum oder der Einbau einer technisch geregelten Lüftung.

Kohlendioxidbelastung in Klassenräumen

Auch in Klassenräumen ist CO₂ in der Regel die bedeutendste Luftverunreinigung. Dies bestätigt eine Studie der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen mit Messungen in 111 Schulen und 379 Klassenräumen [5]. So nimmt in Gegenwart von Schülern die CO₂-Konzentration in einem Klassenraum während einer Schulstunde, in der nicht gelüftet wird, deutlich zu (Abbildung 28). Die Stoßlüftung in der Pause kann zwar die CO₂-Konzentration kurzzeitig unter den Leitwert von 1000 ppm absenken, aber schon nach wenigen Minuten mit geschlossenen Fenstern wird dieser Wert wieder überschritten.

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{n \cdot m_{\text{CO}_2}}{\lambda \cdot V_R} + x_{\text{CO}_2, \text{außen}} = \frac{n \cdot 20\,000 \frac{\text{ml}}{\text{h}}}{\lambda \cdot V_R} + x_{\text{CO}_2, \text{außen}} \quad (1)$$

mit

x_{CO_2} : CO₂-Konzentration in ml/m³

m_{CO_2} : CO₂-Emissionsrate pro Person in ml/h

λ : Luftwechselrate in h⁻¹

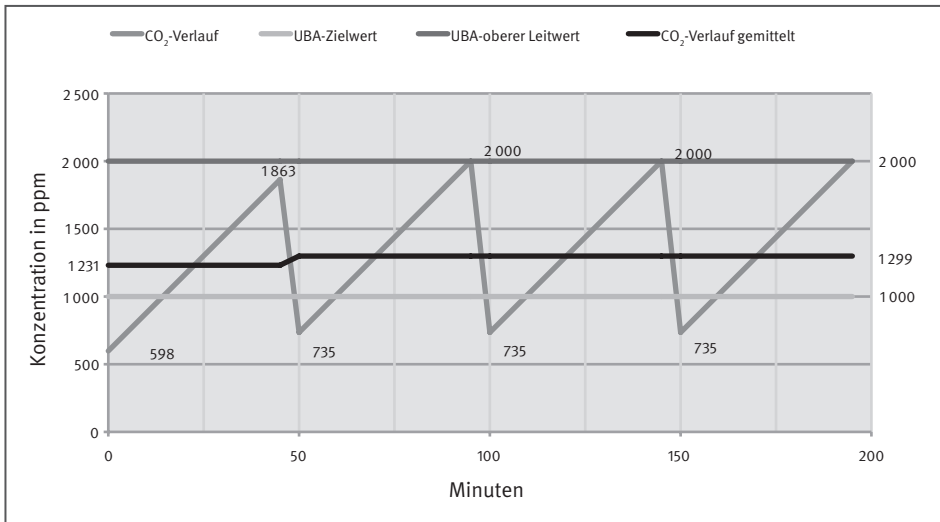
V_R : Raumvolumen in m³

$x_{\text{CO}_2, \text{außen}}$: CO₂-Außenluftkonzentration in ml/m³

n : Anzahl der Personen im Raum

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{2 \cdot 20\,000 \frac{\text{ml}}{\text{h}}}{0,5 \text{ h}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^3} + x_{\text{CO}_2, \text{außen}} = 800 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} + 400 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} = 1\,200 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

Abbildung 28:
Verlauf der mittleren CO₂-Belastung in Klassenräumen mit Stoßlüftung nach jeder Schulstunde



Erst durch ein weiteres Stoßlüften zur Hälfte der Unterrichtsstunde oder durch ständiges Lüften mit gekippten Fenstern während der Unterrichtsstunde kann der Leitwert dauerhaft eingehalten werden. Dabei ist für die Kipp Lüftung nicht unbedingt eine große Fensterfläche erforderlich. Im Winterhalbjahr reicht zum Erhalt einer hygienisch unbedenklichen Luftqualität im Mittel eine freie Fensteröffnung von ca. 1 m². Im Sommerhalbjahr sorgt eine mittlere Fensteröffnung von 1,8 m² dafür, dass die CO₂-Konzentration im Unterricht nur geringfügig ansteigt.

Auch durch mechanische Lüftungen, sei es in Form einer zentralen Lüftungs- oder Klimaanlage im Gebäude oder in Form einer raumbezogenen Lösung, lassen sich Konzentrationen von 1000 ppm CO₂ dauerhaft einstellen.

12.4.2 Ozon

Für die Belastung von Innenräumen mit Ozon ist der Eintrag aus der Außenluft über die Lüftung (z. B. geöffnete Fenster) entscheidend. Die Bildung von Ozon durch den Betrieb von Laserdruckern und -kopierern stellt heute kein Problem mehr dar (siehe Abschnitt 7.2.3).

Ozon wird in der Außenluft durch Sonneneinstrahlung und fotochemische Smogreaktionen gebildet. Über die Lüftung, insbesondere über geöffnete Fenster und Türen, kann es aus der Außenluft in Innenräume gelangen. In technischen Lüftungsanlagen dagegen wird Ozon bereits auf dem Weg zum Arbeitsbereich im Filter und in den Rohrleitungen teilweise wieder abgebaut. In Innenräumen zerfällt Ozon mit einer Halbwertszeit von ungefähr 30 Minuten

12 Chemische Einwirkungen

u. a. durch Reaktionen mit anderen flüchtigen Stoffen.

Die Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa [6] legt zum Schutz der menschlichen Gesundheit als höchsten 8-Stunden-Mittelwert eines Tages für Ozon einen Wert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fest.

Dieser darf an höchstens 25 Tagen im Jahr überschritten werden. Darüber hinaus gelten für den Ein-Stunden-Wert eine Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ab der die Bevölkerung unterrichtet werden muss, und eine Alarmschwelle von $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Besonders bei sonnigem Hochsommerwetter sind hohe Konzentrationen und damit eine Überschreitung der Beurteilungswerte nicht ausgeschlossen. Es empfiehlt sich bei entsprechenden Wetterlagen, Fenster und Türen weitgehend geschlossen zu halten, damit keine zu hohe Belastung der Innenräume mit Ozon aus der Außenluft eintritt. Dabei ist es grundsätzlich besser, für kurze Zeit stoßweise zu lüften und danach Fenster und Türen wieder zu schließen.

12.4.3 Formaldehyd

Formaldehyd ist eine Grundchemikalie, die in der chemischen Industrie als kostengünstige Ausgangssubstanz vielfältig eingesetzt wird. Sie findet u. a. Verwendung bei der Herstellung von Pheno- und Aminoplasten, die z. B. als Leim in Spanplatten, Sperrholzplatten und Holzleimplatten eingesetzt werden (siehe Abschnitt 6.4.3).

Weitere für den Innenraum relevante Formaldehydquellen sind Harnstoff-Formaldehydharz-Ortsschäume, Lacke (hier vor allem

säurehärtende Siegelacke bei Parkettböden und Möbeln), Furniere, Textilien, Teppichböden, bindemittelhaltige Fasermatten etc. Darüber hinaus ist Formaldehyd in wässrigen Zubereitungen als Desinfektions- und Konservierungsmittel enthalten und auch in Körperpflegemitteln, Putz- und Wischmitteln nachweisbar.

Im Jahre 2004 hat eine Arbeitsgruppe der Internationalen Krebsforschungsagentur (International Agency for Research on Cancer, IARC) Formaldehyd in die Stufe 1 „carcinogenic to humans“ eingestuft [7; 8]. Daraufhin schlug das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) im Frühjahr 2006 als „sichere Konzentration“ (Safe Level) im Hinblick auf die krebserzeugende Wirkung von Formaldehyd beim Menschen eine Luftkonzentration von $0,1 \text{ ppm}$ ($0,12 \text{ mg}/\text{m}^3$) vor [9]. Dem schloss sich im Herbst 2006 die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte an [10].

Die WHO schlägt einen 30-Minuten-Durchschnittswert von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($0,08 \text{ ppm}$) vor, um die Mehrheit der Bevölkerung vor sensorischen Irritationen zu schützen [11]. Empfohlen wird bei langfristiger Exposition, eine Konzentration von $0,06 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($0,05 \text{ ppm}$) nicht zu überschreiten [12].

12.4.4 Flüchtige organische Verbindungen

Die flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) lassen sich gemäß Tabelle 30 klassifizieren.

Tabelle 30:
Klassifikation von VOC in Anlehnung an die Weltgesundheitsorganisation [13]

Klassifikation	Abkürzung	Siedebereich in °C
Sehr flüchtige organische Verbindungen Very volatile organic compounds	VVOC	< 0 bis 50-100
Flüchtige organische Verbindungen Volatile organic compounds	VOC	50-100 bis 240-260
Schwer flüchtige organische Verbindungen Semivolatile organic compounds	SVOC	240-260 bis 380-400
Partikuläre Verbindungen Organic compounds associated with particulate (organic) matter	POM	> 380

Während die sehr flüchtigen und flüchtigen organischen Verbindungen nahezu ausschließlich in der Raumluft nachgewiesen werden, findet man die schwer flüchtigen organischen Verbindungen wie Biozide und Phthalate sowie die partikelgebundenen Stoffe (POM) zu überwiegenden Anteilen im sedimentierten Hausstaub und an Schwebstaub gebunden. Eine adäquate Beurteilungsgrundlage kann hierbei nur eine Untersuchung des abgelagerten Staubs ergeben.

Die luftgetragenen VOC sind durch eine außerordentliche Vielzahl von Stoffen charakterisiert, die sich in folgende Substanzklassen unterteilen lassen:

- aliphatische Kohlenwasserstoffe
- aromatische Kohlenwasserstoffe
- Alkohole
- Ketone
- Ester, vorwiegend Acetate und Acrylate

- Glykolverbindungen, sowohl Glykolester als auch Glykolether
- Terpene
- Siloxane (D3- bis D6-Siloxan)

Auch Aldehyde zählen zu den VOC. Aufgrund ihrer separaten Analytik werden sie jedoch häufig gesondert erwähnt.

In Innenräumen gibt es eine Vielzahl potenzieller Quellen für flüchtige organische Verbindungen. Diese lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- gebäudebezogene Quellen
- auf die menschliche Aktivität bezogene Quellen und
- außenluftbezogene Quellen

Als gebäudebezogene Quellen für VOC kommen nahezu alle Materialien infrage, die in modernen Bauten Verwendung finden. Das Stoffspektrum spiegelt dabei Veränderungen

12 Chemische Einwirkungen

in der Zusammensetzung der verwendeten Materialien wider. So werden in Zukunft vermehrt Dicarbonsäuredimethylester (DBE) nachgewiesen werden können – eine Substanzgruppe, die als Ersatz für herkömmliche Lösungsmittel fungiert. Auch bisher emissionsarme Materialien wie Bausteine, Mörtel und andere Konstruktionselemente enthalten heute kunststoff- und lösungsmittelhaltige Zuschlagstoffe. Weitere Quellen können Wandverkleidungen, Bodenbeläge, Isolationsmaterialien, Dichtmassen, Möbel, Farben, Lacke und Lösungsmittel für den Innenausbau sein (siehe Abschnitt 6.4).

Durch menschliche Aktivitäten werden VOC in Form von Reinigungs- und Pflegemitteln sowie durch Kosmetika, Desinfektionsmittel, Pflanzenschutzmittel und Tabakrauch eingebracht. Auch ein Eintrag von VOC über die Außenluft ist möglich (z. B. Straßenverkehr).

Ermittlung

Bei der Ermittlung möglicher VOC-Quellen ist zunächst zu prüfen, ob in jüngerer Zeit Renovierungsarbeiten durchgeführt oder neue Möbel, Geräte etc. aufgestellt wurden (siehe hierzu Ermittlungsbogen G2 in Anhang III). In solchen Fällen gelingt es häufig, durch ausgedehntes Lüften in Kombination mit einem Ausheizen der Räume die VOC-Konzentrationen zu senken. Auch die Verwendung spezieller Reinigungsmittel oder Raumdüfte muss als Quelle überprüft werden. Hinweise auf Einträge von außen enthält der Ermittlungsbogen G2 ebenfalls, in dem u. a. auf die Lage des Gebäudes eingegangen wird.

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Innenraumluftqualität ist die Summe der VOC im Siedebereich 50 bis 260 °C (siehe

Tabelle 30), die als TVOC (total volatile organic compounds) bezeichnet wird. Der Siedebereich umfasst weitestgehend die Stoffe, die analytisch auf einer unpolaren Säule im Elutionsbereich zwischen n-Hexan und n-Hexadecan detektierbar sind [14].

Obwohl gesicherte Dosis-Wirkungs-Beziehungen fehlen und TVOC-Konzentrationen sich nicht als alleiniges Kriterium für eine gesundheitliche Bewertung der Innenraumluftqualität eignen, lassen sich dennoch anhand der TVOC-Konzentrationen Beeinträchtigungen durch VOC in der Innenraumluft bewerten. So ist beispielsweise festzustellen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Reizwirkungen und Geruchswahrnehmungen mit steigender TVOC-Konzentration zunimmt. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte empfiehlt, für die Beurteilung der TVOC-Konzentration das fünfstufige Konzept von *Seifert* aus dem Jahre 1999 heranzuziehen (siehe Tabelle 31) [14]. In der Regel muss im Rahmen der VOC-Bewertung Folgendes geklärt werden:

- Liegen Richtwertüberschreitungen vor (siehe hierzu Abschnitt 12.3.1)?
- Liegen auffällige Referenzwertüberschreitungen vor (siehe hierzu Abschnitt 12.3.3)?
- Sind die raumklimatischen Bedingungen (Luftwechsel, Temperatur, Luftfeuchte) einwandfrei (siehe hierzu Kapitel 9)?

In Anhang V findet sich eine Tabelle mit möglichen Quellen für Einzelstoffe.

Tabelle 31:
Hygienische Bewertung von TVOC-Werten und daraus resultierende Empfehlungen für Maßnahmen [14]

Stufe	Konzentration in mg/m ³	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
1	≤ 0,3	Hygienisch unbedenklich in der Regel keine Beschwerden	Keine weiteren Maßnahmen
2	> 0,3 bis 1	Hygienisch noch unbedenklich, soweit keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe oder Stoffgruppen vorliegen. In Einzelfällen Beschwerden oder Geruchswahrnehmungen, z. B. nach kleineren Renovierungsmaßnahmen oder Neumöblierungen in den letzten Wochen	Ausreichend Lüften besonders nach Renovierungsarbeiten VOC-Quellen ermitteln (z. B. Begehung des Raums), Verwendung von Putz- und Reinigungsmitteln überprüfen, Nachmessungen zur Kontrolle von Richtwertüberschreitungen unter Nutzungsbedingungen
3	> 1 bis 3	Hygienisch auffällig Nutzung bei Räumen, die regelmäßig genutzt werden, nur befristet akzeptabel (< 12 Monate) Innerhalb von ca. sechs Monaten sollte die TVOC-Konzentration deutlich unter den anfangs gemessenen TVOC-Wert abgesenkt werden. Fälle mit Beschwerden oder Geruchswahrnehmungen, z. B. nach größeren Renovierungsarbeiten	Richtwertüberschreitungen umgehend durch Nachmessung unter Nutzungsbedingungen kontrollieren Auffällige Referenzwertüberschreitungen auf gesundheitliche Relevanz prüfen In jedem Fall: Quellensuche durchführen und Lüftungsverhalten überprüfen: intensiv lüften und ggf. Nutzungs- und Lüftungsbedingungen festlegen Kontrollmessung bzw. Nachmessung nach ca. einem Monat empfohlen (unter Nutzungsbedingungen)
4	> 3 bis 10	Hygienisch bedenklich Nutzung bei Räumen, die regelmäßig genutzt werden, nur befristet akzeptabel (< 1 Monat) Die TVOC-Konzentration sollte innerhalb eines Monats unter 3 mg/m ³ abgesenkt werden. Fälle mit Häufung von Beschwerden oder Geruchswahrnehmungen, z. B. nach größeren Renovierungsarbeiten	Richtwertüberschreitungen umgehend durch Nachmessung unter Nutzungsbedingungen kontrollieren Auffällige Referenzwertüberschreitungen auf gesundheitliche Relevanz prüfen. Toxikologische Bewertung von Einzelstoffen oder Stoffgruppen erforderlich In jedem Fall: Quellensuche durchführen und intensiv lüften und ggf. Nutzungs- und Lüftungsbedingungen festlegen und geeignete Minimierungsmaßnahmen veranlassen. Ein ggf. notwendiger Aufenthalt ist nur mit zeitlicher Beschränkung pro Tag über einen vom Gesundheitsamt vorzugebenden maximalen Zeitraum (pro Tag stundenweise/zeitlich befristet) tolerabel.

12 Chemische Einwirkungen

Stufe	Konzentration in mg/m ³	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
			<p>Kontrollmessung bzw. Nachmessung nach ca. einem Monat empfohlen (unter Nutzungsbedingungen) Liegt nach einem Monat trotz der beschriebenen Bemühungen die TVOC-Konzentration weiterhin über 3 mg/m³, so sind adäquate Sanierungsmaßnahmen in die weitere Planung aufzunehmen.</p>
5	> 10	<p>Hygienisch inakzeptabel. Raumnutzung möglichst vermeiden. Ein Aufenthalt ist allenfalls pro Tag stundenweise/zeitlich befristet zulässig. Bei Werten oberhalb von 25 mg/m³ ist eine Raumnutzung zu unterlassen. Die TVOC-Konzentration sollte innerhalb eines Monats unter 3 mg/m³ abgesenkt werden. In der Regel Beschwerden und Geruchswahrnehmungen, z. B. nach Fehlanwendungen, Unfällen.</p>	<p>Richtwertüberschreitungen umgehend durch Nachmessung unter Nutzungsbedingungen kontrollieren. Auffällige Referenzwertüberschreitungen auf gesundheitliche Relevanz prüfen. Toxikologische Bewertung von Einzelstoffen oder Stoffgruppen erforderlich. In jedem Fall: Quellensuche durchführen und intensiv lüften sowie Nutzungs- und Lüftungsbedingungen festlegen und geeignete Minimierungsmaßnahmen veranlassen. Ein ggf. notwendiger Aufenthalt ist nur mit zeitlicher Beschränkung pro Tag über einen vom Gesundheitsamt vorzugebenden maximalen Zeitraum (pro Tag stundenweise/zeitlich befristet) tolerabel. Kontrollmessung bzw. Nachmessung nach ca. einem Monat empfohlen (unter Nutzungsbedingungen). Wird durch Minimierungsmaßnahmen 10 mg/m³ im betrachteten Zeitraum zwar unterschritten, eine Konzentration von 3 mg/m³ allerdings weiterhin überschritten, gelten die Maßnahmeempfehlungen wie unter Stufe 4. Liegt nach einem Monat trotz der beschriebenen Bemühungen die TVOC-Konzentration weiterhin über 10 mg/m³, so sollte die Raumnutzung unterbleiben, und es sind adäquate Sanierungsmaßnahmen zu veranlassen.</p>

12.4.5 Quecksilber in Kompaktleuchtstofflampen (Energiesparlampen) und Leuchtstoffröhren

Quecksilber ist in geringen Mengen in Kompaktleuchtstofflampen (Energiesparlampen) und Leuchtstoffröhren enthalten. Der Einsatz von Quecksilber ist für den Beleuchtungsprozess beim Betrieb dieser Leuchtmittel notwendig. Die in Leuchtmitteln eingesetzte Menge an Quecksilber ist in der Europäischen Union durch die Richtlinie 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten [15] begrenzt und gibt den Herstellern eine weitere Reduzierung vor. Seit Januar 2012 muss der Hersteller den Quecksilbergehalt im Leuchtmittel auf der Verpackung vermerken.

Während des bestimmungsgemäßen Gebrauchs von Leuchtmitteln wird kein Quecksilber freigesetzt. Beim Wechsel oder bei sonstigen Handhabungen von Energiesparlampen oder Leuchtstoffröhren, z. B. beim Sammeln von Altlampen, besteht jedoch die Gefahr, dass Leuchtmittel beschädigt werden. Kommt es zum Bruch von Leuchtmitteln, können Quecksilberdämpfe freigesetzt werden [16].

Messungen des Umweltbundesamtes an neuen auf dem Markt befindlichen Energiesparlampen haben gezeigt, dass nach dem Zerbrechen einer Lampe, der vollständigen Entsorgung der Bruchstücke und anschließendem sofortigem Lüften des Raumes keine nennenswerten Quecksilberkonzentrationen auftreten [17]. Folglich ist nicht mit Gesundheitsrisiken durch Quecksilber zu rechnen.

Um eine mögliche Quecksilberexposition so niedrig wie möglich zu halten, ist darauf zu achten, dass die zu beschaffenden Leuchtmittel einen möglichst niedrigen Quecksilbergehalt haben. Defekte Leuchtmittel sollten nicht in heißem Zustand ausgewechselt werden. Beim Bruch heißer Leuchtmittel ist die Quecksilberdampffreisetzung größer als im kalten Zustand. Altlampen dürfen nicht im Hausmüll, sondern müssen über eine geeignete Sammelstelle (Wertstoffhof, Einzelhandel) möglichst zerstörungsfrei entsorgt werden.

12.4.6 Stäube

Bis zu 50 % der im Innenraum auftretenden Stäube stammen aus der Außenluft. Daneben kommen in genutzten Räumen als Quellen für Stäube u. a. Anhaftungen an Schuhen und Kleidung der Raumnutzer, mechanisches Auf- und Verwirbeln von sedimentierten Partikeln (z. B. durch Staubsaugen, Handhabung von Papier) sowie der Einsatz von Arbeitsmitteln infrage. In Abhängigkeit von der Nutzung variieren die Staubkonzentration und -zusammensetzung in Innenräumen stark [18]. So geben starke Staubablagerungen bei sonst üblichen Reinigungsgewohnheiten oder der Umgang mit großen Papiermengen wie z. B. in Archiven und bei der Vervielfältigung Hinweise auf eine erhöhte Staubkonzentration in der Raumluft.

Von Ausnahmen abgesehen haben Stäube keine schädigende oder belästigende Wirkung, sofern die Innenraumluftkonzentration in der Größenordnung der Außenluftkonzentration liegt. Zu berücksichtigen ist allerdings eine mögliche Anlagerung von schwer flüchtigen organischen Verbindungen (SVOC),

12 Chemische Einwirkungen

Bioziden, PAK, Weichmachern u. a. an die Stäube, und eine damit ggf. verbundene belästigende, reizende oder gesundheits-schädigende Wirkung [19].

Zur Beurteilung möglicher Gesundheits-gefahren durch Staubbelastungen zieht man von der Partikelgröße abhängige Staubfraktionen heran. Die im Arbeitsschutz üblicher-weise verwendeten Fraktionen „einatem-barer Staub“ (E-Fraktion) und „lungengän-giger Staub“ (Alveolarfraktion, A-Fraktion) stimmen nicht exakt überein mit den im Bereich des Umweltschutzes gebräuchlichen Fraktionen PM_{10} (particulate matter) und $PM_{2,5}$. Darunter versteht man in erster Nähe-rung die Summe aller Schwebstaubpartikeln mit einem Durchmesser von bis zu 10 und bis zu 2,5 μm [20].

Für Innenraumarbeitsplätze wird empfohlen, zur Beurteilung von Staubbelastungen die im Umweltschutz definierten Fraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} heranzuziehen, da die Konzentra-tionen hauptsächlich durch die Außenluft bedingt sind und hierfür entsprechende Beurteilungswerte zur Verfügung stehen. So schlägt die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innen-raumrichtwerte vor, bei Abwesenheit von Verbrennungsprozessen (z. B. Tabakrauch) als Beurteilungswert für Feinstaub der Frak-tion $PM_{2,5}$ den von der WHO als Tageswert festgelegten Wert von 25 $\mu g/m^3$ heranzuzie-hen [18].

Für die Fraktion PM_{10} schlägt die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte dagegen keinen Bewertungsmaßstab vor. Sie begrün-det dies damit, dass für diese Fraktion die Konzentrationen in Innenräumen deutlich über denjenigen in der Außenluft liegen. Dies bedeutet, dass die Hauptquellen für

diese Partikelfraktion im Innenraum zu suchen sind. Da die Zusammensetzung dieser Fraktion nicht näher bekannt ist, kann keine abschließende Bewertung erfolgen [18].

Generell sollte darauf geachtet werden, dass die Staubkonzentration bezogen auf die PM_{10} -Fraktion nicht über dem EU-Staubgrenz-wert für die Luft der Troposphäre von 50 $\mu g/m^3$ liegt [21].

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumricht-werte empfiehlt zur Reduzierung der Staub-belastung in Innenräumen, diese ausrei-chend zu lüften. Außerdem sollten bekannte Feinstaubquellen konsequent aufgespürt und minimiert werden [18].

Faserstäube

Unter Wirkungsaspekten sind faserförmige Stäube gesondert zu betrachten. Dies sind in Innenräumen vornehmlich textile Fasern, z. B. von Raumtextilien oder Kleidung, sowie natürliche oder künstliche Mineralfasern, z. B. aus thermischen Isolierungen. Asbest-fasern haben heute in Innenräumen keine Bedeutung mehr, sofern die Vorgaben zur Bewertung der Dringlichkeit von Sanierungs-maßnahmen entsprechend der Asbestricht-linie [22] und zum Schutz der Beschäftigten sowie Dritter im Zusammenhang mit Sanie-rungsmaßnahmen entsprechend TRGS 519 [23] beachtet werden.

Faserförmige Stäube gelten dann als gesund-heitsgefährlich, wenn sie einatembar und „biobeständig“ sind. Fasern gelten nach einer WHO-Definition als einatembar bei einer Länge $> 5 \mu m$, einem Durchmesser $< 3 \mu m$ und einem Verhältnis Länge zu Durch-

messer > 3 : 1 (WHO-Fasern). Die Biobeständigkeit ist abhängig vom Fasermaterial: Seit 1998 dürfen Künstliche Mineralfasern (KMF), wie sie in Mineralwolle-Dämmstoffen zum Einsatz kommen, nur verkauft werden, wenn die Halbwertszeit ihrer Biolöslichkeit (Abbau im Körper durch körpereigene Substanzen) unter 40 Tagen liegt.

Faserstaubexpositionen durch Mineralwolle-Dämmstoffe sind möglich, wenn diese unmittelbar mit der Raumluft in Verbindung stehen (offene Systeme wie z. B. Schallschluckplatten auf Lamellen) und insbesondere durch Erschütterungen oder höhere Luftgeschwindigkeiten beaufschlagt werden. Nur dann ist ggf. auch eine messtechnische Abklärung der Situation sinnvoll.

Die gelegentlich diskutierte irritative Wirkung von KMF ist mit größeren Fasern als WHO-Fasern verbunden und kommt nur dann in Betracht, wenn Mineralwolle-Dämmstoffe nicht ordnungsgemäß eingebaut wurden oder die Kaschierung altersbedingt Beschädigungen aufweist und sich Faserstäube sichtbar ablagern. Nach Walker et al. [24] besteht aus gesundheitlicher Sicht kein Grund, sachgerecht eingebaute alte Mineralwolle-Dämmstoffe (KMF) zu entfernen.

Eine deutlich höhere Gefährdung geht von Asbestfaserstäuben aus. Besteht in dem betroffenen Gebäude der Verdacht auf Freisetzung von Asbestfasern, so sind die weiteren Ermittlungen auf der Basis der bekannten Vorgehensweisen, wie sie z. B. in [25] ausführlich beschrieben sind, durchzuführen und ein ggf. notwendiges Sanierungskonzept ist unter Berücksichtigung der „Asbest-Richtlinie“ [22] zu erstellen.

Tabakrauch in Innenraumarbeitsplätzen

Tabakrauch in der Raumluft ist als krebs-erzeugend beim Menschen eingestuft. Arbeitnehmer haben einen Rechtsanspruch auf einen rauchfreien Arbeitsplatz. In § 5 Absatz 1 der Arbeitsstättenverordnung [26] heißt es:

„Der Arbeitgeber hat die erforderlichen Maßnahmen zu treffen, damit die nicht-rauchenden Beschäftigten in Arbeitsstätten wirksam vor den Gesundheitsgefahren durch Tabakrauch geschützt sind.“

Um den vom Gesetzgeber geforderten Nicht-raucherschutz umzusetzen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Der wirksamste Nicht-raucherschutz ist ein allgemeines Rauchverbot im Gebäude. Nach Umsetzung des Rauchverbotes kann Tabakrauch als Quelle bei der Ermittlung der Luftverunreinigung in Innenräumen vernachlässigt werden.

Zur Belastung mit Tabakrauch an Arbeitsplätzen haben die UV-Träger 2011 einen Report veröffentlicht, in dem Expositionssituationen an Innenraumarbeitsplätzen ausführlich behandelt sind [27].

12.4.7 Phthalate

Phthalate werden nach wie vor in großem Maßstab hergestellt. So beträgt ihre jährliche Produktion in Westeuropa derzeit etwa eine Million Tonnen, wobei ca. 90 % als Weichmacher bei der PVC-Herstellung eingesetzt werden [28]. Im Innenraum können sie in kunststoffhaltigen Bodenbelägen, als Zusatz- oder Hilfsstoffe auch in Baumaterialien wie Beton, Beschichtungen oder Dichtungsmassen sowie in Kondensatoren,

12 Chemische Einwirkungen

Tapeten oder auch Textilien vorkommen. Aufgrund ihrer Eigenschaften als Lösungsvermittler sind Phthalate ferner in Farben, Lacken, Klebstoffen sowie in Kosmetika und Körperpflegeprodukten enthalten.

Sind im Rahmen der VOC-Analytik die Gehalte von Butanol und/oder 2-Ethylhexanol ungewöhnlich hoch, kann dies ein Hinweis auf erhöhte Phthalatkonzentrationen sein, da erstere Stoffe aus den Weichmachern Di-n-butylphthalat (DBP) und Di(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP) durch Hydrolyse freigesetzt werden können.

Im Innenraum dominiert üblicherweise das DEHP, das im Rahmen diverser Studien in der Luft von Wohnungen im unteren $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Bereich gefunden wurde [28]. Im Hausstaub von Wohnungen werden üblicherweise Summengenhalte an Phthalaten von bis zu 1000 mg/kg nachgewiesen, wobei neben der Hauptkomponente DEHP verstärkt längerkettige „Ersatz-Phthalate“ wie z. B. Diisononylphthalat vertreten sind [29].

Phthalate als Weichmacher können aufgrund ihrer hormonellen und reproduktionstoxischen Eigenschaften insbesondere ein Problem im Staub von Kindertagesstätten darstellen. So ist dessen durchschnittliche Phthalatbelastung gegenüber dem Wohnungstaub um mehr als das Dreifache erhöht [30]. Quellen sind meist Einrichtungsgegenstände aus Weich-Polyvinylchlorid (PVC), etwa PVC-Fußböden, Vinyltapeten, Turnmatten, Tischdecken aus Plastik oder Möbelpolster aus Kunstleder, wohingegen z. B. die Verwendung der bisher üblichen Phthalate in Kinderspielzeug bereits seit längerer Zeit verboten ist.

Zur Senkung der Phthalatkonzentration hat das Umweltbundesamt (UBA) den Kindertagesstätten empfohlen, auf Weich-PVC zu verzichten. Stattdessen sollten Kindertagesstätten und auch Eltern auf Produkte setzen, die keine der als „besorgniserregend“ gelisteten Weichmacher enthalten [31]. Händler und Vertrieber sind dabei verpflichtet, den Konsumenten auf Nachfrage Auskunft zu erteilen. Eltern und Kitas sollten dieses Recht nutzen. Das UBA hat ein Musterschreiben vorbereitet, mit dem man gezielt beim Handel nachfragen kann [32].

12.4.8 Insektizide

Insektizide, also Mittel zur Bekämpfung von Schadinsekten, kommen zwar vorrangig in der Land- und Forstwirtschaft zum Einsatz, sie werden in großem Maße jedoch auch in Innenräumen für folgende Zwecke eingesetzt:

- als Holz- und Textilschutzmittel (z. B. Permethrin in Wollteppichen)
- zum Schutz vor Stechmücken (Elektroverdampfer, Sprays)
- gegen Schädlingsbefall an Pflanzen
- zur Therapie parasitärer Hauterkrankungen bei Mensch und Tier sowie
- zur Entseuchung bei Schädlingsbefall (z. B. Kakerlaken, Silberfischchen)

Folgende Substanzklassen spielen derzeit bei der Anwendung im Innenraum eine Rolle:

- Pyrethroide

Mehr als die Hälfte aller im Innenraum ausgebrachten Insektizide enthalten Pyrethroide als Wirkstoffe. Sie werden u. a. unter den Namen Permethrin, Cypermethrin, Cyfluthrin, Deltamethrin, Allethrin oder Tetramethrin geführt. Ihre Wirkung auf den Menschen wird in letzter Zeit immer wieder diskutiert. Zielorgan für Pyrethroidwirkungen ist – bei Insekten wie bei Warmblütern – das Nervensystem. Beim Menschen können infolge unsachgemäßer Handhabung akute Vergiftungen auftreten, wobei auch eine Penetration der Stoffe durch die Haut diskutiert wird. Das chronisch-neurotoxische Potenzial wird eher als gering eingeschätzt. Im Gegensatz zum Naturstoffgemisch Pyrethrum sind die Pyrethroide aufgrund ihres Absorptionsverhaltens, ihres niedrigen Dampfdrucks und ihrer hohen Fotostabilität sehr persistent, sodass belastete Innenräume unter Umständen dekontaminiert werden müssen [33].

- Phosphorsäureester

Eine weitere, weit verbreitete Klasse von Insektiziden sind die Phosphorsäureester – auch Organophosphate genannt. Die in Innenräumen dominierenden Vertreter sind Dichlorvos, Chlorpyrifos und Diazinon. Sie sind unter anderem in vielen haushaltsüblichen Insektiziden enthalten, die meist versprüht oder als Pulver ausgebracht werden. Weit verbreitet ist Dichlorvos als Inhaltsstoff von Insektenstrips, da sich diese Substanz infolge ihres relativ

hohen Dampfdrucks gleichmäßig im Raum verteilt. Dieser Wirkstoff wurde mittlerweile aufgrund neuerer Erkenntnisse zu seinen Stoffeigenschaften von der Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe gestrichen. Alle Phosphorsäureester zeichnen sich durch eine hohe akute Warmblütertoxizität aus. Angriffspunkt ist wie bei den Pyrethroiden das Nervensystem, jedoch erfolgt hier eine Hemmung wichtiger, an der Muskelsteuerung beteiligter Enzyme. Unter anderem wird auch der Abbau eines pyrethroidspaltenden Enzyms gehemmt, was zu einer Wirkungsverstärkung führt, wenn Phosphorsäureester zusammen mit Pyrethroiden angewendet werden.

- Carbamate

Carbamate spielen in Insektizidprodukten außerhalb des Agrarbereichs eher eine untergeordnete Rolle. Ihr Wirkmechanismus gleicht demjenigen der Organophosphate, wenn auch in einer abgeschwächten Ausprägung. Als Hauptvertreter ist Propoxur zu nennen, das meist in Kombination mit Wirkstoffen aus den beiden anderen Kategorien zur Anwendung gelangt.

Allen Insektiziden ist gemeinsam, dass sie auch längere Zeit nach ihrer Ausbringung durch unterschiedliche Prozesse wie Verdampfung, Desorption von Oberflächen oder staubgebunden in die Innenraumluft abgegeben werden. Die Belastungsdauer variiert unter Praxisbedingungen von wenigen Tagen (z. B. Pyrethrum) bis zu mehreren Wochen (Dichlorvos) und Monaten oder länger (Deltamethrin, Permethrin).

12 Chemische Einwirkungen

Da sich viele Insektizide im Staub anreichern, kann die Analytik von abgelagertem Staub wichtige Hinweise auf die im Innenraum ausgebrachten Stoffe und Aufwandmengen liefern. So werden zur Analyse von Pyrethroiden in Innenräumen Luft-, Schwebstaub-, Hausstaub- und Wischproben genommen.

Für Luftproben sind spezielle Filterköpfe aus Polyurethanschaum geeignet, wobei Schwebstaub auf einem vorgeschalteten Glasfaserfilter abgetrennt wird. Hausstaub wird mit konventionellen Staubsaugern gesammelt; zur Untersuchung gelangen dabei ausgewählte Siebfraktionen mit einer oberen Korngröße von 2 mm oder 63 µm. Bei Wischproben wird eine definierte Fläche mithilfe eines Lösungsmittelhaltigen Wischmaterials (meist Watte) abgewischt.

12.4.9 Pentachlorphenol (PCP) und Lindan als Holzschutzmittel

Chemische Holzschutzmittel dienen mit ihren bioziden Wirkstoffen dem präventiven Holzschutz. Dabei unterscheidet man zwischen Fungiziden gegen Holz zerstörende und Holz verfärbende Pilze sowie Insektiziden gegen Holz zerstörende Insekten. Von besonderer Bedeutung für die Luftqualität in Innenräumen, insbesondere aufgrund des Umfangs ihrer Anwendung, ihrer toxischen Wirkung und des Emissionsverhaltens, sind die Holzschutzmittel Pentachlorphenol (PCP) und Lindan.

Pentachlorphenol

PCP wurde aufgrund seines breiten Wirkungsspektrums zur Bekämpfung von Bakterien, Pilzen, Hausschwamm, Algen, Schnecken und Insekten eingesetzt. Bei

den Holzschutzmitteln stand es als Fungizid im Vordergrund. Darüber hinaus wurde PCP in der Textil- und Lederindustrie verwendet, z. B. für Markisen und Zeltstoffe. Seit Ende der 1960er-Jahre bis 1978 war es für den großflächigen Innenanstrich zugelassen. Dabei kam fast ausschließlich technisches, mit Dioxinen und Furanen erheblich verunreinigtes PCP zur Anwendung. Die Verunreinigungen betragen bis zu 0,3 %.

In den alten Bundesländern Deutschlands wurde, nachdem die Anwendung in Innenräumen bereits 1986 untersagt worden war, die Produktion von PCP 1989 verboten [34].

Lindan

Die gleiche Bedeutung wie PCP unter den Fungiziden hatte Lindan unter den insektiziden Holzschutzmitteln. Seit 1983 besteht Lindan zu mindestens 99 % aus dem insektizid wirksamen γ -Hexachlorcyclohexan. Es war das am meisten eingesetzte Insektizid im chemischen Holzschutz, wurde mittlerweile aber weitgehend durch Ersatzstoffe wie Pyrethroide (siehe Abschnitt 12.4.8) verdrängt.

Lindan wurde meist mit dem Wirkstoff PCP (siehe oben) oder auch DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan) kombiniert. Das Gemisch aus Lindan und DDT wurde in der ehemaligen DDR unter dem Namen „Hylotox 59“ bis 1988 insbesondere auf Dachböden und z. T. auch in Innenräumen eingesetzt. Restbestände an Hylotoxpräparaten durften noch bis Ende Juni 1991 verbraucht werden. Lindan darf mittlerweile EU-weit seit September 2006 in Innenräumen nicht mehr eingesetzt werden [35].

Da die Wirkstoffe der Holzschutzmittel über viele Jahre aus den behandelten Materialien freigesetzt werden, sind diese ebenso wie ein Großteil der unter 12.4.8 beschriebenen Insektizide in vielen Innenräumen nachweisbar. Zielführend sind hierbei neben Luftprobenahmen auch Untersuchungen der behandelten Materialien und des Hausstaubs.

Ermittlung

Um die Belastung durch Holzschutzmittel zu ermitteln, sind zunächst Zeitpunkt, Art und Menge der Verwendung des Holzschutzmittels festzustellen. In Anlehnung an die PCP-Richtlinie [36] wird dann wie folgt verfahren:

- Ist nach der Ermittlung die Verwendung eines PCP-haltigen Holzschutzmittels auszuschließen, sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.
- Bei begründetem Verdacht auf Verwendung von PCP-haltigen Holzschutzmitteln wird in Abweichung von der PCP-Richtlinie zunächst der Quotient aus der behandelten Holzoberfläche und dem Raumvolumen bestimmt. Weitere Schritte sind nur dann erforderlich, wenn dieser Quotient $> 0,2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ist.
- Bei Überschreitung des Quotienten ist eine Staubanalyse von Frischstaub oder Altstaub erforderlich. Der zur Staubanalyse gesammelte sogenannte Frischstaub, der ca. eine Woche alt ist, wird mit Staubsaugern aufgenommen. Altstaub, d. h., länger abgelagerter Staub, wie er sich z. B. hinter Verkleidungen u. Ä. befinden kann, wird lediglich passiv gesammelt, z. B. mit Pinsel und Spatel.

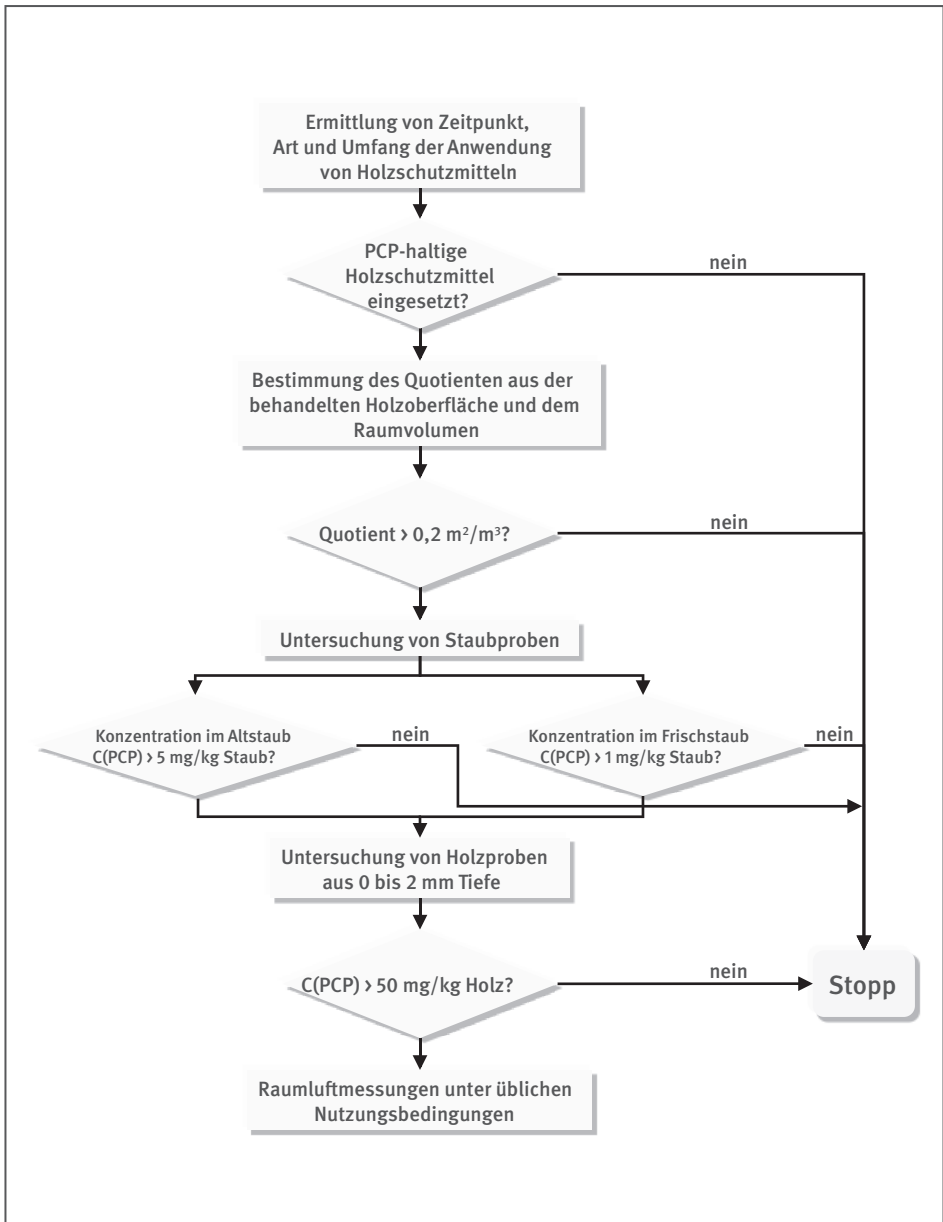
- Ergeben sich Konzentrationen von mehr als 1 mg PCP/kg Frischstaub oder mehr als 5 mg PCP/kg Altstaub, entnimmt man im nächsten Schritt Materialproben aus 0 bis 2 mm Tiefe des in Betracht kommenden Holzes. Bei den früher üblichen Verfahren des Holzschutzes war PCP im Wesentlichen nur im Randbereich des Holzes zu finden.
- Ergibt sich hierbei ein Wert von mehr als 50 mg PCP/kg Holz, so ist das Jahresmittel der Raumluftbelastung zu ermitteln. Eine Sanierung wird nach der PCP-Richtlinie dann für erforderlich gehalten, wenn die Konzentration im Jahresmittel mehr als $1 \mu\text{g PCP/m}^3$ Luft beträgt.

Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 29 nochmals dargestellt. Ein analoges Vorgehen kann auch für Lindan erfolgen.

Für den Sonderfall, dass sich Personen über einen längeren Zeitraum regelmäßig mehr als acht Stunden am Tag in Innenräumen aufhalten, in denen nutzungsbedingt auch Expositionen über Staub und Lebensmittel etc. zu erwarten sind – z. B. Kindertagesstätten oder Heime –, ist weiter zu prüfen, ob die im Jahresmittel zu erwartende Raumluftbelastung über dem Sanierungszielwert von $0,1 \mu\text{g PCP/m}^3$ Luft liegt [37]. Bei Einhaltung dieses Wertes ist nicht von einer Gesundheitsgefährdung auszugehen. Bei Raumluftbelastungen zwischen $0,1$ und $1,0 \mu\text{g PCP/m}^3$ Luft sind Blut- und Urinuntersuchungen zur Entscheidung heranzuziehen [37]. Zur weiteren Vorgehensweise sei auf die PCP-Richtlinie [36] verwiesen.

12 Chemische Einwirkungen

Abbildung 29:
Ablaufschema zur Ermittlung von PCP-Belastungen durch Holzschutzmittel im Innenraum
(in Anlehnung an die PCP-Richtlinie [36])



12.4.10 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Seit etwa 1950 wurden PCB außer in Kondensatoren von Leuchtstoffleuchten und anderen geschlossenen Anwendungen in großem Umfang auch als Weichmacher in einer Reihe offener Anwendungen eingesetzt. Eine solche offene Anwendung von PCB ist insbesondere bei Gebäuden zu befürchten, die bis zum Ende der 1970er-Jahre erbaut wurden. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist eine offene Anwendung von PCB bei Gebäuden, die nach 1980 erbaut wurden, nicht zu erwarten.

Offen angewendete PCB können insbesondere in dauerelastischen Fugendichtungsmassen enthalten sein als

- Gebäudetrennfugen,
- Bewegungsfugen zwischen Betonfertigteilelementen,
- Anschlussfugen (Fenster, Türzargen),
- Glasanschlussfugen an Fenstern,
- Fugen im Sanitärbereich (selten).

Darüber hinaus können

- Anstrichstoffe,
- Klebstoffe,
- Deckenplatten (als Weichmacher oder Flammenschutzmittel),
- Kunststoffe und
- Kabelummantelungen

PCB enthalten.

Eine der häufigsten Anwendungen in diesem Bereich war die Verwendung als Weichmacher in Fugendichtungsmassen auf der Basis eines Polysulfidkunstharzes. Als Weichmacher wurden Produkte verwendet, die 30 bis 60 Gew.-% Chlor enthielten. Diese Weichmacher wurden z. B. unter den Handelsnamen Clophen, Arodor, Kanechlor und Fenchlor in den Verkehr gebracht.

Die bis etwa 1975 in offenen Anwendungen eingesetzten PCB-haltigen Produkte können bis heute zu PCB-Raumluftbelastungen führen, deren Höhe von der Art der PCB, von deren Menge im jeweiligen Produkt, von der Art des PCB-kontaminierten Materials, der Menge und Beschaffenheit PCB-haltiger Produkte im Raum, den Klimabedingungen des Raumes, den Oberflächentemperaturen der Bauten und den Witterungsbedingungen abhängt. Im Laufe der Zeit können in solchen Räumen auch nicht PCB-haltige Bauteile oder Gegenstände durch PCB-haltige Stoffe kontaminiert werden und ihrerseits wieder zur Raumluftverunreinigung beitragen. Daher muss zwischen Primärquellen und Sekundärquellen unterschieden werden.

„Primärquellen sind Produkte, denen die PCB gezielt zur Veränderung der Produkteigenschaften zugesetzt wurden. Solche Produkte, z. B. Fugendichtungsmassen oder Beschichtungen, enthalten in der Regel mehr als 0,1 Gewichtsprozent PCB und können nach den bisher vorliegenden Erfahrungen deutlich erhöhte PCB-Raumluftbelastungen verursachen. Neben dem PCB-Gehalt besitzen das Verhältnis von kontaminierter Oberfläche zu Raumvolumen sowie die Art des PCB-Gemisches einen entscheidenden Einfluss auf die resultierende Raumluftbelastung“ [38].

12 Chemische Einwirkungen

Mögliche Primärquellen für PCB in der Innenraumluft sind nach VDI 4300 Blatt 2 [39]

- defekte Kondensatoren, z. B. in Leuchten,
- defekte Transformatoren,
- Farb- und Lackanstriche mit Flammschutzmitteln,
- in Kunststoff verwendete Weichmacher, z. B. Dichtungsmaterial für Dehnungsfugen im Betonfertigbau,
- im Betonbau verwendetes Schalöl sowie
- Staubeintrag von Emittenten und Altlasten.

„Sekundärquellen sind Bauteile (z. B. Wände, Decken) oder Gegenstände (z. B. Mobiliar oder Ausstattungsgegenstände wie Teppichböden oder Gardinen), die PCB meist über längere Zeit aus der belasteten Raumluft aufgenommen haben. Sie vermögen die an der Oberfläche angelagerten PCB nach und nach wieder in die Raumluft freizusetzen. Großflächige Sekundärkontaminationen können – selbst nach vollständigem Entfernen der Primärquellen – erhöhte PCB-Raumluftkonzentrationen aufrechterhalten“ [38].

Nicht ausreichend tief entfernte Primärquellen oder nicht ausreichend entfernte Sekundärquellen können noch Jahre nach der Sanierung zu erhöhten Raumluftbelastungen führen.

Ermittlung

Ein erster Schritt für die Ermittlung möglicher PCB-Quellen ist die Überprüfung des Alters des möglicherweise PCB-haltigen Bauproduktes oder Elektronikbauteils (siehe hierzu Grunderhebungsbogen G2 im Anhang III). Dabei kann in der Regel von nachstehenden Angaben ausgegangen werden:

- seit 1978 keine offene Anwendung mehr (Inkrafttreten der PCB-Richtlinie)
- seit 1981 kein PCB in Leuchtenkondensatoren und anderen Kondensatoren mehr
- seit 1983 keine Herstellung mehr
- seit 1989 generelles Verbot (PCB-Verbotsverordnung [40])

Lassen sich PCB-Belastungen in Gebäuden dadurch nicht ausschließen, sollte methodisch wie folgt weiter vorgegangen werden:

- Begehung durch sachkundige Personen, repräsentative Probenahme und Analyse verdächtiger Materialien (einschließlich exakter Dokumentation)
- repräsentative Raumluftprobenahme (einschließlich Begründung und Dokumentation der Probenahmestrategie)
- Erstellung eines Schadstoffkatasters (Materialproben, Schichtenprofile, Luftproben) als Grundlage für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes sowie zur Ermittlung der Belastungssituation des Gesamtgebäudes

Die so gewonnenen Ergebnisse sind anschließend zu bewerten.

Bewertung der PCB-Belastung und der Dringlichkeit von Sanierungsmaßnahmen

Das gesundheitliche Risiko für die Nutzer von PCB-belasteten Räumen steigt mit der PCB-Konzentration in der Raumluft, in Abhängigkeit von der Nutzungsart und der Aufenthaltsdauer im Raum.

Die Dringlichkeit einer Sanierung wird anhand der durch das frühere Bundesgesundheitsamt und die Arbeitsgemeinschaft der Leitenden Medizinalbeamten der Länder (AGLMB) durchgeführten toxikologischen Bewertung von PCB in der Innenraumluft dauerhaft genutzter Räume [38] bewertet:

- „Raumluftkonzentrationen unter 300 ng PCB/m³ Luft sind als langfristig tolerabel anzusehen (Vorsorgewert).
- Bei Raumluftkonzentrationen zwischen 300 und 3 000 ng PCB/m³ Luft ist die Quelle der Raumluftverunreinigung aufzuspüren und unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit mittelfristig zu beseitigen. Zwischenzeitlich ist durch regelmäßiges

Lüften sowie gründliche Reinigung und Entstaubung der Räume eine Verminderung der PCB-Konzentration anzustreben. Der Zielwert liegt bei weniger als 300 ng PCB/m³ Luft (Sanierungsleitwert).

- Bei Raumluftkonzentrationen oberhalb von 3 000 ng PCB/m³ Luft sind akute Gesundheitsgefahren nicht auszuschließen (Interventionswert für Sofortmaßnahmen). Bei entsprechenden Befunden sollen unverzüglich Kontrollanalysen durchgeführt werden. Bei Bestätigung des Wertes sind in Abhängigkeit von der Belastung zur Vermeidung gesundheitlicher Risiken in diesen Räumen unverzüglich Maßnahmen zur Verringerung der Raumluftkonzentrationen von PCB zu ergreifen. Der Zielwert liegt auch hier bei weniger als 300 ng PCB/m³ Luft.“

Obwohl gesicherte eindeutige Zusammenhänge zwischen den PCB-Gehalten der Dichtungsmaterialien und der PCB-Raumluftkonzentration bisher nicht abgeleitet werden konnten, lässt sich aufgrund von Literaturangaben eine Grobabschätzung der PCB-Raumluftkonzentration vornehmen (siehe Tabelle 32) [41].

Tabelle 32: Orientierungswerte für PCB-Raumluftkonzentrationen in Abhängigkeit vom PCB-Gehalt im Dichtungsmaterial [41]

Clophentyp ¹⁾	Maximale PCB-Konzentration im Dichtungsmaterial in %	PCB-Raumluftkonzentration in µg/m ³
A 40	maximal 21	ca. 0,2 bis 6,0
A 50	maximal 35	ca. 0,2 bis 2,5
A 60	maximal 47	max. 0,55

¹⁾ technisches PCB-Gemisch der Fa. Bayer

12 Chemische Einwirkungen

Darüber hinaus ist bei großflächigen Primärquellen wie z. B. Farbanstrichen, Brandschutzanstrichen oder Deckenplatten, die oftmals ein hochchloriertes PCB-Gemisch (Chlophen A 50/60) enthalten, auch die Direktaufnahme über die Haut und oral durch kontaminierte Partikel aus Abrieb zu beachten. Mit dem PCB-Gehalt im Material steigt gleichzeitig in der Regel auch der Dioxin- und Furangehalt [38].

Empfehlungen für die Sanierung von Gebäuden

Eine Sanierung PCB-belasteter Gebäude hat zum Ziel, die Raumluftbelastung durch PCB-haltige Produkte dauerhaft zu senken. Dies kann z. B. durch Entfernen, Abtrennen oder Beschichten PCB-haltiger Produkte geschehen. Die Beschichtung von Primärquellen hat sich bislang jedoch nicht bewährt.

Sanierung von Primärquellen

Für eine dauerhafte Sanierung von PCB-belasteten Räumen kommt in der Regel nur das Entfernen der Primärquellen wie z. B. Dichtungsmassen, Anstriche oder Deckenplatten in Betracht. Die im Folgenden aufgeführten Verfahren haben sich in der Praxis bewährt. Damit sind andere Verfahren, die zu gleichwertigen Ergebnissen führen, nicht ausgeschlossen. Nicht geeignet ist allerdings die Heißbehandlung PCB-haltiger Materialien, z. B. durch Flammstrahlen, sowie die Anwendung von Verfahren, bei denen eine Erhitzung PCB-haltiger Materialien auf $> 100\text{ °C}$ auftritt.

Dauerelastische Dichtungsmassen werden ausschließlich mit staubarm arbeitenden Werkzeugen oder von Hand entfernt und in

für die Entsorgung geeigneten Behältern gesammelt. Hinterfüllmaterial soll entfernt werden. Anfallender Staub wird am Entstehungsort mit einem geeigneten Staubsauger, z. B. der Staubklasse H, aufgenommen. Die Fugenflanken sollten soweit möglich unter Berücksichtigung der statischen Erfordernisse entsprechend der PCB-Eindringtiefe entfernt werden. Sie sind ebenso wie Dichtungsmassen von Hand oder mit staubarm arbeitenden Werkzeugen und Techniken unter ständiger Absaugung oder in geschlossenen Verfahren zu entfernen. Ist ein Entfernen der Fugenflanken nicht möglich, sind diese vollständig von allen anhaftenden Dichtungsmassenresten zu befreien und mit geeigneten diffusionshemmenden Beschichtungen zu versehen. Nach Beschichtung der Anschlussbereiche und Einbringen von neuem Hinterfüllmaterial wird neu verfugt.

Großflächige Primärquellen wie Anstriche oder Beschichtungen sind staubfrei unter ständiger Absaugung oder in geschlossenen Systemen zu entfernen. Hinsichtlich ggf. verbliebener Restkontaminationen ist wie bei der Behandlung von Sekundärquellen beschrieben zu verfahren.

Demontierbare Primärquellen wie Deckenplatten sind nach vorheriger Reinigung ohne Freisetzung von Stäuben, ggf. unter Absaugung, auszubauen.

Sanierung von Sekundärquellen

Lässt sich durch die Maßnahmen bei der Sanierung von Primärquellen die PCB-Raumluftkonzentration nicht unter den Sanierungsleitwert von 300 ng PCB/m^3 Luft absenken, ist darüber hinaus die

Sanierung von Sekundärquellen erforderlich.

Die Sanierung von Sekundärquellen sollte wie bei Primärquellen durch Entfernen erfolgen. Wird diese Methode nicht gewählt, lassen sich PCB-Raumluftbelastungen aus kontaminierten Bauteilen auch durch staubarmes Abtragen der Oberflächen dieser Teile unter ständiger Absaugung oder in geschlossenen Systemen, z. B. durch Abbeizen von Farbbeschichtungen und Beschichtungen der Oberflächen, hinreichend vermindern. Hierfür sind nach derzeitigem Kenntnissstand z. B. diffusionshemmende Isoliertapeten, hoch abgebundene Latexdispersionsfarben, insbesondere solche auf Acrylatbasis, oder zweikomponentige Epoxidharz- und Polyurethanbeschichtungen geeignet.

Sekundärquellen können aber auch luftdicht gegen die Raumluft abgeschottet werden, z. B. durch dauerhaft dichte Verkleidungen. Diese müssen jedoch für eine spätere getrennte Entsorgung gekennzeichnet und dokumentiert werden. Ein derartiges Vorgehen erfordert dauerhaft dichte Abschlüsse auch gegenüber angrenzenden Bauteilen und bedarf hinsichtlich seiner bauphysikalischen und raumklimatischen Folgewirkungen sorgfältiger Prüfung.

Kontaminierte Gegenstände wie Mobiliar, Teppiche oder Gardinen sollten gründlich gereinigt und vor Wiederverwendung hinsichtlich ihrer Restkontamination überprüft werden.

Der Langzeiterfolg dieser Maßnahmen ist durch Messungen zu belegen.

Reinigung

Nach Abschluss der Sanierung wird der gesamte Sanierungsbereich einer Feinreinigung unterzogen, wobei zunächst sämtliche Oberflächen von Bauteilen und Einrichtungen mit einem geeigneten Staubsauger gereinigt werden. Im Anschluss daran erfolgt eine Feuchtreinigung sämtlicher dafür infragekommender Flächen sowie des weiterzuverwendenden Mobiliars. Die Reinigung findet manuell mit handelsüblichen Reinigungsmitteln statt. Hochdruckreiniger eignen sich nicht, da die Reinigungsflüssigkeit nicht vollständig erfasst werden kann.

Erfolgskontrolle

Eine Messung der PCB-Konzentration in der Raumluft nach einer in der PCB-Richtlinie festgelegten Messstrategie belegt den Erfolg der Sanierung.

12.4.11 Literatur

- [1] *Eickmann, U.*: Berechnungsverfahren und Modellbildung in der Arbeitsbereichsanalyse. BIA-Report 3/01. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2001
- [2] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes: Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz. 51 (2008) Nr. 11, S. 1358-1369
- [3] *Witthauer, J.; Horn, H.; Bischof, W.*: Raumluftqualität. C. F. Müller, Karlsruhe 1993

12 Chemische Einwirkungen

- [4] Ventilation for acceptable indoor air quality. Hrsg.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (1989) Vol. 62
- [5] *Neumann, H.-D.*: Luftqualität und Lüftung in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 11/12, S. 495-497
- [6] Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. ABL. EG (2008) Nr. L 152, S. 1-44
- [7] IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol. Vol. 88. Hrsg.: International Agency for Research on Cancer (IARC), Lyon 2006
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol88/index.php>
- [8] *Cogliano, V. J.; Grosse, Y.; Baan, R. A.; Straif, K.; Secretan, M. B.; El Ghissassi, F.*: Meeting Report: summary of IARC Monographs on Formaldehyde, 2-Butoxyethanol, and 1-tert-Butoxy-2-propanol. Environm. Health Perspect. 113 (2005) Nr. 9, S. 1205-1208
- [9] *Schulte, A.; Bernauer, U.; Madle, S.; Mielke, H.; Herbst, U.; Richter-Reichhelm, H.-B.; Appel, K.-E. Gundert-Remy, U.*: Assessment of the carcinogenicity of formaldehyde. BfR Wissenschaft. Hrsg.: Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin 2006
www.bfr.bund.de/cm/350/assessment_of_the_carcinogenicity_of_formaledehyde.pdf
- [10] Empfehlung des Umweltbundesamtes. Krebs erzeugende Wirkung von Formaldehyd – Änderung des Richtwertes für die Innenraumluft von 0,1 ppm nicht erforderlich. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 49 (2006) S. 1169
www.umweltbundesamt.de/gesundheits/innenraumhygiene/Formaldehyd.pdf
- [11] WHO Air Quality Guidelines for Europe. 2. Aufl. Hrsg.: Weltgesundheitsorganisation (WHO), Genf 2001
- [12] *Agar, J. P.; Gording, D. A.; Hartley, M. R.; Hope, L. A. E.; Michell, R. M.; Powell, C. B.*: Air Quality Monitoring Report – Richmond Primary School Environment Protection Authority. Adelaide, Juli 2001, S. 10
- [13] Indoor air quality – organic pollutants. Euro Reports and Studies 111. Hrsg.: Weltgesundheitsorganisation (WHO), Kopenhagen 1989
- [14] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes: Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 50 (2007) Nr. 7, S. 990-1005
www.umweltbundesamt.de/gesundheits/innenraumhygiene/innenraumluftkontaminationen.pdf

- [15] Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. ABl. EG (2003) Nr. L 37, S. 19-23; zul. geändert. durch Beschluss 2011/534/EU, ABl. EG (2011) Nr. L 234, S. 44-45
- [16] *Thullner, I.; Buchwald, K.-E.; Wegscheider, W.; Hohenberger, L.:* Quecksilberemissionen bei der Sammlung und Entsorgung von Leuchtmitteln. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 73 (2013) Nr. 1/2, S. 14-24
- [17] Energiesparlampen in der Diskussion. Hrsg.: Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau 2011
- [18] Bekanntmachung des Umweltbundesamtes: Gesundheitliche Bedeutung von Feinstaub in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 51 (2008) Nr. 11, S. 1370-1378
www.umweltbundesamt.de/gesundheitspublikationen/ad-hoc/feinstaub_2008.pdf
- [19] *Nilson, A.; Kihlström, E.; Lagesson, V.; Wessen, B.; Szponar, B.; Larsson, L.; Tagesson, C.:* Microorganisms and Volatile Organic Compounds in Airborne Dust from Damp Residences. In: Indoor Air 2002 – Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, 30. Juni bis 5. Juli 2002, Vol. IV, S. 713-718
- [20] *Mattenklott, M.; Höfert, N.:* Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 69 (2009) Nr. 4, S. 127-129
- [21] Richtlinie 2008/50/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. ABl. EG (2008) Nr. L 152, S. 1-44
- [22] Richtlinie für die Bewertung und Sanierung schwach gebundener Asbestprodukte in Gebäuden (Asbest-Richtlinie) (01.96). MBl. NRW (1997) Nr. 51, S. 1067-1084
- [23] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten (TRGS 519). Ausg. 1/2007. GMBL. (2007) Nr. 6/7, S. 122-163; ber. GMBL. (2007) Nr. 18, S. 398
- [24] *Walker, G.; Ostendorp, G.; Heinzow, B.:* Künstliche Mineralfasern (KMF) und Feinstaub in Schulen und Kindergärten. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 72 (2012) Nr. 3, S. 89-93
- [25] *Hempfling, R.; Stubenrauch, S.:* Schadstoffe in Gebäuden. Blottner, Taunusstein 1999
- [26] Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV) vom 12. August 2004. BGBl. (2004), S. 2179-2189; zul. geändert. BGBl. (2010), S. 960-967

12 Chemische Einwirkungen

- [27] *Breuer, D.; Kühn, R.; Weigl, M.; Eickmann, U.; Weiß, T.; Blome, H.; von der Heyden, T.; Schneider, W.*: Passivrauchen am Arbeitsplatz. DGUV-UVT-Report 1/2011. 2. Aufl. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2011
- [28] *Fromme, H.; Körner, W.; Gruber, L.; Heitmann, D.; Schlummer, M.; Völkel, W.; Bolte, G.*: Exposition der Bevölkerung gegenüber Phthalaten – Ergebnisse der INES-Studie. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 70 (2010) Nr. 3, S. 77-81
- [29] *Nagorka, R.; Conrad, A.; Scheller, C.; Süßenbach, B.; Moriske, H.J.*: Weichmacher und Flammschutzmittel im Hausstaub – Teil 1: Phthalate (A). Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 70 (2010) Nr. 3, S. 70-76
- [30] Viele Kitas stark mit Weichmachern belastet – BUND fordert Verbot der Schadstoffe im Umfeld von Kindern. Hrsg.: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND), Berlin 2011
http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/chemie/20110321_chemie_weichmacher_kitas_hintergrund.pdf
- [31] Plastikweichmacher in Kindertagesstätten. Presseinformation (2011) Nr. 17, Umweltbundesamt (UBA), Berlin 2011
- [32] <http://www.reach-info.de/dokumente/musterbrief.doc>
- [33] *Winter, G.; Hoffmann, G.*: Zur Dekontamination von insektizidbelasteten Flächen nach Entwesungen in Innenräumen. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 43 (2000) Nr. 9, S. 698-714
- [34] Pentachlorphenolverbotsverordnung (PCP-V) vom 12. Dezember 1989. BGBl. 1989, S. 2235-2237
- [35] Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG. ABl. EG (2004) Nr. L 229, S. 5-22
- [36] Richtlinie für die Bewertung und Sanierung Pentachlorphenol (PCP)-belasteter Baustoffe und Bauteile in Gebäuden (PCP-Richtlinie). MBl. NW (1997), S. 1058-1066
- [37] Richtwerte für die Innenraumluft: Pentachlorphenol. Bundesgesundheitsbl. (1997) Nr. 7, S. 234-236
- [38] Richtlinie für die Bewertung und Sanierung PCB-belasteter Baustoffe und Bauteile in Gebäuden (PCB-Richtlinie NRW). MBl. NRW (1996), S. 1260-1268
- [39] VDI 4300 Blatt 2: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Meßstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle (PCB) (12.97). Beuth, Berlin 1997

[40] Verordnung zum Verbot von polychlorierten Biphenylen, polychlorierten Terphenylen und zur Beschränkung von Vinylchlorid (PCB-, PCT-, VC-Verbotsverordnung) vom 18.07.1989. BGBl. I (1989) S. 1482-1485

[41] *Balfanz, E.; Fuchs, J.; Kieper, H.*: Innenraumlufthuntersuchungen auf polychlorierte Biphenyle (PCB) im Zusammenhang mit dauerelastischen Dichtungsmassen. In: Schadstoffbelastung in Innenräumen. S. 205-212. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf 1992