

2 Wirkungen von Luftverunreinigungen auf die Vegetation

2.1 Allgemeines

Die von einer Quelle in die Atmosphäre abgegebenen Stoffe werden als Emissionen bezeichnet. In Tabelle 1 sind einige wichtige Emissionsquellen (hauptsächlich industrielle Emittenten) und deren wesentliche gas- und staubförmige Luftverunreinigungen zusammengestellt. In Hessen werden die Emissionen folgender Emittentengruppen landesweit erhoben: Industrie, Kleingewerbe, Gebäudeheizung, Verkehr, biogene und nicht gefasste Quellen sowie privater Verbrauch und Handwerk. Die freigesetzten Luftverunreinigungen werden in der Atmosphäre verteilt, durch luftchemische Reaktionen teilweise in andere Stoffe umgewandelt (sekundäre Luftverunreinigungen) und am Einwirkungsort als Immissionen wirksam. Pflanzen reagieren auf verschiedene Schadgase empfindlicher als Mensch und Tier [11]. Sie stellen daher empfindliche Indikatoren für Luftverunreinigungen dar, die auch bei niedrigen Belastungen deutlich erkennbare Effekte zeigen.

Die Beeinträchtigung der Pflanzen durch Luftschadstoffe kann prinzipiell auf verschiedenen Wegen erfolgen und zu unterschiedlichen Folgeerscheinungen führen [3]:

- Einfluss gasförmiger Schadstoffe auf die Assimila-

tionsorgane → Bildung von Chlorosen (mangelnde Ausbildung von Blattgrün), Entstehung von Nekrosen (Absterben von Zellen bzw. Gewebepartien), biochemische Veränderungen, Aufnahme von Fremdstoffen.

- Ablagerung von Stäuben auf der Blattoberfläche → Minderung der einfallenden Strahlung, Über-temperatur, Eindringen toxischer Stoffe in das Blatt, Fremdstofftransport in die Nahrungskette.
- Einwirkung von Stäuben über den Bodenpfad → Änderung des Boden-pH-Werts und des Spurenelementgehalts, Störung des Wurzel- und Pflanzenwachstums, Aufnahme toxischer Stoffe.

Die unterschiedliche Kombination aller am Standort einwirkenden exogenen und endogenen Faktoren führt zu verschiedenen Wirkungsausprägungen. An Einflussfaktoren sind neben den Luftschadstoffen andere Umweltfaktoren (Standortfaktoren, biotische Stressoren) sowie pflanzeigene Faktoren (genetische Faktoren, physiologischer Zustand) zu nennen. Diese können den Immissionswirkungen vergleichbare Reaktionen bei Pflanzen hervorrufen und/oder das schädigende Potential von Immissionen verändern [4].

Tab. 1: Luftverunreinigungen einiger Emissionsquellen (nach DÄBLER [3])

Emittenten	Gasförmige Luftverunreinigungen	Staubförmige Luftverunreinigungen
Kraftwerke, Hausbrand	SO ₂ , NO _x , CO, H ₂ S, HF	Flugasche (enthält meist Fluor, Arsen und weitere Spurenelemente)
Ölheizungen	SO ₂ , SO ₃	Ruß, z. T. V-haltig
Synthesechemie	SO ₂ , NO _x , SO ₃ , H ₂ S, CO, z. T. HCl, Cl ₂ , HF, Kohlenwasserstoffe, Phenole, Amine, Mercaptane	Ruß, Flugasche, z. T. Chloride und Fluoride
Kohleveredlung, Kokereien	SO ₂ , H ₂ S, Kohlenwasserstoffe, Phenole	Flugasche, unverbrannte C-Bestandteile
Schwarz- und Buntmetallurgie	SO ₂ , NO _x , CO, H ₂ S, HF, z. T. HCl, Cl ₂	Oxide von Schwermetallen (Pb, Zn, Cu, Cd, Fe u. a.), As- u. F-haltige Stäube, Flugasche
Zementwerke	SO ₂ , NO _x , CO	Rohstoff-, Drehrohrofen- und Zementstaub (meist F-haltig)
Phosphat- und Düngemittelwerke	SO ₂ , HF, z. T. NH ₃	Phosphatstaub (z. T. F- und As-haltig), Flugasche
Kaliindustrie	HCl, Cl ₂	Chloride
Keramische Industrie	HF, SiF ₄ , SO ₂ , SO ₃	F-haltige Stäube, Flugasche
Glaserzeugung und -veredlung	SO ₂ , HF, SiF ₄ , z. T. CO	F- und Pb-haltige Stäube, Flugasche
Aluminiumwerke und -gießereien	HF	z. T. Chloride und Fluoride
Zellstoffwerke	SO ₂ , H ₂ S, Mercaptane, Disulfide	
Tierintensivhaltungen	NH ₃ , Alkylamine	

Die folgende Aufzählung zeigt die Vielzahl von Faktoren, von denen sowohl Art als auch Ausmaß der Immissions-schadwirkung auf Pflanzen abhängen [3]:

- Schadstofftyp
- Höhe der Immissionskonzentration
- Einwirkungs-dauer des Schadstoffs
- relative Immissions-empfindlichkeit der Pflanzenart bzw. der Einzelpflanze
- Entwicklungsstadium der Pflanze
- Disposition der Pflanze
- meteorologische Bedingungen.

Die Belastbarkeit einer Pflanze (das Vermögen, bestimmte Immissionswirkungen zu ertragen) hängt von der Empfindlichkeit des pflanzlichen Organismus gegenüber den einzelnen Schadstoffen sowie von seiner Regenerationsfähigkeit ab. Bei der Disposition der Pflanze, also dem Maß der Anfälligkeit gegenüber der Einwirkung von Immissionen, spielen u. a. Fragen der Nährstoffversorgung oder des Schädlingsbefalls eine Rolle.

Man unterscheidet zwischen verschiedenen Schädigungs- bzw. Wirkungsarten. Akute Schäden werden durch rasches Einwirken hoher Schadstoffkonzentrationen, auch bei nur kurzer Einwirkzeit, verursacht. Die hierbei ausgelösten deutlichen Schädigungen der Vegetation müssen als starke Vergiftung des pflanzlichen Organismus ausgelegt werden. Chronische Schäden werden durch niedrige, meist nicht konstante Schadstoffkonzentrationen, die dauernd oder über lange Zeitspannen einwirken, hervorgerufen. Als Folge nachteiliger Beeinflussung der Stoffwechselforgänge und langsamer Anreicherung von Giftstoffen in der Pflanze treten z. B. Ertragsverluste auf. Neben den sichtbaren Schäden gibt es auch noch die so genannten unsichtbaren (latenten) Immissionswirkungen, bei denen auch bei längerer Einwirkungszeit kein merkbarer Einfluss auf die

Pflanzenwelt ausgeübt wird und die von der Pflanze durch Regeneration bald wieder behoben werden können [3].

Die Schädwirkungen treten auf verschiedenen biologischen Organisationsebenen auf (Zelle, Gewebe/Organ, Organismus, Pflanzengemeinschaft/Ökosystem). Grundsätzlich lassen sie sich in zwei Schadenstypen aufteilen [9]: Unter Schädigung werden alle immissionsbedingten Pflanzenreaktionen verstanden; als Schaden werden diejenigen Wirkungen bezeichnet, die den Nutzungswert der betreffenden Pflanzen beeinträchtigen.

Bei gleichzeitigem Einwirken verschiedener Luftschadstoffe können sich Kombinationswirkungen ergeben; dabei können die Wirkungsausprägungen sowohl quantitativ als auch qualitativ beeinflusst werden. Beim quantitativen Einfluss ist zu unterscheiden zwischen additiver Wirkung (d. h. die Wirkung eines Gemischs entspricht der Summe der Wirkungen der Einzelkomponenten) und interaktiver Wirkung. Letztere liegt dann vor, wenn die Kombinationswirkung eines Gemischs größer (synergistischer oder „über-additiver“ Effekt) oder kleiner ist (antagonistischer oder „unter-additiver“ Effekt) als die rein additive Wirkung. Als Zeitmuster des kombinierten Einwirkens von verschiedenen Schadstoffen ist gleichzeitiges Auftreten (simultane Exposition) oder aufeinander folgendes Einwirken (sequentielle Exposition) möglich.

Im folgenden Kapitel sollen einige umweltrelevante Luftverunreinigungen kurz dargestellt werden; dabei wird jedoch nur auf diejenigen Luftschadstoffe eingegangen, deren Schädwirkungen im Rahmen des hessischen Wirkungskatasters untersucht werden. Für jede Stoffgruppe werden die Eintragswege in die Atmosphäre sowie die schädlichen Wirkungen auf Pflanzen und Menschen beschrieben.

2.2 Ausgewählte Luftschadstoffe

2.2.1 Photooxidantien

Photooxidantien sind gasförmige Stoffe, die in bodennahen Luftschichten in Gegenwart von Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen unter Einwirkung von kurzweiliger Strahlung (Sonnenlicht) entstehen; neben Ozon werden weitere reaktive Produkte wie Peroxyacetylnitrat (PAN), Aldehyde, Peroxide, freie Radikale u. a. gebildet [3]. Diese photochemisch gebildeten Komponenten sind Bestandteil des so ge-

nannten Sommersmogs (auch als „Los-Angeles-Smog“ bezeichnet). Sie werden also nicht primär emittiert, sondern stellen sekundäre Luftverunreinigungen dar.

Die Reaktionsgleichungen für Aufbau und Zerfall von Ozon sind sehr komplex [5, 6]; deshalb wird hier nur auf einige grundsätzliche Aspekte eingegangen. Für die Ozonbildung sind folgende Reaktionen maßgeblich: die Spaltung von Stickstoffdioxid mit Hilfe von

Licht in Stickstoffmonoxid und atomarem Sauerstoff, der sich mit molekularem Sauerstoff zu Ozon verbindet. Hierbei spielen die flüchtigen organischen Verbindungen eine wichtige katalytische Rolle [14]. Das gebildete Ozon kann durch andere Luftverunreinigungen wieder zerstört werden. Allgemein gilt, dass die meteorologischen Bedingungen den Ozonaufbau und -abbau wesentlich mitbestimmen. Ein Teil des in der unteren Atmosphäre vorhandenen Ozons ist natürlichen Ursprungs. Durch die hohen anthropogenen Emissionen der Vorläuferstoffe wird das Gleichgewicht gestört, es kommt zu den beschriebenen Reaktionen und somit zu einem Anstieg der Ozonkonzentrationen. Bei den Vorläufersubstanzen stammen die Stickstoffoxide größtenteils aus dem Autoverkehr und die Kohlenwasserstoffe vor allem aus der Industrie, der privaten Anwendung sowie dem Verkehr.

Die mittleren Ozonkonzentrationen liegen heute größenordnungsmäßig doppelt so hoch wie um die Jahrhundertwende [14]. Seit 1990 haben die Vorläufersubstanzen in Deutschland um mehr als 30 % abgenommen; trotzdem ist nur ein schwach fallender Trend bei der Ozonbelastung erkennbar. Seit Ende der 80er Jahre haben sich die Jahresmittelwerte kaum verändert, wohingegen die maximalen 1-Stundenwerte eine sinkende Tendenz aufweisen [6].

Aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung liegen die Ozonkonzentrationswerte im Sommerhalbjahr deutlich höher als im Winterhalbjahr. Sie zeigen außerdem einen ausgeprägten Tagesgang mit einem Maximum in den späten Nachmittagsstunden, da die Netto-Ozonbildung mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung abläuft. Die Tagesgänge fallen in Ballungsräumen und ländlichen Gebieten sehr unterschiedlich aus: In urbanen Regionen sinken die Ozonwerte nachts sehr stark ab, da hier das Ozon (insbesondere in Anwesenheit von Stickstoffmonoxid) fast vollständig abgebaut wird; außerhalb der Belastungsgebiete bleiben hingegen die Ozonwerte nachts auf relativ hohem Niveau.

Als Leitsubstanz für die Photooxidantien gilt das Ozon (O_3), ein Gas von etwas stechendem Geruch. Nach Fluor ist es das stärkste Oxidationsmittel und eines der stärksten Reizgase überhaupt. Es führt bei Mensch und Tier zu Reizungen der Schleimhäute und greift vor allem Atemwege, Lungengewebe und Augen an [11]. Beim Einatmen dringt Ozon tief in die Lunge ein und ruft dort durch seine hohe Reaktionsfähigkeit Schädigungen der Oberfläche hervor. Daneben bewirken höhere Ozonkonzentrationen

subjektive Befindlichkeitsstörungen wie Augentränen, Kopfschmerzen, Konzentrationsschwäche und Reizung der Atemwege; bei hohen Ozonwerten kann sogar die physische Leistungsfähigkeit abnehmen.

Photooxidantien schädigen Funktion und Struktur pflanzlicher Zellen und verursachen bei vielen Pflanzen Schadsymptome. Neben Ozon besitzt insbesondere auch PAN phytotoxische Eigenschaften; manche Pflanzenarten reagieren stärker auf Ozon, andere mehr auf PAN. Im Folgenden wird jedoch nur die Wirkung von Ozon auf die Vegetation beschrieben.

Im Gegensatz zu anderen Luftschadstoffen, die sowohl über die oberirdischen Pflanzenteile als auch über die Wurzeln in die Pflanze gelangen, wird Ozon ausschließlich aus der Luft aufgenommen; es erfolgt auch keinerlei Akkumulation innerhalb der Pflanze. Die Ozonaufnahme findet im Wesentlichen über die Spaltöffnungen (Stomata) der Blätter bzw. Nadeln statt [6]. Ozon stellt ein sehr reaktives Molekül dar; biochemisch relevant sind die Reaktionen mit Kohlenstoff-Doppelbindungen sowie mit Thiolen [15].

Ozon kann bei Pflanzen ein breites Spektrum an Symptomen auslösen. Wichtige Folgewirkungen sind äußerlich sichtbare Blatt- und Nadelschäden (wie Verfärbungen, Chlorosen und Nekrosen) und vermindertes Wachstum bzw. Ertragsverluste [6]. Außerdem steht Ozon im Verdacht, für die neuartigen Waldschäden mitverantwortlich zu sein [25].

Die Beeinträchtigung der Produktivität landwirtschaftlicher Nutzpflanzen ist in ökonomischer Hinsicht von Bedeutung. In umfangreichen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass freilandrelevante Ozonkonzentrationen die Erträge wichtiger Kulturpflanzen verringern können. Ertragseinbußen treten u. a. bei Buschbohnen, mehreren Getreidearten, Baumwolle und Mais auf [6]. In diesem Zusammenhang soll folgende Tatsache kurz erwähnt werden: Die Ergebnisse von Dosis-Wirkungsbeziehungen, die für Ozon in open-top-Kammerexperimenten gewonnen werden, sind nur bedingt auf Freilandverhältnisse übertragbar [36]. In den Kammern herrschen eine nahezu konstante Turbulenz (Windgeschwindigkeit) sowie eine optimale Wasserversorgung; beides ist im Freiland jedoch nicht gegeben. Die Ergebnisse von Ozon-Begasungsversuchen überschätzen daher die tatsächlichen Wirkungen von Ozon auf Freilandpflanzen hinsichtlich der Ertragseinbußen.

Grundsätzlich bestehen zwischen den verschiedenen Pflanzenarten große Unterschiede in der Sensitivität gegenüber Ozon; außerdem ist die Ozonemp-

findlichkeit vom physiologischen Blattalter abhängig [6]. Zu den besonders empfindlichen Arten zählen beispielsweise Roggen, Weizen, Hafer, Kartoffeln, Raps, Zwiebeln, Tomaten, Tabak, Spinat, Bohnen und Klee. Am sensibelsten reagieren Blätter während der Zeit ihrer höchsten Stoffwechselaktivität auf akute Ozonbelastungen, wohingegen ausgereifte sowie die jüngsten Blattstadien in der Regel nur gering geschädigt werden. Blattschädigungen, die in frühen Entwicklungsstadien aufgetreten sind, können sich unter sonst günstigen Bedingungen wieder auswachsen.

2.2.2 Fluorverbindungen

Die fluorhaltigen Luftverunreinigungen treten gas- und staubförmig auf; sie werden vor allem als Fluorwasserstoff (HF) und als Siliciumtetrafluorid (SiF₄) oder als Natrium- bzw. Kaliumfluoridstaub emittiert [3]. Freigesetzt werden sie hauptsächlich in zahlreichen Industrieprozessen: bei der Aluminiumherstellung und der Kohleverbrennung, in der Glas- oder Keramikindustrie, in Emallierwerken und Ziegeleien, bei der Stahlerzeugung und der Düngemittelproduktion. Insgesamt betragen die abgegebenen Mengen nur Bruchteile eines Prozents der gesamten industriellen Emission anorganischer Gase [11]. Die Emission von Fluoriden zeigt eine rückläufige Entwicklung.

Fluorwasserstoff hat die Eigenschaften eines Reizgases, die sich jedoch bei den in der Luft vorliegenden Konzentrationen nicht auf den Menschen auswirken. Bei hohen Konzentrationswerten können Fluorverbindungen Knochen-, Zahn-, Nieren- und Hautveränderungen verursachen [11].

Hinsichtlich der phytotoxischen Wirkung stellt Fluorwasserstoff die wichtigste Komponente unter den fluorhaltigen Verbindungen dar. Sie kann an empfindlichen Pflanzen schon in sehr geringen Konzentrationen Schäden hervorrufen; auch für diesen Luftschadstoff gilt, dass sich die einzelnen Pflanzenarten deutlich in ihrer Empfindlichkeit unterscheiden.

Grundsätzlich kann die Pflanze Fluorverbindungen sowohl aus der Luft als auch aus dem Boden aufnehmen; dabei erfolgt die Aufnahme des gasförmigen Anteils überwiegend über die Spaltöffnungen der Blattorgane. Fluor wird (im Gegensatz beispielsweise zu Ozon) stark in der Pflanzensubstanz angereichert. Außerdem unterliegt es einer Translokation in die Blattspitzen bzw. -ränder; in den Bereichen der bevorzugten Anreicherung liegen die Fluoridgehalte

ein Vielfaches über denen der übrigen Blattpartien [9].

Für die Toxizität sind die Interaktionen mit dem Kationen- und Phosphathaushalt sowie spezifische Hemmungen von Enzymreaktionen verantwortlich [15]. Eine weitere Schädigung liegt in der möglichen Komplexbildung mit essentiellen Spurenelementen, wodurch es für die Pflanze zu Mangelsituationen kommen kann [9].

Im fortgeschrittenen Schädigungsstadium zeigen die Pflanzen sichtbare Symptome wie Verfärbungen oder Nekrosen. Typische Fluorschäden sind Spitzen- und Randnekrosen der Blätter. Monokotyle (einkeimblättrige) Pflanzen wie Nadelbäume, Gräser oder Gladiolen bilden hauptsächlich Nekrosen, die von der Blattspitze ausgehen. Bei den breitblättrigen dikotylen Pflanzen (z. B. Laubbäumen) zeigen sich an den Blatträndern Nekrosen. Die nekrotischen Bezirke sind oft durch ein schmales dunkles Band abgegrenzt [7].

2.2.3 Schwefeldioxid

Schwefeldioxid (SO₂) wird bei der Verbrennung von Kohle und Heizöl sowie anderer schwefelhaltiger Brennstoffe gebildet. Die Feuerungsanlagen im Bereich der Industrie und der Gebäudeheizung sind die Hauptquellen für die SO₂-Belastung der Atmosphäre. In früheren Jahrzehnten konnte es in Gegenwart hoher SO₂- und Staubkonzentrationen hauptsächlich im Winter bei Inversionswetterlagen zu Smogsituationen kommen, die unter dem Namen „London-Smog“ bekannt geworden sind. Dank der umfangreichen Maßnahmen zur SO₂-Emissionsminderung (Rauchgasreinigung bei Kraftwerken sowie Einsatz schwefelärmerer Brennstoffe) ist die SO₂-Belastung in den letzten Jahrzehnten drastisch gesunken.

SO₂, ein stechend riechendes und farbloses Gas, ist ein Reizgas, das sich nachteilig auf die Atmungsorgane von Menschen und Tieren auswirkt; es wirkt insbesondere auf die Schleimhäute der Atemwege und Augen. Infolge des Rückgangs der SO₂-Belastung dürfte die Gesundheitsbelastung durch SO₂ in Deutschland weitgehend gebannt sein [14].

Viele Pflanzen reagieren auf Schwefeldioxid mit sichtbaren Symptomen wie Chlorosen und Nekrosen. Dabei erweisen sich die einzelnen Pflanzenarten als sehr unterschiedlich sensibel gegenüber SO₂; besonders empfindlich sind beispielsweise bestimmte Nadelgehölze oder Spinat. Schwefelverbindungen können auch in manchen Pflanzen (wie z. B. Koniferen) angereichert werden. Interessant ist, dass es bei

diesem Luftschadstoff einen Schwellenwert gibt, unterhalb dessen keine Schäden sichtbar werden, sondern eine wachstumsfördernde Wirkung zu beobachten ist [15]. Über der Toxizitätsschwelle bewirkt SO_2 eine Störung der Assimilationsvorgänge.

Die durch SO_2 verursachten akuten Schädigungssymptome an Nadel- und Laubgehölzen sind gut bekannt: Es entwickeln sich Verfärbungen an Blättern und Nadeln [3]. An Blättern entstehen bei nicht zu hoher Immissionskonzentration zunächst ausgeprägte Spitzen- und Randnekrosen; bei höherer oder längerer Belastung bilden sich auch unregelmäßige nekrotische Flecken auf der gesamten Blattoberfläche. Bei Nadeln setzen die Verfärbungen nicht immer an der Spitze an, sondern in mittleren bis spitzennahen Nadelabschnitten; bei stärkerer Schädigung ist schließlich die gesamte Nadel bzw. der gesamte Nadeljahrgang betroffen.

Neben den o. g. Wirkungen auf Lebewesen verursacht SO_2 auch Schäden an Sachgütern. Es greift zahlreiche Materialien an; insbesondere seien hier die Korrosions- und Verwitterungsprozesse von Metallen und Gesteinen genannt. Die überwiegend durch anthropogene Emissionen (Kfz-Verkehr, Gebäudeheizung und Energiegewinnung) erzeugten Luftschadstoffe Schwefeldioxid (SO_2) und Stickstoffoxide (NO_x) sind wegen ihrer Umwandlung in der Atmosphäre zu Schwefelsäure (H_2SO_4) bzw. Sulfaten (SO_4^{2-}) und Salpetersäure (HNO_3) bzw. Nitraten (NO_3^-) hauptsächlich für die Bildung der sauren Niederschläge verantwortlich. Diese führen neben den o. g. Materialschäden zur Versauerung von Böden und Gewässern. Saure Niederschläge – in der Öffentlichkeit auch als „saurer Regen“ bekannt – spielen in der Waldschadensdiskussion eine erhebliche Rolle [8].

2.2.4 Metalle und Metallverbindungen

Die Gruppe dieser anorganischen Luftschadstoffe besteht aus Verbindungen mit (Schwer-)Metallen; sie liegen in der Luft überwiegend staubförmig vor. Über nasse und trockene Deposition sowie Auskämmeffekte gelangen diese Komponenten in die Pflanzen. Sie sind im ökologischen Kreislauf schwer abbaubar und können von der Vegetation akkumuliert werden. Beim Überschreiten bestimmter Schwellenwerte können sie schädigende Folgewirkungen innerhalb einzelner Glieder der Nahrungskette herbeiführen. Die Akkumulierbarkeit in den Umweltmedien macht es notwendig, routinemäßige

Untersuchungen – zumindest einiger ausgewählter Schwermetalle – durchzuführen, weil sie entweder Schlüsselkomponenten für bestimmte Emissionsquellen darstellen oder von besonderer toxikologischer Bedeutung sind.

Tabelle 2 zeigt für eine Reihe von umweltrelevanten Metallen deren Hauptemissionsquellen und ihre Wirkungen auf Pflanzen und Menschen. Die Angaben bezüglich der krebserzeugenden (carcinogenen) Eigenschaften sind der MAK-Liste (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) [10] entnommen. Alle in der Tabelle genannten Stoffe werden vom HLUG in unterschiedlichen Wirkungsuntersuchungen bestimmt. Die meisten Metalle von Tabelle 2 stellen Schwermetalle dar; bei Titan handelt es sich um ein Leichtmetall und bei Antimon sowie Arsen um Halbmetalle.

2.2.5 Organische Verbindungen

Eine weitere Stoffgruppe unter den Luftschadstoffen stellen die organischen Spurenverunreinigungen dar. Davon sind einige aufgrund ihrer Toxizität von großer Bedeutung für die Gesundheit von Menschen und Tieren. Hierzu gehören insbesondere folgende Stoffklassen, die sich jeweils aus vielen Einzelverbindungen zusammensetzen:

- polychlorierte Biphenyle (PCB)
- polychlorierte Benzole (PCBz) und Phenole (PCPh)
- polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/PCDF)
- polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK).

Die Dioxine und PAK liegen in der Luft überwiegend partikelgebunden, die PCB zu einem großen Teil gasförmig vor. Auf Grund der Persistenz (hohe Stabilität gegenüber biologischer Umwandlung) und Lipophilie (Fettlöslichkeit) werden vor allem in die Umwelt emittierte organische Chlorverbindungen in der Nahrungskette angereichert. Daraus resultieren für den Menschen im Wesentlichen Gesundheitsrisiken aus dem Verzehr kontaminierter pflanzlicher und tierischer Nahrungsmittel. Die Schlüsselstellung beim Eintritt in die Nahrungskette kommt der Vegetation zu, die diese Schadstoffe überwiegend direkt aus der Luft anreichert.

Die PCB wurden aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften weltweit zu verschiedensten Einsatzzwecken angewendet, weshalb sie ubiquitär angetroffen werden. 1978 wurde ihre offene Anwendung in Deutschland verboten; 1989 wurden

Tab. 2: Wirkungen umweltrelevanter Metalle und deren Verbindungen auf Pflanzen und Menschen

Element	Vorkommen	Emission aus	Wirkung auf Pflanzen	Wirkung auf Menschen
Antimon (Sb)	Erz, Kohle	Goldminen, Blei- und Kupferschmelzen, Kohleverbrennung, Kfz-Verkehr (Bremsbeläge)		Beeinträchtigung der Herzfunktion durch langanhaltende Belastungen, carcinogen
Arsen (As)	Gestein, Metallverbindung, Kohle	Vulkane, Buntmetall-, Glas-, Textilindustrie, Pestizide, Kohleverbrennung	Hemmung des Wurzelwachstums	heftige Magen-, Darmbeschwerden, Enzymhemmung, carcinogen
Blei (Pb)	Minerale, Erz, Kohle	Farb-, Eisen-, Stahlindustrie, Rostschutz, Kfz-Verkehr, Kohleverbrennung, Verhüttung, Winderosion	Verringerung der Pflanzenmasse (im Laborexperiment)	Stoffwechsellstörungen, Zahn-, Leber-, Nierenschädigung, Nervenkrankung, evtl. carcinogen
Cadmium (Cd)	Metallverbindung, Minerale, Kohle	Buntmetallindustrie, Zinkverhüttung, Kfz-Verkehr, Düngung, Klärschlamm, Müllverbrennung	Photosynthesehemmung, Ertragsrückgänge, Chlorosen, Nekrosen	Akkumulation in Leber und Niere, Knochenveränderung, carcinogen
Chrom (Cr)	Erz, Kohle	Eisen-, Stahlindustrie, Kohleverbrennung, Erzabbau, Winderosion		essentiell; Akkumulation in Leber, Niere, Nebenschilddrüse, Knochenmark, reizend, carcinogen
Kupfer (Cu)	Erz, Kohle	Kupferproduktion, Buntmetall-, Stahlindustrie, Kohle-, Müllverbrennung, Düngung, Fungizide	essentiell; bei Überschuss: Chlorosen, Wurzelveränderungen	essentiell; bei Überschuss: Enzymhemmung, heftige Magen-, Darmbeschwerden
Nickel (Ni)	Erz, Erdöl, Kohle	Vulkane, Winderosion, Stahl-, Elektro-, Keramik-, Glasindustrie, Müllverbrennung, Kfz-Verkehr	Chlorosen	Enzymhemmung, vorübergehende Schädigung des Zentralnervensystems, Lunge, Herz, Hautallergien, carcinogen
Quecksilber (Hg)	Gestein, Minerale, Erdöl, Kohle	Vulkane, Verhüttung, Beizmittel, Verbrennung von Kohle, Heizöl, Müll		Schädigung des Zentralnervensystems, Nierenschäden, evtl. carcinogen
Thallium (Tl)	Minerale, Kohle	Metallgewinnung, Kohleverbrennung		Magen-, Darmbeschwerden, Hautreizungen, Nervenschädigungen, Haarausfall
Titan (Ti)	Minerale, Kohle	Verhüttung, Winderosion, Verbrennung von Kohle, Müll		
Vanadium (V)	Minerale, Erz, Erdöl, Kohle	Öl-, Kohleverarbeitung, Stahl-, Zementproduktion, Kfz-Verkehr, Farb-, Fotoindustrie	essentiell, phytotoxisch ab etwa 2 ppm TS	essentiell; chronische Vergiftungserscheinungen sowie atemähmend bei dauernder Einwirkung
Zink (Zn)	Minerale, Erz, Kohle	Verhüttung, Buntmetallindustrie, Kfz-Verkehr	essentiell; bei Mangel: Zwergwuchs; bei Überschuss: Chlorosen, Nekrosen	essentiell; bei Überschuss: Erkrankung der Atemwege, Erbrechen

Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung der PCB durch die PCB-Verbots-Verordnung untersagt. Das toxische Wirkprofil der PCB besteht in einer Schädigung der Leber und des Immunsystems [14]. Viele polychlorierte Benzole und Phenole sind Zwischenprodukte in der chemischen Industrie. Die bekanntesten Vertreter sind Hexachlorbenzol und Pentachlorphenol (PCP). PCP war früher als Fungizid in vielen Holzschutzmitteln enthalten; es wurde inzwischen in die Gruppe der krebserregenden Arbeitsstoffe eingereiht [10].

Dioxine wurden nie gezielt hergestellt, sondern sie werden als Nebenprodukt chemischer Synthesen und thermischer Prozesse freigesetzt. Die Dioxinkonzentrationen liegen mehrere Zehnerpotenzen unter dem Konzentrationsniveau der anderen o. g. Komponenten. Trotzdem ist das Vorkommen von Di-

oxinen in der Umwelt als kritisch zu bezeichnen, denn einzelne Vertreter haben eine extreme Toxizität [12]. Viele PCDD/PCDF-Vertreter erwiesen sich im Tierversuch als carcinogen; 2,3,7,8-TCDD (das sog. „Seveso-Dioxin“) wird als krebserzeugend beim Menschen eingestuft [13]. Eine Bewertung des toxikologischen Risikos der PCDD/PCDF insgesamt ist leider nur unzureichend möglich [14].

PAK stammen vorwiegend aus Verbrennungsvorgängen; sie entstehen bei jeder unvollständigen Verbrennung organischen Materials. Emittiert werden sie hauptsächlich von Gebäudeheizungen und industriellen Feuerungsanlagen, vom Kraftfahrzeugverkehr sowie bei einigen industriellen Fertigungsprozessen. Für ca. 15 Vertreter der PAK ist bisher eine carcinogene Wirkung im Tierversuch nachgewiesen [14].