

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) ist eine 1948 gegründete Sonderorganisation der Vereinten Nationen, die sich in erster Linie mit internationalen Gesundheitsfragen und der öffentlichen Gesundheit befasst. Das WHO-Regionalbüro für Europa ist eines von sechs Regionalbüros, die überall in der Welt eigene, auf die Gesundheitsbedürfnisse ihrer Mitgliedsländer abgestimmte Programme durchführen.

Mitgliedstaaten

Albanien
Andorra
Armenien
Aserbaidschan
Belgien
Bosnien-Herzegowina
Bulgarien
Dänemark
Deutschland
Ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien
Estland
Finnland
Frankreich
Georgien
Griechenland
Irland
Island
Israel
Italien
Kasachstan
Kirgisistan
Kroatien
Lettland
Litauen
Luxemburg
Malta
Monaco
Montenegro
Niederlande
Norwegen
Österreich
Polen
Portugal
Republik Moldau
Rumänien
Russische Föderation
San Marino
Schweden
Schweiz
Serbien
Slowakei
Slowenien
Spanien
Tadschikistan
Tschechische Republik
Türkei
Turkmenistan
Ukraine
Ungarn
Usbekistan
Vereinigtes Königreich
Weißrussland
Zypern

Die WHO-Luftgüte-Richtlinien sollen eine Orientierungshilfe bei der Verringerung der Gesundheitsfolgen durch Luftverschmutzung bieten. Sie basieren auf der fachlichen Evaluierung der aktuellen wissenschaftlichen Evidenz und beziehen sich auf vier gängige Luftschadstoffe. Die überprüften und teilweise geänderten Richtwerte sind in allen WHO-Regionen der Welt anwendbar und sollen politischen Entscheidungsträgern als Grundlage dienen. Sie sollen außerdem angemessene Zielwerte für ein breites Spektrum an Politikoptionen bei der Überwachung der Luftqualität und der Bekämpfung der Luftverschmutzung vorgeben.

WHO-Luftgüte- Richtlinie für Feinstaub, Ozon, Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid

**Global gültige Aktualisierung 2005
Zusammenfassung der
Risikobewertung**



WHO-Luftgüte-Richtlinie für Feinstaub, Ozon, Stickstoff- dioxid und Schwefeldioxid

Global gültige Aktualisierung 2005

Zusammenfassung der Risikobewertung

Die WHO-Luftgüte-Richtlinien sollen eine Orientierungshilfe bei der Verringerung der Gesundheitsfolgen durch Luftverschmutzung bieten. Sie basieren auf der fachlichen Evaluierung der aktuellen wissenschaftlichen Evidenz und beziehen sich auf vier gängige Luftschadstoffe. Die überprüften und teilweise geänderten Richtwerte sind in allen WHO-Regionen der Welt anwendbar und sollen politischen Entscheidungsträgern als Grundlage dienen. Sie sollen außerdem angemessene Zielwerte für ein breites Spektrum an Politikoptionen bei der Überwachung der Luftqualität und der Bekämpfung der Luftverschmutzung vorgeben.

Schlüsselwörter

AIR POLLUTION
RISK ASSESSMENT
PARTICULATE MATTER
NITROGEN DIOXIDE
SULFUR DIOXIDE
OZONE

EU/05/5067584

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 2007

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.

INHALT

Seite

Vorwort	1
Die Bedeutung der Richtlinien für den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung.....	2
Luftgüte-Richtwerte und ihre Begründung.....	4
Feinstaub	4
Ozon.....	9
Stickstoffdioxid	12
Schwefeldioxid.....	14
Quellen	17

Vorwort

Saubere Luft gilt als eine Grundvoraussetzung für die Gesundheit und das Wohlergehen von Menschen. Von der Luftverschmutzung geht jedoch weltweit weiterhin eine beträchtliche gesundheitliche Gefährdung aus. Laut einer von der WHO vorgenommenen Einschätzung der Krankheitslast aufgrund von Luftverschmutzung können jedes Jahr mehr als 2 Millionen vorzeitige Sterbefälle auf die Folgen verschmutzter Außenluft in Städten und verschmutzter Innenraumluft (verursacht durch die Verbrennung von festen Brennstoffen) zurückgeführt werden. Mehr als die Hälfte dieser Krankheitslast entfällt auf die Bewohner von Entwicklungsländern.¹

Die WHO-Luftgüte-Richtlinien sollen eine Orientierungshilfe bei der Verringerung der Gesundheitsfolgen der Luftverschmutzung bieten. Die Richtlinien wurden 1987 zum ersten Mal ausgearbeitet² und 1997 aktualisiert³. Sie basieren auf der fachlichen Evaluierung der aktuellen wissenschaftlichen Evidenz. Seit der Vollendung der zweiten Ausgabe der *Luftgüte-Richtlinien für Europa* wurde in der wissenschaftlichen Literatur eine Fülle neuer Studien zu den Gesundheitsfolgen von Luftverschmutzung veröffentlicht. Dazu zählen auch wichtige Forschungen aus Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen, in denen der Grad der Luftverschmutzung am höchsten ist. Dies hat die WHO dazu veranlasst, die vorliegende wissenschaftliche Evidenz zu sichten und zu untersuchen, welche Auswirkungen diese für ihre Luftgüte-Richtlinien hat. Das Ergebnis dieser Bemühungen wird hier in Form überprüfter und teilweise geänderter Richtwerte für ausgewählte Luftschadstoffe präsentiert, die in allen WHO-Regionen der Welt anwendbar sind. Die neuen Richtlinien sollen politischen Entscheidungsträgern als Grundlage dienen und angemessene Zielwerte für ein breites Spektrum an Politikoptionen bei der Überwachung der Luftqualität und der Bekämpfung der Luftverschmutzung vorgeben.

Die in dieser jüngsten Aktualisierung der WHO-Luftgüte-Richtlinien berücksichtigten neuen Fakten und Daten beziehen sich auf vier gängige Luftschadstoffe: Feinstaub (PM, (engl.) particulate matter), Ozon (O₃), Stickstoffdioxid (NO₂) und Schwefeldioxid (SO₂). Im Umfang dieser Sichtung spiegelt sich die Verfügbarkeit neuer Evidenz zu den Gesundheitsfolgen dieser Schadstoffe und ihre relative Bedeutung im Hinblick auf die aktuellen und zukünftigen Gesundheitsfolgen der Luftverschmutzung in jeder der WHO-Regionen wider. Für im vorliegenden Dokument nicht berücksichtigte Luftschadstoffe gelten weiterhin die in den *Luftgüte-Richtlinien für Europa*³ der WHO präsentierten Schlussfolgerungen.

Der Bericht über die Tagung der WHO-Arbeitsgruppe vom 18. bis 20. Oktober 2005 in Bonn enthält eine zusammenfassende Darstellung des Prozesses, dessen Ergebnis die vorliegende Überarbeitung der WHO-Luftgüte-Richtlinien ist.⁴ In diesem Bericht sind auch die Mitglieder der Arbeitsgruppe aufgeführt, die die verfügbare Evidenz gesichtet und die hier vorgelegten Richtwerte empfohlen haben. Ein umfassender Bericht, der sowohl eine detaillierte Bewertung

¹ World health report 2002. Reducing risks, promoting healthy life. Genf, Weltgesundheitsorganisation, 2002.

² Air quality guidelines for Europe. Kopenhagen, Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa, 1987 (WHO Regional Publications, European Series, Nr. 23).

³ Air quality guidelines for Europe, 2. Ausgabe, Kopenhagen, Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa, 2000 (WHO Regional Publications, European Series, Nr. 91).

⁴ Verfügbar unter <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>.

der verfügbaren wissenschaftlichen Evidenz als auch die überarbeiteten Eingangskapitel der *WHO-Luftgüte-Richtlinien* enthalten wird, ist im Frühjahr 2007 veröffentlicht worden⁵

Die Bedeutung der Richtlinien für den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung

Die WHO-Luftgüte-Richtlinien sind für die weltweite Anwendung vorgesehen. Sie wurden zur Unterstützung von Maßnahmen entwickelt, mit denen eine Luftqualität erreicht werden soll, die geeignet ist die Gesundheit der Bevölkerung zu schützen. Luftqualitätsnormen werden von jedem Land zum Schutz der Gesundheit seiner Bürger festgelegt und sind somit ein wichtiger Bestandteil nationaler politischer Handlungskonzepte für das Risikomanagement und den Umweltschutz. Die nationalen Normen werden sich je nach den gewählten Ansätzen für den Ausgleich von Gesundheitsrisiken, technischer Realisierbarkeit, wirtschaftlichen Überlegungen sowie verschiedenen anderen politischen und sozialen Faktoren unterscheiden, wobei diese wiederum unter anderem vom Entwicklungsstand und der nationalen Kapazität zur Überwachung der Luftqualität und der Bekämpfung der Luftverschmutzung abhängen. Die von der WHO empfohlenen Richtwerte berücksichtigen diese Heterogenität und tragen insbesondere dem Umstand Rechnung, dass Regierungen bei der Festlegung von Zielvorgaben im Rahmen politischer Handlungskonzepte die jeweiligen Umstände vor Ort sorgfältig prüfen sollten, bevor sie die Richtlinien unmittelbar als rechtsverbindliche Normen übernehmen.

Die WHO-Luftgüte-Richtlinien basieren auf einer mittlerweile umfangreichen Menge an wissenschaftlicher Evidenz zur Luftverschmutzung und ihren Gesundheitsfolgen. Wenngleich diese Datengrundlage Lücken und Ungewissheiten aufweist, stellt sie ein solides Fundament für die empfohlenen Richtlinien dar. Mehrere wichtige Ergebnisse, die in den letzten Jahren vorgelegt wurden, verdienen besondere Erwähnung. Erstens macht die Evidenz für Ozon (O₃) und Feinstaub (PM) deutlich, dass Gesundheitsrisiken bereits bei Konzentrationen bestehen, die derzeit in vielen Großstädten in Industrieländern vorgefunden werden. Da in der Forschung zudem bislang keine Schwellen ermittelt wurden, unterhalb derer keine gesundheitsschädigenden Wirkungen auftreten, muss betont werden, dass die hier genannten Richtwerte keinen vollständigen Schutz der menschlichen Gesundheit gewährleisten können.

Zweitens wurde die Luftverschmutzung mit einem breiter werdenden Spektrum von gesundheitsschädigenden Wirkungen in Verbindung gebracht, wobei dies für immer geringere Konzentrationen nachgewiesen wurde. Dies gilt insbesondere für Feinstaub. In neuen Studien kamen verfeinerte Methoden mit empfindlicheren Indikatoren wie physiologische Parameter (beispielsweise Veränderungen der Lungenfunktion, Entzündungs-Marker) zur Anwendung. Deshalb konnten als Grundlage für die aktualisierten Richtlinien neben den wichtigsten Indikatoren für die Gesundheit der Bevölkerung wie Sterblichkeit und unplanmäßige Krankenhausaufenthalte auch diese empfindlichen Indikatoren verwendet werden.

Drittens sind parallel zum verbesserten Verständnis der Komplexität des Luftschadstoffgemischs die Grenzen der Eindämmung der Luftverschmutzung durch Richtlinien für einzelne Schadstoffe zunehmend deutlich geworden. Stickstoffdioxid (NO₂) beispielsweise ist ein Produkt von Verbrennungsprozessen und findet sich in der Atmosphäre im Allgemeinen in engem Zusammenhang mit anderen Primärschadstoffquellen einschließlich ultrafeinen Partikeln. Es ist selbst bereits toxisch und zudem eine Vorläufersubstanz von Ozon, mit dem es zusammen mit

⁵ Air Quality Guidelines – global update 2005. World Health Organization 2006 (verfügbar unter <http://www.euro.who.int/Document/E90038.pdf>)

einer Reihe anderer fotochemisch erzeugter Oxidantien koexistiert. Oft besteht eine enge Korrelation zwischen NO_2 -Konzentrationen und denen anderer toxischer Schadstoffe. Da erstere jedoch leichter zu messen sind, werden sie häufig stellvertretend für das Schadstoffgemisch insgesamt verwendet. Die Absenkung der Konzentration einzelner Schadstoffe wie NO_2 auf Richtlinienwerte könnte deshalb mit einem größeren Nutzen für die öffentliche Gesundheit verbunden sein, als ausgehend von Schätzungen der Toxizität eines einzelnen Schadstoffes erwartet werden dürfte.

Die vorliegende Überarbeitung der *Luftgüte-Richtlinien für Europa* enthält neue Richtwerte für drei der vier untersuchten Schadstoffe. Für zwei von ihnen (Feinstaub und Ozon) kann eine quantitative Beziehung zwischen der in der Umgebungsluft beobachteten Schadstoffkonzentration und konkreten Gesundheitsergebnissen (gewöhnlich der Sterblichkeit) abgeleitet werden. Diese Beziehungen sind außerordentlich wertvoll für Bewertungen von Gesundheitsfolgen und gestatten es, Erkenntnisse über die vom aktuellen Grad der Luftverschmutzung ausgehende Sterblichkeits- und Morbiditätslast zu gewinnen sowie darüber, welche Gesundheitsverbesserungen von unterschiedlichen Szenarien für die Minderung der Luftverschmutzung erwartet werden könnten. Die Schätzungen für die Krankheitslast können ebenfalls dazu benutzt werden, die Kosten und den Nutzen von Maßnahmen zur Verringerung der Luftverschmutzung abzuschätzen. Eine zusammenfassende Darstellung zu Ansätzen für Bewertungen von Gesundheitsfolgen und deren Grenzen wird im vollständigen Bericht zu den aktualisierten Richtlinien enthalten sein.

Luftschadstoffkonzentrationen sollten an Messorten gemessen werden, die für die Belastung der Bevölkerung repräsentativ sind. Der Grad der Luftverschmutzung kann in der Umgebung konkreter Schadstoffquellen wie Straßen, Kraftwerken und großen stationären Quellen höher sein, weshalb der Schutz der in einem solchen Umfeld lebenden Bevölkerung spezielle Maßnahmen zur Absenkung des Verschmutzungsgrads unter die Richtwerte erfordern kann.

Die folgenden Abschnitte dieses Textes enthalten die WHO-Luftgüte-Richtlinien für Feinstaub, Ozon, NO_2 und SO_2 . In allen Fällen wird die Entscheidung zur Änderung des Richtwerts beziehungsweise zur Beibehaltung des alten Werts begründet. Wie bereits erwähnt, geht aus der epidemiologischen Evidenz hervor, dass selbst bei Erreichen des Richtwerts gesundheitsschädigende Wirkungen weiterhin möglich sind. Dies könnte manche Länder veranlassen, für ihre nationalen Luftqualitätsnormen Konzentrationen unterhalb der WHO-Richtwerte festzulegen.

Zusätzlich zu Richtwerten werden für die Schadstoffe Feinstaub, Ozon und SO_2 **Zwischenziele** angegeben. Diese werden als Etappen im Prozess einer kontinuierlichen Verringerung der Luftverschmutzung vorgeschlagen und sollen in Gebieten mit hoher Luftverschmutzung zur Anwendung kommen. Diese Zielwerte sollen den Übergang von hohen Luftschadstoffkonzentrationen, die mit akuten und schwerwiegenden Gesundheitsfolgen verbunden sind, zu niedrigeren Luftschadstoffkonzentrationen erleichtern. Wenn diese Zielwerte erreicht würden, dürfte eine beträchtliche Risikominderung in Bezug auf akute und chronische Gesundheitsfolgen der Luftverschmutzung erwartet werden. Letztlich sollte das Ziel der Überwachung der Luftqualität und der Bekämpfung der Luftverschmutzung sowie der Verringerung der Gesundheitsrisiken auf allen Gebieten der Fortschritt auf dem Weg zum Erreichen der Richtwerte sein.

Luftgüte-Richtwerte und ihre Begründung

Feinstaub

<i>Richtwerte</i>	
PM _{2,5} :	10 µg/m ³ Jahresmittelwert 25 µg/m ³ 24-Stunden-Mittelwert
PM ₁₀ :	20 µg/m ³ Jahresmittelwert 50 µg/m ³ 24-Stunden-Mittelwert

Begründung

Die Evidenz zu luftgetragendem Feinstaub und seiner Wirkung auf die Gesundheit der Bevölkerung belegt übereinstimmend gesundheitsschädigende Wirkungen bei Belastungen, die heute für Stadtbewohner sowohl in Industrie- als auch Entwicklungsländern gemessen werden können. Das Spektrum der Gesundheitsfolgen ist breit; sie beziehen sich jedoch vor allem auf das Atmungssystem und das Herz-Kreislauf-System. Die gesamte Bevölkerung ist betroffen; die Anfälligkeit kann jedoch je nach Gesundheitszustand und Alter variieren. Nachweislich steigt das Risiko verschiedene Folgen zu erleiden mit der Belastung, und es gibt kaum Evidenz für eine Schwelle, unterhalb derer davon ausgegangen werden könnte, dass keine gesundheitsschädigenden Wirkungen mehr auftreten. Die Untergrenze des Konzentrationenbereichs, für den gesundheitsschädigende Wirkungen nachgewiesen wurden, liegt de facto nicht weit über der Hintergrundkonzentration, die für Partikel mit einem Durchmesser von unter 2,5 µm (PM_{2,5}) sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in Westeuropa auf 3 - 5 µg/m³ geschätzt wurde. Die epidemiologische Evidenz zeigt gesundheitsschädigende Wirkungen von Feinstaub sowohl nach Kurzzeit- als auch nach Langzeitbelastungen.

Da keine Schwellen ermittelt wurden und von einer beträchtlichen interindividuellen Variabilität der Belastung und der Reaktion auf eine bestimmte Belastung ausgegangen werden muss, ist es unwahrscheinlich, dass eine Norm oder Richtlinie für jede Person vollständigen Schutz vor allen möglichen gesundheitsschädigenden Wirkungen von Feinstaub gewährleisten kann. Der Prozess der Normensetzung muss stattdessen zum Ziel haben, die niedrigste Konzentration zu erreichen, die abhängig von lokalen Zwängen sowie von Prioritäten und Möglichkeiten im Umwelt- und Gesundheitsschutz realisierbar sind. Die quantitative Risikobewertung eröffnet eine Möglichkeit zum Vergleich unterschiedlicher Eindämmungsszenarien und zur Einschätzung des Restrisikos eines konkreten Richtwerts. Sowohl die US-amerikanische Umweltschutzbehörde als auch die Europäische Kommission haben in jüngster Zeit unter Verwendung dieses Ansatzes ihre Luftqualitätsnormen für Feinstaub überarbeitet. Die Länder sind aufgefordert, die Verabschiedung zunehmend strengerer Normen ins Auge zu fassen. Dabei sollten sie Fortschritte mittels der Überwachung der Emissionsverringerung und sinkender Feinstaubkonzentrationen verifizieren. Um diesen Prozess zu unterstützen, entsprechen die hier angegebenen Richt- und Zwischenzielwerte den Konzentrationen, bei denen auf der Grundlage aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse eine erhöhte Sterblichkeit aufgrund der Luftverschmutzung durch Feinstaub erwartet wird.

Die Auswahl des Indikators für Feinstaub erfordert ebenfalls sorgfältige Abwägung. Derzeit erfassen die meisten standardmäßigen Luftgüte-Überwachungssysteme Daten auf der Grundlage

der Messung von PM_{10} statt anderer Feinstaubgrößen. Dementsprechend wird PM_{10} in den meisten epidemiologischen Studien als Belastungsindikator verwendet. PM_{10} macht die Partikelmasse aus, die in den Respirationstrakt eintritt, und umfasst zudem sowohl die groben Partikel (mit einer Größe zwischen 2,5 und 10 μm) als auch die feinen Partikel (mit einer Größe unter 2,5 μm , $PM_{2,5}$), von denen angenommen wird, dass sie in Städten zu den beobachteten Gesundheitsfolgen beitragen. Die Erstgenannten entstehen vorwiegend durch mechanische Prozesse wie Bauarbeiten, die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub durch Wind, während die Letztgenannten hauptsächlich von Verbrennungsquellen ausgehen. Die Außenluft in den meisten Städten enthält sowohl grobe als auch feine Partikel, aber die Partikelanteile der beiden Größenbereiche dürften abhängig von der Geografie, Meteorologie und konkreten Feinstaubquellen von Großstadt zu Großstadt beträchtlich variieren. In manchen Gebieten kann die Verbrennung von Holz und anderen Biomassebrennstoffen eine wichtige Quelle für partikelförmige Luftschadstoffe sein, wobei die resultierenden Verbrennungspartikel überwiegend der feinen Fraktion ($PM_{2,5}$) angehören. Wenngleich in wenigen Studien die relative Toxizität der Verbrennungsprodukte von fossilen Brennstoffen und Biomasse verglichen wurde, ähneln sich die Wirkungsschätzungen für viele Großstädte sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern. Es ist deshalb angemessen, davon auszugehen, dass die Gesundheitsfolgen von $PM_{2,5}$ aus den beiden Quellen im Großen und Ganzen die gleichen sind. Aus denselben Gründen können die WHO-Luftgüte-Richtlinien für Feinstaub auch auf die Innenrumluft angewendet werden. Dies gilt insbesondere in den Entwicklungsländern, wo ein großer Teil der Bevölkerung hohen Konzentrationen von Verbrennungspartikeln aus Herden und offenen Feuern in Innenräumen ausgesetzt ist.

Obwohl PM_{10} die häufiger verwendete Messgröße und aus Gründen, auf die weiter unten eingegangen wird, auch der relevante Indikator für die Mehrzahl der epidemiologischen Daten ist, basieren die WHO-Luftgüte-Richtlinien für Feinstaub auf Studien, in denen $PM_{2,5}$ als ein Indikator verwendet wird. Durch Anwendung eines Werts von 0,5 für das Verhältnis von $PM_{2,5}$ zu PM_{10} werden die Richtwerte für $PM_{2,5}$ in die entsprechenden Richtwerte für PM_{10} umgerechnet. Ein Wert von 0,5 für das Verhältnis von $PM_{2,5}$ zu PM_{10} ist typisch für Städte in Entwicklungsländern und am unteren Ende des Wertebereichs für Städte in Industrieländern (0,5 - 0,8) angesiedelt. Bei der Festlegung lokaler Normen und unter der Annahme, dass die entsprechenden Daten verfügbar sind, kann ein anderer Wert für dieses Verhältnis, der den Umständen vor Ort besser entspricht, verwendet werden.

Auf der Grundlage bekannter Gesundheitsfolgen sind für beide Indikatoren der Feinstaubverschmutzung Richtwerte für sowohl Kurzzeitbelastungen (24 Stunden) als auch Langzeitbelastungen erforderlich.

Langzeitbelastungen

Als Langzeitrichtwert für $PM_{2,5}$ wurde eine jährliche mittlere Konzentration von 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ abgeleitet. Dieser entspricht dem unteren Ende des Wertebereichs, über den in der Studie der American Cancer Society (ACS) (Pope et al., 2002) signifikante Einflüsse auf die Überlebensraten beobachtet wurden. Die Verabschiedung eines Richtwerts auf diesem Niveau räumt den Langzeitbelastungsstudien, in denen Daten der ACS und der Harvard-Six-Cities-Studie (Dockery et al., 1993, Pope et al., 1995, HEI, 2000, Pope et al., 2002, Jerrett, 2005) verwendet wurden, großes Gewicht ein. In allen diesen Studien wurde über robuste Zusammenhänge zwischen einer Langzeitbelastung durch $PM_{2,5}$ und der Sterblichkeit berichtet. Die historische mittlere $PM_{2,5}$ -Konzentration belief sich in der Six-Cities-Studie auf 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Wertebereich 11,0 - 29,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und in der ACS-Studie auf 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Wertebereich 9,0 - 33,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In keiner dieser Studien wurden Schwellen erkennbar, wenngleich die Dauer und die Muster der bedeutsamen Belastung nicht genau festgestellt werden konnten. In der ACS-Studie wird die statistische Ungewissheit

der Risikoabschätzungen bei Konzentrationen von etwa $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sichtbar, unterhalb derer das Konfidenzintervall beträchtlich größer wird, weil die Konzentrationen relativ weit vom Mittelwert abweichen. Nach den Ergebnissen der Studie von Dockery et al. (1993) ähneln sich die Risiken in den Großstädten mit den niedrigsten $\text{PM}_{2,5}$ -Langzeitkonzentrationen (11 und $12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ein höheres Risiko wird in der Stadt mit dem nächstniedrigen Langzeitmittelwert für $\text{PM}_{2,5}$ ($14,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) erkennbar, was darauf schließen lässt, dass bei jährlichen mittleren Konzentrationen im Bereich von $11 - 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesundheitsfolgen erwartet werden können. Deshalb kann in Übereinstimmung mit der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur davon ausgegangen werden, dass eine jährliche mittlere Konzentration von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ unter dem Mittelwert für die wahrscheinlichsten Folgen liegt. Die Auswahl eines Langzeitmittelwerts für die $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ räumt auch den Ergebnissen der Zeitreihenstudien zur täglichen Belastung, in denen die Beziehungen zwischen der $\text{PM}_{2,5}$ -Belastung und akuten negativen Gesundheitseffekten untersucht wurden, ein gewisses Gewicht ein. In diesen Studien lagen die Langzeitmittelwerte (für Zeiträume von drei bis vier Jahren) im Bereich von $13 - 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wenn gleich gesundheitsschädigende Wirkungen auch unterhalb dieser Werte nicht vollständig ausgeschlossen werden können, entspricht der jährliche Mittelwert in den WHO-Luftgüte-Richtlinien derjenigen $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration, die nicht nur nachweislich in großen Städten in Industrieländern zu erreichen ist, sondern für die zudem gilt, dass ihr Erreichen die Gesundheitsrisiken beträchtlich verringern dürfte.

Neben dem Richtwert werden für $\text{PM}_{2,5}$ drei Zwischenziele (ZZ) definiert (siehe Tabelle 1). Diese sind mit sukzessiven und anhaltenden Bekämpfungsmaßnahmen nachweislich erreichbar. Länder werden diese Zwischenziele vielleicht als besonders hilfreich empfinden, wenn sie im schwierigen Prozess der kontinuierlichen Verringerung der Feinstaubbelastung der Bevölkerung ihre Fortschritte beurteilen wollen.

Als Zwischenziel 1 wurde eine jährliche mittlere $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration von $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgelegt. Dieser Wert entspricht den höchsten mittleren Konzentrationen, über die in Studien von gesundheitlichen Langzeitfolgen berichtet wurde, und kann auch höheren, jedoch unbekannt historischen Konzentrationen entsprechen, die zu beobachteten Gesundheitsfolgen beigetragen haben können. In den Industrieländern steht dieser Wert nachweislich in einem Zusammenhang mit einer signifikant erhöhten Sterblichkeit.

Das Zwischenziel 2 wurde auf $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgelegt und beruht auf den Studien zu Langzeitbelastung und Sterblichkeit. Dieser Wert ist höher als die mittlere Konzentration, bei der in solchen Studien Gesundheitsfolgen beobachtet wurden, und steht wahrscheinlich in einem Zusammenhang mit beträchtlichen Gesundheitsfolgen sowohl der Langzeitbelastung als auch der 24-Stunden-Belastung durch $\text{PM}_{2,5}$. Das Erreichen dieses ZZ-2-Werts würde die Gesundheitsrisiken der Langzeitbelastung um 6% (95% KI, $2 - 11\%$) im Vergleich zum ZZ-1-Wert verringern. Der empfohlene ZZ-3-Wert beträgt $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit beträchtlicher Gesundheitsfolgen der Langzeitbelastung noch stärker. Dieser Wert liegt nahe an den mittleren Konzentrationen, über die in Studien zur Langzeitbelastung berichtet wurde, und führt zu einer weiteren Absenkung des Sterblichkeitsrisikos um 6% im Vergleich zum ZZ-2-Wert. Weil eine WHO-Luftgüte-Richtlinie für $\text{PM}_{2,5}$ allein keinen Schutz gegen die schädliche Wirkung grober Staubpartikel (die Fraktion zwischen 10 und $2,5 \mu\text{m}$) bieten würde, werden entsprechende Richt- und Zwischenzielwerte auch für PM_{10} empfohlen (Tabelle 1). Die quantitative Evidenz zu groben Staubpartikeln wird jedoch als unzureichend für die Ableitung separater Richtwerte eingestuft. Es gibt allerdings einen großen Bestand an Literatur zu den Folgen der Kurzzeitbelastung durch PM_{10} , der als Grundlage für die Entwicklung der WHO-Luftgüte-Richt- und der Zwischenzielwerte für 24-Stunden-Feinstaubkonzentrationen verwendet wurde (siehe unten).

Tabelle 1

WHO-Luftgüte-Richtwerte und -Zwischenziele für Feinstaub:
Jahresmittel-Konzentrationen^a

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	Grundlage für die gewählten Werte
Zwischenziel 1 (ZZ-1)	70	35	Diese Werte stehen in einem Zusammenhang mit einem um etwa 15% höheren Langzeitsterblichkeitsrisiko im Vergleich zum Luftgüte-Richtwert.
Zwischenziel 2 (ZZ-2)	50	25	Neben anderem Gesundheitsnutzen verringern diese Werte das Risiko vorzeitiger Sterblichkeit um etwa 6% [2 - 11%] im Vergleich zum ZZ-1-Wert.
Zwischenziel 3 (ZZ-3)	30	15	Neben anderem Gesundheitsnutzen verringern diese Werte das Sterblichkeitsrisiko um etwa 6% [2 - 11%] im Vergleich zum ZZ-2-Wert.
Luftgüte-Richtwert	20	10	Dies sind die niedrigsten Werte, bei denen die gesamte kardiopulmonale und Lungenkrebssterblichkeit als Reaktion auf eine Langzeitbelastung durch PM _{2,5} mit einer Konfidenz von 95% nachweislich steigt.

a Die Verwendung des Richtwerts für PM_{2,5} wird bevorzugt.

Kurzzeitbelastungen

Es bestehen im Allgemeinen länderübergreifende Unterschiede in Bezug darauf, welcher der beiden Richtwerte – der für die 24-stündige oder der für die mittlere Jahresbelastung – restriktiver ist. Dies hängt weitgehend von den speziellen Merkmalen der Schadstoffquellen und ihrem Standort ab. Für die Evaluierung der WHO-Luftgüte-Richt- und Zwischenzielwerte wird im Allgemeinen empfohlen, dass dem jährlichen Mittel Vorrang gegenüber dem 24-Stunden-Mittel eingeräumt wird, weil bei niedrigen Werten geringerer Grund zur Sorge wegen episodischer Abweichungen besteht. Die Einhaltung der Richtwerte für das 24-Stunden-Mittel schützt jedoch vor Spitzen der Luftverschmutzung, die andernfalls zu erheblicher zusätzlicher Morbidität oder Sterblichkeit führen würden. Es wird empfohlen, dass Länder mit Gebieten, in denen der 24-Stunden-Richtwert derzeit nicht eingehalten wird, unmittelbar Maßnahmen ergreifen, um diesen Wert in möglichst kurzer Zeit zu erreichen.

Studien, die in mehreren Großstädten Europas (29 Großstädte) und den Vereinigten Staaten (20 Großstädte) durchgeführt wurden, berichten über Sterblichkeitseffekte der Kurzzeitbelastung durch PM₁₀-Konzentrationen von 0,62% beziehungsweise 0,46% pro 10 µg/m³ (24-Stunden-Mittel) (Katsouyanni et al., 2001, Samet et al., 2000). Eine Meta-Analyse der Daten von 29 Großstädten außerhalb von Westeuropa und Nordamerika ergab einen Sterblichkeitseffekt von 0,5% pro (Cohen et al., 2004), der nahe an dem für asiatische Großstädte ermittelten Wert (0,49% pro 10 µg/m³) (HEI International Oversight Committee, 2004) liegt. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die von einer Kurzzeitbelastung durch PM₁₀ ausgehenden Gesundheitsrisiken in Großstädten von Industrie- und Entwicklungsländern ähnlich sind: Jede Erhöhung der täglichen Konzentration um 10 µg/m³ lässt die Sterblichkeit um etwa 0,5% steigen. Deshalb dürfte eine PM₁₀-Konzentration von 150 µg/m³ grob zu einem Anstieg der täglichen Sterblichkeit um 5% führen – eine Wirkung, die sehr besorgniserregend wäre und für die sofortige Gegenmaßnahmen empfohlen würden. Das Zwischenziel 2 von 100 µg/m³ stünde in einem Zusammenhang mit einem Anstieg der täglichen Sterblichkeit um 2,5% und das Zwischenziel 3 mit einem Anstieg um 1,2%. Der WHO-Richtwert für PM₁₀ für das 24-Stunden-Mittel beträgt

50 µg/m³ und basiert auf der Beziehung zwischen den Verteilungen von 24-Stunden-Mittelwerten (sowie ihrem 99. Perzentil) und jährlichen mittleren Konzentrationen.

Tabelle 2

WHO-Luftgüte-Richtwerte und -Zwischenziele für Feinstaub: 24-Stunden-Konzentrationen^a

	PM₁₀ (µg/m³)	PM_{2,5} (µg/m³)	Grundlage für die gewählten Werte
Zwischenziel 1 (ZZ-1)	150	75	Veröffentlichte Risikoeffizienten aus Multicenterstudien und Metaanalysen (etwa 5% Anstieg der Akutsterblichkeit im Vergleich zum Luftgüterichtwert)
Zwischenziel 2 (ZZ-2)	100	50	Veröffentlichte Risikoeffizienten aus Multicenterstudien und Metaanalysen (etwa 2,5% Anstieg der Akutsterblichkeit im Vergleich zum Luftgüterichtwert)
Zwischenziel 3 (ZZ-3)*	75	37,5	Veröffentlichte Risikoeffizienten aus Multicenterstudien und Metaanalysen (etwa 1,2% Anstieg der Akutsterblichkeit im Vergleich zum Luftgüterichtwert)
Luftgüterichtwert	50	25	Die Beziehung zwischen dem 24-Stunden- und dem jährlichen Feinstaubwert

a 99. Perzentil (3 Tage/Jahr).

* Für Verwaltungszwecke. Auf der Grundlage von Richtwerten für das jährliche Mittel; der genaue Wert muss auf der Grundlage der lokalen Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte bestimmt werden. Die Häufigkeitsverteilung der Tageswerte für PM_{2,5} und PM₁₀ nähert sich gewöhnlich einer logarithmische Normalverteilung an.

In jüngster Zeit galt die Aufmerksamkeit von Naturwissenschaft und Medizin auch verstärkt den so genannten ultrafeinen Partikeln (UF-Partikeln), das heißt solchen mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 µm. Diese werden gewöhnlich als Anzahlkonzentration gemessen. Obwohl beträchtliche toxikologische Evidenz für einen potenziellen negativen Einfluss von UF-Partikeln auf die menschliche Gesundheit vorliegt, reicht der Bestand an epidemiologischer Evidenz für eine abschließende Beurteilung der Beziehung zwischen Belastung und Reaktion bei UF-Partikeln nicht aus. Deshalb können derzeit noch keine Empfehlungen in Bezug auf Richtlinienkonzentrationen für UF-Partikel abgegeben werden.

Ozon

Richtwert

O₃: 100 µg/m³ 8-Stunden-Mittelwert

Begründung

Seit der Veröffentlichung der zweiten Ausgabe der WHO-Luftgüte-Richtlinien für Europa (WHO, 2000), in denen der Richtwert für Ozon auf 120 µg/m³ im 8-Stunden-Tagesmittel festgelegt wurde, wurden in Kammer- oder Feldstudien kaum neue Erkenntnisse über die Gesundheitsfolgen von Ozon gewonnen. Wichtige Ergänzungen zur Evidenzgrundlage für die Gesundheitsfolgen gingen jedoch aus epidemiologischen Zeitreihenstudien hervor. In ihrer Gesamtheit haben diese Studien positive, schwache, aber überzeugende Zusammenhänge zwischen der täglichen Sterblichkeit und der Ozonkonzentration aufgedeckt, die von der Feinstaubwirkung unabhängig sind. Ähnliche Zusammenhänge wurden sowohl in Nordamerika als auch in Europa beobachtet. In diesen jüngsten Zeitreihenstudien wurden Gesundheitsfolgen von Ozonkonzentrationen nachgewiesen, die unterhalb des früheren Richtwerts von 120 µg/m³ lagen; sie erbrachten jedoch keine klare Evidenz für eine Schwelle. Dieses Ergebnis in Verbindung mit der Evidenz aus Kammer- und Feldstudien, die auf beträchtliche individuelle Schwankungen der Reaktion auf Ozon hindeutet, liefert ein überzeugendes Argument für die Absenkung des WHO-Luftgüte-Richtwerts für Ozon vom bisherigen Wert 120 µg/m³ auf 100 µg/m³ (Tagesmaximum des 8-Stunden-Mittelwertes). Bei empfindlichen Personen können selbst unterhalb des neuen Richtwerts Gesundheitsfolgen auftreten. Auf der Grundlage von Zeitreihenstudien wird der Anstieg der Zahl der zurechenbaren aufgedeckten Todesfälle an Tagen, an denen die mittlere Ozonkonzentration über einen Zeitraum von 8 Stunden 100 µg/m³ beträgt, auf 1 - 2% höher als die Zahl geschätzt, die für den Basiswert von 70 µg/m³ (den geschätzten Hintergrundozonwert; siehe Tabelle 3) erwartet wird. Es gibt gewisse Hinweise an Evidenz für chronische Folgen einer Langzeitbelastung durch Ozon, die jedoch für die Empfehlung eines Langzeitrichtwerts nicht ausreicht.

Ozon entsteht in der Atmosphäre durch fotochemische Reaktionen unter Sonnenlicht und bei Vorhandensein von Vorläufersubstanzen wie Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs, (engl.) volatile organic compounds). Durch Reaktionen mit NO₂ wird es zerstört und sinkt zu Boden. In mehreren Studien wurde nachgewiesen, dass Ozonkonzentrationen mit verschiedenen anderen toxischen, fotochemischen Oxidantien aus ähnlichen Quellen einschließlich den Peroxyacylnitraten, Salpetersäure und Wasserstoffperoxid korrelieren. Die Maßnahmen zur Eindämmung von Ozon in der Troposphäre konzentrieren sich auf die Gasemissionen seiner Vorläufersubstanzen, begrenzen jedoch wahrscheinlich auch die Konzentration und die Wirkung einer Reihe dieser anderen Schadstoffe.

Hemisphärische Hintergrundkonzentrationen von troposphärischem Ozon variieren in Zeit und Raum, können allerdings 8-Stunden-Mittel von etwa 80 µg/m³ erreichen. Sie entstehen aus anthropogenen und biogenen Emissionen (beispielsweise VOCs aus der Vegetation) von Ozon-Vorläufersubstanzen und dem Eindringen von stratosphärischem Ozon in die Troposphäre. Der vorgeschlagene Richtwert kann deshalb gelegentlich aufgrund natürlicher Umstände überschritten werden.

Wenn Ozonkonzentrationen den Richtwert überschreiten, werden die Gesundheitsfolgen in der Bevölkerung zunehmend zahlreicher und schwerwiegender. Diese Wirkung kann an Orten ein-

treten, an denen die aktuelle Konzentration aufgrund menschlicher Aktivitäten hoch oder in Zeiten sehr heißen Wetters erhöht ist. Der 8-Stunden-ZZ-1-Wert für Ozon wurde auf 160 µg/m³ festgelegt. Bei diesem Wert wurden in kontrollierten Kammertests bei jungen Erwachsenen, die mit Unterbrechungen körperlich aktiv waren, messbare, wenngleich kurzzeitige Veränderungen der Lungenfunktion und pulmonale Entzündungsreaktionen nachgewiesen. Ähnliche Effekte wurden bei körperlich aktiven Kindern in Sommerlagern beobachtet. Wenngleich von mancher Seite behauptet würde, dass diese Reaktionen nicht zwangsläufig gesundheitsschädigend sein müssen und nur bei intensiver körperlicher Aktivität auftraten, steht dieser Argumentationslinie die Möglichkeit gegenüber, dass ein beträchtlicher Anteil der Bevölkerung für die Folgen einer Ozonbelastung anfälliger sein könnte als die relativ jungen und im Allgemeinen gesunden Teilnehmer an der Kammerstudie. Außerdem liefern Kammerstudien kaum Erkenntnisse über wiederholte Belastungen. Auf der Grundlage der Evidenz aus Zeitreihen wird eine Belastung beim ZZ-1-Wert mit einem Anstieg der Zahl der zurechenbaren aufgedeckten Todesfälle um 3 - 5% in Verbindung gebracht (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3

WHO-Luftgüte-Richtwerte und -Zwischenziel für Ozon: 8-Stunden-Konzentrationen

	Täglicher maximaler 8-Stunden-Mittelwert (µg/m³)	Grundlage für den gewählten Wert
Hohe Konzentration	240	Beträchtliche Gesundheitsfolgen, großer Teil der anfälligen Bevölkerung betroffen
Zwischenziel 1 (ZZ-1)	160	Wichtige Gesundheitsfolgen, bietet keinen angemessenen Schutz der öffentlichen Gesundheit. Eine Belastung durch diese Ozonkonzentration wird in Verbindung gebracht mit: <ul style="list-style-type: none"> • physiologischen und entzündlichen Lungeneffekten bei körperlich aktiven gesunden jungen Erwachsenen, die für eine Dauer von 6,6 Stunden einer Belastung ausgesetzt sind, • Gesundheitsfolgen bei Kindern (auf der Grundlage verschiedener Studien zu Sommerlagern, in denen Kinder Ozonkonzentrationen in der Außenluft ausgesetzt waren), • einem geschätzten Anstieg der täglichen Sterblichkeit^a um schätzungsweise 3 - 5% (auf der Grundlage von Ergebnissen aus Tageszeitreihenstudien).
Luftgüte-Richtwert	100	Bietet angemessenen Schutz der öffentlichen Gesundheit, wenngleich bestimmte Gesundheitsfolgen auch unterhalb dieser Konzentration auftreten können. Eine Belastung durch diese Ozonkonzentration wird in Verbindung gebracht mit: <ul style="list-style-type: none"> • einem geschätzten Anstieg der täglichen Sterblichkeit^a um schätzungsweise 1 - 2% (auf der Grundlage von Ergebnissen aus Tageszeitreihenstudien), • der Extrapolation aus Kammer- und Feldstudien auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeit, dass die Belastung in der Realität wiederholt erfolgt, und des Umstands, dass hochempfindliche oder klinisch vorbelastete Personen sowie Kinder von der Teilnahme an Kammerstudien ausgeschlossen sind, • der Wahrscheinlichkeit, dass die Ozonkonzentration in der Außenluft ein Indikator für verwandte Oxidantien ist.

a Todesfälle, die Ozon zugerechnet werden können. Zeitreihenstudien legen einen Anstieg der täglichen Sterblichkeit im Bereich von 0,3–0,5% für jede Erhöhung der 8-Stunden-Ozonkonzentration um 10 µg/m³ über eine geschätzte Hintergrundkonzentration von 70 µg/m³ nahe.

Bei 8-Stunden-Kontzentrationen über $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden beträchtliche Gesundheitsfolgen als wahrscheinlich angesehen. Diese Schlussfolgerung basiert auf den Ergebnissen einer großen Zahl von klinischen Inhalations- und Feldstudien. Bei sowohl gesunden Erwachsenen als auch Asthmatikern dürfte es zu einer beträchtlichen Einschränkung der Lungenfunktion und Atemwegsentzündungen kommen, die Symptome auslösen und das Leistungsvermögen verändern würden. Darüber hinaus bestehen zusätzliche Bedenken bezüglich eines höheren Risikos respiratorischer Erkrankungen bei Kindern. Auf der Grundlage der Evidenz aus Zeitreihen würde eine Ozonbelastung dieser Größenordnung mit einem Anstieg der Zahl der zurechenbaren aufgedeckten Todesfälle um 5 - 9% im Vergleich zu einer Belastung durch die geschätzte Hintergrundkonzentration führen.

Stickstoffdioxid

Richtwerte

**NO₂: 40 µg/m³ Jahresmittelwert
200 µg/m³ 1-Stunden-Mittelwert**

Begründung

Als Luftschadstoff ist Stickstoffdioxid (NO₂) in mehreren Beziehungen von Bedeutung, die oft schwer oder bisweilen gar nicht voneinander zu trennen sind:

- i. Experimentelle Studien mit Tieren und Menschen zeigen, dass NO₂ – bei kurzfristigen Konzentrationen über 200 µg/m³ – ein toxisches Gas mit beträchtlichen Gesundheitsfolgen ist. Toxikologische Tierstudien legen zudem die Schlussfolgerung nahe, dass die Langzeitbelastung durch NO₂ über den aktuellen Außenluftkonzentrationen gesundheitsschädigend ist.
- ii. In zahlreichen epidemiologischen Studien wurde NO₂ als Indikator für den Mix an Schadstoffen aus Verbrennungsprozessen verwendet, insbesondere solchen Schadstoffen, die durch den Straßenverkehr und die Verbrennung in Innenräumen freigesetzt werden. In diesen Studien hätten die beobachteten Gesundheitsfolgen auch auf anderen Verbrennungsprodukten wie ultrafeinen Partikeln, Stickstoffmonoxid (NO), Feinstaub oder Benzol beruhen können. Obwohl in mehreren Studien – sowohl zur Außen- als auch zur Innenraumluft – versucht wurde, sich auf die von NO₂ ausgehenden Gesundheitsrisiken zu konzentrieren, konnten die Einflüsse dieser anderen hochkorrelierten Schadstoffe oft nur schwer ausgeschlossen werden.
- iii. Der größte Teil des atmosphärischen NO₂ wird in der Form von NO emittiert, das durch Ozon rasch zu NO₂ oxidiert wird. In Gegenwart von Kohlenwasserstoffen und ultraviolettem Licht ist Stickstoffdioxid die Hauptquelle von troposphärischem Ozon und Nitrat-Aerosolen, die einen wichtigen Teil der PM_{2,5}-Masse in der Außenluft ausmachen.

Der derzeitige WHO-Richtwert von 40 µg/m³ (für das jährliche Mittel) wurde festgelegt, um die Bevölkerung vor den Gesundheitsfolgen von gasförmigem NO₂ zu schützen. Der Grund hierfür war, dass die meisten Minderungsmethoden, weil sie eigens für NO_x konzipiert wurden, sich nicht für die Eindämmung anderer Schadstoffe eignen und deren Emissionen sogar noch erhöhen können. Wenn NO₂ jedoch als ein Indikator für komplexe, durch Verbrennung erzeugte Schadstoffmischungen überwacht wird, sollte ein niedrigerer jährlicher Richtwert verwendet werden (WHO, 2000).

Langzeitbelastungen

Es gibt immer noch keine abgesicherte Grundlage für die Festlegung eines Richtwerts für die jährliche mittlere NO₂-Belastung ausgehend von einer unmittelbaren toxischen Wirkung. Es liegt jedoch mittlerweile Evidenz vor, die die Besorgnis über Gesundheitsfolgen von Schadstoffmischungen in der Außenluft erhöhen, an denen NO₂ beteiligt ist. Beispielsweise wurde in epidemiologischen Studien nachgewiesen, dass Bronchitissymptome asthmatischer Kinder im Zusammenhang mit der jährlichen NO₂-Konzentration zunehmen und dass an Orten, an denen die

NO₂-Konzentration bereits die aktuellen Werte für die Außenluft in nordamerikanischen und europäischen Städten erreicht, eine verringerte Zunahme der Lungenfunktion bei Kindern mit erhöhten NO₂-Konzentrationen in Verbindung steht. In einer Reihe in jüngster Zeit veröffentlichter Studien wurde nachgewiesen, dass NO₂ höhere räumliche Schwankungen als andere verkehrsbedingte Luftschadstoffe, beispielsweise Partikelmasse, aufweisen kann. In diesen Studien wurden auch schädliche Einflüsse auf die Gesundheit von Kindern in Ballungsräumen festgestellt, für die höhere NO₂-Konzentrationen charakteristisch waren, selbst wenn der Gesamt-NO₂-Wert für das Stadtgebiet insgesamt recht niedrig war. Neuere Innenraumluftstudien haben Evidenz für Einflüsse von NO₂-Konzentrationen unter 40 µg/m³ auf Atemwegssymptome bei Säuglingen hervorgebracht. Diese Zusammenhänge können durch eine Parallelbelastung durch Feinstaub nicht vollständig erklärt werden. Es wurde jedoch die Vermutung geäußert, dass der beobachtete Zusammenhang möglicherweise zum Teil auf andere Komponenten im Mix (wie organischen Kohlenstoff und Salpetersäuredampf) zurückgeführt werden kann.

Zusammengenommen liefern diese Ergebnisse eine gewisse Begründung für die Absenkung des aktuellen jährlichen NO₂-Richtwerts. Es ist jedoch unklar, inwieweit die in epidemiologischen Studien beobachteten Gesundheitsfolgen auf NO₂ selbst oder auf die anderen primären oder sekundären verbrennungsbedingten Produkte zurückzuführen sind, mit denen es gewöhnlich korreliert. Deshalb kann die Position vertreten werden, dass in der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur nicht genügend Evidenz vorgelegt wurde, um eine Revision des geltenden WHO-Luftgüte-Richtwerts für jährliche NO₂-Konzentrationen zu rechtfertigen. Da die NO₂-Konzentration in der Außenluft jedoch regelmäßig gemessen wird, die anderer korrelierter verbrennungsbedingter Schadstoffe jedoch nicht, erscheint es dennoch sinnvoll, einen eher niedrigen jährlichen mittleren Grenzwert für NO₂ beizubehalten. Ein solcher Grenzwert berücksichtigt den Umstand einer potenziellen unmittelbaren toxischen Wirkung einer chronischen NO₂-Belastung selbst bei niedrigen Konzentrationen. Darüber hinaus kann die Beibehaltung des jährlichen Richtwerts zur Eindämmung komplexer verbrennungsbedingter Schadstoffmischungen (überwiegend aus dem Straßenverkehr) beitragen.

Kurzzeitbelastungen

In einer Reihe experimenteller Humantoxikologiestudien zu Kurzzeitbelastungen wurde über akute Gesundheitsfolgen der Belastung durch 1-stündige NO₂-Konzentrationen von mehr als 500 µg/m³ berichtet. Obwohl die niedrigste NO₂-Belastung, bei der in mehr als einem Labor eine unmittelbare Beeinträchtigung der Lungenfunktion bei Asthmatikern nachgewiesen wurde, 560 µg/m³ betrug, weisen Studien zur bronchialen Reagibilität von Asthmatikern auf eine steigende Reagibilität bei Konzentrationen ab 200 µg/m³ hin.

Weil der geltende WHO-Luftgüte-Richtwert von 200 µg/m³ für die kurzzeitige (1-stündige) NO₂-Belastung durch neuere Studien nicht in Frage gestellt wurde, wird er beibehalten. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Richtwerte für NO₂ auf den geltenden Werten, das heißt bei 40 µg/m³ für die mittlere jährliche Belastung und bei 200 µg/m³ für die mittlere 1-stündige Belastung, belassen werden.

Schwefeldioxid

Richtwerte

SO₂: 20 µg/m³ 24-Stunden-Mittelwert
500 µg/m³ 10-Minuten-Mittelwert

Begründung

Kurzzeitbelastungen

Kontrollierte Studien mit körperlich aktiven Asthmatikern lassen darauf schließen, dass bei einem Teil von diesen bereits nach einer 10-minütigen SO₂-Belastung Veränderungen der Lungenfunktion und Atemwegssymptome auftreten können. Auf der Grundlage dieser Evidenz wird empfohlen, dass über mittlere Zeiträume von 10-Minuten Dauer eine SO₂-Konzentration von 500 µg/m³ nicht überschritten werden sollte. Weil die Kurzzeitbelastung durch SO₂ in hohem Maß von der Art der lokalen Quellen und der vorherrschenden Wetterlage abhängt, ist es nicht möglich, auf diesen Wert einen einfachen Faktor anzuwenden, um entsprechende Richtwerte für längere Zeiträume (beispielsweise eine Stunde) abzuschätzen.

Langzeitbelastungen (über 24 Stunden)

Erste Schätzungen der Veränderungen der Sterblichkeit, der Morbidität und der Lungenfunktion von einem Tag auf den anderen aufgrund mittlerer SO₂-Konzentrationen über 24 Stunden basierten auf epidemiologischen Studien, bei denen Personen einer Schadstoffmischung ausgesetzt wurden. Da es kaum Anlass gab, die Beiträge einzelner Schadstoffe zu den beobachteten Gesundheitsergebnissen voneinander zu trennen, wurden vor 1987 die Richtwerte für SO₂ an die entsprechenden Werte für Feinstaub geknüpft. Dieser Ansatz führte zur Festlegung eines Richtwerts für SO₂ von 125 µg/m³ als 24-Stunden-Mittelwert. Hierzu wurde auf die niedrigste beobachtete Konzentration mit gesundheitsschädigenden Wirkungen ein Unsicherheitsfaktor von 2 angewendet (WHO, 1987). In der zweiten Ausgabe der WHO-Luftgüte-Richtlinien für Europa (WHO, 2000) wurde darauf hingewiesen, dass in späteren epidemiologischen Studien separate und unabhängige negative Einflüsse von Feinstaub und SO₂ auf die öffentliche Gesundheit dokumentiert wurden. Dies führte zur Festlegung eines separaten WHO-Luftgüte-Richtwerts für SO₂ von 125 µg/m³ (24-Stunden-Mittelwert). Zur neuesten verfügbar gewordenen Evidenz zählt eine Studie (Hedley et al., 2002), die in Hongkong durchgeführt wurde. Dort wurde in sehr kurzer Zeit eine stärkere Verringerung des Schwefelgehalts von Kraftstoffen erreicht. Auf diese wurde eine beträchtliche Verringerung der Gesundheitsfolgen (beispielsweise Atemwegserkrankungen bei Kindern und Sterblichkeit über alle Altersgruppen) zurückgeführt. Neuere Zeitreihenstudien zu Krankenhausaufnahmen wegen Herzkrankheit in Hongkong und London ergaben keine Evidenz für einen Schwellenwert für Gesundheitsfolgen einer 24-stündigen SO₂-Belastung bei Konzentrationen im Bereich von 5 - 40 µg/m³ (Wong et al., 2002). 24-Stunden-SO₂-Werte wurden signifikant mit täglichen Sterblichkeitsraten in 12 kanadischen Großstädten assoziiert, die mittlere Konzentrationen von lediglich 5 µg/m³ aufwiesen (der höchste mittlere SO₂-Wert lag unter 10 µg/m³) (Burnett et al., 2004). In der Studie der American Cancer Society (ACS) (siehe den Abschnitt zu Feinstaub) wurden in 126 Ballungsgebieten der Vereinigten Staaten, in denen die aufgezeichnete mittlere SO₂-Konzentration 18 µg/m³ und die höchste mittlere Konzentration 85 µg/m³ betrug, signifikante Zusammenhänge zwischen SO₂ und der Sterblichkeit beobachtet

(Pope et al., 2002). Wenn es in einer dieser beiden Studien eine Schwelle für Gesundheitsfolgen gegeben hätte, hätte sie sehr niedrig sein müssen.

Es ist immer noch sehr ungewiss, ob SO₂ der für die beobachteten gesundheitsschädigenden Wirkungen verantwortliche Schadstoff ist oder ob es sich dabei um ein Surrogat für ultrafeine Partikel oder eine andere korrelierte Substanz handelt. Sowohl Deutschland (Wichmann et al., 2000) als auch die Niederlande (Buringh, Fisher und Hoek, 2000) verzeichneten eine deutliche Verringerung der SO₂-Konzentrationen über den Verlauf eines Jahrzehnts. Obwohl jedoch auch die Sterblichkeit mit der Zeit abnahm, wurde der Zusammenhang zwischen SO₂ und der Sterblichkeit in beiden Fällen nicht als kausal für den Rückgang der Sterblichkeit eingestuft, sondern einem ähnlichen Zeittrend bei einem anderen Schadstoff (Feinstaub) zugeschrieben.

Unter Berücksichtigung von: a) der ungewissen Kausalität von SO₂, b) der Schwierigkeit in der Praxis, Werte zu ermitteln, die mit Gewissheit mit keinen anderen Gesundheitsfolgen in Zusammenhang gebracht werden können, und c) der Notwendigkeit, ein höheres Maß an Schutz zu gewährleisten, als der geltende Luftgüte-Richtwert für SO₂ bietet, sowie unter der Annahme, dass die Verringerung der Belastung durch eine kausal wirkende und korrelierte Substanz durch die Verringerung der SO₂-Konzentrationen erreicht wird, liegt eine Grundlage für die Absenkung des 24-Stunden-Richtwerts für SO₂ vor. Unter Verwendung eines verantwortungsbewussten Vorsorgeansatzes wurde der Wert von 20 µg/m³ gewählt.

Tabelle 4

WHO-Luftgüte-Richtwerte und -Zwischenziele für SO₂: 24-Stunden- und 10-Minuten-Konzentrationen

	24-Stunden-Mittelwert (µg/m³)	10-Minuten-Mittelwert (µg/m³)	Grundlage für die gewählten Werte
Zwischenziel 1 (ZZ-1) ^a	125	–	
Zwischenziel 2 (ZZ-2)	50	–	Zwischenziel auf der Grundlage der Eindämmung von entweder Kraftfahrzeugemissionen, Industrieemissionen und/oder Emissionen aus der Stromerzeugung. Dies wäre ein vernünftiges und erreichbares Ziel für manche Entwicklungsländer (es könnte innerhalb von wenigen Jahren erreicht werden), das zu signifikanten Gesundheitsverbesserungen führen würde, die wiederum weitere Verbesserungen rechtfertigen würden (beispielsweise Maßnahmen zum Erreichen des Luftgüte-Richtwerts für SO ₂).
Luftgüte-Richtwert	20	500	

a Der „alte“ Luftgüte-Richtwert der WHO für SO₂ (WHO, 2000).

Ein Jahresrichtwert wird nicht benötigt, weil die Einhaltung des 24-Stunden-Werts niedrige mittlere Jahreswerte gewährleistet. Diese empfohlenen Richtwerte für SO₂ sind nicht mit denjenigen für Feinstaub verknüpft. Weil der neue 24-Stunden-Richtwert für manche Länder in kurzer Zeit möglicherweise nur schwer erreichbar sein wird, wird ein Stufenansatz unter Verwendung von Zwischenzielen empfohlen (siehe Tabelle 4). Ein Land könnte beispielsweise Fortschritte auf dem Weg zur Einhaltung der Richtlinie erzielen, indem es die Emissionen von einer wichtigen Schadstoffquelle nach der anderen eindämmt und dabei die Quellen aus den Bereichen Kraft-

fahrzeuge, Industrie und Stromerzeugung auswählt. Dies hätte den größten Einfluss auf die SO₂-Konzentrationen bei geringsten Kosten. Eine geeignete Folgemaßnahme für ein solches Vorgehen wäre die Überwachung der öffentlichen Gesundheit und der SO₂-Konzentrationen im Hinblick auf eine positive Gesundheitsentwicklung. Der Nachweis des Gesundheitsnutzens sollte einen Anreiz für die Anordnung von Eindämmungsmaßnahmen bezüglich der wichtigsten Emissionsquellen liefern.

Quellen

- Buringh E, Fischer P, Hoek G (2000). Is SO₂ a causative factor for the PM-associated mortality risks in the Netherlands? *Inhalation Toxicology*, 12(Suppl.):S55-S60.
- Burnett RT et al. (2004). Associations between short-term changes in nitrogen dioxide and mortality in Canadian cities. *Archives of Environmental Health*, 59:228-236.
- Cohen A et al. (2004). Mortality impacts of urban air pollution. In: Ezzati M et al., Hrsg. *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*. Genf, Weltgesundheitsorganisation: 1353-1434.
- Dockery DW et al. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine*, 329:1753-1759.
- Hedley AJ et al. (2002). Cardiorespiratory and all-cause mortality after restrictions on sulfur content of fuel in Hong Kong: an intervention study. *Lancet*, 360:1646-1652.
- HEI (2000). *Reanalysis of the Harvard Six-Cities study and the American Cancer Society study of particulate air pollution and mortality. A special report of the Institutes Particle Epidemiology reanalysis Project*. Cambridge, MA, Health Effects Institute.
- HEI International Oversight Committee (2004). *Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia: a literature review*. Boston, MA, Health Effects Institute (Special Report No. 15).
- Jerrett M (2005). Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles. *Epidemiology*, 16:727-736.
- Katsouyanni K et al. (2001). Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology*, 12:521-531.
- Pope CA et al. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 151:669-674.
- Pope CA et al. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287:1132-1141.
- Samet JM et al. (2000). The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States. *Research Reports of the Health Effects Institute*, 94:5-70.
- Wong CM et al. (2002). A tale of two cities: effects of air pollution on hospital admissions in Hong Kong and London compared. *Environmental Health Perspectives*, 110:67-77.
- WHO (1987). *Air quality guidelines for Europe*. Kopenhagen, Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa, 1987 (WHO Regional Publications, European Series No. 23).
- WHO (2000). *Air quality guidelines for Europe*, 2. Ausgabe. Kopenhagen, Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa, 2000 (WHO Regional Publications, European Series No. 91).
- Wichmann HE et al. (2000). *Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany. Part I: Role of particle number and particle mass*. Cambridge, MA, Health Effects Institute (Research Report No. 98).