

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	69 (1977)
Heft:	5
Artikel:	Zur Beurteilung von Schadstoffkonzentrationen in der Luft : ein Diskussionsbeitrag zur Frage, welchen Angaben nötig sind, um die Belastung der Luft durch Schadstoffe zu beschreiben und zu beurteilen
Autor:	Martin, Werner / Mauch, Samuel
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-941489

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zur Beurteilung von Schadstoffkonzentrationen in der Luft

DK 614.7

Ein Diskussionsbeitrag zur Frage, welche Angaben nötig sind, um die Belastung der Luft durch Schadstoffe zu beschreiben und zu beurteilen.

Werner Martin und Samuel Mauch

1. Einleitung Begriffe

Autos, Heizungsanlagen und Fabrikanlagen emittieren Schadstoffe wie Russ, Staub, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe in die Luft. Die dadurch in der Luft entstehenden Schadstoffkonzentrationen (gemessen z. B. in Gramm Schadstoff pro m^3 Luft) bezeichnet man als *Immissionsangebote* oder *Immissionskonzentrationen*. Sie stellen eine Verunreinigung oder eine Belastung der Luft dar. Diese Verunreinigungen können belästigende oder gesundheitsschädigende Wirkungen auf Menschen, Tiere und Pflanzen haben, welche diese Luft einatmen und ihr durch Körperkontakt ausgesetzt sind.

Bild 1 versucht in einfacher Weise das «Luftverunreinigungssystem» zu umschreiben. Besondere Aufmerksamkeit erhält in diesem Aufsatz das rechts in der Figur eingezzeichnete Subsystem «Immissionen».

In der Schweiz wurde in den letzten Jahren begonnen, Schadstoffkonzentrationen in der Aussenluft zu messen. Stadtluftuntersuchungen und lufthygienische Gutachten werden mancherorts vorgenommen. Dieses Erfassen und Beurteilen einer lokalen Luftbelastung hat deshalb sehr grosses politisches Gewicht bekommen, weil letztlich Lufthygiene im Interesse der Volksgesundheit und des Volkswohls betrieben werden soll [1]. Immissionsmessungen stellen heute die beste Grundlage zur Beurteilung des Luftzustandes dar. Immer wieder taucht aber das Problem der Interpretation solcher lufthygienischer Messwerte auf. Der folgende Diskussionsbeitrag setzt sich mit dieser Frage auseinander.

Oft entstehen Verwirrungen bei der Interpretation von lufthygienischen Daten deshalb, weil Angaben über Immissionskonzentrationen, die zum Beispiel «in der Stadtluft gemessen wurden», nicht eindeutig wiedergegeben werden, oder weil Messdaten ungenügend präzis umschrieben sind. Es ist zum Beispiel ungenügend, zu sagen: «Die SO_2 -Konzentration beträgt 60 mg/m^3 », ohne dass man dazu noch angibt, über welche Messzeit dieser Wert gemittelt wurde und wie häufig eine solche Situation auftritt.

Es fällt auf, dass oft bei Vergleichen von gemessenen Konzentrationen in der Aussenluft mit ausländischen Grenz- und Richtwerten nicht darauf geachtet wird, ob beide Größen von ihrer Form und Definition her vergleichbar sind. Ein weiterer Punkt gibt Anlass zu Verwirrungen: Man unterscheidet oft zu wenig bewusst zwischen *objektiver Feststellung* oder *Beschreibung des Zustandes* der Luft einerseits, und *normativer Festlegung von Qualitätsanforderungen* für die Luft anderseits. Im ersten Fall gibt man an, welche Immissionskonzentrationen an einem bestimmten Ort in der Luft vorkommen (aufgrund von Messungen oder Rechnun-

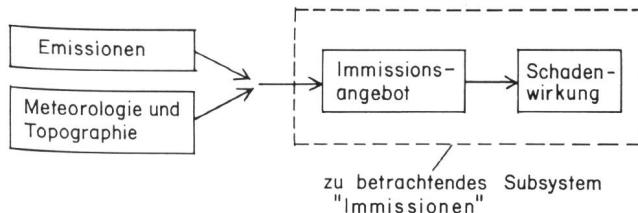


Bild 1. Vereinfachtes System der Luftverunreinigung.

gen). Damit kann man den *Zustand* der Luft *beschreiben*. Man kann aber noch keine Aussage über die Luftqualität machen; man kann noch nicht sagen, ob dieser gemessene Zustand als gut oder schlecht zu bezeichnen sei. Im zweiten Fall werden aufgrund von bekannten wissenschaftlichen und oft auch politischen Kriterien Minimalanforderungen an den Zustand der Luft gestellt.

Im weiteren halten wir uns an folgende *Konventionen*: Mit *Luftzustand* bezeichnen wir objektiv messbare Angaben über die Zusammensetzung der Luft, den Gehalt an Luftfremdstoffen usw., also über den Zustand der Luft; *ohne Bezug zu normativen Qualitätsanforderungen* (Angaben in mg/m^3 mit den notwendigen statistischen Präzisierungen).

Mit *Zielzustand* bezeichnen wir die Grenzwertgrössen der Luftzustandsparameter, die normativ aus gesundheitlichen oder anderen Gründen festgelegt werden, und die nicht oder nur mit einer bestimmten Häufigkeit überschritten werden dürfen.

Es ist das Ziel der folgenden Ausführungen, eine Uebersicht zu geben über die verschiedenen Parameter, die angegeben werden müssen, damit eine möglichst präzise Aussage über den Zustand oder die Qualität der Luft sowie ihre Bedeutung für die Auswirkungen auf Menschen, Tiere und Pflanzen gewährleistet ist.

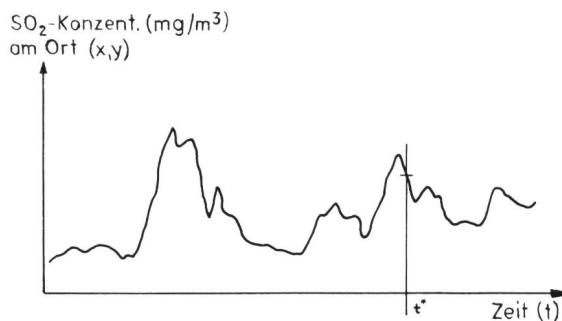


Bild 2. Die Zustandsparameter der Luft sind immer statistische Grössen, in Funktion der Zeit. Es ist unmöglich vorauszusagen, wie gross die SO_2 -Konzentration an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit t^* sein wird. Sinnvolle statistische Angaben sind aber möglich.

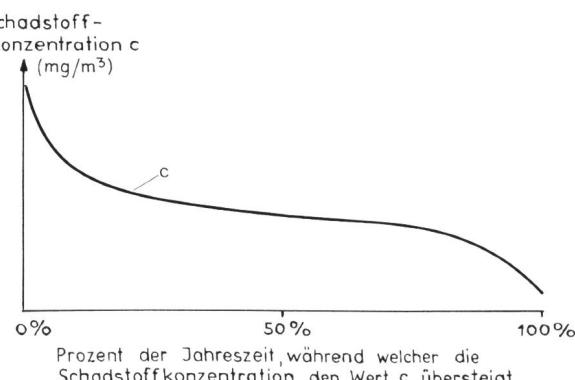


Bild 3. Summenhäufigkeit der Schadstoffkonzentration während der Beobachtungszeit von 1 Jahr, für einen bestimmten Ort (x, y) .

2. Luftzustandsparameter: Durch welche Größen wird die Schadstoffkonzentration eindeutig beschrieben?

Da eine ganz bestimmte Konzentration eines Gases oder Aerosols in der Luft nur kurzzeitig auftritt und innerhalb eines gewissen Zeitabschnitts mit einer bestimmten Häufigkeit wiederkehrt, ist eine Konzentrationsangabe nur als statistische Größe sinnvoll. Es muss also klar festgehalten werden: Die Schadstoffkonzentrationen der Luft an einem bestimmten Ort sind stochastische Funktionen der Zeit. Für alle planerischen Zwecke können sie deshalb nur als *statistische Größen* beschrieben werden (siehe Bild 2).

Wie erwähnt, entstehen Missverständnisse oft, weil statistische Angaben ungenau wiedergegeben werden, und dann unbewusst als deterministische Größen aufgefasst und interpretiert werden. Welche statistischen Angaben über die SO₂-Konzentration kann man sinnvollerweise machen? Wir nehmen an, dass eine Beobachtungszeit von einem Jahr als Basis für die Beschreibung dieser Statistik geeignet sei. Das bedeutet, dass sich die wesentlichen Verhältnisse im Zyklus von einem Jahr wiederholen. Es wird auch angenommen, die Messungen geschehen kontinuierlich mit einer kleinsten, erfassten Mittlungszeit von ca. einer Minute. Eine erste Methode, diese Jahresstatistik anzugeben, ist die in Bild 3 dargestellte Summenhäufigkeitskurve der Schadstoffkonzentrationen.

Aus Bild 3 kann abgelesen werden, wie häufig eine bestimmte Konzentration c während des Jahres auftritt. Eine wichtige Information, die in der Lufthygiene gebraucht wird, kommt darin aber nicht zum Ausdruck: Wie häufig kommt es während eines Jahres vor, dass ein *Mittelwert*, gemessen über eine Minute, eine Stunde, einen Tag oder einen Monat, eine bestimmte Konzentration erreicht oder überschreitet? Eine Graphik, die darüber Auskunft gibt, ist in Bild 4 dargestellt. Diese *statistische Darstellung* ist in der Lufthygiene bereits seit einigen Jahren gebräuchlich [2]. Wegen ihrer generell gültigen Form wird sie als Pfeildiagramm bezeichnet (aus dem Amerikanischen «arrow head chart»). Das Pfeildiagramm gibt bedeutend mehr Information über die Jahresstatistik wieder als die Darstellung von Bild 3. Aus Bild 4 wird nun auch klar, wie eine Angabe über eine Schadstoffkonzentration gemacht werden muss, damit sie eindeutig und sinnvoll ist:

Genügend präzise Angabe: «Der 1 %-ige Stundenmittelwert der SO₂-Konzentration am Ort (x, y) im Jahre 1974 betrug 80 mg/m³» (Punkt B₁ in Bild 4). Das heißt, 1 % aller Stundenmittel während eines Jahres übersteigt den Stundenmittelwert 80 mg/m³.

Ungenügend präzise Angabe: «Der Stundenmittelwert der SO₂-Konzentration am Ort (x, y) im Jahre 1974 betrug 80 mg/m³.»

Die zweite Aussage ist deshalb sinnlos, weil es nicht einen Stundenmittelwert während eines Jahres gibt, sondern eine ganze Häufigkeitsverteilung solcher Werte, wie Bild 4 zeigt (Punkte B₁, B₁₀, B₉₀, B₉₉). Einzig beim Jahresmittel gibt es nur einen einzigen Wert.

Man kann nun sagen, dass diese vieldimensionale Angabe zu kompliziert sei. Es kann im Sinne einer Vereinfachung nötig werden, sich auf die Angabe eines einzigen, repräsentativen Stundenwertes zu einigen, zum Beispiel auf den 10%-Wert B₁₀¹⁾. Wichtig ist dann aber, dass diese Konvention bewusst und einheitlich getroffen wird, und dass

¹⁾ Dieser 10 %-Stundenmittelwert gibt an, wie hoch die Konzentration ist, die während eines Jahres als Stundenmittelwert in nur 10 % der Fälle überschritten wird.

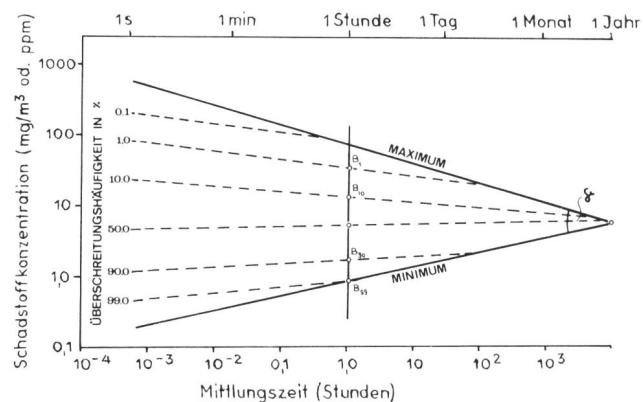


Bild 4. Das Pfeildiagramm (Doppellogarithmische Darstellung) beschreibt die Statistik der Schadstoffkonzentration c an einem bestimmten Ort während einer Zeitperiode von (normalerweise) einem Jahr.

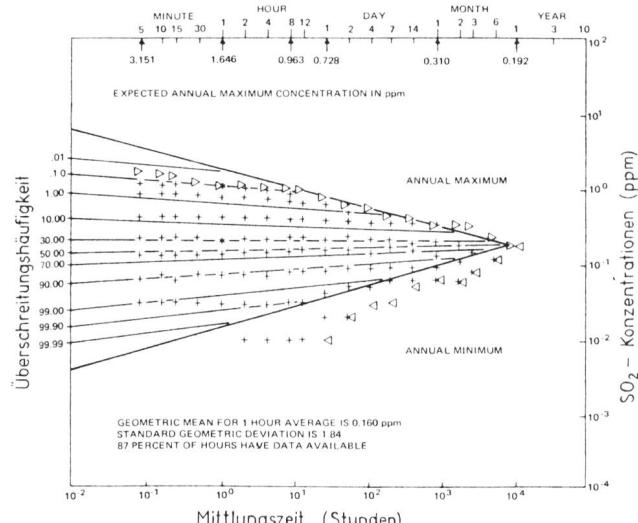


Bild 5. Beispiel 1. Konzentrationen von Schwefeldioxid, aufgetragen für verschiedene Mittlungszeiten und Überschreitungshäufigkeiten, gemessen in Chicago vom 1. 12. 1963 bis 1. 12. 1964 [3].

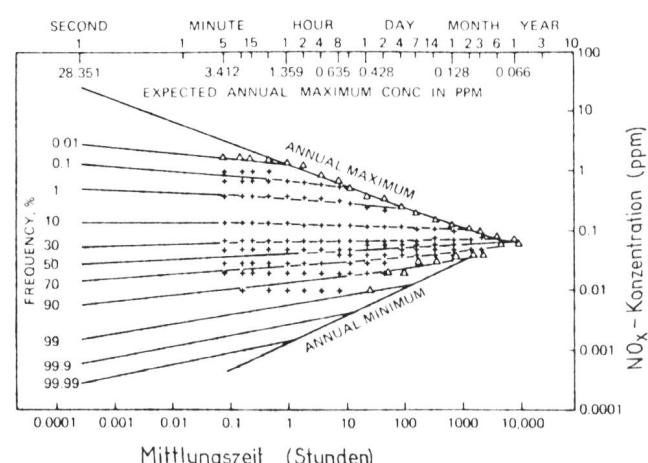


Bild 6. Beispiel 2. Konzentrationen von Stickstoffoxiden aufgetragen für verschiedene Mittlungszeiten und Überschreitungshäufigkeiten, gemessen in Washington, D. C. vom 1. 12. 1961 bis 1. 12. 1964 [2].

alle Angaben sich neu auf diesen 10%-Wert beziehen. Nur so kann eine anhaltende Verwirrung vermieden werden. Das Diagramm gemäss Bild 4 behält für die verschiedensten Situationen die gleiche Grundform. Der Winkel γ zwischen der Maximum- und der Minimum-Linie sowie die gegenseitigen Abstände der 1%--, 10%--, 50%--, 90%- und 99%-Linien variieren von Fall zu Fall. Ein grosser Winkel tritt zum Beispiel für eine Messstelle an einer Ueberlandstrasse auf, wo im allgemeinen — bei sehr geringem Verkehr — sehr kleine Konzentrationen vorherrschen, wo aber bei Verkehrsstockungen bei windstillem, stabilem Wetter hohe Konzentrationen auftreten können. Demgegenüber wird der Oeffnungswinkel γ kleiner sein für eine Messstelle irgendwo auf dem Land, wo geringe Schwankungen der Konzentration auftreten. Dort liegen dann die 1%- und die 99%-Werte viel näher beieinander als im ersten Fall.

3. Der Zusammenhang zwischen Schadstoffkonzentrationen und Schadenwirkung

In diesem Abschnitt fragen wir nach den Auswirkungen von Schadstoffen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien. Die Wirkung eines bestimmten Schadstoffes hängt nicht nur von der **Schadstoffkonzentration**, sondern auch von deren **Einwirkungszeit** ab. Das Produkt dieser beiden Grössen bezeichnet man als **Dosis** (=Konzentration mal Einwirkungszeit), und der entsprechende Zusammenhang wird als Beziehung zwischen Dosis und Schadenwirkung dargestellt (Bild 7). Zusätzlich wird die Schadenwirkung noch durch die Empfindlichkeit des Objekts und die Art (Giftigkeit) des Schadstoffes bestimmt, so dass folgende Bestimmungsgrössen massgebend sind:

Schadenwirkung = f (Schadstoff, Empfindlichkeit des Objekts, Schadstoffkonzentration c , Einwirkungszeit τ).

Im folgenden beschränken wir uns darauf, für einen bestimmten Schadstoff und ein bestimmtes Objekt darzustellen, wie die Schadenwirkung von den beiden Parametern Konzentration und Einwirkungszeit abhängt.

Die drei Begriffe Konzentration, Einwirkungszeit und Schadenwirkung brauchen wiederum Präzisierungen: Wir nehmen an, dass die Beziehungen, wie sie zum Beispiel in Bild 8 dargestellt sind, empirisch ermittelt werden müssen und unter der idealisierten Bedingung gelten, dass ein **Objekt** (Mensch, Tier, Pflanze, Material) während einer bestimmten Zeit τ einer konstanten **Schadstoffkonzentration** c ausgesetzt ist. Die vertikal aufgetragene Schadenwirkung ist genau zu identifizieren: Augenbrennen, Geruchsstörung, Atembeschwerden usw. beim Menschen; Blattverfärbung, Entlaubung, Schadstoffakkumulation bei der Pflanze. Für jede dieser Schadenwirkungen kann die Kurvenschar $S(\tau, c)$ verschieden sein. Zudem ist die Funktion $S(\tau, c)$ noch in dem Sinne statistisch, dass zum Beispiel nicht alle Menschen gleich empfindlich sind. Man muss also auch hier eine Zusatzangabe machen über den Anteil (die Fraktile) der Bevölkerung, die **mindestens** die Schadenwirkung $S(\tau, c)$ zeigt; zum Beispiel $S_{90}(\tau, c)$.

In der Praxis unterscheidet man in bezug auf die Einwirkungszeit τ zwischen drei Fällen: Mit kurzfristig meint man den Sekunden- und Minutenbereich (akute Wirkung), mit mittelfristig den Bereich Stunden bis Tage, und mit langfristig einen Zeitraum von Monaten und Jahren (chronische Wirkung).

Nun kann man die Information von Bild 8 in das Pfeildiagramm eintragen, siehe Bild 9. Für eine bestimmte Schadenwirkung (z. B. Augenbrennen infolge SO₂-Konzentration bei höchstens 10 % der Bevölkerung) ergibt dies eine Li-

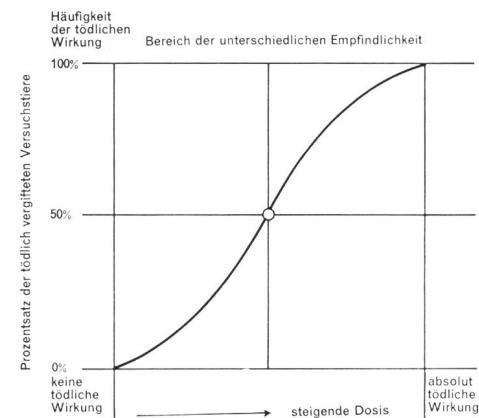


Bild 7. Beziehungen zwischen Dosis und Wirkung von Giften bei einmaliger Verabreichung [4].

S_{10} = Schadenwirkung
die bei höchstens 10 %
der Bevölkerung auftritt

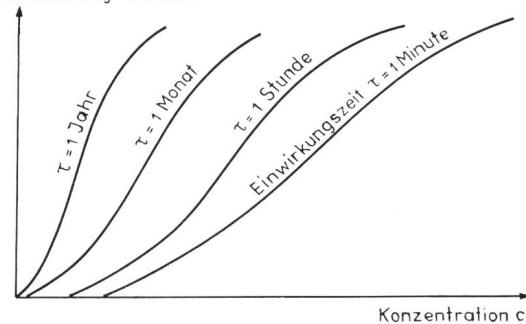


Bild 8. Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Schadstoffkonzentration, Einwirkungszeit und Schadenwirkung.

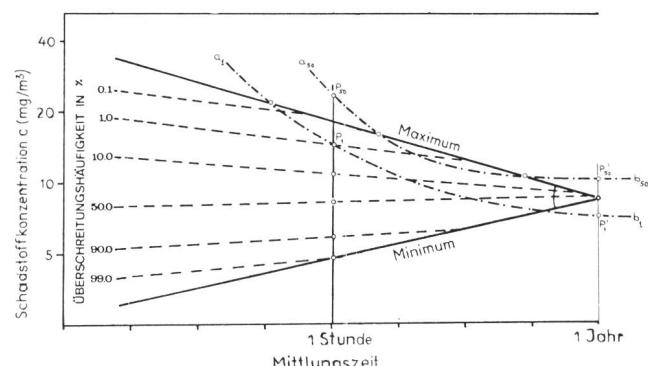


Bild 9. Die Schadenwirkungskurven für Augenbrennen a—b, einge tragen im Pfeildiagramm für die Schadstoffkonzentrationen.

nie a—b im Pfeildiagramm, weil die Konzentration c , bei welcher dieser Schaden auftritt, von der Einwirkungszeit abhängt. Die Einwirkungszeit τ wird hier mit der Mittlungszeit gleichgesetzt.

Die Kurve a₁—b₁ gilt für die empfindlichsten 1 %, die Kurve a₅₀—b₅₀ für die empfindlichere Hälfte der betrachteten Bevölkerung. Punkt P₁ bedeutet, dass bei 1 % der Bevölkerung mit akutem Augenbrennen zu rechnen ist, wenn die Konzentration $c = 18 \text{ mg/m}^3$, als Stundenmittel gemessen, auftritt. Der Punkt P₅₀ bedeutet, dass bei 50 % der Bevölkerung chronisches Augenbrennen auftritt, wenn die Konzentration — als Jahresmittel — 15 mg/m^3 erreicht.

4. Zur Festlegung von Qualitätsanforderungen als Zielgrößen des Luftzustandes

Risikoproblem 1

Normwerte entstehen, wenn man die vorhandenen Informationen über die Dosis—Wirkung-Beziehungen übersetzt auf normative Vorstellungen darüber, welche Schäden man als Folge der Luftverschmutzung tolerieren bzw. verhindern will. Zum Beispiel: Nirgends darf die Verschmutzung der Luft so sein, dass bei dort sich aufhaltenden Personen in mehr als 1 % der Fälle mit akutem oder chronischem Augenbrennen zu rechnen ist.

Wenn Bild 9 als massgebend gelten soll, so bedeutet dies, dass der maximal zulässige Stundenmittelwert (die Maximum-Linie) auf 18 mg/m³, und der maximal zulässige Jahresmittelwert auf 10 mg/m³ festgelegt werden müssten.

Es ist zu beachten, dass diese Überlegung das *individuelle Risiko* irgendeiner einzelnen Person limitiert. Neben dem individuellen Risiko gibt es ein kollektives. Das *kollektive Risiko* in unserem Falle wäre die Gesamtzahl der Fälle pro Jahr von akutem oder chronischem Augenbrennen. Das kollektive Risiko ist einerseits durch das festgelegte maximale individuelle Risiko (gegeben durch die Grenzwerte), und andererseits durch die geographische-zeitliche Verteilung der Luftverschmutzung und der Bevölkerung gegeben.

Risikoproblem 2

Man weiß einiges, aber dennoch «viel zu wenig» über die Dosis—Wirkung- bzw. Dosis—Schaden-Beziehungen von Schadstoffen. Dies führt zu einer wichtigen Frage, die heute viel diskutiert wird: Wie kann man Richtwerte festlegen, wenn man noch zu wenig Kenntnis über diese Beziehungen hat?

Die einen sagen, man müsse warten mit der Festlegung der Richtwerte, bis man sicherer sei, wie hoch man sie festlegen müsse.

Wir glauben, dass diese Haltung falsch ist, weil sie einem wichtigen Grundsatz des gesellschaftlich verantwortungsvollen Handelns widerspricht, der in vielen anderen Bereichen des Ingenieurwesens und der Wissenschaft schon immer angewendet wurde. Es handelt sich um ein Risikoproblem, ähnlich wie zum Beispiel im Brückenbau: Man hat schon Brücken gebaut zu einer Zeit, da man weder die Widerstandsfähigkeit der Baumaterialien genau kannte noch die Brückenkonstruktionen genau berechnen konnte. Als Kompensation für diese noch bestehende Unsicherheit hat man entsprechend grosse Sicherheitsfaktoren eingebaut, um das Risiko in tolerierbaren Grenzen zu halten. Die Situation in der Lufthygiene — oder im Umweltschutz allgemein — ist analog: Dass an verschiedenen Orten noch grosse Unsicherheiten bei der Festlegung von Richtwerten vorhanden sind, berechtigt uns nicht abzuwarten, bis wir es «genügend» genau wissen, sondern sie verpflichtet uns, die Richtwerte mit vorläufigen Sicherheitsmargen festzulegen, die dem Ausmass der Unsicherheit angemessen sind. Denn Luftschatstoffe werden ja weiter-

hin produziert. Wenn in einigen Jahren der Unsicherheitsbereich als Folge weiterer Forschungen abnimmt, so können neue Richtwerte mit kleineren Sicherheitsmargen verwendet werden. In Ausnahmefällen kann es auch notwendig werden, die Richtwerte zu verschärfen, wenn neuere Forschungsresultate dies verlangen.

Die Scheu vor einer nicht perfekten Lösung, bei der man Richt- oder Grenzwerte ein für allemal festlegt, muss dem Verantwortungsgrundsatz weichen. Man muss bei jenen Richtwerten, die man noch nicht mit Sicherheit festlegen kann, bewusst ein dynamisches Vorgehen wählen und es als solches bezeichnen. Einem solchen Konzept haftet durchaus nichts von «die wissen nicht, was sie wollen» an. Es liegt in der Sache des Risikoproblems, das man als solches anerkennen muss.

5. Schlussbemerkung

Wir haben uns darauf beschränkt darzustellen, welche Gesichtspunkte es zu beachten gilt, wenn

- a) lufthygienische Messdaten verwendet werden, um den Luftzustand zu beschreiben (Abschnitt 2),
- b) der Zusammenhang zwischen Schadstoffen in der Luft und ihren Schadwirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien dargestellt werden soll (Abschnitt 3), und
- c) es darum geht, Zielgrößen für den tolerablen Luftzustand als Richt- oder Grenzwerte festzulegen.

In der Praxis der Lufthygiene kommen noch zwei weitere Probleme dazu: Einmal treten in der Regel immer verschiedene Schadstoffe miteinander auf. Damit stellt sich die Frage, wie diese zusammenwirken, und ob es sinnvoll und möglich sei, den Luftzustand in solchen Situationen mit einer einzigen Zahl, einem Luftqualitäts- oder Luftverschmutzungsindex, zu beschreiben.

In der Planungspraxis sollte man sinnvolle Regeln haben, nach welchen man den einzelnen Schadstoffemittenten Auflagen zur Reduktion ihrer Emissionen macht. Diese Regeln sollten so sein, dass die auf der Immissionsseite gestellten Qualitätsanforderungen mit möglichst kleinem volkswirtschaftlichem Aufwand erreichbar sind und gleichzeitig keine groben Bevorteilungen oder Benachteiligungen auftreten.

Auf diese beiden Fragen soll in einem Folgeteil zu diesem Aufsatz eingegangen werden.

- [1] Artikel 24septies der Bundesverfassung über den Umweltschutz.
- [2] C. E. Zimmer und R. I. Larsen: Calculating Air Quality and Its Control. «Journal of Air Pollution Control Association» 15, 1965.
- [3] Air Quality Criteria for Sulfur Oxides. U. S. Department of Health, Education and Welfare, Washington, D. C., April 1970.
- [4] Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL). Probleme der Lufthygiene, Unterlagen zur Umweltgesetzgebung, zusammengestellt von der EKL.
Sonderdruck zur Beilage B, Nr. 6/1973, «Bulletin des Eidg. Gesundheitsamtes».

Adresse der Verfasser: Werner Martin, Thunstrasse 41, 3005 Bern, und Samuel Mauch, INFRAS, Beratungsgemeinschaft für Infrastruktur- und Entwicklungsplanung, Umwelt- und Wirtschaftsfragen, Dreikönigstrasse 51, 8002 Zürich.