

UmweltWissen

## Luftschadstoffe – Wirkungen auf Ökosysteme

Pflanzen, Tiere und unbelebte Substanzen wie Boden oder Wasser bilden Ökosysteme, die sich durch die Wechselwirkung zwischen den Komponenten regulieren und so langfristig stabil bleiben. Luftschadstoffe können all diese Komponenten und Prozesse verändern (s. Abb. 1). Mögliche Folgen sind z.B., dass ein Ökosystem seine Puffer- und Filterfunktion verliert oder dass seltene Arten dort nicht mehr überleben. Über Nahrungs- oder Futterpflanzen können Schadstoffe in die Nahrungskette gelangen und auch die menschliche Gesundheit belasten.

Einen knappen Überblick zu dieser umfangreichen Thematik finden Sie in dieser Publikation. Ergänzend empfehlen wir Ihnen unsere Publikation ► [Umweltmedium Luft](#), in der Sie einen Überblick über verschiedene Schadstoffemissionen erhalten sowie unsere Publikation speziell über ► [Ammoniak und Ammonium](#).

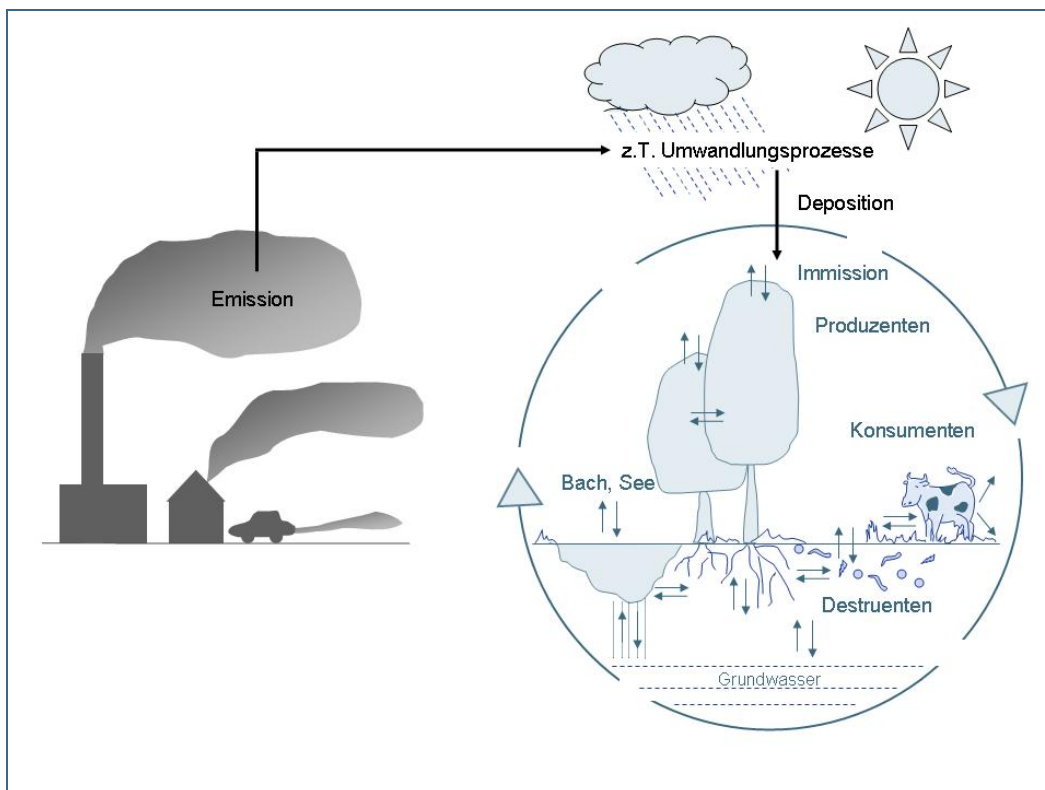


Abb. 1: Schadstoffeinträge in Ökosysteme. Ein Ökosystem besteht aus Pflanzen, Tieren und unbelebten Komponenten. Die Wechselwirkungen zwischen diesen Komponenten regulieren das Ökosystem, bis es im Gleichgewicht ist. Jedes Ökosystem ist durch Stoffflüsse mit anderen Ökosystemen verbunden. Der Eintrag von Schadstoffen über die Luft kann all diese Komponenten und Prozesse verändern.

## 1 Transport und Ablagerung von Schadstoffen

Der Transport von Spurenstoffen in der Atmosphäre kann sehr weiträumig sein und während dieses Transportes finden einige Umwandlungsprozesse statt (s. Publikationen ► [Umweltmedium Luft](#) und ► [Ammoniak und Ammonium](#)). Wo die Spurenstoffe abgelagert werden, hängt ebenfalls von meteorologischen Faktoren ab. Daneben spielen aber auch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Substanz sowie der Bewuchs und die Geländeeigenschaften eine Rolle:

Von **trockener** Deposition spricht man, wenn Stoffe ohne den Einfluss von Regenniederschlag abgelagert werden. Dies können insbesondere feste Partikel, aber auch gasförmige Stoffe sein. Je nach Gewicht werden sie in unterschiedlicher Entfernung von der Quelle abgelagert: Nahe bei Emittenten werden v. a. Grobpartikel abgelagert, während fernab zunehmend feine Partikel bzw. Aerosole oder gasförmige Stoffe dominieren.

Besonders hoch ist die trockene Deposition bei hoher „Oberflächenrauigkeit“, z.B. in Waldgebieten und Städten. Dieser sogenannte „Auskämmeffekt“ kann z.B. den Eintrag in Waldgebiete im Vergleich zu einer offenen Wiesenfläche um den Faktor 3 erhöhen. Die trockene Deposition ist in vielen Ökosystemen der wichtigste Eintragspfad.

Bei der **nassen** Deposition werden die Spurenstoffe mit dem Niederschlagswasser aus der Atmosphäre ausgewaschen. Dabei kann es sich um Regen oder um Schnee handeln. Die Stoffe sind dabei z. T. im Niederschlagswasser gelöst. Die nasse Deposition ist v. a. in regenreichen Gebieten ein wichtiger Eintragspfad.

**Feuchte** Deposition nennt man den Eintrag von Substanzen, die im Nebel gelöst sind. Nebel ist ein feinst verteiltes Aerosol-Wassertröpfchen-Gemisch. Dieses Gemisch hat eine sehr große Oberfläche und kann daher eine hohe Schadstofflast tragen. Auch beim Nebel gibt es den „Auskämmeffekt“: Je größer die Oberfläche, desto mehr Nebel wird ausgekämmt, z.B. bei Nadelbäumen im Vergleich zu Laubbäumen. Dieser Eintragspfad ist z.B. in den nebelreichen Kammlagen der Mittelgebirge von Bedeutung.

## 2 Was ist eine Wirkung?

Unter dem Begriff „Wirkung“ wird nicht allein die akute Schädigung eines Lebewesens verstanden, sondern auch die Anreicherung von Schadstoffen – sowohl im Individuum als auch in einem Umweltmedium. Dabei muss noch keine schädliche Veränderung festgestellt werden.

### Definition von Wirkungen

- **Reaktion** eines Lebewesens auf einen Schadstoff: **akute Schädigung**
- **Anreicherung** im oder am Organismus oder in einem Umweltmedium über ein Normalgehalt hinaus: **Langzeitwirkung**

Die Veränderung, die ein Schadstoff in einem Ökosystem auslöst, ist aufgrund der vielfältigen Wechselbeziehungen innerhalb des Ökosystems oft sehr komplex. Ansatzpunkt für die Veränderung kann zum einen das Individuum sein, wenn der Schadstoff in den Stoffwechsel eingreift. Zum anderen können die abiotischen Umweltfaktoren verändert werden, so dass sich der ganze Lebensraum verändert. Für Pflanzen kann man das z.B. so beschreiben:

- Veränderungen des Stoffwechsels: Pflanzenarten reagieren auf denselben Schadstoff sehr unterschiedlich. Wird z.B. das Wachstum einer Pflanze stärker beeinträchtigt als das ihrer Nachbarn, verliert sie an Konkurrenzstärke. Langfristig kann sich dann die Artenzusammensetzung eines Bestandes verschieben. Produziert diese neue Pflanzengesellschaft z.B. eine anders zusammengesetzte Streu, verändert sich langfristig auch der Stoffhaushalt des Bodens.

- Veränderung des Lebensraums: Reichern sich Schadstoffe langfristig im Boden an, verändert dies die Wachstumsbedingungen für die Pflanzen und Tiere. Empfindliche Arten können so ihren Lebensraum verlieren. Z.B. werden in vielen naturnahen Ökosystemen die kritischen Belastungsgrenzen von stickstoffhaltigen Verbindungen überschritten. Viele Arten der Roten Liste sind jedoch auf nährstoffarme Standorte angewiesen, die u. a. auch durch diesen Stoffeintrag immer seltener werden (s. Abschnitt 4 und Publikation ► [Ammoniak und Ammonium](#)).

Die Wirkung eines Schadstoffes betrifft also potenziell immer das gesamte Beziehungsgeflecht in einem Ökosystem (s. Abb. 2). Veränderungen können sowohl einzelne Individuen, die Artenzusammensetzung der Pflanzengemeinschaft oder auch das gesamte Ökosystem beeinflussen (weitere Beispiele s. Tab. 1).

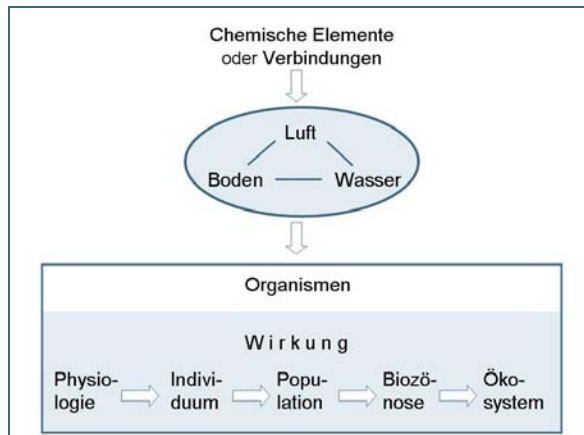


Abb. 2: Wirkungskette. Quelle: Peichl 1993

Tab. 1: Beispiele für Prozesse und Eigenschaften in Pflanzen und Ökosystemen, die von Schadstoffeinträgen verändert werden können, aufgeteilt auf die Ebene der Zelle, des Gewebes, des Organismus und der Pflanzengemeinschaft bzw. des Ökosystems. Wirkungen auf Ebene der Zelle und des Gewebes können Änderungen auf der Ebene des Organismus und der Pflanzengemeinschaft bzw. des Ökosystems zur Folge haben. Quelle: Guderian 2001, verändert

Prozesse und Eigenschaften, die von Schadstoffeinträgen verändert werden können			
Zelle	Gewebe	Organismus	Pflanzengemeinschaft, Ökosystem
Enzymaktivität Stoffwechselregulation Membranintegrität Zellfunktion von Wurzelzellen Zelltod	Energie- und Wasserhaushalt: Photosynthese, Atmung, Verdunstung Gaswechsel: Regulation der Spaltöffnungen Gaswechsel: Verfärbungen des Blattes und Tod des Gewebes Nährstoffaufnahme: Wurzelsymbiosen	Pflanzenwachstum Vitalität Konkurrenzkraft Samenproduktion Empfindlichkeit gegen Stressfaktoren Pflanzentod	Produktivität, Ertrag und Qualität von Kulturpflanzen Artenzusammensetzung Bestandsstruktur Wirt-Parasit-Verhältnis, Wurzelsymbiosen Nahrungsnetz: Folgewirkungen auf die weiteren Glieder der Nahrungskette Stabilität und Selbstregulierung des Ökosystems

### 3 Ozon

Bodennahes Ozon ist die mengenmäßig wichtigste Komponente der Photooxidantien. Das sind Luftschadstoffe, die unter der Einwirkung von Licht entstehen und stark oxidierend wirken. Vorläufersubstanzen der Photooxidantien sind insbesondere Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide, die v. a. aus dem Verkehr stammen.

Besonders im Sommer und bei länger anhaltenden Schönwetterperioden können die Ozonkonzentrationen in der bodennahen Luft erhöht sein. Dabei sind ausgeprägte regionale Unterschiede sehr typisch: Im Nahbereich stark befahrener Stadtstraßen ist die Ozonkonzentration eher geringer als in verkehrsfernen Bereichen, z.B. in Parkanlagen oder am Stadtrand (s. Publikation ► [Bodennahes Ozon](#)). Am höchsten ist sie oft in ländlichen Gebieten. Dementsprechend sind dort auch vermehrt Pflanzenschäden zu erwarten.

Ozon wirkt direkt auf Nadeln und Blätter. Es dringt in das Gewebe ein und zerstört dort Enzyme und Membranen. Dies wird sichtbar durch Nekrosen, d.h. durch punktförmige Zerstörungen des Gewebes (s. Abb. 3). Bei stärkerer Schädigung können diese Punkte auch zu Flächen zusammenwachsen. Sehr stark geschädigte Blätter und Nadeln sterben ab.



Abb. 3: Ozonschäden an Tabak

Sterben zu viele Blätter oder Nadeln ab, kann die Pflanze weniger Photosynthese betreiben und wächst schwächer. Bei Bäumen erkennt man dies z.B. an verlichteten Baumkronen. Allerdings reagieren nicht alle Pflanzen gleich empfindlich auf Ozon (s. Tab. 2).

Tab. 2: Ozonempfindlichkeit von Pflanzen. Quelle: VDI 1989

Ozonempfindlichkeit	Pflanze
Weniger empfindlich	Rübe, Kopfsalat, Löwenzahn, Spitzahorn
Empfindlich	Kohl, Mais, Weißklee, Kiefer
Sehr empfindlich	Gerste, Weizen, Kartoffel, Europäische Lärche

### 4 Stickstoff- und Schwefelverbindungen

Stickstoffverbindungen fördern das Pflanzenwachstum (s. Abschnitt 4.1) und tragen gemeinsam mit den Schwefelverbindungen zur Versauerung von Böden und Gewässern bei (s. Abschnitt 4.2). Wichtige Vertreter, die über die Luft in Ökosysteme eingetragen werden, sind z.B. Schwefeldioxid (s. Abschnitt 4.3), Stickstoffoxide sowie Ammoniak bzw. Ammonium (s. Publikation ► [Ammoniak und Ammonium](#)).

- **Nährstoffanreicherung (Eutrophierung)**

Durch Stickstoffverbindungen wird zusätzlich Stickstoff in Ökosysteme eingetragen. Dann beobachtet man einen starken Wachstumsschub der Pflanzen und gleichzeitig verändern sich viele Prozesse: Nährstoffungleichgewichte und Bodenversauerung, Verschiebung der Artenzusammensetzung sowie Erhöhung der Stoffausträge in benachbarte Gewässer oder ins Grundwasser sind die Folgen.

**Wirkungen von Stickstoff (N) auf Ökosysteme**

- Wachstumssteigerung
- Nährstoffungleichgewichte in Boden und Pflanzen
- Bodenversauerung
- Verschiebung der Artenzusammensetzung aufgrund unterschiedlicher Empfindlichkeit gegen die genannten Prozesse
- Erhöhte N<sub>2</sub>O-Emissionen (Treibhausgas)
- Nitrat-Belastung von Grund- und Oberflächenwasser

Jährlich gelangen in Deutschland ca. 16 kg N je ha über den Luftpfad in die Ökosysteme. Fast 99 % der natürlichen oder naturnahen Ökosysteme sind davon betroffen. Eine ausführlichere Darstellung finden Sie in unserer Publikation ► [Ammoniak und Ammonium](#).

- **Versauerung**

Durch den Eintrag von Stickstoff- und Schwefelverbindungen versauern Böden und Gewässer. Dabei bleibt der pH-Wert so lange konstant, wie die Säurebildner abgepuffert werden können. Ist die Pufferkapazität jedoch erschöpft, kommt es zu einer sprunghaften Verringerung des pH-Wertes. Dies hat weitreichende Folgen für die chemischen Prozesse im Ökosystem und für die Lebensbedingungen der Arten.

**Folgen der Versauerung**

- Auswaschung von Kationen aus dem Boden, z.B. Calcium, Magnesium, Kalium
- Mobilisierung von Schwermetallen im Boden
- Verschlechterung der Bodenstruktur
- Schädigung der Bodenlebewesen
- Auswaschung von Nährstoffen aus Blättern und Nadeln (Nährstoffverlust für die Pflanze)
- Verschiebung der Artenzusammensetzung aufgrund unterschiedlicher Empfindlichkeit gegen die genannten Prozesse

Eine ausführliche Darstellung finden Sie in unserer Publikation ► [Ammoniak und Ammonium](#).

- **Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)**

Waldsterben und Versauerung von Böden und Gewässern sind Schlagworte, die lange Zeit v. a. mit SO<sub>2</sub> in Verbindung gebracht wurden. Infolge von Emissionsminderungsmaßnahmen (z.B. Rauchgas-Entschwefelung bei Großfeuerungsanlagen) hat die SO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen. Ebenso ist auch die Wirkung auf Pflanzen erkennbar zurückgegangen (s. Abb. 4).

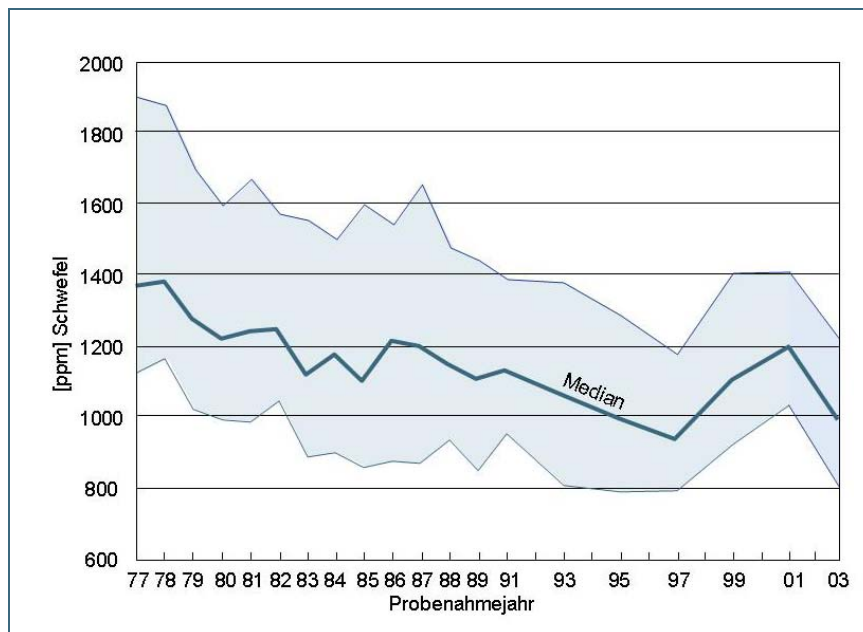


Abb. 4: Schwefelgehalt in Fichtennadeln 1977-2001. Innerhalb des hellblauen Bereichs befinden sich 80 % der Messwerte. Der Median bezeichnet den mittleren Messwert. Quelle: LfU 2001

Deutliche **Schäden an Pflanzen** zeigen sich nur bei hohen  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen, wobei die Schäden besonders stark sind, wenn gleichzeitig  $\text{NO}_2$  einwirkt. Bäume werden erst ab gewissen Schwellenwerten geschädigt, denn in geringen Mengen ist  $\text{SO}_2$  sogar ein wichtiger Nährstoff. Höhere  $\text{SO}_2$ -Mengen können sie bis zu einem gewissen Grad neutralisieren (Oxidation zu Sulfat), wenn genügend positiv geladene Metallionen vorhanden sind. Diese Metallionen stehen dann für andere Stoffwechselprozesse nicht mehr zur Verfügung. Ist die Nährstoffversorgung (K, Ca, Mg) auf einem Standort bereits gestört, kann es so zu Mineralstoffmangel und Wachstumsstörungen kommen. Auch andere Prozesse können hierbei eine Rolle spielen, z.B. Wassermangel oder die Waldbewirtschaftung.

## 5 Schwermetalle

Schwermetalle kommen von Natur aus in der Umwelt vor: Sie sind in die Kristallstruktur von Gesteinen eingebunden, aus der sie durch Verwitterung freigesetzt werden. Außerdem gelangen sie durch Vulkanausbrüche und durch technische Prozesse in die Umwelt, v. a. aus folgenden Quellen:

- Industrieprozesse: Bedeutende Quellen sind z.B. Betriebe der Metallbranche.
- KfZ-Verkehr: Durch Brems-, Kupplungs- und Reifenabrieb entstehen fein verteilte Stäube, die Schwermetalle enthalten (z.B. Sb, Cu, Pb, Zn).
- Landwirtschaft: Düngemittel und Pestizide können zu einer lokal bedeutsamen Anreicherung von Schwermetallen führen (z.B. Cu, Cd). Generell ist die Belastungssituation in ländlichen Regionen jedoch deutlich geringer als in städtischen Verdichtungsräumen.

Manche Metalle sind für Mensch und Tier essentiell, d.h. die Zufuhr bestimmter Mengen ist lebensnotwendig. Erst in höheren Konzentrationen wirken diese Metalle toxisch. Außerdem können verschiedene Organismen gegenüber demselben Element unterschiedlich empfindlich sein.

Essentielle und nicht essentielle Schwermetalle	
Essentiell:	Nicht essentiell:
• Mangan	• Arsen
• Kobalt	• Blei
• Kupfer	• Cadmium
• Selen	• Quecksilber
• Zink	• Thallium

Schwermetalle können **Bodenorganismen** schädigen und wirken so indirekt auf die Lebensbedingungen von Pflanzen. Bodenorganismen bauen abgestorbene Biomasse in die organische Substanz des Bodens ein. Sind sie sehr aktiv, entsteht ein humoser, gut durchlüfteter Boden, der gute Wachstumsbedingungen für Pflanzen bietet.

**Mobilität und Toxizität** der Schwermetalle im Boden sind stark vom pH-Wert abhängig: Bei neutraler Bodenreaktion sind die Schwermetalle v. a. an die Bodenmatrix gebunden. Je stärker die Versauerung, desto mehr Schwermetalle gehen in Lösung. Dann sind sie im Bodenwasser nachweisbar und damit für Pflanzen und Bodenorganismen verfügbar. Außerdem können sie mit der Bodenlösung ins Grundwasser oder in andere Ökosysteme ausgewaschen werden.

Langfristig ist die **Anreicherung** von Schwermetallen problematisch, da es in Ökosystemen keine Senken gibt, d.h. Schwermetalle können nicht abgebaut werden. Besonders Arten am Ende der Nahrungskette können erheblich belastet werden und letzten Endes kann auch der Mensch davon betroffen sein.

## 6 Organische Verbindungen

Zu den organischen Verbindungen, die sich in Ökosystemen anreichern, zählen polychlorierte Biphenyle (s. Abschnitt 6.1), polychlorierte Dibenzop-Dioxine und -furane (s. Abschnitt 6.2) sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (s. Abschnitt 6.3). Weitere Verbindungen werden zur Gruppe der persistenten organischen Verbindungen zusammengefasst (s. Abschnitt 6.4).

Diese Stoffgruppen kommen von Natur aus kaum in der Umwelt vor und sind schwer abbaubar (persistent). Sie wirken in geringsten Konzentrationen toxisch, einige gelten sogar als kanzerogen und müssen daher besonders aufmerksam beobachtet werden.

### • Polychlorierte Biphenyle (PCB)

PCB sind eine große Gruppe von Verbindungen, die häufig eingesetzt wurden, z.B. in Fugendichtungen, Hydraulikflüssigkeiten oder zu Kühlzwecken in Großtransformatoren bzw. in Kondensatoren. Seit 1983 sind Produktion und Verwendung dieser Stoffe in Deutschland verboten. Sie verdunsten jedoch immer noch aus Gebäuden, Böden und Altlasten. Ausführlichere Informationen finden Sie in unserer Publikation ► [Polychlorierte Biphenyle \(PCB\)](#).

PCB gehören zu den Verbindungen, die überall in der Umwelt nachzuweisen sind. Sie reichern sich in der Nahrungskette stark an und sind besonders in Endgliedern der Nahrungskette zu finden – z.B. im Fettgewebe höherer Tiere oder auch im Menschen. Dagegen sind die Konzentrationen in Boden, Luft und Wasser nur sehr gering.

#### Eigenschaften der PCB

- Langlebig
- Fettlöslich, daher Anreicherung im Fettgewebe
- Anreicherung in der Nahrungskette
- Verdacht auf krebserzeugende Wirkung

Die Belastung mit PCB ist in städtisch geprägten Bereichen z. T. deutlich höher als in ländlichen Regionen (Erfassung durch Bioindikatoren, s. Abschnitt 7). Auch in den Sommermonaten findet man höhere PCB-Belastungen, da PCB in der warmen Jahreszeit stärker verdunsten.

### • Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)

PCDD/F sind eine Gruppe von Verbindungen, die z.B. aus industriellen thermischen Produktionsprozessen (z.B. Metallindustrie) und aus Feuerungsanlagen stammen. Sie entstehen insbesondere, wenn chlorhaltige Stoffe bei ungünstigen Temperaturen verbrennen (z.B. PVC, s. Publikation

► **Polyvinylchlorid (PVC)**. Von Natur aus kommen sie in der Umwelt nur in äußerst geringen Konzentrationen vor.

PCDD/F werden von Pflanzen aus der Luft aufgenommen. Dagegen sind sie im Boden stark adsorbiert und daher kaum bioverfügbar. Sie sind sehr stabil und gelangen über die Nahrungskette bis zum Menschen. PCDD/F wirken z. T. krebserzeugend. Sie sind gut fettlöslich und reichern sich im Fettgewebe an. Sie wurden u. a. auch in Muttermilch nachgewiesen.

#### Eigenschaften von PCDD/F

- Langlebig
- Fettlöslich, daher Anreicherung im Fettgewebe
- Anreicherung in der Nahrungskette
- Z. T. krebserzeugende Wirkung

Im letzten Jahrzehnt hat die PCDD/F-Belastung der Ökosysteme und der Nahrungsmittel deutlich abgenommen (Erfassung durch Bioindikatoren, s. Abschnitt 7). Trotzdem wird der Zielwert für die duldbare tägliche Aufnahme von 1 pg WHO-TEQ<sup>1</sup> pro kg Körpergewicht von einem beträchtlichen Teil der deutschen sowie europäischen Bevölkerung noch überschritten.

#### • **Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)**

Die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) werden hauptsächlich durch Tätigkeiten des Menschen in die Umwelt gebracht. Sie entstehen als Nebenprodukte unvollständiger Verbrennung von organischen Materialien, insbesondere beim Einsatz von Holz in Kleinf Feuerungsanlagen z.B. für die Hausheizung und dem Kfz-Verkehr.

PAK-Moleküle binden sich an Ruß und Staubpartikel und werden mit diesen verfrachtet. Einige Verbindungen gelten als stark krebserregend. Humantoxikologisch besonders relevant sind Benzo(a)pyren und Dibenz(a,h)anthracen.

#### Eigenschaften von PAK

- Langlebig
- Starke Bindung an Ruß- und Staubpartikel
- Anreicherung in der Nahrungskette
- Z. T. krebserzeugende Wirkung

In ländlichen Gebieten ist die PAK-Belastung relativ gering (Erfassung durch Bioindikatoren, s. Abschnitt 7). Dennoch kann man spezielle Belastungsspitzen z.B. durch Hausheizungen nachweisen: Die Anreicherung im Herbst, wenn die Heizperiode beginnt, ist doppelt so hoch wie im Frühjahr oder im Sommer. Dies lässt sich – auf höherem Niveau – auch in städtischen Ballungsräumen beobachten.

#### • **Weitere persistente organische Verbindungen (POPs)**

Langlebige organische Verbindungen (POPs) findet man mittlerweile in allen Umweltmedien. Sie werden auch weit entfernt von den ursprünglichen Ausbringungsorten nachgewiesen, z.B. im Hochgebirge und in der Arktis.

#### Eigenschaften der POPs

- Langlebig
- Anreicherung in der Nahrungskette
- Überall in der Umwelt nachweisbar
- Z. T. krebserzeugende Wirkung

Eine besonders wichtige Stoffgruppe sind die chlorierten Pflanzenschutzmittel (Aldrin, Chlordan, DDT, Dieldrin, Endrin, Heptachlor, Hexachlorbenzol, Mirex, Toxaphen). Zusammen mit den zuvor genannten PCB und Dioxinen / Furanen sind sie als „dreckiges Dutzend“ der UNEP (Umweltprogramm der Vereinten Nationen) bekannt. Weitere problematische Stoffe sind z.B. Insektizide wie Lindan und Endosulfan, das Biozid Tributylzinn (TBT) sowie die Gruppe der bromierten Flammschutzmittel (Polybromierte Diphenylether: PBDE).

## 7 Messung von Schadstoffeinträgen: Bioindikation

Schadstoffe können in den Depositionen gemessen werden z.B. im Niederschlagswasser oder im Staub. Diese Daten benötigt man, wenn man die langfristige Anreicherung von Schadstoffen in Ökosystemen abschätzen will.

Zur Beurteilung der belebten Umwelt bedient man sich zusätzlich der sog. **Bioindikatoren**: Organismen oder Organismengemeinschaften, die stellvertretend für alle Tier- und Pflanzenarten die Wirkung von Umweltfaktoren anzeigen. Dabei sind zwei Auswahlkriterien von Bedeutung:

- **Sensible Reaktion auf einen Umweltfaktor**  
Bioindikatoren reagieren sehr sensibel auf einen speziellen Umweltfaktor, z.B. ist Tabak empfindlich gegenüber Ozon. Für die Untersuchungen wird darüber hinaus eine spezielle Tabaksorte verwendet, die besonders empfindlich ist. Die Pflanzen werden zwei Wochen im Freien ausgesetzt, anschließend erfasst man den Anteil geschädigter Blattfläche. Mit dieser sog. Bonitierung schätzt man die Belastung mit Photooxidantien in den vergangenen zwei Wochen ab.
- **Verallgemeinerung für eine Lebensgemeinschaft möglich**  
Die Aussage, die aus der Untersuchung eines Bioindikators gewonnen werden kann, muss für eine Lebensgemeinschaft zu verallgemeinern sein: Beispiel hierfür ist Weidelgras, das als Futtermittel u. a. für die Beurteilung von Schadstoffgehalten im Grünfutter verwendet wird (Abb. 5). Auch die Anreicherung von Schwermetallen und PCDD/F, PCB sowie PAK wird anhand standardisierter Graskulturen untersucht.



Abb. 5: Standardisierte Graskultur von „Welschem Weidelgras“ zur Ermittlung der Schwermetallanreicherung

Weitere Beispiele für Schadstoffe, Bioindikatoren und angezeigte Wirkung finden Sie in Tabelle 3.

Tab. 3: Beispiele für Schadstoffe und ihre Wirkung auf Bioindikatoren

Schadstoff	Bioindikator	Welche Wirkung wird angezeigt?
Organische Verbindungen (PCB, PCDD/F, PAK)	Weidelgras, Grünkohl	Anreicherung
Schwermetalle	Weidelgras, Moos	Anreicherung
SO <sub>2</sub>	Standortfichte	Anreicherung
Ozon	Tabak	Reaktion: Blattschäden
Fluor	Gladiolen	Reaktion: Blattschäden
SO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , Staub, Schwermetalle	Flechten	Reaktion: Artenverschiebung Anreicherung <sup>3</sup>

<sup>3</sup> Als sog. „Akkumulationsindikator“ für Schwermetalle regional von Bedeutung

Die **Auswahl des Standortes**, an dem Bioindikatoren ausgesetzt und beprobt werden, hat besondere Bedeutung, da sich die Aussage des Ergebnisses je nach Emittentendichte in der Umgebung sehr stark unterscheiden kann:

- Zur Ermittlung der Hintergrundbelastung dienen Untersuchungen von Bioindikatoren an emittentfernen Standorten. Derzeit gibt es in Bayern 8 Dauerbeobachtungsstationen, die seit 1993 beprobt werden (s. Abb. 6).
- Der Einfluss von Emittenten lässt sich erfassen, indem gezielt Pflanzen in der Umgebung einer konkreten Emissionsquelle untersucht werden.

## 8 Bewertung

Aufgrund der Vielzahl an Schadstoffen und der möglichen Wirkungen sind auch die Bewertungsgrundlagen je nach Fragestellung verschieden. Einige Beispiele sind:

- Um die Belastung empfindlicher Ökosysteme zu bewerten, bedient man sich z.B. des Konzepts der kritischen Belastungsgrenzen und Konzentrationen (Critical Loads und Critical Levels, s. Publikation ► [Ammoniak und Ammonium](#)).
- Daneben gibt es auch Konzepte zum Schutz spezieller Schutzgüter, z.B. Trinkwasser oder Futtermittel. Damit soll auch der Eintrag in die menschliche Nahrungskette berücksichtigt werden.
- Der Vergleich mit Hintergrundwerten unbelasteter Räume sowie mit Indikatoren ermöglicht ebenfalls eine Einordnung der Immissionswerte.

Die umfassendsten Grundlagen für die Bewertung von Schadstoffimmissionen liefern die VDI-Richtlinien (insbesondere VDI 2310) sowie die TA Luft und auch Verordnungen wie die Futtermittelverordnung oder die Trinkwasserverordnung. Neuere Erkenntnisse aus der Ökosystemforschung führen zu einer ständigen Weiterentwicklung heute geltender Bewertungsgrundlagen.

## 9 Fazit

Vielfältig wie die Komponenten und Wechselbeziehungen in den verschiedenen Ökosystemen kann auch die Wirkung der Luftschadstoffe sein, zumal es sich um eine Vielzahl von Substanzen handelt. Um diese Wirkung zu beurteilen, benötigt man Daten zur Stoffkonzentration in den verschiedenen Umweltmedien (Boden, Wasser, Luft). Diese Daten müssen durch Untersuchungen ergänzt werden, wie ein Schadstoff auf Pflanzen oder auf Ökosysteme wirkt. Dazu bedient man sich auch der Bioindikatoren, die als Stellvertreter die Wirkungen von Luftschadstoffen anzeigen. Dieser Untersuchungsansatz wird ständig weiterentwickelt.

## 10 Literatur

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (jetzt: Bayer. Landesamt für Umwelt) (Hrsg.):

(2001): Immissionsökologischer Jahresbericht 1998/99. Augsburg

(2003): Immissionsökologischer Bericht 2000-2001. Augsburg

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg., 1993): Umweltschutz und Straßenverkehr. Bericht

Fellenberg G. (1977): Umweltforschung. Einführung in die Probleme der Umweltverschmutzung. Berlin

Fiedler H. (1995): Quellen von PCDD/PCDF und Konzentrationen in der Umwelt. Organohalogen Compounds 22. Bayreuth, S. 7-39

Guderian R. (Hrsg.):

(2000): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Bd. 1A: Atmosphäre, Anthropogene und biogene Emissionen – Photochemie der Troposphäre – Chemie der Stratosphäre und Ozonabbau. Berlin

(2000): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Bd. 1B: Aerosol/Multiphasenchemie – Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen – Auswirkungen auf Strahlung und Klima. Berlin

(2001): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Bd. 2A: Terrestrische Ökosysteme, Immissionsökologische Grundlagen – Wirkungen auf Boden – Wirkungen auf Pflanzen, Berlin

Hagenmaier H., Lindig C., She J. (1993): Correlation of environmental occurrence of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo furans with possible sources. DIOXIN'93 12, Wien, S. 271-274

Möller D. (2003): Luft – Chemie – Physik – Biologie – Reinhaltung – Recht. Berlin

Nagel H.-D., Gregor H.-D. (Hrsg., 1999): Ökologische Belastungsgrenzen. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag, Berlin

Peichl (1993): Methodik der Bioindikation für Aufgaben des Biomonitorings: Grundlagen – In: Immissionserfassung mit Bioindikatoren (Seminar am 27. April 1993 in Wackersdorf), unveröffentlicht

Schubert R. (Hrsg., 1991): Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen. Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart

#### Gesetzliche Regelungen und technische Richtlinien

Richtlinie 2001/102/EG vom 27. November 2001 zur Änderung der Richtlinie 1999/29/EG des Rates über unerwünschte Stoffe und Erzeugnisse in der Tierernährung, ABl. Nr. 6/45

Verordnung (EG) Nr. 2375/2001 vom 29. November 2001 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 466/2001 der Kommission zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, Abl. Nr. L 321/1

Verordnung (EG) Nr. 850/2004 vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG, ABl. Nr. L 158/7, ABl. 2004 Nr. L 229/5

Futtermittelverordnung (FutMV) vom 29.11.2000, Anlage 5, BGBl. I 2000 S. 1605, z.g am 07.07.2004, BGBl. I 2004 S. 1498

Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung-TVO) vom 28.05.2001. BGBl. I 2001 S. 959

Verordnung zur Verminderung von Sommersmog, Versauerung und Nährstoffeinträgen (33. BImSchV) vom 13.07.2004, BGBl. I 2004 S. 1612

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24.07.2002 (TA Luft), GMBI. I S.511

VDI (1989): VDI-Richtlinie 2310/6, Maximale Immissionskonzentration für Ozon

VDI (2002): VDI-Richtlinie 2310/6, Maximale Immissions-Werte zum Schutz der Vegetation – Maximale Immissionskonzentrationen für Ozon

#### Internet

Immissionsökologie: ► [www.lfu.bayern.de/luft/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/luft/index.htm)

Die Dauerbeobachtungsstationen des LfU: ► [www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/index.htm)

## LfU-Publikationen

Immissionsökologischer Jahresbericht 1998/99:

▶ [www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu\\_luft\\_00086.htm](http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_luft_00086.htm)

Immissionsökologischer Bericht 2000-2001:

▶ [www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu\\_luft\\_00107.htm](http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_luft_00107.htm)

Information über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs:

▶ [www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/doc/abgase.pdf](http://www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/doc/abgase.pdf)

Weiterführende Publikationen des Infozentrums UmweltWissen

- ▶ [Ammoniak und Ammonium](#)
- ▶ [Automobil und Umweltschutz](#)
- ▶ [Bodennahes Ozon](#)
- ▶ [Polychlorierte Biphenyle \(PCB\)](#)
- ▶ [Polyvinylchlorid \(PVC\)](#)
- ▶ [Umweltmedium Luft](#)
- ▶ [UVB-Strahlung – Wirkung auf Pflanzen](#)

## 11 Ansprechpartner

Private Anfragen an das Bayerische Landesamt für Umwelt richten Sie bitte an unser Bürgerbüro:

E-Mail: [oeffentlichkeitsarbeit@lfu.bayern.de](mailto:oeffentlichkeitsarbeit@lfu.bayern.de)

Fragen und Anregungen zu Inhalten, Redaktion und Themenwahl der Publikationen von UmweltWissen sowie Anfragen bezüglich Recherche und Erstellung von Materialien für die Umweltbildung/-beratung richten Sie bitte an:

UmweltWissen am Bayerischen Landesamt für Umwelt:

Telefon: 0821 / 9071 – 5671

E-Mail: [umweltwissen@lfu.bayern.de](mailto:umweltwissen@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de/umweltwissen](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen)

---

### Impressum:

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
86177 Augsburg

Telefon: (08 21) 90 71-0

Telefax: (08 21) 90 71-55 56

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

Bearbeitung:

Joachim Nittka (LfU)

Dr. Katharina Stroh (LfU)

Stand:

2004 (Links 2011)

---

Diese Veröffentlichung wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Sie haben diese Veröffentlichung auf Papier, wollen aber auf die verlinkten Inhalte zugreifen?

Die jeweils aktuellste Ausgabe finden Sie im Internet unter:

▶ [www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw\\_39\\_luftschadstoffe\\_wirkungen\\_oekosysteme.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_39_luftschadstoffe_wirkungen_oekosysteme.pdf)

oder unter

▶ [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de): UmweltWissen > Luft > Überblick