



Weltgesundheitsorganisation

---

REGIONALBÜRO FÜR **Europa**

# WHO Leitlinien für Innen- raumlufthqualität: ausgewählte Schadstoffe

**Zusammenfassung**

## ABSTRACT

Das vorliegende Dokument ist eine Übersetzung der englischen Kurzzusammenfassung der WHO Publikation [http://www.euro.who.int/data/assets/pdf\\_file/0009/128169/e94535.pdf](http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf). Diese legt Leitlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) vor, die dem Schutz der Bevölkerung vor Gesundheitsrisiken durch eine Reihe gängiger Innenraumchemikalien dienen soll. Die berücksichtigten Stoffe, Benzol, Kohlenmonoxid, Formaldehyd, Naphthalin, Stickstoffdioxid, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (insbesondere Benzo[a]pyren), Radon, Trichlorethen und Tetrachlorethen haben Quellen in Innenräumen, sind bekannt für ihre Schädlichkeit für Gesundheit und sind häufig in Konzentrationen, die bedenklich für die Gesundheit sind, in Innenräumen auffindbar. Die Leitlinien richten sich ebenso an Fachleute des öffentlichen Gesundheitswesens, die mit der Verhütung von umweltbedingten Gesundheitsrisiken betraut sind, als auch an Behörden und Experten, die in den Bereichen Baukonstruktion und Gebäudenutzung, Innenraumbaustoffe und Raumausstattung tätig sind. Sie bieten eine wissenschaftliche Grundlage für rechtsverbindliche Standards.

Anfragen zu Veröffentlichungen des WHO-Regionalbüros für Europa richten Sie bitte an:

Publications  
WHO Regional Office for Europe  
Scherfigsvej 8  
DK-2100 Kopenhagen Ø, Dänemark

Oder füllen Sie auf der Website des Regionalbüros für Europa ein Online-Formular für Dokumentation/Information bzw. die Genehmigung zum Zitieren/Übersetzen aus (<http://www.euro.who.int/PubRequest?language=German>).

### © Weltgesundheitsorganisation 2011

Alle Rechte vorbehalten. Das Regionalbüro für Europa der Weltgesundheitsorganisation begrüßt Anträge auf Genehmigung zur teilweisen oder vollständigen Reproduktion oder Übersetzung seiner Veröffentlichungen.

Die in dieser Publikation benutzten Bezeichnungen und die Darstellung des Stoffes beinhalten keine Stellungnahme seitens der Weltgesundheitsorganisation bezüglich des rechtlichen Status eines Landes, eines Territoriums, einer Stadt oder eines Gebiets bzw. ihrer Regierungs-/Verwaltungsinstanzen oder bezüglich des Verlaufs ihrer Staats- oder Gebietsgrenzen. Gestrichelte Linien auf Karten bezeichnen einen ungefähren Grenzverlauf, über den möglicherweise noch keine vollständige Eignigkeit besteht.

Die Erwähnung bestimmter Firmen oder Erzeugnisse bedeutet nicht, dass diese von der Weltgesundheitsorganisation unterstützt, empfohlen oder gegenüber ähnlichen, nicht erwähnten bevorzugt werden. Soweit nicht ein Fehler oder Versehen vorliegt, sind die Namen von Markenartikeln als solche kenntlich gemacht.

Die Weltgesundheitsorganisation hat alle angemessenen Vorkehrungen getroffen, um die in dieser Publikation enthaltenen Informationen zu überprüfen. Dennoch wird die Veröffentlichung ohne irgendeine explizite oder implizite Gewähr herausgegeben. Die Verantwortung für die Deutung und den Gebrauch des Materials liegt bei der Leserschaft. Die Weltgesundheitsorganisation schließt jegliche Haftung für Schäden aus, die sich aus dem Gebrauch des Materials ergeben. Die von den Autoren, Redakteuren oder Expertengruppen geäußerten Ansichten sind nicht unbedingt Ausdruck der Beschlüsse oder der erklärten Politik der Weltgesundheitsorganisation.

## Zusammenfassung

Das vorliegende Dokument legt Leitlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) vor, die dem Schutz der Bevölkerung vor Gesundheitsrisiken durch eine Reihe gängiger Innenraumchemikalien dienen sollen. Diese Leitlinien basieren auf einer umfassenden Durchsicht und Bewertung der zusammengetragenen wissenschaftlichen Kenntnisse durch eine multidisziplinäre Expertengruppe, die toxische Wirkungen und gesundheitliche Effekte dieser Schadstoffe untersuchte.

Die Aufnahme der in dieser Untersuchung betrachteten Stoffe (Benzol, Kohlenmonoxid, Formaldehyd, Naphthalin, Stickstoffdioxid, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (insbesondere Benzo[a]pyren), Radon, Trichlorethen und Tetrachlorethen) in die Leitlinie erfolgte unter Berücksichtigung der Angaben zu Innenraumquellen, zur Verfügbarkeit toxikologischer und epidemiologischer Daten und zur gesundheitlich bedenklichen Expositionshöhe.

Sowohl in Ländern mit geringen, als auch mittleren und höheren Einkommen ist eine problematische Innenraumluftqualität als ein wichtiger Risikofaktor für die menschliche Gesundheit anerkannt. Die Innenraumluftqualität ist außerdem wichtig, weil Menschen einen beträchtlichen Teil ihrer Zeit in Gebäuden verbringen. In Wohnungen, Kindertagesstätten, Altenheimen und anderen speziellen Einrichtungen sind durch Schadstoffe in der Innenraumluft Bevölkerungsgruppen betroffen, die aufgrund ihres Gesundheitsstatus oder ihres Alters besonders vulnerabel sind.

Es ist das Hauptziel dieser Leitlinien, eine einheitliche Basis zum Schutz der Gesundheit der Bevölkerung vor schädlichen Einflüssen durch Innenraumschadstoffe bereitzustellen, und die Exposition gegenüber Schadstoffen, von denen bekannt ist oder angenommen wird, dass sie gesundheitsgefährdend sind, zu beseitigen oder auf ein Minimum zu reduzieren. Die Leitlinien richten sich ebenso an Fachleute des öffentlichen Gesundheitswesens, die mit der Verhütung von umweltbedingten Gesundheitsrisiken betraut sind, als auch an Behörden und Experten, die in den Bereichen Baukonstruktion und Gebäudenutzung, Innenraumbaustoffe und Raumausstattung tätig sind. Die Leitlinien basieren auf den zum Zeitpunkt der Ausarbeitung bekannten und zugänglichen wissenschaftlichen Kenntnissen. Sie haben den Charakter von Empfehlungen. Dennoch können Länder diese Leitlinien als wissenschaftliche Grundlage für rechtsverbindliche Standards anwenden.

Die den Leitlinien zugrundeliegende wissenschaftliche Ausarbeitung für die einzelnen ausgewählten Schadstoffe stützt sich sowohl auf die Auswertung der Innenraumquellen, der üblichen Innenraumkonzentrationen und deren Verhältnis zur Außenluftkonzentration, als auch auf eine Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Kinetik, zum Metabolismus und zu den gesundheitlichen Auswirkungen. Auf Basis der zusammengetragenen Daten formulierten die Experten eine Bewertung der gesundheitlichen Risiken und verständigten sich auf Leitlinien für die nachfolgend aufgeführten Schadstoffe.

### **Benzol**

Leitlinien zur Expositionshöhe von Benzol in der Innenraumluft werden benötigt, da Innenraumluft eine bedeutende Quelle darstellt und die Aufnahme von Benzol beim Menschen hauptsächlich inhalativ erfolgt. Benzol kommt sowohl in der Außen- als auch in der Innenraumluft vor. Dennoch sind die Konzentrationen in der Innenraumluft im Allgemeinen höher als in der Außenluft, weil Benzol von außen in Innenräume eindringen kann und es in Innenräumen eine Vielzahl weiterer Emissionsquellen gibt. Typischerweise liegen die Innenraumluftkonzentrationen unterhalb des niedrigsten Werts, für den nachteilige gesundheitliche Effekte nachgewiesen werden können. Leitlinien zur Innenraumluftexposition werden benötigt, wenn man berücksichtigt, dass Benzol in Innenräumen vorkommt und das individuelle Expositionsmuster in Betracht gezogen wird, das hauptsächlich durch die Innenraumluft bestimmt wird.

Benzol ist ein beim Menschen genotoxisches Karzinogen, für das keine gesundheitlich unbedenkliche Konzentration angegeben werden kann. Das Toxizitätsrisiko für eingeatmetes Benzol ist bei Innenraum- oder Au-

ßenluftexposition dasselbe. Deshalb gibt es keinen Grund, weshalb sich die Innenraumluftleitlinien von Außenluftleitlinien unterscheiden sollten. Es wird empfohlen, weiterhin dieselben Faktoren für das Unit-Risk anzuwenden. Das geometrische Mittel der Abschätzungen für das zusätzliche Lebenszeit-Risiko für Leukämie bei einer Luftkonzentration von  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt  $6 \times 10^{-6}$ . Die Benzolkonzentration in der Luft, die mit einem zusätzlichen Lebenszeit-Risiko von 1/10.000, 1/100.000 und 1/1.000.000 verbunden sind, betragen jeweils 17, 1,7 und  $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Wie oben aufgeführt, ist für die Benzolexposition kein Schwellenwert bekannt. Deshalb ist es aus praktischer Sicht angebracht, die Innenraumkonzentrationen weitgehend zu reduzieren. Hierzu müssen Tätigkeiten, bei denen Benzol freigesetzt wird, reduziert oder eliminiert werden, wie beispielsweise das Rauchen, der Einsatz von Lösungsmittel bei Hobby oder zur Reinigung oder die Verwendung von Baustoffen, die Benzol ausdünsten.

Welche Lüftung angemessen ist, hängt von der Lage des Gebäudes ab. In modernen Gebäuden, die an stark befahrenen Straßen oder anderen größeren Außenquellen für Benzol gelegen sind, muss die Luftzufuhr an der am wenigsten belasteten Gebäudeseite angebracht sein.

## **Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid verringert die maximale körperliche Leistungsfähigkeit bei gesunden jungen Menschen und verkürzt den Zeitraum bis zur Entstehung einer Angina pectoris und bei Menschen mit kardiovaskulären Erkrankungen in manchen Fällen die ST-Senkung, und dies bei geringeren Konzentrationen, als zur Verringerung der körperlichen Leistungsfähigkeit gesunder Menschen nötig wären.

Das Verhältnis der Kohlenmonoxidexposition zum Methämoglobin (MetHb) im Blut kann mit Hilfe der differentialen Coburn-Forster-Kane-Gleichung modelliert werden, die, bei gleichbleibenden Konzentrationen von eingeatmetem, exogenen Kohlenmonoxid, einen guten Schätzwert für die MetHb-Konzentration liefert. Auf der Basis von Laborstudien, welche die Verminderung der körperlichen Leistungsfähigkeit sowohl bei gesunden Personen als auch bei Freiwilligen mit kardiovaskulären Erkrankungen untersuchten, wurde ermittelt, dass die MetHb-Konzentrationen 2 % nicht übersteigen sollten. Die Coburn-Forster-Kane-Gleichung wird nachfolgend verwendet, um die CO-Konzentrationen zu ermitteln, denen gesunde Erwachsene unter Ruhebedingungen bei verschiedenen Zeitintervallen ausgesetzt werden können, ohne dass die MetHb-Konzentration im Blut über 2 % steigt.

Die vorherigen WHO-Leitlinien wurden für einen Expositions-Zeitraum von 15 Minuten erstellt, um vor kurzen Spitzenexpositionen zu schützen, wie sie beispielsweise durch einen Herd ohne Abzug entstehen können, bzw. für einen Zeitraum von 1 Stunde bei defekten Geräten sowie für einen Zeitraum von 8 Stunden (der für die Exposition am Arbeitsplatz relevant ist und der bisher als durchschnittliche Expositionszeit für die Außenluft herangezogen wurde). Wir empfehlen keine Änderung der bestehenden Leitlinien.

Dennoch unterscheidet sich eine chronische Kohlenmonoxidexposition von einer akuten Exposition in mehreren wichtigen Punkten. Die neuesten Studien von 2009, insbesondere jene epidemiologischen Studien mit sehr großen Datensätzen und somit extrem verlässlichen Ergebnissen, legen nahe, dass bei einer Leitlinie für eine längerfristige, mittlere Kohlenmonoxidexposition die Konzentrationen unterhalb der 8-Stunden-Leitlinie von  $10 \text{mg}/\text{m}^3$  liegen müssen, um gesundheitliche Beeinträchtigungen zu minimieren.

Deshalb werden mehrere Leitlinien zu typischen Innenraumexpositionen wie folgt empfohlen:  $100 \text{mg}/\text{m}^3$  für eine 15-minütige Exposition und  $35 \text{mg}/\text{m}^3$  bei einstündiger Exposition (bei leichter körperlicher Betätigung und maximal einmaliger Exposition am Tag),  $10 \text{mg}/\text{m}^3$  bei 8-stündiger Exposition (mittlere Konzentration, bei leichter bis mäßiger körperlicher Betätigung), und  $7 \text{mg}/\text{m}^3$  bei 24-stündiger Exposition (mittlere Konzentration, bei wachen und aufmerksamen, aber nicht körperlich aktiven Personen).

## **Formaldehyd**

Eine Innenraumlufleitlinie für Formaldehyd ist angebracht, weil die Innenraumluft den größten Beitrag zur

individuellen Exposition durch Inhalation darstellt, und die Innenraumkonzentrationen ausreichend hoch sein können, um gesundheitsschädliche Effekte auszulösen.

Die geringste Konzentration, von der berichtet wird, dass sie beim Menschen zu Augenreizungen geführt hat, beträgt  $0,36 \text{ mg/m}^3$  innerhalb von vier Stunden. Bei  $0,6 \text{ mg/m}^3$  kommt es zu einer Zunahme der Blinzelfrequenz und zu Bindehautrötungen. Dieser Wert wird als NOAEL angesehen. Es gibt keine Hinweise auf kumulative Effekte bei Dauerexposition.

Der Geruch führt bei manchen Menschen möglicherweise zu subjektiv wahrgenommen sensorischen Irritationen, und einzelne Menschen können Formaldehyd bei Konzentrationen unterhalb  $0,1 \text{ mg/m}^3$  wahrnehmen. Dies wird aber nicht als gesundheitlich advers angesehen. Der NOAEL von  $0,6 \text{ mg/m}^3$  für die erhöhte Blinzelfrequenz wird mit einem Rechenfaktor von 5 versehen, der von der Standardabweichung der Reizschwelle der Nasenschleimhäute (sensorische Irritation) abgeleitet ist. Dies führte zu einem Wert von  $0,12 \text{ mg/m}^3$ , der auf  $0,1 \text{ mg/m}^3$  abgerundet wurde. Bei diesen Innenraumkonzentrationen werden weder eine erhöhte Sensibilität noch eine Sensibilisierung bei Erwachsenen und Kindern für plausibel erachtet. Deshalb wird dieser Wert bei einer kurzzeitigen Exposition (30 Minuten) für valide erachtet und diese Schwelle soll bei keinem 30-Minuten-Intervall während eines Tages überschritten werden.

Folglich wird in der Leitlinie bei kurzzeitiger Exposition (30 Minuten) ein Wert von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  empfohlen, um sensorische Irritationen bei der Allgemeinbevölkerung zu vermeiden.

Die Bewertung der langfristigen Effekte, einschließlich der Kanzerogenese, die auf der Basis eines NOAEL und eines Rechenfaktors, als auch auf Schätzungen mit Hilfe biologischer Modelle vorgenommen wurde, führt mit Werten von ungefähr  $0,2 \text{ mg/m}^3$  zu vergleichbaren Ergebnissen. Diese Werte liegen oberhalb der Leitlinie für kurzzeitige Effekte von  $0,1 \text{ mg/m}^3$ . Aus diesem Grund werden bei der Anwendung der Leitlinie für kurzzeitige Effekte (30 Minuten Exposition) von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  auch langfristige gesundheitliche Wirkungen einschließlich Krebs verhindert.

Die Verwendung von Baumaterialien und Produkten mit geringer Emission und die Vermeidung von Passivrauch und anderer Verbrennungsprodukte minimieren das Expositionsrisiko. Außerdem kann die Formaldehydexposition in Innenräumen durch Lüften verringert werden.

## Naphthalin

Wie in Tierversuchen gezeigt werden konnte, sind Atemwegläsionen, einschließlich Tumore der oberen Atemwege, und die hämolytische Anämie bei Menschen die größten gesundheitlichen Probleme einer Naphthalinexposition.

Läsionen der Riechschleimhaut und bei höheren Konzentrationen auch der Epithelien der Atemwege sind bei Ratten die wichtigsten nicht-neoplastischen Effekte. Schwerwiegende Entzündungsreaktionen und Tumore der Atemwege werden an diesen Stellen bei Konzentrationen beschrieben, die 100-fach höher waren als die niedrigsten gewebeschädigenden Konzentration.

Eine verstärkte Zellproliferation aufgrund der Zytotoxizität (Zellschädigung) von Naphthalin gilt als wichtigstes Element bei der Entstehung von Atemwegstumoren. Da wahrscheinlich zytotoxische Metaboliten an der Kanzerogenese beteiligt sind und Naphthalin wohl nicht genotoxisch wirkt, kann angenommen werden, dass ein Schwellenwert existiert.

Aus diesem Grund scheint die Anwendung eines LOAEL/NOAEL als Schwellenwert, in Kombination mit Sicherheitsfaktoren, zur Erstellung von Innenraumleitlinien geeignet, um das Krebsrisiko der Atemwege durch Naphthalin zu minimieren.

Bei wiederholter Inhalation für täglich 6 Stunden, 5 Tage pro Woche und einer Dauer von 104 Wochen wurden bei fast allen Ratten, die der geringsten (aber dennoch relativ hohen) Naphthalindosis von  $53 \text{ mg/m}^3$  ausgesetzt waren, schwere Entzündungsreaktionen beobachtet. Aufgrund des Fehlens adäquat publizierter Daten zu weniger schweren Effekten, kann dieser Wert als LOAEL verwendet werden, obwohl dieser Wert mit

schwerwiegenden Effekten einhergeht.

Nimmt man diesen LOAEL als Ausgangspunkt und passt ihn an eine Dauerexposition an (indem man ihn durch  $24/6$  und  $7/5$  dividiert), erhält man einen Wert von etwa  $10 \text{ mg/m}^3$ . Unter Einbeziehung eines Faktors 10 wegen der Verwendung des LOAEL anstatt des NOAEL, eines Faktors 10 für die Interspezies-Variation, und schließlich eines Faktors 10 für die interindividuelle Variation, erhält man für die Leitlinie einen Wert von  $0,01 \text{ mg/m}^3$ . Dieser Leitlinienwert sollte als Jahresmittelwert angewandt werden.

Extensiver Gebrauch oder Missbrauch von Naphthalin-Mottenkugeln kann zu einer hämolytischen Anämie führen. Die Kenntnisse über die Auswirkungen einer Naphthalinexposition auf das Risiko empfindlicher Menschen (Träger eines Glukose-6-Phosphat-Dehydrogenase-Mangels), eine hämolytische Anämie zu entwickeln, können aufgrund des Fehlens geeigneter Expositionsdaten nicht als Grundlage für eine Leitlinie herangezogen werden.

Ohne Mottenkugeln und andere Naphthalinquellen wie beispielsweise die Verbrennung von Biomasse, liegen die Innenraumkonzentrationen für Naphthalin knapp über der Nachweisgrenze von etwa  $0,001 \text{ ng/m}^3$ . Da die Naphthalinkonzentration im Wohnumfeld bis auf das 100-fache ansteigen kann, wenn Mottenkugeln verwendet werden, wäre es zur Verhütung hoher Expositionen am effektivsten, die Verwendung von naphthalinhaltigen Mottenkugeln einzustellen (bzw. zu verbieten).

## Stickstoffdioxid

Es wird empfohlen, den Richtwert von  $200 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  als 1-Stunden-Mittel anzuwenden, der mit der bestehenden Luftqualitätsleitlinie der WHO übereinstimmt.

Bei ungefähr dem doppelten Wert kommt es bei Asthmatikern zu einer geringfügigen Abnahme der Lungenfunktionen. Bei sensibilisierten Asthmatikern zeigen sich schon bei diesen Konzentrationen leichte Veränderungen der Empfindlichkeit der Atemwege auf eine Reihe von Stimuli. Studien zur Innenraumlufth geben keinen Anlass für Abweichungen gegenüber den für die Außenluft gültigen Leitlinien.

In Übereinstimmung mit der bestehenden Luftqualitätsleitlinie der WHO wird für Innenräume ein Richtwert für Stickstoffdioxid von  $40 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  als Jahresmittelwert empfohlen.

Der Richtwert für Stickstoffdioxid von  $40 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  als Jahresmittelwert für die Außenluft basiert ursprünglich auf einer Meta-Studie von Untersuchungen der Innenraumlufth. Dabei wurde davon ausgegangen, dass das Kochen mit einem Gasherd im Vergleich zum Elektroherd zu einer durchschnittlichen Zunahme der Innenraumkonzentration von  $28 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  führt. Die Meta-Studie ergab, dass eine Zunahme der Innenraumkonzentration an Stickstoffdioxid um  $28 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  mit einem um 20 % erhöhtem Risiko für Erkrankungen der unteren Atemwege bei Kindern einhergeht.

Für Häuser ohne Innenraumquellen wird ein durchschnittlicher Wert von  $15 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  angenommen. Mehrere umfassende Untersuchungen, zur Weiterentwicklung der Außenluftleitlinien haben diese Ergebnisse nicht in Frage gestellt.

Neuere, verlässliche epidemiologische Studien, bei denen die Innenraumkonzentrationen von Stickstoffdioxid gemessen wurden, unterstützen die Vermutung, dass es bereits bei den in der Leitlinie genannten Werten zu Atemwegsbeschwerden kommen kann.

## Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs)

Manche polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) sind starke Karzinogene; in der Luft sind sie üblicherweise an Partikel gebunden. Die primäre Exposition gegen karzinogene PAKs in der Luft erfolgt über die Inhalation dieser Partikel. PAKs kommen in der Innenraumlufth als komplexe Gemische vor, deren Zusammensetzung von Ort zu Ort variieren kann. Experimentelle Daten zu Metabolismus, Genexpression und DNA-Addukten lassen darauf schließen, dass die Interaktionen von PAKs in Gemischen komplex und für eine Vielzahl von PAK-Zusammensetzungen in hohem Maße unvorhersagbar sind (inhibitorisch, additiv, syner-

gistisch).

Angesichts der Schwierigkeiten bei der Erstellung von Leitlinien für PAK-Gemische, wurde Benzo[a]pyren (B[a]P) für die bei Messungen am besten geeignete Indikatorsubstanz erachtet. Die Toxikologie von B[a]P ist bestens bekannt, die meisten Daten zu Außen- und Innenraumluft beziehen sich auf B[a]P, und B[a]P wird bei epidemiologischen Studien häufig als Indikatorverbindung verwendet.

Die Angaben zur Gesundheitsbewertung lassen darauf schließen, dass Lungenkrebs das größte Gesundheitsrisiko durch eine PAK-Exposition in Innenräumen darstellt. B[a]P ist unter den bekannten PAKs eines der stärksten Karzinogene.

Bei ihrer Bewertung der PAKs als Schadstoffe in der Außenluft formulierte die WHO im Jahre 2000 ein Unit-Risk für Krebs als Funktion der B[a]P-Konzentration, die als Marker für ein PAK-Gemisch herangezogen wird. Die Anwendung desselben Unit-Risk-Faktors für Innenräume impliziert, dass B[a]P das gleiche Verhältnis an krebserregenden Aktivitäten im PAK-Gemisch aufweist wie bei der Bestimmung des Unit-Risk bei einer Exposition am Arbeitsplatz. Diese Annahme wird nicht immer gelten, aber die mit der Risikoabschätzung verbundenen Unsicherheiten sind wahrscheinlich nicht groß.

Eine Abnahme der B[a]P-Exposition sollte auch das Risiko für andere gesundheitsschädigende Wirkungen verringern, die mit PAKs in Verbindung stehen.

Auf der Basis epidemiologischer Daten aus Untersuchungen von Kokereiarbeitern beträgt das Unit-Risk für Lungenkrebs bei PAK-Gemischen etwa  $8,7 \times 10^{-5}$  pro  $\text{ng/m}^3$  B[a]P. Dies entspricht dem Leitlinienwert für PAKs in Innenräumen. Die entsprechenden Konzentrationen, die bei lebenslanger B[a]P-Exposition das Lebenszeit-Risiko für Krebs um 1/10.000, 1/100.000 und 1/1.000.000 erhöhen, betragen jeweils etwa 1,2, 0,12 und 0,012  $\text{ng/m}^3$ .

## Radon

Radon wird von der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) als Human-karzinogen (Gruppe 1) eingestuft. Anhand epidemiologischer Studien in Wohnungen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Radon und einem Risiko für Lungenkrebs. Die Dosis-Wirkungsbeziehung lässt sich am besten als linear beschreiben; es gibt keinen Schwellenwert. Das zusätzliche relative Risiko bei einer Erhöhung der durchschnittlichen Langzeit-Exposition (30 Jahre) gegenüber Radon um  $100 \text{ Bq/m}^3$  beträgt 16 %; dieses relative Risiko variiert nicht nennenswert zwischen Rauchern, Ex-Rauchern und lebenslangen Nichtrauchern. Weil das absolute Lungenkrebsrisiko bei jeder Radonkonzentration bei Rauchern viel höher als bei lebenslangen Nichtrauchern ist, ist das absolute Lungenkrebsrisiko aufgrund von Radon bei Rauchern und Ex-Rauchern beträchtlich höher als bei lebenslangen Nicht-Rauchern. Das absolute Krebsrisiko bei Ex-Rauchern liegt zwischen demjenigen von lebenslangen Nichtrauchern und Rauchern.

Das kumulative Sterberisiko durch radoninduzierten Lungenkrebs wurde für lebenslange Nichtraucher und Raucher (15-24 Zigaretten am Tag) ermittelt. Das hieraus abgeleitete zusätzliche Lebenszeitrisiko betrug im Alter von 75 Jahren  $0,6 \times 10^{-5}$  bzw.  $15 \times 10^{-5}$  pro  $\text{Bq/m}^3$ . Das Risiko für Ex-Raucher liegt dazwischen und hängt von der Zeit ab, die seit dem Aufhören vergangen ist. Die Radonkonzentration, die mit einem zusätzlichen Lebenszeitrisiko von 1 pro 100 oder 1 pro 1000 einhergeht, beträgt  $67 \text{ Bq/m}^3$  bzw.  $6,7 \text{ Bq/m}^3$  für Raucher und  $1670 \text{ Bq/m}^3$  bzw.  $167 \text{ Bq/m}^3$  für lebenslange Nichtraucher.

Als Baustein beim Umgang mit der Radonproblematik empfiehlt das Internationale Radon-Projekt der WHO die Erstellung eines Referenzwertes als wichtiges Verfahrensinstrument.<sup>1</sup>

Ein nationaler Referenzwert legt keine strenge Grenze zwischen Sicherheit und Gefährdung fest, sondern definiert einen Wert für das Risiko durch Radon im Innenraum, den ein Land für zu hoch erachtet, wenn er ungehindert andauern

---

<sup>1</sup> WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva, World Health Organization, 2009.

sollte. Dennoch können Schutzmaßnahmen auch unterhalb dieses Wertes angemessen sein um sicherzustellen, dass Radonkonzentrationen in Häusern deutlich unter diesem Wert liegen. Angesichts der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse schlägt die WHO einen Referenzwert von  $100 \text{ Bq/m}^3$  vor, um die Gesundheitsgefährdung durch Radon in Innenräumen auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Sollte dieser Wert aber unter den gegebenen, länderspezifischen Bedingungen nicht eingehalten werden können, sollte der gewählte Referenzwert  $300 \text{ Bq/m}^3$  nicht übersteigen, was nach den neuesten Berechnungen der Internationalen Strahlenschutzkommission etwa  $10 \text{ mSv pro Jahr}$  entspricht.

In einem Leitfaden zum Umgang mit Radon sollten zusätzlich zum Referenzwert auch Bauvorschriften, Messvorschriften und weitere wichtige Bestandteile eines nationalen Radonprogramms enthalten sein.

## Trichlorethen

Das Vorliegen von sowohl positiven als auch negativen Ergebnissen hat bei Risikobewertungen in der Vergangenheit zu einer unterschiedlichen Interpretation der Toxizität von Trichlorethen (TCE) und zu abweichenden Schätzungen des Krebsrisikos beim Menschen geführt. Bei einer Bewertung des gesundheitlichen Risikos, in die neueste Kenntnisse zu einem nicht spezies-spezifischen Wirkmechanismus, einer schwachen, nachgewiesenen Genotoxizität und zur Übereinstimmung von bestimmten tierischen und menschlichen Krebsarten (insbesondere Leberkrebs) eingehen, erscheint es angebracht, angesichts der Kanzerogenität bei Tieren, der positiven epidemiologischen Studien und der Plausibilität eines Krebsrisikos beim Menschen einen Ansatz ohne Schwellenwert mit einer Risikoabschätzung statt einen gesundheitliche unbedenklichen Wert (sicheren Schwellenwert) zu empfehlen.

Deshalb wird die Kanzerogenität (unter der Annahme der Genotoxizität) als Endpunkt für die Erstellung des Wertes der Leitlinie gewählt. Die Schätzung eines Unit-Risk von  $4,3 \times 10^{-7} (\mu\text{g/m}^3)$ , das auf der Basis einer Zunahme von Leydig Zelltumoren (Hodentumore) bei Ratten ermittelt wurde, wird als Leitlinie für die Innenraumluftqualität vorgeschlagen. Dies war auch das Fazit der WHO im Jahre 2000, der EU im Jahre 2004 und der Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) im Jahre 2009.

Die Konzentrationen an TCE in der Luft, die mit einem zusätzlichen Lebenszeit-Krebsrisiko von  $1/10.000$ ,  $1/100.000$  und  $1/1.000.000$  einhergehen, liegen jeweils bei  $230$ ,  $23$  und  $2,3 \mu\text{g/m}^3$ .

## Tetrachlorethen

Bei Tetrachlorethen wird aus drei Gründen nicht die Kanzerogenität als Endpunkt bei der Erstellung eines Leitlinienwertes gewählt: Die epidemiologische Beweislage ist fragwürdig, die bei Tieren beobachteten Tumore werden nicht als humanrelevant erachtet, und es gibt keine Hinweise auf eine Genotoxizität. Die Ableitung eines Leitlinienwertes wird derzeit auf zwei nicht-neoplastische Effekte als kritischen Endpunkt begründet: Die Beeinträchtigung der verhaltensneurologischen Leistungen und renale Veränderungen.

Auf der Basis eines Langzeit-LOAEL von  $102 \text{ mg/m}^3$  für renale Effekte bei Beschäftigten in chemischen Reinigungen wurde ein Leitlinienwert von  $0,25 \text{ mg/m}^3$  errechnet. Bei der Ableitung dieses Leitlinienwertes wird der LOAEL an eine Dauerexposition angepasst (indem durch  $4,2$  ( $168/40$ ) und durch einen Unsicherheitsfaktor von  $100$  ( $10$  für die Anwendung eines LOAEL und  $10$  für intraspezifische Variabilität) dividiert wird). Unter der Berücksichtigung, dass der LOAEL gewisse Unsicherheiten aufweist, weil die beobachteten Effekte nicht klar abgegrenzt werden können und das Maß der Exposition schwankt, wurde eine alternative Berechnung durchgeführt, die auf dem LOAEL von  $680 \text{ mg/m}^3$  bei Mäusen basiert und einen entsprechenden Unsicherheitsfaktor von  $1000$  berücksichtigt. Diese Berechnung führt zu einem Leitlinienwert von  $0,68 \text{ mg/m}^3$ .

Ein Minimaler Risikowert (MRL) von  $0,28 \text{ mg/m}^3$  ( $0,04 \text{ ppm}$ ) bei chronischer Inhalation wurde von der Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) auf der Basis eines LOAEL von  $15 \text{ ppm}$  abgeleitet. Von diesem LOAEL wurde der MRL durch die Ausdehnung auf Dauerexposition ( $8/24$  Stunden,  $5/7$  Tage) und der Division durch einen Unsicherheitsfaktor von  $100$  ( $10$  für die Anwendung eines LOAEL und  $10$  für die Variabilität beim Menschen) errechnet. Bei der Bezugsgröße wurden signifikant verlängerte Reaktionszeiten bei Arbeitern gefunden, die beruflich einer durchschnittlichen Konzentration von  $15 \text{ ppm}$  über einen Zeitraum von  $10$  Jahren ausgesetzt waren.

Der Nutzen und die Angemessenheit zur Erstellung eines Kurzzeitgrenzwertes sind fraglich, weil akute Effekte nur bei sehr hohen Konzentrationen von 50 ppm (340 mg/m<sup>3</sup>) und höher auftreten, vergleichbar mit den in unmittelbarer Nähe zu Reinigungen allgemein zu beobachtenden Werten. Die Erstellung eines Langzeitwertes stellt einen größeren Schutz für die menschliche Gesundheit dar.

Auf der Basis einer umfassenden Bewertung des Gesundheitsrisikos beträgt der empfohlene Richtwert 0,25 mg/m<sup>3</sup> im Jahresmittel. Dies entspricht der bisherigen WHO Leitlinie.

Die umseitige Tabelle A zeigt eine Zusammenstellung der Leitlinien für alle in dieser Ausgabe berücksichtigten Schadstoffe.

**Tabelle A: Zusammenfassung der Leitlinien für alle in dieser Ausgabe berücksichtigten Schadstoffe**

	Ausschlaggebende Wirkung(en) für die Definition der Leitlinie	Leitlinien	Anmerkungen
Benzol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akute myeloische Leukämie (ausreichende kausale Evidenz)</li> <li>• Genotoxizität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es kann kein unbedenklicher Wert für die Exposition vorgeschlagen werden</li> <li>• Das Unit-Risk für Leukämie beträgt <math>6 \times 10^{-6}</math> pro <math>1 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> Luft</li> <li>• Die Benzolkonzentration in der Luft, die mit einem zusätzlichen Lebenszeit-Risiko von 1/10.000, 1/100.000 and 1/1.000.000 verbunden sind, betragen jeweils 17, 1,7 und <math>0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3</math></li> </ul>	
Kohlenmonoxid	Akute Verringerung der körperlichen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Exposition und Zunahme der Symptome ischaemischer Herzerkrankungen (z. B. veränderte ST-Senkung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15 Minuten – <math>100 \text{ mg}/\text{m}^3</math></li> <li>• 1 Stunde – <math>35 \text{ mg}/\text{m}^3</math></li> <li>• 8 Stunden – <math>10 \text{ mg}/\text{m}^3</math></li> <li>• 24 Stunden – <math>7 \text{ mg}/\text{m}^3</math></li> </ul>	
Formaldehyd	Sensorische Reizungen	$0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ – 30-minütiger Durchschnitt	Die Leitlinie (die für jede 30-minütige Exposition gilt) beugt Wirkungen auf die Lungenfunktion ebenso vor wie auch Krebs des Nasen-Rachenraums und myeloischer Leukämie
Naphthalin	Läsionen der Atemwege, die zu Entzündungen und im Tierversuch zu bösartigen Tumoren führen	$0,01 \text{ mg}/\text{m}^3$ – Jahresdurchschnitt	Es wird davon ausgegangen, dass mit dem Langzeitwert der Leitlinie auch mögliche bösartige Neubildungen der Atemwege verhindert werden können.
Stickstoffdioxid	Respiratorische Symptome, Bronchokonstriktion, Zunahme der bronchialen Reaktivität, Entzündungen der Atemwege und verringerte Immunantwort, die zu einer erhöhten Empfänglichkeit für respiratorische Infekte führt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>200 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> – 1-Stunden- Durchschnitt</li> <li>• <math>40 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> – Jahresdurchschnitt</li> </ul>	Ein Schwellenwert konnte in epidemiologischen Studien nicht nachgewiesen werden
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	Lungenkrebs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es kann kein Schwellenwert festgelegt werden, und jede Innenraumexposition wird als gesundheitsrelevant erachtet.</li> <li>• Das Unit-Risk für Lungenkrebs durch PAK-Gemische wird auf <math>8,7 \times 10^{-5}</math> pro <math>\text{ng}/\text{m}^3</math> B[a]P geschätzt.</li> <li>• Die entsprechenden Konzentrationen, die bei lebenslanger B[a]P-Exposition zu einem erhöhten Lebenszeit-Risiko für Krebs von 1/10.000, 1/100.000 und 1/1.000.000 führen betragen jeweils etwa 1,2, 0,12 und <math>0,012 \text{ ng}/\text{m}^3</math></li> </ul>	B[a]P wird als Marker von PAK-Gemischen verwendet

Radon	Lungenkrebs Anhaltspunkte für eine Assoziation mit anderen Krebsarten, insbesondere Leukämie und Krebs der extrathorikalen Luftwege	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das zusätzliche Lebenszeitrisko für den Tod durch radoninduzierten Lungenkrebs (bis zum Alter von 75 Jahren) wird für lebenslange Nichtraucher auf <math>0,6 \times 10^{-5}</math> pro <math>\text{Bq/m}^3</math>, und für Raucher (15 - 24 Zigaretten am Tag) auf <math>15 \times 10^{-5}</math> <math>\text{Bq/m}^3</math> geschätzt; bei ehemaligen Rauchern liegt das Risiko dazwischen und hängt von der Zeit ab, die seit dem Aufhören vergangen ist.</li> <li>• Die Radonkonzentrationen, die mit einem zusätzlichen Lebenszeit-Risiko von 1/100 und 1/1.000 einhergehen, betragen bei Rauchern jeweils 67 bzw. 6,7 <math>\text{Bq/m}^3</math> und bei lebenslangen Nichtrauchern 1670 bzw. 167 <math>\text{Bq/m}^3</math>.</li> </ul>	Die WHO-Leitlinien bieten einen umfassenden Ansatz zum Umgang mit gesundheitlichen Risiken durch Radon.
Trichlorethen	Kanzerogenität (Leber, Niere, Gallengang und Non-Hodgkin-Lymphom), Genotoxizität wird angenommen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschätztes Unit-Risk von <math>4,3 \times 10^{-7}</math> per <math>\mu\text{g/m}^3</math></li> <li>• Die Konzentrationen an Trichlorethen in der Luft, die mit einem erhöhten Lebenszeit-Risiko von 1/10.000, 1/100.000 und 1/1.000.000 einhergehen, betragen jeweils 230, 23 und 2,3 <math>\mu\text{g/m}^3</math></li> </ul>	
Tetrachlorethen	Niereffekte, die auf eine frühe Nierenerkrankung und verschlechterte renale Funktion hinweisen	0,25 $\text{mg/m}^3$ – Jahresdurchschnitt	Kanzerogenität wird nicht als Endpunkt verwendet, weil es keine Hinweise darauf gibt, dass Tetrachlorethen genotoxisch ist und Unsicherheiten hinsichtlich der epidemiologischen Evidenz und der Humanrelevanz der Kanzerogenität im Tierversuch bestehen