

Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs)

Einleitung

Die polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, abgekürzt PAKs (*engl.*: polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH) sind zum Teil anthropogenen Ursprungs, d. h. sie gehören zu den sog. Umweltchemikalien. Derartige Stoffe werden durch menschliches Handeln in die Umwelt gebracht und können in Mengen und Konzentrationen auftreten, die geeignet sind, Lebewesen, insbesondere den Menschen zu gefährden. PAKs entstehen typischerweise bei unvollständig ablaufenden Verbrennungsvorgängen und werden dadurch in die Umwelt eingetragen. Die Mehrzahl der PAKs, es gibt in dieser Stoffklasse ungefähr 300 bekannte Verbindungen, werden nicht gezielt von der chemischen Industrie hergestellt.

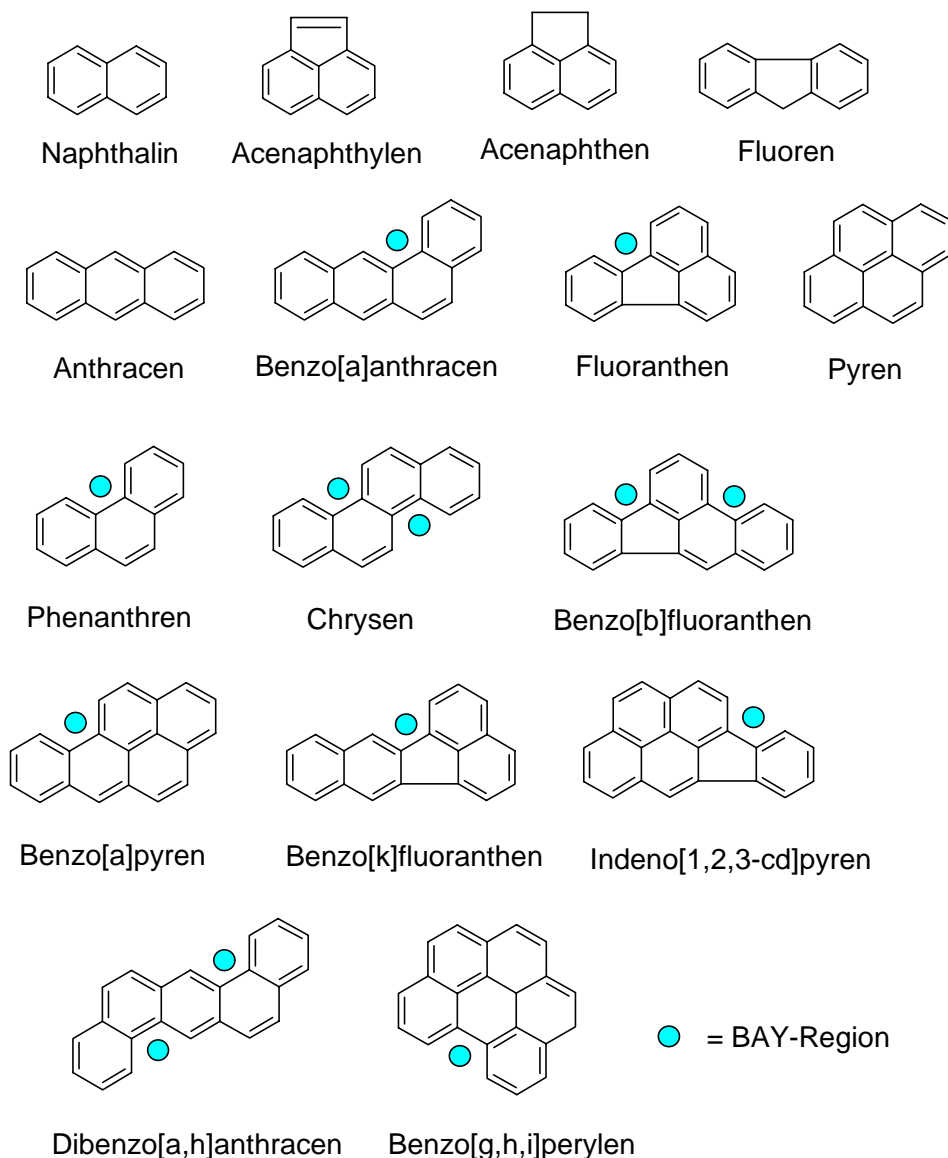
Einige wenige Verbindungen aus der Stoffgruppe der PAKs, wie z.B. Anthracen und Pyren werden in reiner Form synthetisiert und sind die Grundlage für die Herstellung von Produkten der chemischen Industrie. In sehr geringem Umfang werden zusätzlich einige weitere ausgewählte Verbindungen als Standards für die chemische Analytik hergestellt. In den meisten Fällen werden polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe bei unvollständigen Verbrennungsprozessen organischer Materialien und anderen pyrolytischen Vorgängen gebildet. Diese Prozesse finden weltweit statt und führen zu einem ubiquitären Vorkommen der PAKs in biotischen und abiotischen Umweltkompartimenten. Die Gruppe der PAKs umfasst eine sehr große Anzahl von Einzelsubstanzen, von Bedeutung sind vor allem 16 Einzelsubstanzen, welche von der US-EPA (United States Environmental Protection Agency) als Leitsubstanzen für umweltanalytische Untersuchungen vorgeschlagen und in eine ihrer Testmethoden aufgenommen wurden. Die 16 PAKs aus der US-EPA-Liste enthalten auch die sechs von der WHO (World Health Organisation) vorgeschlagenen und in der TVO (Deutsche Trinkwasser-Verordnung) enthaltenen Verbindungen.

In der Reihenfolge ihrer Häufigkeit handelt es sich bei den PAKs um Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthen, Pyren, Benz[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[a]pyren, Dibenz[a,h]anthracen, Benzo[ghi]perylen und Indeno[1,2,3-cd]pyren. Einige PAKs, wie z.B. Benzo[a]pyren, Benzo[b]fluoranthen oder Dibenzo[a,h]anthracen, werden als mutagene bzw. kanzerogene Verbindungen angesehen. Die PAKs fördern zum großen Teil die kanzerogene Wirkung anderer Chemikalien, d. h. sie fungieren als Tumorpromotoren.

Chemische Struktur der PAKs

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe sind organische Verbindungen, die nur aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff aufgebaut sind. Sie enthalten im Molekül mehrere (mindestens zwei) kondensierte Benzolringe (= Naphthalin), wobei auch Verbindungen einbezogen werden, die im Molekül zusätzlich einen oder mehrere Kohlenstoff-Fünfringe enthalten (Abb. 1).

Abb. 1: Strukturen der 16 PAK-Leitsubstanzen nach US-EPA



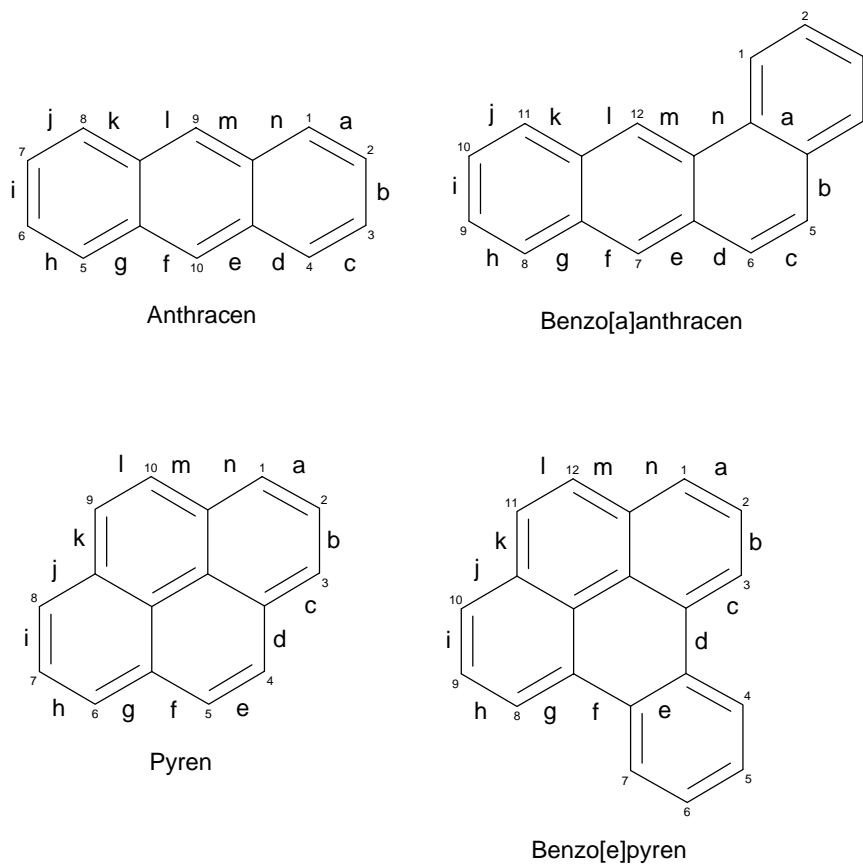
Der einfachste Vertreter dieser Stoffgruppe ist das aus zwei aromatischen, aneinander kondensierten Ringen bestehende Naphthalin. Die kleinen, nur aus Benzol-Ringen zusammengesetzten PAKs sind in ihrer Struktur planar und von aromatischem Charakter. Die 16 PAKs aus der EPA-Liste enthalten maximal sechs verknüpfte Benzol-Ringssysteme, bei einigen Verbin-

dungen wird ein Benzol-Ring durch einen Fünfring substituiert. Bei geeigneter Verknüpfung der Ringsysteme kann bei den PAKs das Strukturelement der „Bay-Region“ auftreten, welches charakteristisch ist für viele kanzerogene Stoffe.

Die Nomenklatur der PAKs baut auf wenigen Grundkörpern wie Naphthalin, Anthracen, Phenanthren und Pyren auf. Ist die Kette der Benzolringe linear angeordnet, so spricht man von orthoanellierten Verbindungen, bei einer gewinkelten Anordnung handelt es sich um perianellierte Verbindungen.

Die Nummerierung der Kohlenstoffatome erfolgt im Uhrzeigersinn, die enthaltenen Bindungen werden in alphabetischer Reihenfolge mit Buchstaben bezeichnet (d. h. die Bindung zwischen C-1 und C-2 wird mit „a“ gekennzeichnet). Beim Anfügen eines Benzolringes an ein Anthracenmolekül in der Position [a] entsteht Benzo[a]anthracen. Analog entsteht durch Anfügen eines Benzolringes an Pyren in der Position [e] das entsprechende Benzo[e]pyren (Abb. 2).

Abb. 2: Beispiele zur Nomenklatur der PAKs



Die mögliche Zahl der Verbindungen steigt mit zunehmender Anzahl der kondensierten Ringe stark an (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anzahl der möglichen äquiannularen Molekülstrukturen bei den PAKs in Abhängigkeit von der Ringanzahl

Anzahl Ringe	Ortho-anellierte PAKs	Peri-anellierte PAKs	Summe Anzahl der Verbindungen
2	1	0	1
3	2	1	3
4	5	2	7
5	12	10	22
6	37	45	82
7	123	210	333
8	446	1002	1448

Einige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften von PAKs

Die Molmassen der 16 PAKs nach US-EPA liegen im Bereich von 128 bis 278. Die Mehrzahl aller bekannten PAKs (ungefähr 300 Einzelsubstanzen) haben einen für organische Verbindungen vergleichsweise hohen Siedepunkt im Bereich von ca. 300 bis 500 °C. In reiner Form sind die PAKs bei Raumtemperatur farblose, kristalline Festkörper. Diese Stoffe sind bedingt durch das Fehlen von hydrophilen Gruppen nur sehr wenig löslich in Wasser, aber vergleichsweise gut löslich in unpolaren organischen Lösungsmitteln. Der Dampfdruck der meisten Verbindungen ist gering mit Werten im Bereich von 10^{-2} bis 10^{-8} Pa. Lediglich Naphthalin ist merklich flüchtig, welches bereits durch seinen ausgeprägten Geruch erkennbar ist (Verwendung in Mottenkugeln). Bei den höheren PAKs ist die Flüchtigkeit der Stoffe für ihre Mobilität zwischen den verschiedenen Umweltbereichen Wasser, Boden und Luft von untergeordneter Bedeutung. Im allgemeinen zeigen PAKs eine hohe Tendenz zur Geoakkumulation, wobei in Abhängigkeit vom Gehalt des Bodens oder Sedimentes an organischem Material zum Teil sehr hohe Sorptionskoeffizienten erreicht werden.

Die Werte für den n-Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten ($\log P_{OW}$), welche die Tendenz zur Verteilung von Stoffen zwischen der wässrigen Phase und den organischen Bestandteilen von Umweltkompartimenten (z.B. Lipide und Wachse) beschreiben, charakterisieren die PAKs als stark lipophile Substanzen. Typische Werte für den Verteilungskoeffizienten $\log P_{OW}$ liegen im Bereich von 3 bis 8 (Tabelle 2).

Tabelle 2: Physikalisch-chemische Eigenschaften der 16 PAKs nach US-EPA

Substanz	Molmasse [g/mol]	Dampfdruck bei 25 °C [Pa]	Wasserlöslichkeit bei 25 °C [g/L]	Henry- Konstante H bei 25 °C	n-Octanol- Wasser- Verteilungs- koeffizient log P _{ow}
Naphthalin	128.2	11.3	0.032	0.019	3.33
Acenaphthylen	152.2	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Acenaphthen	154.2	0.31	0.0037	0.0052	3.992
Fluoren	166.2	0.096	0.0019	$8.2 \cdot 10^{-4}$	4.31
Phenanthren	178.2	0.022	0.0011	0.0022	4.43
Anthracen	178.2	0.001	$4.8 \cdot 10^{-5}$	0.0015	4.45
Fluoranthren	202.3	0.0013	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	4.97
Pyren	202.3	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	5.13
Benzo[a]anthracen	228.3	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	5.73
Chrysen	228.3	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Benzo[b]fluoranthren	252.3	$6.7 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	k. A.	6.57
Benzo[k]fluoranthren	252.3	$6.7 \cdot 10^{-7}$	$5.5 \cdot 10^{-7}$	k. A.	6.84
Benzo[a]pyren	252.3	$7.0 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	6.04
Indeno[1,2,3-cd]pyren	276.3	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$6.2 \cdot 10^{-7}$	k. A.	7.66
Benzo[g,h,i]perylen	276.3	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Dibenzo[a,h]anthracen	278.4	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$5.9 \cdot 10^{-7}$	6.39

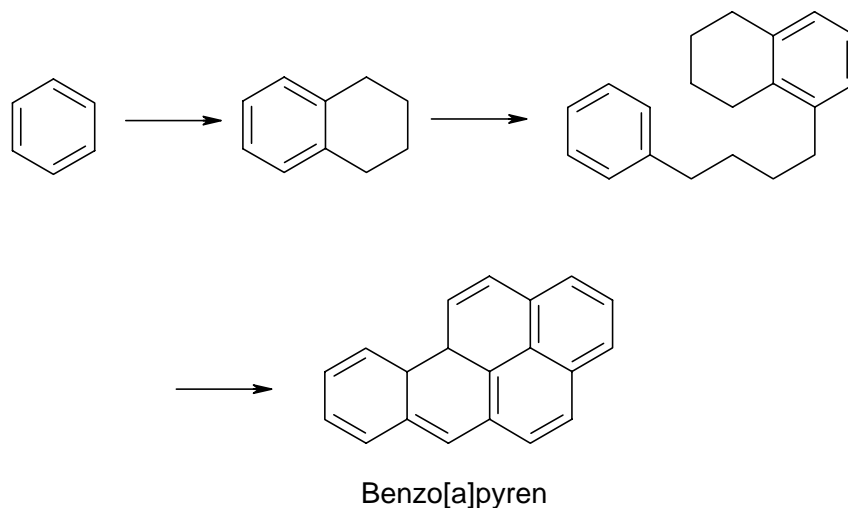
Die Werte für den n-Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten (log P_{ow}), welche die Tendenz zur Verteilung von Stoffen zwischen der wässrigen Phase und den organischen Bestandteilen von Umweltkompartimenten (z.B. Lipide und Wachse) beschreiben, charakterisieren die PAKs als stark lipophile Substanzen. Typische Werte für den Verteilungskoeffizienten log P_{ow} liegen im Bereich von 3 bis 8 (Tabelle 2).

Bildung und Vorkommen der PAKs

Die Verbindungen dieser Stoffgruppe werden immer dann gebildet, wenn organische Stoffe höheren Temperaturen (oberhalb von ca. 700 °C) ausgesetzt werden, oder diese einer Pyrolyse (thermische Zersetzung organischer Stoffe unter Luftausschluss) bzw. unvollständigen Verbrennung unterliegen. Unter dem Einfluss hoher Temperaturen werden in den Substraten chemische Bindungen aufgebrochen, so dass aus kompliziert aufgebauten Verbindungen

kleinere und einfacher gebaute Moleküle entstehen. Die im Primärschritt gebildeten kleinen Kohlenwasserstoff-Radikale (wie z.B. Ethylen- und Acetylen-Fragmente = C-2-Einheiten, aber auch C-4-Alken- und C-4-Alkinradikale; diese Spezies entstehen durch Spaltung von C-C-Bindungen im Ausgangsmaterial) können über mehrere Zwischenstufen neue Strukturen wie PAKs aufbauen. Eine wichtige Schlüsselsubstanz bei der flammenchemischen Bildung von PAKs ist das Acetylen. Aus zwei C-2-Einheiten kann ein Butadienmolekül entstehen, welches im Folgeschritt durch Anknüpfung einer weiteren C-2-Einheit Benzol bildet. Die weiteren Aufbauschnitte verdeutlichen die pyrolytische Bildung von Benzo[a]pyren (Abb. 3).

Abb. 3: Mögliche Aufbauschnitte bei der pyrolytischen Benzo[a]pyren-Bildung



Bei den pyrolytischen Prozessen können je nach Material und Art der Zersetzung einige hundert verschiedene PAKs gebildet werden, neben diesem relativ einfachen Mechanismus sind auch andere Reaktionswege möglich. Für Cycloalkane und Cycloalkene wurde gezeigt, dass die pyrolytische Bildung aromatischer Verbindungen zum Teil sehr komplexe und unerwartete Abläufe beinhaltet.

Als Hauptemissionsquellen der PAKs sind im allgemeinen industrielle Prozesse der Mineralölverarbeitung (Petrochemie), Kohlechemie (Kokereien), Metallverarbeitung (Aluminiumproduktion, Eisen- und Stahlerzeugung) und der Energieerzeugung (Kraftwerke) zu nennen. Die in großem Umfang stattfindenden Verbrennungsvorgänge fossiler Energieträger (Kohle, Öl und Gas) im industriellen Bereich, aber auch in Hausfeuerungsanlagen und in Verbrennungsmotoren im stetig wachsenden Straßenverkehr leisten einen großen Beitrag zum Eintrag von PAKs in die Umwelt. Weitere Einträge aus verschiedenen natürlich auftretenden Verbrennungsprozessen wie Wald- und Buschbränden oder Vulkanausbrüchen sind eher von untergeordneter Bedeutung.

Im Bereich der industriellen Produktion sind die flüssigen Begleitprodukte aus der Kohleverkokung eine wichtige Quelle für PAKs. Die gewonnenen Produkte Steinkohlenteer und Rohbenzol decken zum Teil den erheblichen Weltbedarf an aromatischen Chemierohstoffen. Die Bedeutung des Steinkohlenteers ist allerdings zurückgegangen. Die im Steinkohlenteer enthaltenen PAKs dienen u. a. als Ausgangsstoffe für Synthesen der organischen Chemie. Derartige kommerziell einsetzbare PAKs sind z.B. Naphthalin, Phenanthren und Anthracen. Das Naphthalin wurde in der Vergangenheit zur Herstellung von Phthalsäureanhydrid, einem wichtigen Zwischenprodukt zur Synthese von künstlichem Indigo, verwendet. Heute dient Naphthalin u. a. zur Herstellung von Naphthochinon, welches nachfolgend mit Butadien zu Anthrachinon und im weiteren zu Farbstoffen umgesetzt wird. Auch Phenanthren und Anthracen sind nach Oxidation zu den Chinonen bedeutsame Ausgangsstoffe in der Chemie der Farbstoffherstellung.

Bei stillgelegten Mineralöllagern, Kokereien, teer- und pechverarbeitenden Betrieben sowie ähnlichen Altstandorten werden in der Regel umweltgefährdende Altlasten infolge einer Kontamination der Böden mit PAKs vorgefunden, die durch Versickern dorthin gelangt sind. In diesen Fällen sind besonders hohe Konzentrationen zu erwarten sind. Die PAK-Belastung in Böden von Altlasten liegt häufig in einer sehr inhomogenen Verteilung vor.

Die nachfolgend beschriebenen Verbrennungs- und Pyrolysevorgänge liefern in der PAK-Gesamtbilanz nur einen geringen Beitrag. Sie sind aber von Bedeutung für die Gesundheit, da die gebildeten PAKs auf diese Weise besonders leicht in den Organismus aufgenommen werden. Eine wichtige PAK-Quelle ist in diesem Fall das Rauchen von Zigaretten, Zigarren und anderen Tabakerzeugnissen, wobei die PAKs in die Atmungsorgane inhaliert werden. Beim Erhitzen von Lebensmitteln im Kochtopf sowie beim Grillen und Räuchern können ebenfalls PAKs gebildet werden, die dann über den Verdauungstrakt inkorporiert werden. Im Vergleich mit in der Pfanne gebratenem Fleisch sind bei geräucherten Produkten zum Teil hohe Konzentrationen an PAKs nachgewiesen worden. Der Gehalt an dem besonders kanzerogenen Benzo[a]pyren darf nach der Fleischverordnung einen Grenzwert von 1 µg/kg in Fleischerzeugnissen nicht überschreiten.

Auf natürlichem Weg können biogene PAKs durch verschiedene Bakterien, Pilze, Pflanzen und Tiere infolge von Stoffwechselfvorgängen gebildet werden. Beispielsweise entstehen die PAKs über den Isopren-Stoffwechselweg aus Aminosäuren durch Ringschluss, aus Umlagerungen, Alkylierungen und Oxidationsreaktionen. Aus Huminsäuren können im Boden durch

Kondensationsreaktionen PAKs entstehen. Dieses tritt vornehmlich in Humusböden in Erscheinung, so dass dort der normale PAK-Gehalt höher ist als in anderen Böden, insbesondere im Vergleich zu Sandböden. Die relativ geringen PAK-Gehalte in Sandböden sind auch darauf zurückzuführen, dass die Sandpartikel nur über ein geringes Adsorptionsvermögen verfügen.

Die durch anthropogene Einflüsse verursachten PAK-Konzentrationen in Böden sind in der Regel immer um ein Vielfaches höher als die PAK-Konzentrationen, welche durch natürliche Prozesse entstehen können.

Die aus Verbrennungsprozessen gebildeten PAKs gelangen über die Emission von Abgasen (mit einem hohen Anteil aus dem Straßenverkehr) und Flugaschen leicht in die Atmosphäre, wo sie dann durch Transportmechanismen weitgehend gleichmäßig verteilt werden. Die Verbindungen mit drei oder weniger aromatischen Ringen besitzen einen höheren Dampfdruck und einen niedrigen Kondensationspunkt (unterhalb 400 °C). Sie liegen in der Luft gasförmig vor. Die Mehrzahl der PAKs sind höher siedende Stoffe, welche dort vorwiegend in partikelgebundener Form vorliegen. Die Adsorptionskraft ist unterschiedlich je nach Art der Partikel, beispielsweise ist sie bei den emittierten Rußteilchen in den Abgasen von Dieselfahrzeugen besonders groß. Durch trockene und nasse Deposition gelangen die PAKs nachfolgend aus der Atmosphäre auf den Boden, auf Oberflächen von Pflanzen und in Gewässer.

Im Boden zeigen die PAKs aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit, dem niedrigen Dampfdruck und der starken Adsorption an organische und anorganische Materialien eine geringe Mobilität und verbleiben vorwiegend in den Bodenschichten, in die sie bei der Deposition gelangt sind. Ein Transport der PAKs erfolgt meist nur mit anderen Bodenverunreinigungen (Mineralöle, Lösungsmittel oder Detergentien) sowie an Partikel adsorbiert.

Toxikologie (und Wirkungsmechanismen) der PAKs

Zahlreiche Verbindungen aus der Stoffklasse der PAKs sind im Tierversuch krebserzeugend, einige Substanzen haben auch mutagene Eigenschaften. Die PAKs werden daher auch in der MAK-Werte-Liste für gefährliche Arbeitsstoffe als „im Tierversuch eindeutig krebserzeugend“ eingestuft (Kategorie III, 3B). Sie können Lungenkarzinome und Hautkrebs verursachen. Über die akute Toxizität der PAKs existieren vergleichsweise wenig Daten, zur Auslösung von Vergiftungserscheinungen sind in der Regel relativ hohe Dosen erforderlich.

Die krebserzeugende Wirkung von PAKs beim Menschen wurde bereits im 18. Jahrhundert (ca. um 1775) von Sir Percival Pott beobachtet, indem er ein häufigeres Auftreten von

Scrotalkrebs (*lat.*: scrotum = Hodensack) bei Kaminkehrern feststellte und dieses auf die Exposition durch Ruß zurückführte. 1875 stellte v. Volkmann bei Arbeitern in der Teer- und Paraffinindustrie eine Häufung von Hautkrebs fest. Die krebserzeugende Wirkung der PAKs wurde 1915 an Kaninchen nachgewiesen, die durch Einwirkung von Steinkohlenteer maligne Tumoren auf der Haut entwickelten. In der Zeit um 1925 wurden die PAKs als Inhaltsstoffe von Ruß und Teer identifiziert.

Die Personengruppen, die infolge ihres Berufes der Einwirkung von PAKs ausgesetzt sind, zeigen ein deutlich erhöhtes Krebsrisiko. Bei epidemiologischen Untersuchungen von Arbeitnehmern in Kokereien, die als sog. Gasarbeiter auf oder neben den Öfen beschäftigt waren, sowie bei Aluminiumschmelzern und teerverarbeitenden Dachdeckern wurde eine erhöhte Häufigkeit von Karzinomen der Atemwege festgestellt. Das Krebsrisiko steigt dabei mit der Beschäftigungsdauer und mit der Höhe der Schadstoffkonzentration am Arbeitsplatz an, wobei allerdings das Rauchverhalten nicht berücksichtigt wurde.

Ein Zusammenhang von Rauchverhalten und dem Auftreten von Lungenkrebs ist ebenso unumstritten. Die Wirkung von Extrakten aus Rauchpartikeln von Kokereien, Zigarettenrauch, Dieselabgasen und der Verarbeitung von Dachteer in Bezug auf die Entstehung von Hautkrebs ist unterschiedlich, dieses wurde in Tierversuchen belegt. Bei Personen, die Nahrungsmittel mit einem erhöhten Gehalt an Benzo[a]pyren aufnehmen, gibt es Hinweise auf ein häufigeres Auftreten von Magenkrebs.

Ein wichtiges Kriterium für kanzerogene Eigenschaften ist das Vorhandensein der sog. Bay-Region, welche als Strukturelement in einigen PAKs enthalten ist (siehe in Abb. 1). Aufgrund der schon frühen guten Nachweisbarkeit ist das stark kanzerogene Benzo[a]pyren die bekannteste Verbindung und gilt auch heute noch als Leitparameter und geeigneter Kanzerogenitäts-Indikator in der Stoffklasse der PAKs. Die Einbeziehung anderer PAKs ergibt keinen besseren Maßstab zur Einschätzung des Krebsrisikos.

Nicht alle PAKs haben stark kanzerogene Eigenschaften. Die Mehrzahl der Verbindungen werden aber als Tumorpromotoren angesehen, d. h. sie fördern die kanzerogene Wirkung von anderen Chemikalien. Vorwiegend die aus vier bis sieben Ringen bestehenden PAKs sollen für das Wachstum von Krebsgeschwüren verantwortlich sein, während den PAKs mit zwei oder drei Benzolringen keine kanzerogene Potenz zugeschrieben wird. Einige Daten zur Toxizität, Mutagenität und Kanzerogenität sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Mutagenität, Kanzerogenität und akute Toxizität der 16 PAKs nach US-EPA.

Substanz	Mutagenität	Kanzerogenität	Akute Toxizität LD₅₀[mg/kg]
Naphthalin	inaktiv	inaktiv	1780 (Ratte) 350 (Maus)
Acenaphthylen	k. A.	k. A.	k. A.
Acenaphthen	aktiv	k. A.	10000 (Ratte)
Fluoren	inaktiv	k. A.	k. A.
Phenanthren	inaktiv	inaktiv	700 (Ratte)
Anthracen	inaktiv	aktiv	111 (Amsel)
Fluoranthren	inaktiv bis schwach aktiv	inaktiv	2000 (Ratte)
Pyren	inaktiv	inaktiv	9400 (Maus)
Benzo[a]anthracen	schwach bis mäßig aktiv	schwach aktiv	k. A.
Chrysen	mäßig aktiv	schwach aktiv	k. A.
Benzo[b]fluoranthren	mäßig aktiv	mäßig bis stark aktiv	k. A.
Benzo[k]fluoranthren	mäßig aktiv	schwach aktiv	k. A.
Benzo[a]pyren	sehr stark aktiv	sehr stark aktiv	50 (Ratte)
Indeno[1,2,3-cd]pyren	mäßig aktiv	mäßig aktiv	k. A.
Benzo[g,h,i]perylen	schwach aktiv	inaktiv bis schwach aktiv	k. A.
Dibenzo[a,h]anthracen	mäßig bis stark aktiv	stark bis sehr stark aktiv	k. A.

Die natürliche Aufnahme von PAKs in den tierischen und menschlichen Organismus erfolgt inhalativ über Stäube oder oral über die Nahrung. Eine Aufnahme über die Haut ist nur von geringer Bedeutung. Die inhalative Aufnahme von PAKs tritt beim Konsum von Tabakerzeugnissen und bei beruflicher Exposition in der Umgebung von Emittenten sowie in Industrie- und Ballungsgebieten in den Vordergrund. Die in die Lunge inhalierten PAKs werden nach und nach von den Partikeln abgelöst und gelangen dann in die Blutbahn.

Die toxischen Effekte der PAKs werden u.a. darauf zurückgeführt, dass sie ähnlich wie Dioxine, Furane und coplanare PCB an die cytosolischen Ah-Rezeptoren (Ah = Aromatic Hydrocarbon) gebunden werden. Im Organismus induzieren die PAKs eine Synthese der sie abbauenden Enzyme, wie z.B. Dioxigenasen und mischfunktionelle Oxigenasen, sie beeinflussen unter anderem auch physiologische Parameter wie den Fettgehalt in der Leber. Ein Abbau der PAKs wird bei Säugetieren durch Cytochrom P-450-abhängige mischfunktionelle

Oxidasen eingeleitet. Die PAKs werden dabei trotz ihrer guten Fettlöslichkeit rasch zu Phenolen oder Epoxiden metabolisiert, welche als wasserlösliche Glucuronide, Sulfate oder Glutathion-Konjugate ausgeschieden werden. Kanzerogene Wirkungen können unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass einige der bei der Metabolisierung entstehenden Epoxide in Folgereaktionen in *trans*-Dihydrodirole und *trans*-Dihydrodirolepoxide umgewandelt werden. Die Dihydrodiol-epoxide können unter Öffnung des Epoxidringes kovalent an die Basen der DNS gebunden werden, welches höchst wahrscheinlich zur Kanzerogenität führt.