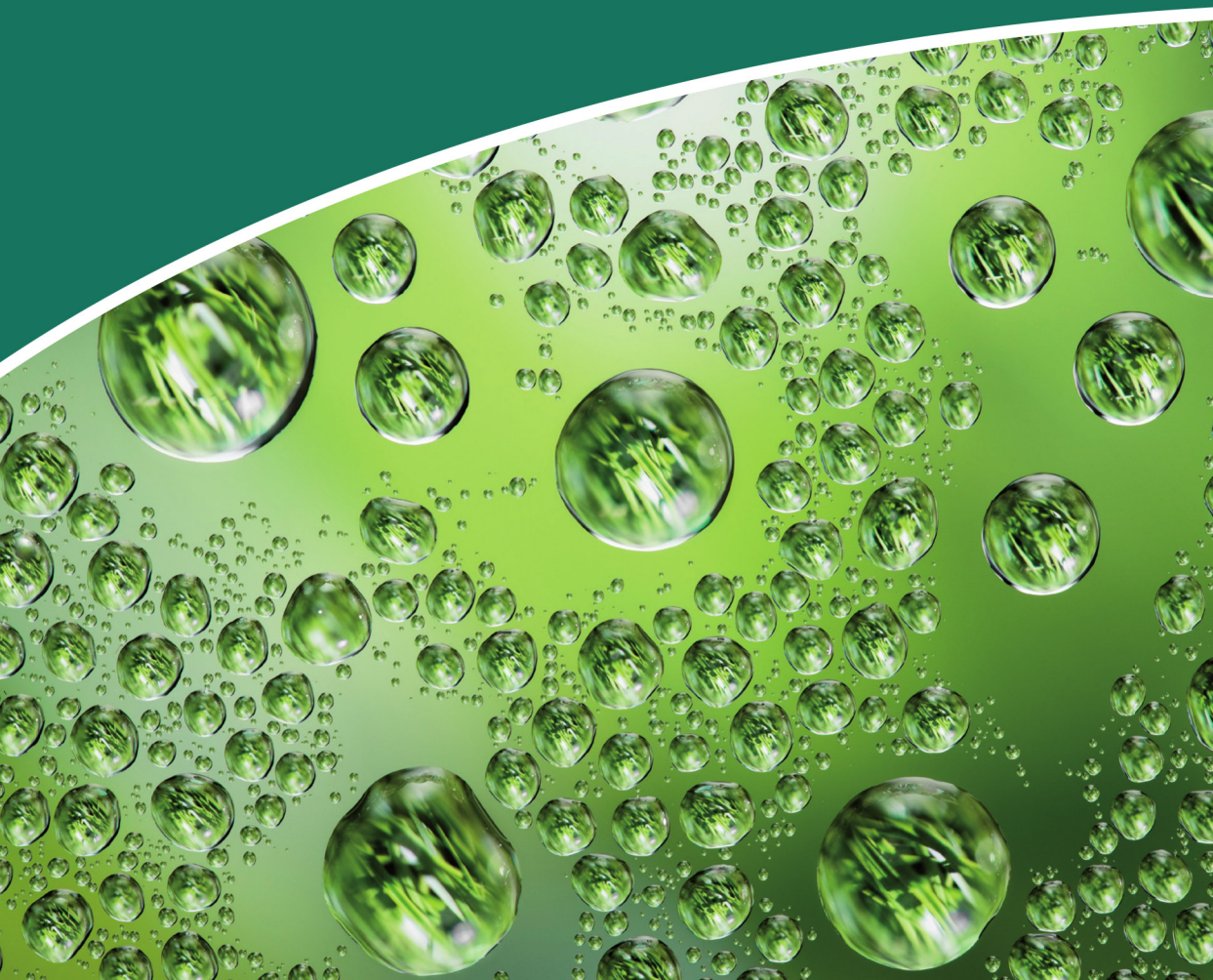


Franz-Xaver Reichl

Moderne Umweltmedizin

Umweltbelastungen
Diagnostik
Therapie



Franz-Xaver Reichl

Moderne Umweltmedizin

Umweltbelastungen – Diagnostik – Therapie

Univ.-Prof.. Dr. Dr. Franz-Xaver Reichl
Poliklinik für Zahnerhaltung
und Parodontologie und
Walther-Straub-Institut für Pharmakologie
und Toxikologie
Ludwig-Maximilians-Universität München
Nussbaumstraße 26
80336 München

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar

© lehmanns media, Berlin 2011
Hardenbergstraße 5
10623 Berlin

Umschlag: Gilberg Marketing
Grafik und Layout: epline Ruth Hammelehle,
Kirchheim unter Teck
Druck und Bindung: Drukarnia Dimograf,
Bielsko-Biała

ISBN 978-3-86541-399-4

www.lehmanns.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Verfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung auf DVDs, CD-ROMs, CDs, Videos, in weiteren elektronischen Systemen sowie für Internet-Plattformen

Vorwort

Umweltmedizin stellt eine humanmedizinische Wirkungsforschung dar und untersucht, welche Umweltfaktoren allein oder in Kombination unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden beeinflussen. Schwierig bzw. unmöglich ist es, im Einzelfall vorherzusagen, wie hoch dieser Einfluss ist. Kranke können z. B. empfindlicher auf sich ändernde Umweltfaktoren reagieren als Gesunde, die wiederum bei gleicher Exposition durchaus unterschiedliche Reaktionen zeigen können.

Die moderne Umweltmedizin untersucht somit sämtliche Einflüsse, die aus der Umgebung direkt oder indirekt auf den Menschen einwirken. Sie schützt nicht die Umwelt vor den Menschen, sondern den Menschen vor der Umwelt! Ihr höchstes Schutzgut ist also der Mensch. Die umweltmedizinische Beurteilung und Bewertung der Wirkung von (Schad)Stoffen oder anderen Umweltfaktoren hat sich dabei auf wissenschaftlich erfassbare und gesicherte Fakten zu stützen.

In diesem Buch werden die Wirkungen von Stoffen bzw. Faktoren erklärt und illustriert, die in der Umwelt Veränderungen hervorrufen und so für den Menschen eine Gefährdung darstellen können. Es ist überschaubar in 6 Kapitel gegliedert:

1. Allgemeine Umweltmedizin mit Vermittlung grundlegender Kenntnisse der Umweltmedizin
2. Umweltbelastung mit Darstellung z. B. der verschiedenen (Schad-)Stoffgruppen
3. Diagnostische Methoden
4. Darstellung gesundheitlicher, umweltbedingter (Organ-)Störungen beim Menschen
5. Therapeutische Möglichkeiten umweltbedingter Erkrankungen, wobei alternativmedizinische Verfahren nicht ausgeklammert,

sondern einer kritischen Beurteilung unterzogen werden

6. Diskussion übergreifender umweltmedizinischer Aspekte, z. B. die Rolle der Medien

Das Buch bietet eine kurzgefasste aktuelle Darstellung der Umweltmedizin in Wort und Bild. Durch die „visuelle Methode“ und die brillanten Farbfotos werden die zum Teil komplizierten umweltmedizinischen Zusammenhänge selbst Laien leicht vermittelt und bleiben einprägsam.

Es dient zudem Studierenden aller Fächer, sich die grundlegenden Kenntnisse über umweltrelevante Stoffe, Wirkungen und Therapien von Erkrankungen rasch anzueignen.

Das Buch *Moderne Umweltmedizin* wurde nach dem Gegenstandskatalog angefertigt und ist dadurch der ideale Wegbegleiter zum Kursbuch für die Aus- und Weiterbildung zum Umweltmediziner. Es umfasst alle umweltmedizinischen Themata und stellt somit eine ideale Vorbereitung für Prüfungen dar.

Es soll darüber hinaus praktizierenden (Umwelt)Medizinern oder in anderen Berufen tätigen Personen helfen, schon Vergessenes wieder in Erinnerung zu rufen. Durch die leicht lesbaren, verständlichen Texte und übersichtlichen Farbtafeln wird schließlich jeder sein Wissen auf dem Gebiet der Umweltmedizin schnell und problemlos erweitern.

Die in alphabetischer Reihenfolge angefügten, schnell abrufbaren Kurz-Definitionen (Glossar) beinhalten alle wichtigen, umweltrelevanten Begriffe.

Ich danke Kollegen und Mitarbeitern für die Anregungen: Herrn Prof. Dr. Reinhard Hickel, Direktor der Klinik und Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Univer-

sität München und Herrn Prof. Dr. Thomas Gudermann, Direktor des Walther-Straub-Instituts für Pharmakologie und Toxikologie der Universität München für ihre Unterstützung; insbesondere Frau Ruth Hammelehle für die graphische Gestaltung der Abbildungen und Herrn Bernhard Walter für die redaktionelle Bearbeitung.

Ferner gilt mein Dank auch folgenden Personen für die umfassenden Recherchen und hilfreichen Arbeiten bei der Erstellung einzelner Kapitel: Frau Dr. Sigrun Schütz (Kausaltherapie und Therapien mit Medikamenten in der Umweltmedizin), Frau Dr. Karin

Luber De Quintana (alternativmedizinische, diagnostische und therapeutische Verfahren sowie umstrittene Behandlungsmöglichkeiten) und Herrn Diplom-Chemiker Dr. Dr. Jürgen Durner für die Überprüfung der Richtigkeit der chemischen Formeln.

Für die Bearbeitung einiger Kapitel konnten zusätzlich fachkompetente Autoren gewonnen werden, denen ich für ihre Mühe und ihr Engagement besonders danke.

München im Mai 2011
Franz-Xaver Reichl

Inhaltsverzeichnis

Benutzungshinweise	X	1.8 Grenz- und Richtwerte	61
1 Allgemeine Umweltmedizin	1	1.8.1 Grenz- und Richtwerte in der Arbeitsmedizin.	61
1.1 Geschichte der Umweltmedizin	1	1.8.2 Grenz- und Richtwerte in der Umweltmedizin	64
1.1.1 Umweltkrisen in der Erdgeschichte	1	1.9 Informationssysteme	66
1.1.2 Industrieunfälle und Umweltkatastrophen.	3	2 Umweltbelastungen	71
1.2 Grundlagen der Umweltmedizin	6	2.1 Relevante Stoffgruppen	71
1.2.1 Inhalte der Umweltmedizin.	6	2.1.1 Kohlenwasserstoffe	71
1.2.2 Grundbegriffe der Umweltmedizin	9	Benzol	71
1.2.3 Methodische Ansätze	11	Chlorierte aliphatische Kohlen- wasserstoffe	73
1.3 Umweltmonitoring und Umwelt- analytik	13	Formaldehyd.	75
1.3.1 Umweltmonitoring	13	Pentachlorphenol	78
1.3.2 Umweltanalytik	15	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane.	80
1.4 Grundlagen der Umwelt- toxikologie	22	2.1.2 Metalle.	90
1.4.1 Umwelttoxikologie	22	Aluminium	90
1.4.2 Toxikodynamik	27	Arsen	93
1.4.3 Toxikokinetik.	29	Blei.	95
1.4.4 Biometrie	34	Cadmium	98
1.5 Testmethoden.	39	Chrom (Cr)	100
1.5.1 In-vivo-Methoden.	39	Kupfer (Cu)	101
1.5.2 In-vitro-Methoden	41	Nickel	103
1.5.3 In-calculo-Methoden	44	Platin-Metalle.	104
1.5.4 Weitere theoretische Methoden	46	Quecksilber.	105
1.6 Epidemiologie in der Umwelt- medizin	48	2.1.3 Weitere Stoffgruppen	108
1.6.1 Grundlagen der Epidemiologie	48	Anorganische Gase	108
1.6.2 Studientypen in der Epidemiologie	51	Asbest und Mineralfasern.	113
1.7 Risiko in der Umweltmedizin	53	Biozide.	115
1.7.1 Risk Assessment (Risikoabschätzung).	53	Nitrat, Nitrit, N-Nitrosoverbindungen	120
1.7.2 Kontroverse Risikoabschätzungen	53	Radioaktive Nuklide	125
		Mineralstoffe und Spurenelemente.	128

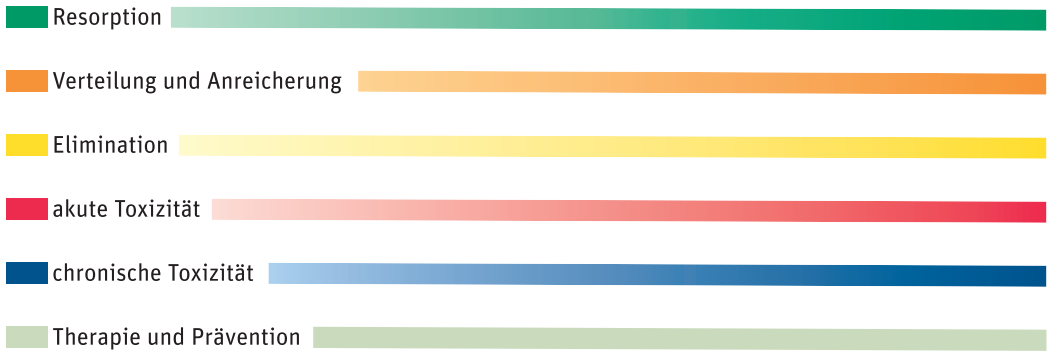
Inhaltsverzeichnis

Staub und partikelförmige Emissionen	130
Tabakrauch	132
2.2 Umweltmedien	134
2.2.1 Außenluft	134
2.2.2 Innenraumluft	137
2.2.3 Wasser	139
2.2.4 Boden	147
2.2.5 Abfall	151
2.2.6 Bedarfsgegenstände	153
2.2.7 Iatrogene Belastungen	156
2.2.8 Gifte und Schadstoffe in Lebensmitteln	160
2.2.9 Novel Food und Lebensmittelbestrahlung	166
2.3 Umweltfaktoren	168
2.3.1 Ionisierende Strahlung	168
2.3.2 Nicht-ionisierende Strahlung	173
2.3.3 Sinnesvermittelte Umweltfaktoren	175
2.3.4 Wetter und Klima	181
2.4 Ökotoxikologie	183
3 Diagnostik in der Umweltmedizin	187
3.1 Anamnese	187
3.2 Diagnostische Methoden	189
3.2.1 Grundlagen und allergologische Diagnostik	189
3.2.2 Lungenfunktionsprüfung	192
3.2.3 Neurologische Diagnostik	194
3.3 Human-Biomonitoring	197
3.3.1 Grundlagen	197
3.3.2 Analyseverfahren	199
3.3.3 Bewertung	201
3.4 Differenzialdiagnose umweltbedingter psychischer Störungen	204
3.4.1 Grundlagen	204
3.4.2 Umwelt- bzw. Vergiftungsangst	206
3.4.3 Informationsstand und Persönlichkeit	211
3.4.4 Psychogene Störungen	213
3.5 Alternative Verfahren	222
3.5.1 Komplementärmedizin	222
3.5.2 Komplementärmedizinische Diagnostik	225
3.6 Ermittlung von Umwelt-emittenten	230
3.6.1 Grundlagen	230
3.6.2 Methoden	230
4 Umweltbedingte Störungen beim Menschen	235
4.1 Funktionsstörungen von Organsystemen	235
4.1.1 Respirationstrakt	235
4.1.2 Blut und blutbildende Organe	239
4.1.3 Herz und Kreislauf	242
4.1.4 Gastrointestinaltrakt (GIT)	244
4.1.5 Leber	246
4.1.6 Niere	249
4.1.7 Immunsystem	251
4.1.8 Haut	254
4.1.9 Nervensystem	256
4.1.10 Sinnesorgane	258
4.1.11 Reproduktion	261
4.2 Umweltmedizinische Symptomkomplexe	263
5 Therapie in der Umweltmedizin	279
5.1 Kausaltherapie in Schul- und Alternativmedizin	279
5.2 Umwelterkrankungen erkennen und behandeln	281
5.2.1 Grundlagen medikamentöser Therapie	281
5.2.2 Antidota: Chelatbildner	284
5.2.3 Andere Antidota und andere Medikationen	286

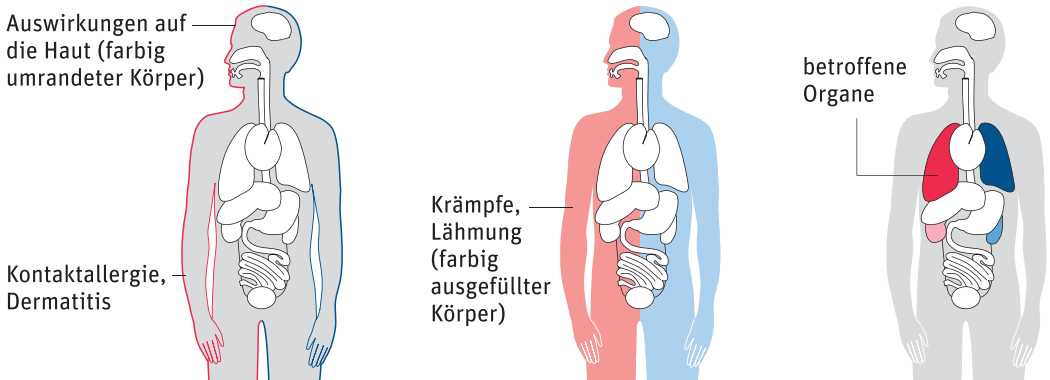
5.3	Therapie allergischer Erkrankungen	288	6.3	Aufgaben des Umwelt- mediziners.....	347
5.4	Psychotherapie.....	303	6.3.1	Grundlagen.....	347
5.5	Therapie unspezifischer Beschwerden.....	315	6.3.2	Gesundheits- und Umweltschutz in Zusammenarbeit mit den Behörden.....	348
5.5.1	Alternative und schul- medizinische Therapieansätze... ..	315	6.3.3	Voraussetzungen des Umweltmediziners	348
5.5.2	Placebo	317	6.4	Die Rolle öffentlicher Medien..	350
5.6	Alternativmedizinische Thera- pien.....	320	6.5	Gesundheits- und Umweltschutz	352
5.6.1	Klassische Naturheilverfahren... ..	320	6.5.1	Vorbeugender Gesundheitsschutz	352
5.6.2	Erweiterte Naturheilverfahren	327	6.5.2	Wasser.....	358
5.6.3	Naturheilkundliche Außenseitermethoden	330	6.5.3	Abfall.....	363
5.7	Umstrittene Behandlungs- methoden	332	6.5.4	Energie	365
5.8	Umstrittene Außenseiter- methoden	334	6.6	Umweltrelevante Rechtsgebiete	370
5.9	Eliminierung von Umwelt- emittenten.....	337	Glossar und Abkürzungen		373
6	Übergreifende umweltmedizinische Aspekte	343	Weiterführende Literatur.....		399
6.1	Risikogruppen in der Umwelt- medizin	343	Sachverzeichnis.....		401
6.2	Weiterbildung zum Umwelt- mediziner.....	345	Dank.....		425
			Adressen		427

Benutzungshinweise

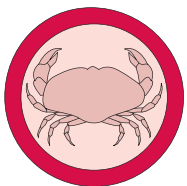
Zur schnellen Orientierung sind folgenden Begriffen bestimmte Farben zugeordnet:



Charakteristische Symptome sind wie folgt dargestellt:



Das Krebsymbol steht für Kanzerogenität; dahinter ist die Einstufung nach der MAK-Liste 1999 der Deutschen Forschungsgemeinschaft erwähnt:



MAK z. B. III/2

1 Allgemeine Umweltmedizin

1.1 Geschichte der Umweltmedizin

1.1.1 Umweltkrisen in der Erdgeschichte

Geologen teilen die Erdgeschichte in chronologische Abschnitte ein (Abb. 1.1). Die größten heißen *Äonen*, gefolgt von *Ären* und *Perioden*. Die Erdgeschichte wird durch das Studium der verschiedenartigen Gesteinsablagerungen in der Erdrinde erschlossen.

Veränderungen in der Umwelt sind keine neuzeitlichen Erscheinungen: Umweltkrisen gab es in der Erdgeschichte schon vor Jahrtausenden, mit z. T. katastrophalen Auswirkungen auf das Leben. Eines der spektakulärsten Ereignisse, durch einen Meteoriteneinschlag ausgelöst, fand vor ca. 65 Mill. Jahren am Ende der *Kreidezeit* statt. Es beendete das Zeitalter der Dinosaurier (das Mesozoikum) und läutete das Zeitalter der Säugetiere (das Känozoikum) ein.

Hauptindiz für den *Meteoriteneinschlag (Impact-Hypothese)* ist der ungewöhnlich hohe Iridium-Gehalt, der an vielen Stellen der Erde einen bis zu 30 cm dicken Sedimentabschnitt an der Grenze zwischen mesozoischen und känozoischen Gesteinen kennzeichnet (Abb. 1.2). Iridium ist ein in der Erdkruste höchst seltenes Element, kommt aber in Meteoriten häufig vor. Es soll nach dem Aufprall eines ca. 10 km großen Meteoriten in der heutigen Gegend um den Golf von Mexiko als Fall-out über die gesamte Erdoberfläche verteilt worden sein. Dieses Ereignis war jedoch keineswegs das schwerwiegendste in der Geschichte des Lebens: Vor ca. 440 Mill. Jahren, am Ende des

Ordoviziums, und ca. 80 Mill. Jahre später, am Ende des *Devons*, wurden die Lebensgemeinschaften der Meere empfindlich dezimiert.

Auslöser war eine klimatische Veränderung, verursacht durch plattentektonische Bewegungen in der Erdrinde. Für manche Regionen, z. B. das damals überflutete westliche Nordamerika, werden die Verluste mit über 70% aller wirbellosen Tierarten angegeben.

Die bisher verheerendste Umweltkatastrophe, die zum größten Artensterben aller Zeiten führte, ereignete sich am Ende des *Perm* vor ca. 250 Mill. Jahren: Damals kam es durch auseinanderdriftende Landmassen zu einer massiven Abkühlung des Weltklimas (*Vereisungsperiode*). Zu den Opfern dieser Vereisungsperiode gehörten fast 90% aller Arten des marinen Lebensraums, darunter die Ammoniten (Abb. 1.3), einzellige Foraminiferen, Seelilien, Korallen, aber auch Landwirbeltiere.

Die jüngste Krise, die insbesondere die Großsäugetiere des Festlandes traf, liegt erst ca. 11 000 Jahre zurück. Offensichtlich griff hier erstmals der Mensch zerstörerisch in die Umwelt ein. Hauptauslöser soll die exzessive Jagdtätigkeit des Menschen gewesen sein (*Overkill-Hypothese*). Steinzeitliche Jäger sollen mit ihren fortschrittlichen Waffen (z. B. Speeren) das Großwild massenweise vernichtet und so zum Aussterben gebracht haben. Vorstellungen, wonach eine infolge von Klimaverschiebungen veränderte Vegetation (Nahrungsknappheit) für das damalige Aussterben der Großsäugetiere verantwortlich gewesen sein soll, wurden widerlegt: Analysen von fossilem Kot bewiesen, dass z. B. das pflanzenfressende Shasta-Bodenfaultier (Abb. 1.4), das vor ca. 11 000 Jahren ausstarb, damals sogar ein sehr reiches Nahrungsangebot hatte.

1 Allgemeine Umweltmedizin

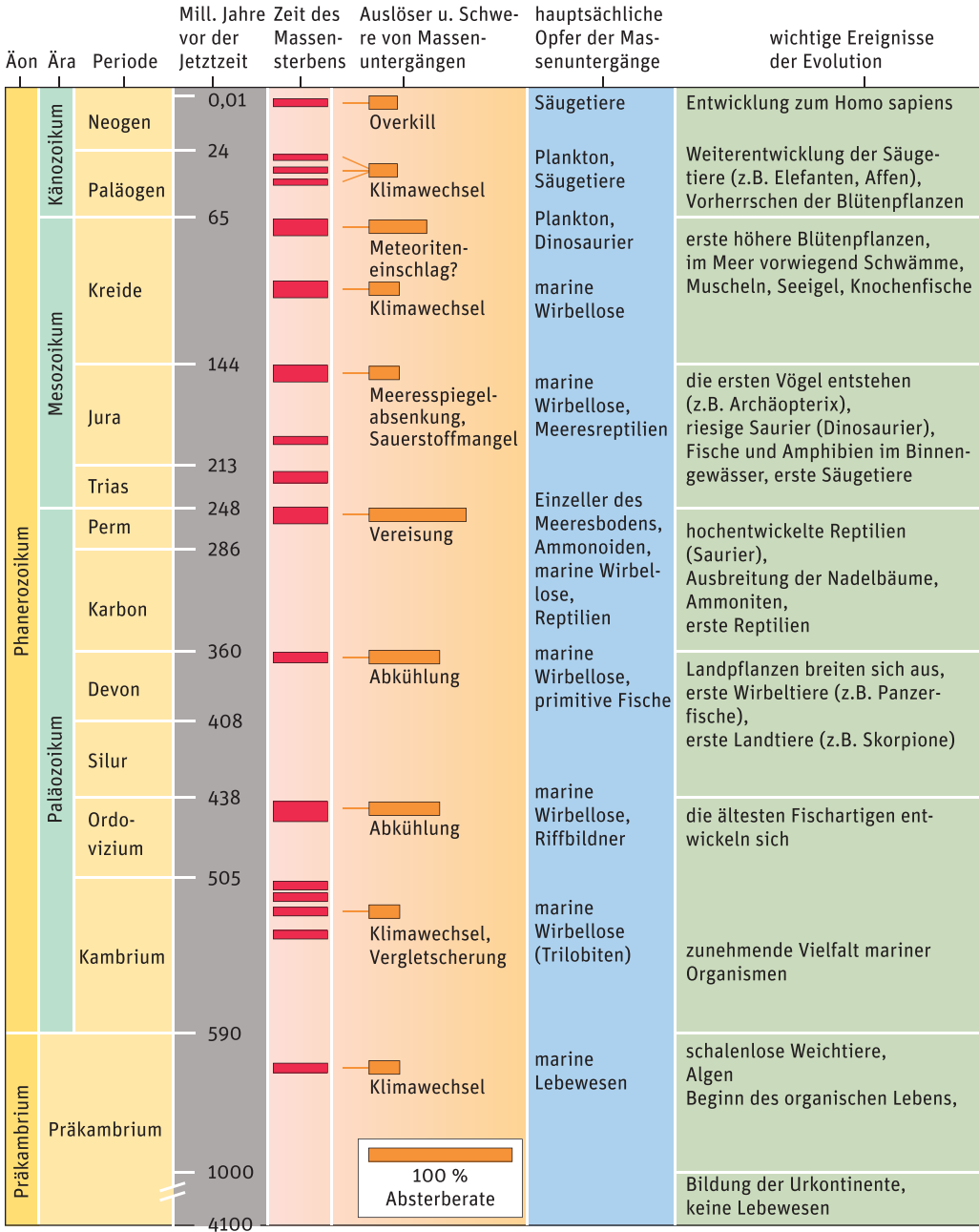


Abb. 1.1 Umweltkrisen in der Erdgeschichte



Abb. 1.2 Iridium-Anomalie. Eine ca. Eurostück-große Münze liegt auf der schwarzen Iridium-haltigen Tonschicht (zu sehen im Appenin/Italien)



Abb. 1.3 Ammonoid aus dem Jungpaläozoikum



Abb. 1.4 Das Shasta-Bodenfaultier, ein großer Pflanzenfresser, der aus einer aus Südamerika eingewanderten Art hervorging. Es besiedelte im Pleistozän (Unterzeit im Neogen) das westliche Nordamerika und starb vor ca. 11 000 Jahren plötzlich aus

Weitere Auslöser von Katastrophen

Als Ereignisse, die zu kleineren Massensterben führten, gelten plötzliche vulkanische Ausbrüche von giftigen Gasen oder von Aschewolken, die den Himmel verdunkeln, Meeresspiegelschwankungen, veränderte Sauerstoffkonzentrationen in der Atmosphäre und im Meer, Störungen in der Nährstoffzufuhr, Schwankungen der Salzkonzentration im Weltmeer und die Ausbreitung von Trübströmen (im Wasser schwebende Sedimentwolken) über die Ozeane.

Zu den todbringenden Veränderungen, die man heftigen Meteoriteneinschlägen und/oder Kometenschauern zuschreibt, gehören sowohl klimatische Abkühlungen (infolge der Himmelverfinsterung durch den aufgewirbelten Staub) als auch das Aufwühlen von Sedimenten in Ozeanen.

In Zusammenhang mit einigen Krisen werden weitere fremdartige Wirkkräfte diskutiert wie Strahlung infolge einer Supernova-Explosion in Erdnähe sowie die Zunahme der kosmischen Strahlung durch eine plötzliche Abschwächung des Erdmagnetfeldes, das normalerweise als eine Art Schutzschild wirkt.

Jetztzeit

Die erwähnten Massensterben bei prähistorischen Umweltkrisen hatten weit größere Ausmaße als Verluste bei neuzeitlichen Naturkatastrophen. Das Jahr 1999 gilt im letzten Jahrtausend als das Jahr mit den meisten Naturkatastrophen (ca. 700). In den letzten 1000 Jahren starben ca. 15 Mio. Menschen bei Naturkatastrophen (Überschwemmungen, Vulkanausbrüchen).

1.1.2 Industrieunfälle und Umweltkatastrophen

Im Industriezeitalter sind häufig menschliches Versagen und Fehlverhalten die Ursachen von schweren Unfällen, die zu Umweltkatastrophen führen. Im Folgenden sind bedeutende Industrieunfälle und Umweltkatastrophen dargestellt.

Industrieunfälle

Seveso (Italien, Abb. 1.5): Am 10.7.1976 trat um 12.37 Uhr durch ein defektes Ventil im Chemiebetrieb ICMESSA (Hoffmann La Roche-Konzern) eine Aerosolwolke mit hochgiftigen Dioxinen aus, die ein 1800 ha großes Gebiet nördlich von Mailand bedeckte. In der am stärksten vergifteten Zone wurde ein Dioxingehalt bis zu $50 \mu\text{g}/\text{m}^2$ gemessen. Die Zahl der Neugeborenen mit Missbildungen in Seveso stieg nach dem Unfall bis zum Jahr 1978 um fast das 15fache an. Hautentzündungen und Chlorakne (besonders bei Kindern) waren die Hauptsymptome bei den Betroffenen (s. S. 80 und 85).



Abb. 1.5 10.07.1976: Spezialisten in Schutzanzügen säuen ein mit Dioxin kontaminiertes Gelände in Seveso ein

Bhopal (Neu Delhi, Indien, Abb. 1.6): Beim bisher schwersten Industrieunglück der Welt starben in der Nacht vom 3./4. 12. 1984 mehr als 3300 Menschen, als 42 t des giftigen Gases Methylisocyanat aus den Tanks einer Fabrik für Pflanzenschutzmittel des US-Unternehmens Union Carbide entwichen. Bis Mai 1997 wird die Zahl der Todesopfer offiziell mit 13 000 angegeben. Im Februar 1989 einigten sich Union Carbide und die indische Regierung auf Entschädigungszahlungen für die Hinterbliebenen der Opfer und für dauerhaft Geschädigte in Höhe von 470 Mio. US-Dollar.

Tschernobyl (Ukraine, Abb. 1.7): Bedienungsfehler, Sicherheitsmängel und Systemschwächen des dortigen Atomreaktors haben den



Abb. 1.6 03.12.1984: Opfer der Giftgaskatastrophe in Bhopal, Indien

bislang schwersten Unfall bei der friedlichen Nutzung der Atomenergie ausgelöst. Durch Missachtung mehrerer Vorschriften geriet der Reaktor am 26.04.1986 um 1.23 Uhr außer Kontrolle. 40 Sekunden später sprengten zwei Explosionen den Reaktor (**GAU, größter anzunehmender Unfall**). Von brennendem Graphit in die Höhe getrieben, breitete sich eine radioaktive Wolke aus. Die freigesetzte Strahlung entsprach der von 200 Hiroshima-Atombomben. Unmittelbar nach dem Unfall starben 31 Personen an der akuten Strahlenkrankheit. 800 000 Personen (sog. „Liquidatoren“) wurden zu Aufräumarbeiten eingesetzt. Von diesen gelten heute 125 000 als chronisch krank, 10 000 „Liquidatoren“ sind bis heute verstorben. In der Bevölkerung der



Abb. 1.7 26.04.1986: explodierter Atomreaktor in Tschernobyl, Ukraine

betroffenen Gebiete traten nach dem Unfall vermehrt Tumoren auf, besonders Schilddrüsentumoren bei Kindern. Bis heute liegt die Selbstmordrate in Tschernobyl und Umgebung mit 19% extrem hoch.

Fukushima (Japan, Abb. 1.8): Am 11.03.2011 kam es um 14.46 Uhr (06.46 Uhr MEZ) durch ein Erdbeben der Stärke 9.0 zur Auslösung eines Tsunamis, der zum Ausfall der Kühlung in insgesamt 6 Atomkraftwerken führte. Explosionen führten zur Freisetzung von Radioaktivität (bis zu 400 mSv/h; siehe Radioaktivität S. 125–127; 168–175). In der Evakuierungszone in Fukushima (ca. 30 km) wurden 210 000 Menschen evakuiert. Jodpräparate mit stabilem Jod wurden verteilt um die Aufnahme von radioaktivem Jod zu unterbinden. In der Präfektur Fukushima wurde eine erhöhte Radioaktivität im Trinkwasser, in Gemüse und in der Milch gemessen (bis zu 1500 Bq/kg Milch; Grenzwert in Japan 300 Bq/kg Milch). In Teilen der EU führte diese Atom-Katastrophen zu einem Umdenken in der Atom-Politik.



Abb. 1.8 März 2011: beschädigte Atomreaktoren in Fukushima, Japan

Umweltkatastrophen durch Öltanker

18.3.1967: Die unter liberianischer Flagge fahrende *Torrey Canyon* lief vor der Südküste Großbritanniens auf ein Riff und brach auseinander. 117 000 t Öl verursachten an der britischen, französischen und niederländischen Küste die bis dahin größte „Ölpest“.

16.3.1978 (Abb. 1.9): Die ebenfalls unter liberianischer Flagge fahrende *Amoco Cadiz* lief nahe der französischen Hafenstadt Brest



Abb. 1.9 16.03.1978: Bretagne. Tausende von Seevögeln wurden Opfer der Ölpest, ausgelöst durch die havarierte *Amoco Cadiz*

auf Grund, brach auseinander und verlor 223 000 t Öl. In der Bretagne wurden 220 km Strand verseucht, 15000 Seevögel kamen ums Leben.

24.3.1989: Vor dem Hafen Valdez in Alaska (USA) lief der US-Tanker *Exxon Valdez* auf ein Riff. 42 000 t Öl liefen aus und verursachten die größte Umweltkatastrophe in der Geschichte der USA. 2000 km Strand wurden verseucht. Mehr als eine halbe Million Vögel, Tausende von Ottern und mehrere Grauwalen kamen um. Nach dem Tanker-Unfall hatte Exxon bereits 3,4 Milliarden Dollar für Säuberungsaktionen, Schadenersatz und Geldbußen bezahlt. Im Jahre 2009 musste Exxon noch eine halbe Mrd. Dollar an Zinsen nachzahlen. Für die etwa 33 000 Geschädigten (Fischer, Anwohner, Fischverarbeiter) hat sich damit die Auszahlungssumme bis heute auf rund 15 000 Dollar verdoppelt.

3.12.1992: Der griechische Öltanker *Aegean Sea* strandete und brach vor der Bucht der spanischen Hafenstadt La Coruna auseinander. Mehr als 90 000 t Öl verseuchten 200 km galizischer Küste.

5.1.1993 (Abb. 1.10): Die unter liberianischer Flagge fahrende *Braer* lief vor den Shetland-Inseln auf und verlor 85 000 t Öl. Schwere Stürme verteilten das Öl auf offener See und verhinderten eine noch größere Umweltkatastrophe.



Abb. 1.10 05.01.1993: Ölkatastrophe vor den Shetland-Inseln; der Öltanker *Braer* sank am 06.01.1993

12.12.1999: (Abb. 1.11) In schwerer See brach der unter der Flagge Maltas fahrende Tanker *Erika* auseinander. 16 000 t Schweröl verschmutzten 500 km der französischen Atlantikküste. Am schlimmsten betroffen sind die Küsten der Bretagne und der Ferieninsel Re, die ein wichtiges Überwinterungsgebiet für Vögel ist. Umweltschützer gehen davon aus, dass bis zu 300 000 Seevögel getötet worden sein könnten.

13.11.2002: Vor der nordwestspanischen Küste geriet ein auf den Bahamas registrierter Tanker in Seenot. Die „*Prestige*“, die 77 000 l Öl geladen hatte, zog einen mehrere Kilometer langen Ölteppich hinter sich her. Sie brach sechs Tage nach der Havarie entzwei. 500 km lange galizische Küsten wurden mit Öl belastet.



Abb. 1.11 12.12.1999: Brest, Frankreich. Mehr als 16 000 t Öl verschmutzten die bretonische Küste

22.4.2010: Aus den Lecks sprudelten am Meeresgrund mehrere Mio. Liter Öl, als die von BP genutzte Bohrplattform „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko nach einer Methanogas-Explosion versank. Rund eine Mio. Liter Chemikalien sind eingesetzt worden, um das Öl aufzulösen. Das Gemisch namens Corexit 9500 zersetzt das Öl so, dass es nicht an die Oberfläche steigt und an Land kommen kann. Umweltschützer warnen jedoch vor den toxischen Auswirkungen, die die Gifte auf dem offenen Meer haben. Beim Menschen kann es zu Entzündungen der Augen, Haut und Lunge kommen. Krebsereggende Substanzen enthält dieser Cocktail nicht. Die Auswirkungen auf das Ökosystem sind unbekannt. Aufgrund der höheren Risiken werden Tiefsee-Ölbohrungen zunehmend kontrovers diskutiert.

1.2 Grundlagen der Umweltmedizin

1.2.1 Inhalte der Umweltmedizin

Umweltmedizin gestern und heute

Schon die Urmenschen benutzten Heilmittel (z. B. Pflanzen) zur Behandlung von Störungen, die durch die Umwelt bedingt waren und sie erkannten die Gefährlichkeit von (Schad-)Stoffen (z. B. Staub), aber auch von Giften (z. B. nach Schlangenbissen). Schriftlich festgehalten wurden umweltbedingte Erkrankungen und Störungen des Wohlbefindens zum ersten Mal 1500 v. Chr. in dem altägyptischen Medizindokument „Papyrus Ebers“. Heute sind viele (Schad-)Stoffe und Umweltfaktoren bekannt, die die Gesundheit beeinträchtigen können. Umweltmedizin ist deshalb heute auch „humanmedizinische Wirkungsforschung“: Sie untersucht, welche Umweltfaktoren allein oder in Kombination die Gesundheit und das Wohlbefinden beeinflussen. Oft ist es schwierig oder sogar unmöglich, im Einzelfall vorherzusagen, wie stark der Einfluss einzelner Faktoren sein



„Die Dosis allein macht das Gift (Dosis sola facit venenum)“

Abb. 1.12 Paracelsus (1493 – 1541): Erster Vertreter naturwissenschaftlicher Denkweisen

wird. Kranke können z. B. empfindlicher auf sich ändernde Umweltfaktoren reagieren als Gesunde, die wiederum bei gleicher Exposition durchaus unterschiedliche Reaktionen zeigen können.

Wichtige Aspekte bei umweltmedizinischen Untersuchungen sind Kenntnisse über die Menge und die Dauer der Einwirkung des (Schad-) Stoffes. Auch in der Umweltmedizin hat das Paradigma von Paracelsus Gültigkeit: „Die Dosis allein macht das Gift (*Dosis sola facit venenum*)“ (Abb. 1.12).

Umweltmedizin als Präventivmedizin

Umweltmedizin wird im engeren Sinne nicht der kurativen (heilenden), sondern der präventiven (vorbeugenden) Medizin zugeordnet (Abb. 1.13). Sie hat die Aufgabe, gesundheitliche Risiken für die Bevölkerung abzuschätzen und durch ihre Intervention abzuwenden. Dabei muss sie im Besonderen Gruppen (z. B. Kinder) berücksichtigen, die bei entsprechender Exposition einem höheren Risiko ausgesetzt sein können.

Der Begriff „Umwelt“ steht in der Umweltmedizin nicht für die gesamte Umgebung, sondern nur für die Teile daraus, die für Lebensabläufe und Zusammenhänge wichtig sind (z. B. Erkennen von Veränderungen). Soziale, politische, wirtschaftliche und kulturelle Umweltaspekte sind im engeren Sinne nicht Gegenstand der Umweltmedizin. Eine strik-

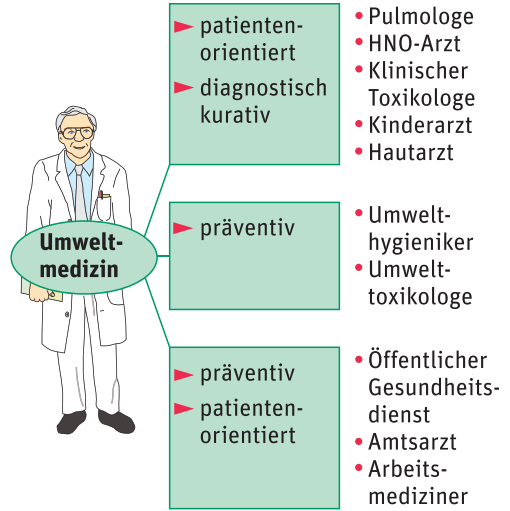


Abb. 1.13 Wichtige umweltmedizinische Disziplinen

te Trennung ist aber nicht möglich, da der Mensch nicht isoliert gesehen werden kann. Allein durch die Art, wie er lebt (z. B. Konsum von Gütern, Müllproduktion, Verkehr), nimmt er Einfluss auf die Umwelt. Solche Umweltveränderungen können wiederum seine Gesundheit beeinträchtigen. Insofern muss die Umweltmedizin als Präventivmedizin bei drohenden gefährlichen Entwicklungen auch in den oben erwähnten Bereichen intervenieren.

Assoziierte Fächer der Umweltmedizin

(Abb. 1.14)

Umwelttoxikologie: Sie beschreibt und erforscht die Wirkungen von (Schad-)Stoffen in Luft, Wasser und Erde, die das ökologische Gleichgewicht stören und Lebewesen bedrohen können.

Umwelthygiene: Sie beschreibt vorbeugende Maßnahmen für die Gesunderhaltung von Menschen, um Erkrankungen bzw. Störungen fern zu halten.

Arbeitsmedizin: Sie befasst sich mit Berufskrankheiten, Arbeitsunfällen, gewerbehygienischen und arbeitstoxikologischen Fragen.

Sozialmedizin: Sie befasst sich mit den Gesund-

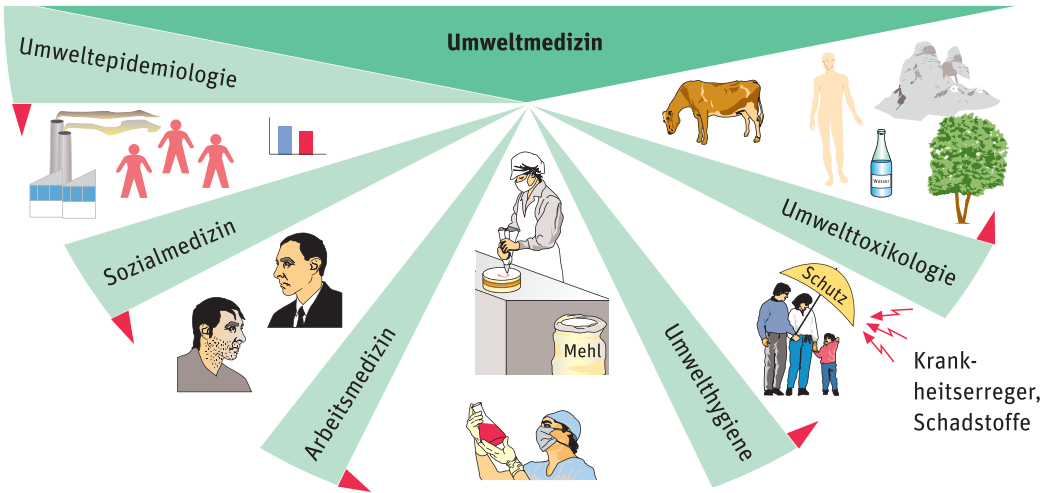


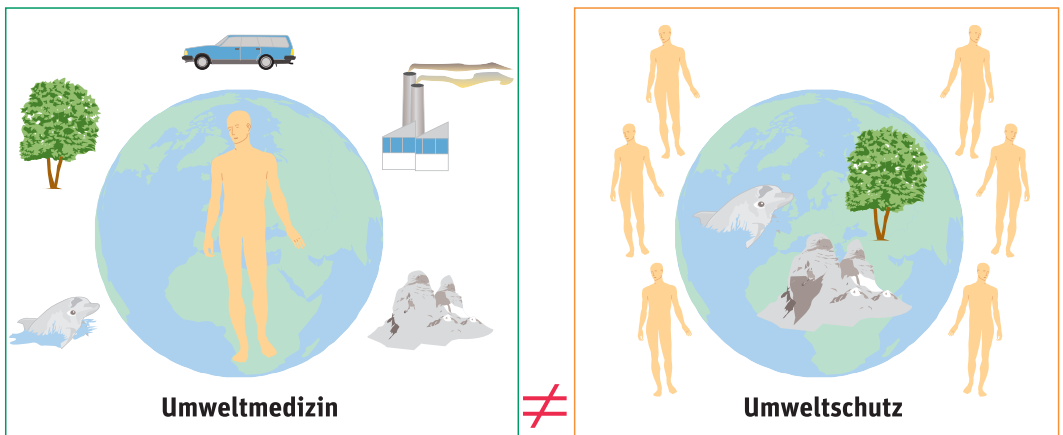
Abb. 1.14 Assoziierte Fächer der Umweltmedizin

heitsstörungen, die durch die soziale Umwelt verursacht werden, und deren Prävention.

Umweltepideidemiologie: Sie beschäftigt sich mit der Verteilung von Krankheiten und deren physikalischen, chemischen, psychischen und sozialen Determinanten und Folgen in der Bevölkerung.

Der Mensch steht im Mittelpunkt (Abb. 1.15)

Umweltmedizin untersucht die durch menschliches Handeln entstandenen, physikalischen und chemischen Faktoren, Stoffe und andere Einflüsse, die aus der natürlichen oder künstlichen Umgebung direkt oder indirekt auf den Menschen einwirken. Ihr höchstes Schutzgut ist der Mensch. Umweltmedizin



Umweltmedizin schützt nicht die Umwelt vor den Menschen, sondern die Menschen vor der Umwelt!

Abb. 1.15 Der Mensch ist Mittelpunkt in der Umweltmedizin

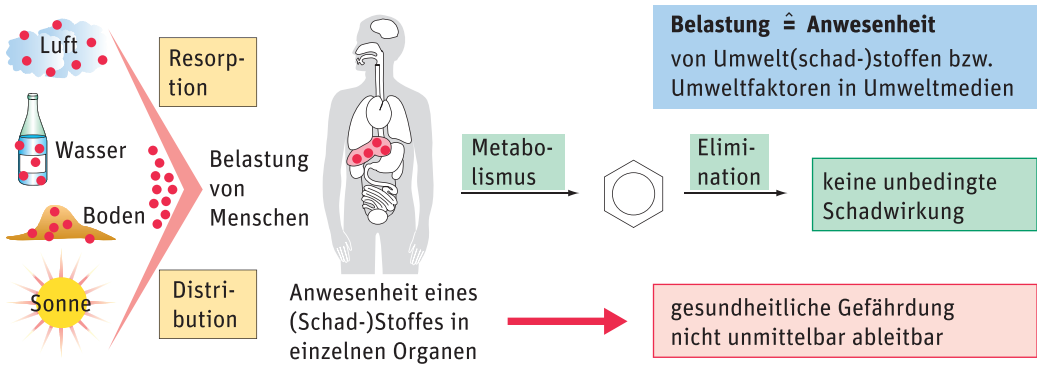


Abb. 1.16 Belastung von Umweltmedien

schützt nicht die Umwelt vor den Menschen, sondern die Menschen vor der Umwelt! Selbst ernannte Umweltexperten sehen oft den „Wald vor lauter Bäumen“ nicht mehr und verkennen zunehmend diesen Leitsatz. Human-, Sozial- oder Kulturökologen betrachten das gesamte Beziehungsgefüge des Menschen in seiner jeweiligen Umwelt - oft um den Preis der Entfremdung zur Schulmedizin, die aber ihrerseits Grundlage der wissenschaftlichen Umweltmedizin ist.

1.2.2 Grundbegriffe der Umweltmedizin

Belastung (Abb. 1.16)

Immer wieder wird der Begriff „Belastung“, insbesondere von den Medien, missverständlich interpretiert, sodass die Bevölkerung ihn oft mit einer gefährlichen Bedrohung und gesundheitlichen Gefährdung gleichsetzt.

In der Umweltmedizin wird Belastung als Anwesenheit eines Stoffes definiert. Eine gesundheitliche Gefährdung ist daraus nicht unmittelbar ableitbar. Umweltmedien wie Luft, Wasser und Boden können mit (Schad-)stoffen oder das Umfeld mit Lärm oder Strahlung belastet sein. Ebenso können der Mensch als Ganzes oder nur einzelne Organe betroffen sein.

Die bloße Anwesenheit eines Stoffes in einem biologischen System hat aber nicht un-

bedingt eine Wirkung zur Folge. Es ist zu bedenken, dass die meisten (Schad-)Stoffe vom intakten Körper verstoffwechselt und/oder wieder eliminiert werden können.

Schädigende Wirkungen (Abb. 1.17)

Von einer schädigenden Wirkung ist erst dann zu sprechen, wenn durch (Schad-)Stoffe oder andere Reize nach kurz- oder langandauernder Zufuhr, vorübergehend oder bleibend, messbar, fühlbar oder auf andere Weise erkennbar eine Veränderung der normalen physiologischen Prozesse herbeigeführt wird. Definitionsgemäß gehört somit zu einer Wirkung sowohl eine Änderung des Musters der ständig ablaufenden biochemischen Aktivitäten als auch die Möglichkeit, diese zu beobachten oder zu erkennen. Erst wenn diese Kriterien erfüllt sind, darf von der Wahrscheinlichkeit einer gesundheitlichen Gefährdung gesprochen werden, obwohl Letztere sich nicht unbedingt entwickeln muss.

Emission und Immission (Abb. 1.18)

Belastungen werden von Emittenten verursacht, z. B. von PKW, Müllverbrennungsanlagen oder der Landwirtschaft. Die von den Emittenten frei gesetzten Emissionen (z. B. Schwefeldioxid, Nitrat) führen entsprechend ihrer Verteilung, die wiederum von Umweltfaktoren wie Klima und Wind abhängig ist, zu Immissionen mit entsprechenden Konzentrationen (z. B. in Luft, Wasser oder Boden).

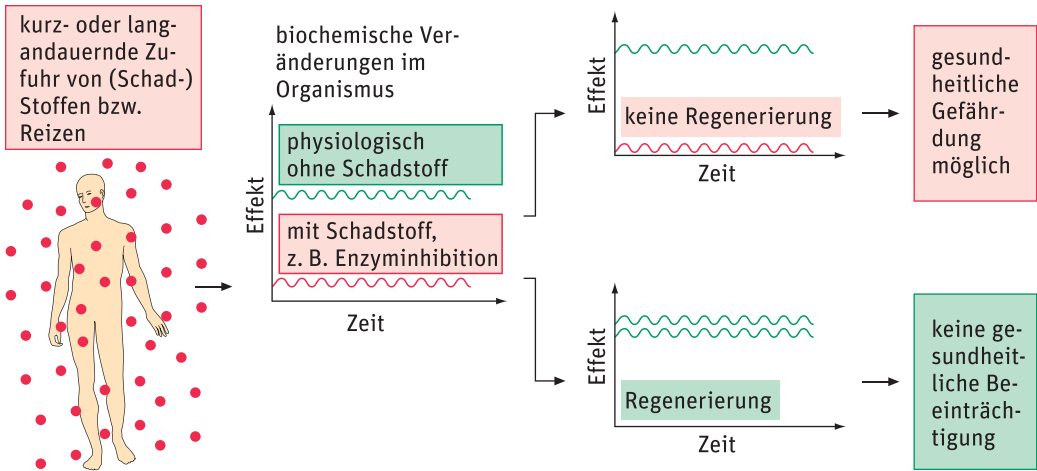


Abb. 1.17 Schädigende Wirkung von Schadstoffen

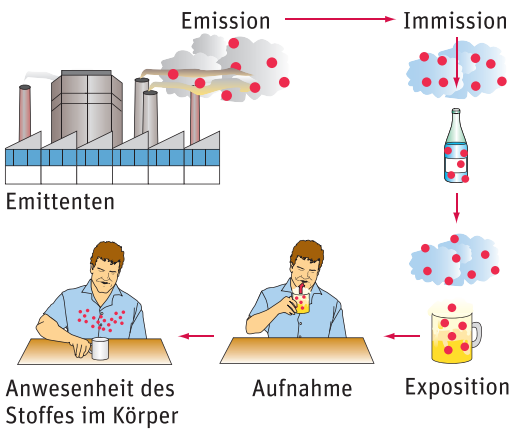


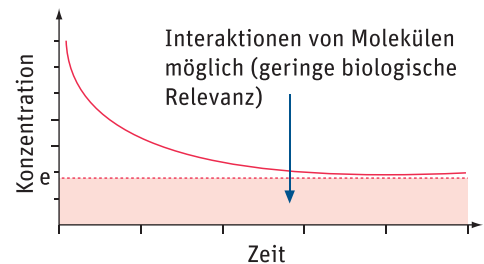
Abb. 1.18 Die Kette Emission-Immission-Exposition-Aufnahme (EIEA)

Über diese Umweltmedien können die Stoffe dann vom Menschen bei entsprechender Exposition aufgenommen werden. Die Kette *Emission-Immission-Exposition-Aufnahme* kann dann zur Belastung mit dem jeweiligen Stoff, also zu einer Anwesenheit in Körperflüssigkeiten oder Organen führen.

Interaktionen

Fremdstoffmoleküle können mit Molekülen im Organismus interagieren und so zu Funktionsstörungen an wichtigen Zellsystemen

führen. Die Wahrscheinlichkeit solcher Interaktionen, Wirkungen und Intensitäten steigt mit der Konzentration der beteiligten Stoffe. Die Dosis-Wirkungs-Beziehung beschreibt diesen Zusammenhang quantitativ. Die Konzentration, unterhalb derer keine Wirkung mehr erkannt wird, gibt die *Schwellenkonzentration* an (Abb. 1.19). Diese kann experimentell oder theoretisch ermittelt werden. Auch unterhalb von Wirkungsschwellen können Interaktionen zwischen betreffenden Molekülen stattfinden, doch sind diese in den meisten Fällen ohne Relevanz. Wirkungs-



e = Schwellenkonzentration: darunter durchläuft der Fremdstoff den Organismus wirkungslos (bezogen auf den jeweils gemessenen Effekt)

Abb. 1.19 Schwellenkonzentration

Regenerierung von Funktionsbeeinträchtigungen:

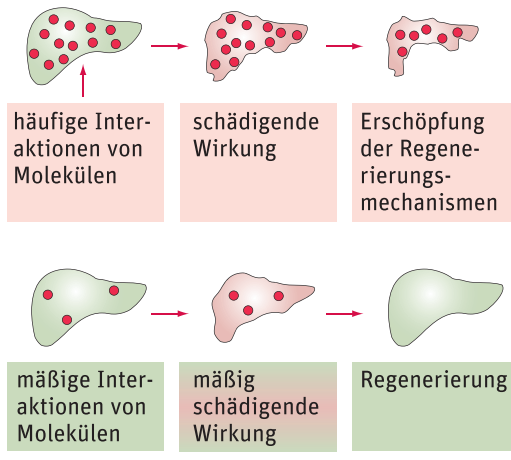


Abb. 1.20 Regenerierung

schwelen haben meist toxikokinetische und/oder toxikodynamische Ursachen.

Aufgabe der *Toxikokinetik* (s. S. 29) ist es, den Weg und das Schicksal eines Stoffes im Organismus quantitativ zu erfassen (d. h. Resorption, Distribution, Metabolismus, Elimination). Wird z. B. ein Stoff schneller eliminiert, als er aufgenommen wird, kommt es meist zu keiner schädigenden Wirkung.

Die *Toxikodynamik* (s. S. 27) beschreibt die Veränderungen des Organismus unter der Einwirkung eines Stoffes. Zu erkennbaren Wirkungen kommt es erst dann, wenn z. B. Interaktionen zwischen relevanten Molekülen häufig stattfinden. Zu bedenken bleibt ferner, dass Funktionsbeeinträchtigungen auch regeneriert werden können, sodass bereits stattgefundene Interaktionen nicht erkannt werden (Abb. 1.20). Sie treten erst dann in Erscheinung, wenn z. B. die „Reparaturmechanismen“ erschöpft sind.

Es können weder Wirkungsschwellen für DNA-interagierende Stoffe (ein einzelnes Molekül kann z. B. bereits genotoxisch wirken!) noch für allergene Stoffe (extrem unterschiedliche Empfindlichkeit der Betroffenen!) angegeben werden. Es fällt sogar zunehmend schwerer, allergische Reaktionen einzelnen Stoffen oder Stoffgruppen zuzuordnen.

1.2.3 Methodische Ansätze

Umweltfaktoren und Gesundheitsindikatoren

Wichtige methodische Ansätze, mit deren Hilfe Daten über Wirkungen von Umweltfaktoren generiert werden, sind die der Umwelttoxikologie und Umweltepidemiologie (s. S. 22, 48). Dazu kommen kasuistische Erfahrungen aus Unfällen und Vergiftungen.

Die Umwelttoxikologie ist von der Ökotoxikologie (s. S. 183) abzugrenzen, die die Wirkung von Stoffen und physikalischen Faktoren auf einzelne Arten, Lebensgemeinschaften sowie ganze Ökosysteme untersucht und bemüht ist, dafür Wirkungsschwellen zu erarbeiten.

Eine Möglichkeit, schädigende Einflüsse von Stoffen bei lang anhaltender Exposition gegenüber selbst niedrigen Konzentrationen beim Menschen direkt aufzudecken, stellt die Umweltepidemiologie dar (Abb. 1.21). Derzeit ist diese aber (noch) zu wenig entwickelt. So mangelt es z. B. an Datenbanken und Zugriffsmöglichkeiten darauf.

Einflussfaktoren können auch nicht durch Beobachtung einzelner Kranker als krankheitsverursachend erkannt werden. Hier ermöglicht nur der Einsatz von epidemiologischen Methoden, Biometrie und Statistik (s. S. 34, 36, 51), Zusammenhänge zu erkennen und zu erfassen (Abb. 1.21). Wird mithilfe solcher Methoden die Unbedenklichkeit nachgewiesen, so kann umgekehrt auch ein unter Verdacht stehender (Schad-) Stoff von seiner krankheitsauslösenden Ursache freigesprochen werden. Solche Untersuchungen sind allerdings kostspielig und langwierig.

Des Weiteren muss bei derartigen Untersuchungen mit der Beteiligung bzw. Überlagerung von Störgrößen (z. B. Tabakrauch) gerechnet werden, die eine Verfälschung des Ergebnisses ergeben können (Abb. 1.22). Typische Störgrößen sind unterschiedliche Ernährung, Gegebenheiten am Arbeitsplatz, physische und psychische Konstitution sowie individuelles Gesundheitsverhalten von Betroffenen. Auch hier wird deutlich, wie schwer es ist, Zusammenhänge zwischen Um-

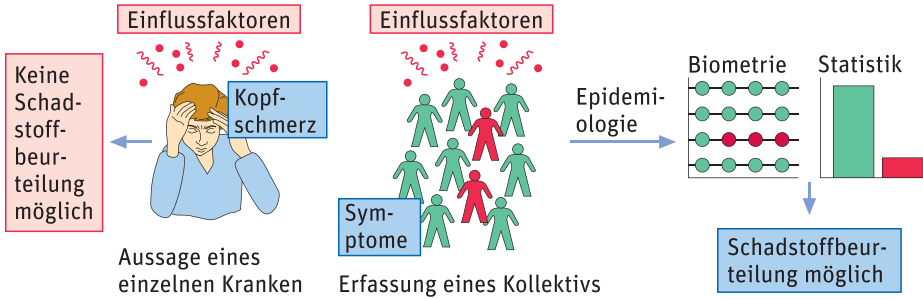


Abb. 1.21 Epidemiologie und Biometrie

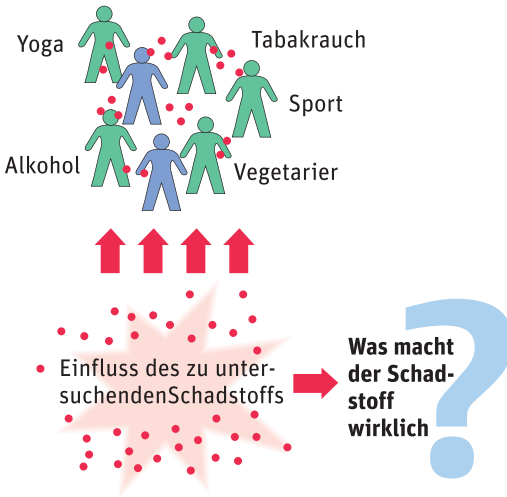


Abb. 1.22 Einfluss von Störgrößen

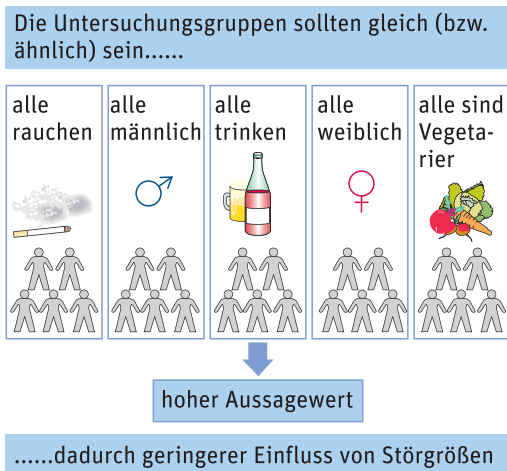


Abb. 1.23 Kriterien für Untersuchungen

weltfaktoren und Gesundheitsindikatoren zu erfassen.

Untersuchungskriterien (Abb. 1.23)

Epidemiologische Untersuchungen sollten immer gleiche Gruppen miteinander vergleichen. Dies ist faktisch aber nahezu unmöglich. Deswegen gilt: Je höher die Übereinstimmung in den Gruppen, desto besser ist die Vergleichbarkeit und dementsprechend der Aussagewert. Studien sind aussagekräftiger (aber auch teurer), wenn sie anhand von Individualdaten durchgeführt werden. Dazu werden die Gesundheitsdaten einzelner Personen mit der Schadstoffexposition und der individuellen Schadstoffbelastung in Verbindung gebracht. Werden in der Studie Personen ausgewählt, die eventuell ein höheres Risiko tragen (d. h. stärker auf einen Schadstoff reagieren) als der Bevölkerungsdurchschnitt, steigt die Wahrscheinlichkeit, eventuelle Zusammenhänge aufzudecken. Den sicheren Nachweis der Unschädlichkeit eines Stoffes kann auch die Umweltepidemiologie nicht erbringen. Großzügig bemessene Sicherheitsfaktoren verringern zwar das Risiko (s. S. 53), können es jedoch nie aufheben.

Gesundheit und Krankheit (Abb. 1.24)

Die Einflüsse einer Reihe von Umweltfaktoren oder Umwelt(schad-)stoffen werden von bestimmten Personen als unangenehm empfunden oder beeinträchtigen auf eine (bisher) medizinisch nicht erklärbare Art Befinden, Entfaltungsmöglichkeiten bzw. Lebensqua-

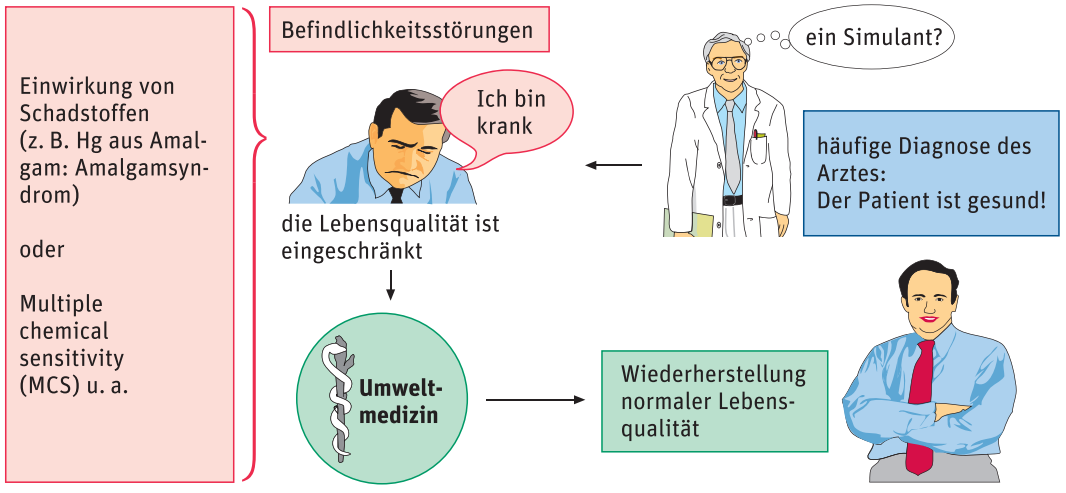


Abb. 1.24 Gesundheit und Krankheit

lität der Betroffenen. Oft fühlen sich die Betroffenen mäßig bis schwer krank, auf keinen Fall jedoch gesund.

Die Begriffe gesund und krank sind nicht eindeutig voneinander abzugrenzen. In der Gründungserklärung der WHO von 1946 heißt es: „Gesundheit ist ein Zustand vollständigen körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur das Freisein von Krankheit. Die höchstmögliche erreichbare Form eines solchen Gesundheitszustandes ist ein fundamentales Menschenrecht, ohne Rücksicht auf Rasse, Religion, politische, ökonomische oder soziale Bedingungen“.

In Anbindung an diese Definition sollte die Umweltmedizin die Herausforderung annehmen, die Hintergründe der subjektiv empfundenen Beeinträchtigungen von Betroffenen bzw. „Umweltopfern“ wissenschaftlich aufzudecken und zu erfassen.

1.3 Umweltmonitoring und Umweltanalytik

1.3.1 Umweltmonitoring

Grundlagen

Umweltmedizinische Analytik kann auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Das *Umweltmonitoring* dient dem Nachweis oder dem Ausschluss einer Exposition gegenüber Umwelttoxinen und soll gegebenenfalls die Identifizierung einer Belastungsquelle ermöglichen. Erfasst wird die sog. *äußere Exposition* (Belastung) gegenüber Schadstoffen in Umweltmedien wie Wasser, Boden, Luft, Baumaterialien, in Lebensmitteln und in Bedarfsgegenständen etc. (Abb. 1.25). Das Umweltmonitoring allein erlaubt keine Annahmen über die Schadstoffaufnahme in den menschlichen Körper, die sog. *innere Exposition*. Zur Bestimmung der inneren Exposition des menschlichen Körpers wird das Human-Biomonitoring herangezogen (s. S. 197). Die individuelle Belastung hängt außer von der Höhe der Schadstoffkonzentration in der Umwelt u. a. von dem Aufnahmepfad, der Belastungsdauer und der Belastungshäufigkeit ab.

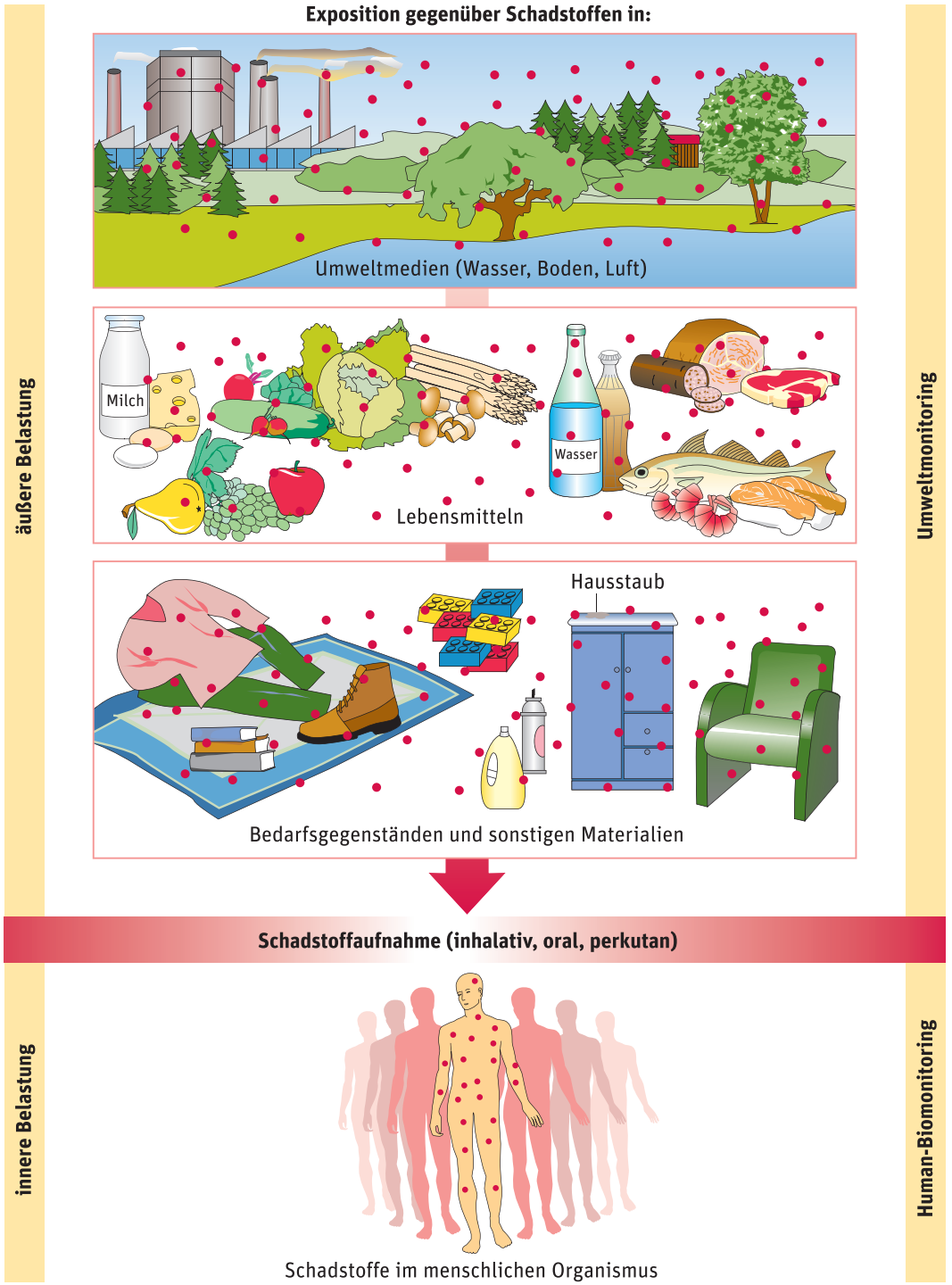


Abb. 1.25 Schadstoffbelastung des Menschen

Untersuchungsmaterial, Probennahme

Boden: Entscheidend für die gesundheitliche Bewertung sind in erster Linie die oberflächennahen Schichten (sinnvolle Beprobungsschichten z. B. 0–10 cm und 10–30 cm). Probenzahl, Entnahmeorte sowie die Beprobungsart (Einzel-, Mischproben) richten sich nach vermutetem Ausmaß und Art (punktuell, flächenhaft) der fraglichen Kontamination.

Luft: Für einige Stoffe stehen kontinuierliche Messverfahren zur Verfügung (z. B. Ozon, Schwefeldioxid). Viele Verunreinigungen lassen sich jedoch nicht durch kontinuierliche Verfahren bestimmen. Diese können durch spezielle Probenröhrchen schnell halbquantitativ oder durch diskontinuierliche Verfahren gemessen werden.

Die Stoffe werden aktiv mit einer Pumpe oder passiv beprobt und an Trägermaterialien (sog. Sorptionsmittel) gebunden. Die quantitative Bestimmung erfolgt nachträglich nach Desorption im Labor.

Die Werte werden durch Nutzungs- und Lüftungsverhältnisse, Raumtemperatur und Luftfeuchte beeinflusst. Messungen können unter üblichen Nutzungsbedingungen (Temperatur, Feuchte) oder unter ungünstigen Bedingungen („Worst case“, z. B. 10 Stunden ungelüftet, Temperatur 20°C) vorgenommen werden.

Lebensmittel, Trinkwasser: Für viele Umweltkontaminanten stellt die Nahrungsaufnahme den Hauptbelastungspfad dar. Daher ist den unterschiedlichen Lebensmitteln, je nach Art und Verzehrmenge, größte Aufmerksamkeit zu widmen, wenn möglicherweise umweltbedingte Gesundheitsbeeinträchtigungen erkannt und beurteilt werden sollen.

Bedarfsgegenstände, Baumaterialien: Bedarfsgegenstände wie Textilien, Teppiche, Möbel und Leder (PCP, Pyrethroide), sowie Baumaterialien wie großflächig verarbeitetes Holz (Holzschutzmittel) oder Spanplatten (Formaldehyd) können zur Identifizierung von Belastungsquellen im Wohnbereich beprobt werden.

Hierbei ist immer die bauliche Situation (Lüftungsverhältnisse, Verhältnis belasteter Flächen zum Raumvolumen) und die Art der Nutzung beprobter Räume zu beachten. Eine nur gelegentliche Nutzung (z. B. Abstellkammern, Putzräume, Dachböden) ist unter gesundheitlichen Gesichtspunkten weit weniger kritisch zu bewerten als beispielsweise die Nutzung eines Raumes über einen größeren Teil des Tages, z. B. als Kinderkrippe.

Hausstaub: Hausstaub bindet eine Vielzahl potenzieller Schadstoffe und kann daher als Indikator einer Innenraumbelastung dienen. Organische Bestandteile (Abrieb von Teppichen, Haare etc.) binden lipophile Substanzen deutlich besser als anorganisches Material (Sand, Ton etc.). Aufgrund der größeren Oberfläche bindet Feinstaub die Substanzen - relativ gesehen - in größerem Ausmaß als Grobstaub. Vergleichsweise „frischer“ Hausstaub weist in der Regel niedrigere Konzentrationen auf als älterer Staub.

Gängiges Untersuchungsmaterial sind Sammelproben (z. B. Staubsaugerbeutelinhalt über 7–14 Tage), die einen Überblick über einen längeren Zeitraum geben. Eine Aussiebung der Grobpartikel und Untersuchung des Feinstaubes (< 65 µm) ist sinnvoll, um eine gewisse Homogenität der Proben zu erreichen.

1.3.2 Umweltanalytik

Chemisch-analytische Verfahren

Atomabsorptionsspektrometrie (AAS): Die AAS zeichnet sich durch hohe Spezifität für Metalle aus. Sie beruht auf dem Prinzip, dass ein Lichtquant, emittiert durch ein angeregtes Atom, von einem Atom des gleichen Elements im nicht-angeregten Zustand absorbiert wird. Bei der *Flammen-AAS* (Abb. 1.26) wird die Probenlösung in eine Flamme zerstäubt und so in Atomdampf überführt (atomisiert). Durch diesen Dampf wird das von einer Hohlkathodenlampe ausgestrahlte Licht geschickt. Die Intensität der Spektrallinien des zu bestimmenden Elements ist umso schwächer, je höher die Konzentration in der

zerstäubten Probenlösung ist. Die Abschwächung der Spektrallinien kann nach spektraler Zerlegung (Monochromator) bzw. Aus-

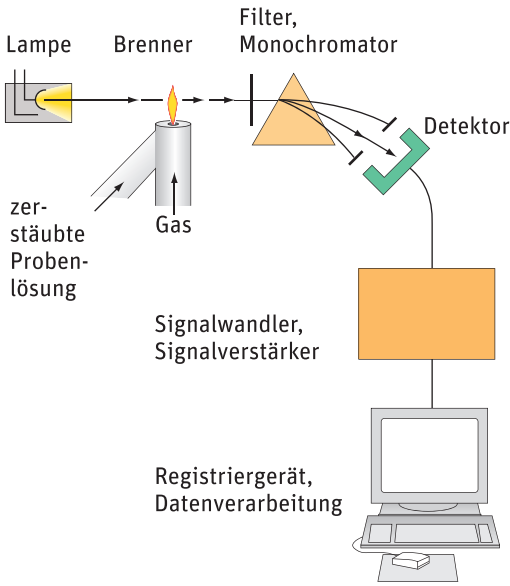


Abb. 1.26 Flammen-AAS

filterung der spezifischen Resonanzlinien detektiert werden.

Bei der sog. *flammenlosen AAS* erfolgt die Zerstäubung und Atomisierung der Probe z. B. durch beheizte Graphitöfen („Graphitrohr-Technik“) oder Überführung in Hydride („Hydrid-Technik“). Dadurch können bestimmte Elemente (z. B. Arsen) mit höherer Auflösung detektiert werden.

Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppelter Plasmaanregung (ICP-AES, Abb. 1.27): Sie ist weniger empfindlich als die AAS, erlaubt dafür allerdings Übersichtsanalysen mehrerer Metalle gleichzeitig (Multielementanalysen). Von einem im Hochfrequenzfeld ionisierten Gas (z. B. Argon) wird Energie auf die Probe übertragen (Atomisierung, Anregung). Im Gegensatz zur AAS wird nicht die Absorption, sondern von der Probe emittiertes Licht gemessen.

Gaschromatographie (GC, Abb. 1.28): Chromatographische Verfahren beruhen auf der Auftrennung von Substanzgemischen durch Verteilungsvorgänge zwischen einer sog. stationären und einer mobilen Phase. Die GC ist eine empfindliche Methode zur Trennung von Stoffen, die gasförmig vorliegen oder (evtl. erst nach Derivatisierung) vollständig verdampft werden können. Als mobile Phase dient strömendes Gas („Trägergas“: Inertgase wie Ar, He, H₂, N₂, CO₂). Die stationäre Phase besteht bei der Adsorptions-GC (GSC, Gas solid chromatography) aus einem Feststoff, bei der Gas-Flüssig-Chromatographie (GLC, Gas liquid chromatography) aus einer hochsiedenden (sog. Trenn-)Flüssigkeit (z. B. Paraffine, Siliconöle). Die stationäre Phase befindet sich auf einem indifferenten Träger, wie z. B. saugfähigem Füllkörpermateriale oder der Wand einer Kapillare. Durch Kapillarsäulen (0,2–0,5 mm Innendurchmesser, 15–200 m lang) lassen sich besonders hohe Trennleistungen erzielen.

Eine Probe der zu analysierenden Substanzen wird mit der mobilen Phase am Säulenanfang aufgegeben. Unterschiedliche Stoffeigenschaften (Polarität, Löslichkeit etc.) führen zu

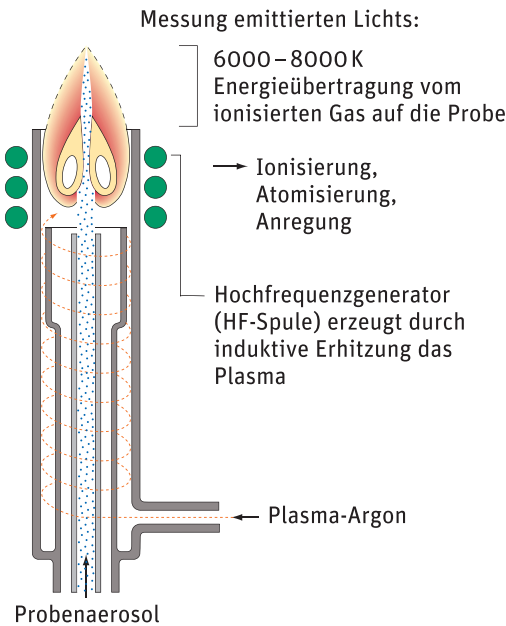


Abb. 1.27 ICP-AES

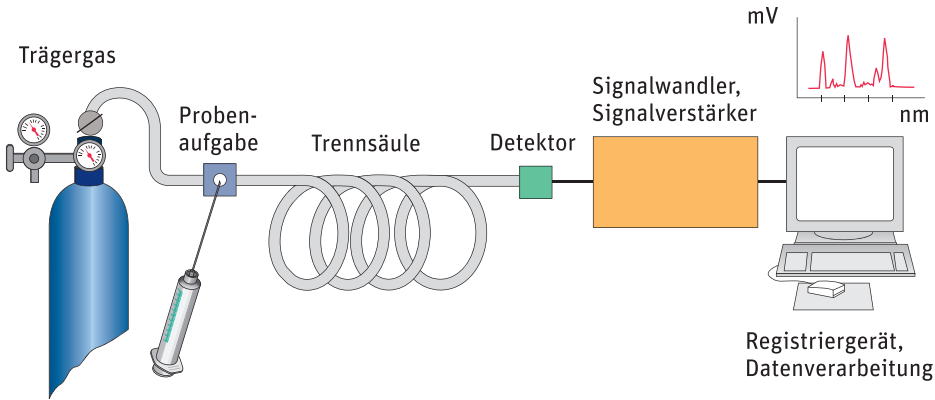


Abb. 1.28 Gaschromatographie (GC)

einer mehr oder minder starken Wechselwirkung mit der stationären Phase, sodass die Substanzen unterschiedlich schnell das Ende der Trennsäule erreichen. Dort können sie durch Detektoren, die z. B. auf die Ionisierbarkeit in der Gasphase (z. B. FID = Flammenionisationsdetektor, ECD = Elektroneneinfangdetektor) ansprechen, einzeln nachgewiesen werden.

Hochdruckflüssigkeitschromatographie (High pressure liquid chromatography, HPLC, (Abb. 1.29): Wässrige Proben nicht-flüchtiger oder höher molekularer Stoffe können durch HPLC analysiert werden. Eine Pumpe presst das sog. Elutionsmittel (mobile Phase) mit Drücken bis zu mehreren Hundert bar durch eine Säule (5–100 cm lang, 1–25 mm Innendurchmesser).

Verwendet werden heute vor allem unpolare stationäre Phasen, insbesondere mit Kohlenstoffketten (C_2 – C_{18}) modifizierte Silicagele (sog. Reversed-Phase-Säulen). Diese erlauben, wässrige Proben ohne Aufarbeitung und schnell zu trennen, wobei die Trennung nach der Polarität der einzelnen Stoffe erfolgt.

Die Trennleistungen liegen allerdings noch weit unter denen der Kapillar-GC (s. o.). Am Säulenende erscheinen nach der Elutionsmittelfront zuerst sehr polare Verbindungen. Zur Detektion werden u. a. Fluoreszenz-, elektrochemische, UV- oder sog. Diodenarray-Detektoren eingesetzt. Letztere ermöglichen die Aufnahme von UV-Spektren zur Substanzcharakterisierung direkt aus dem Eluat.

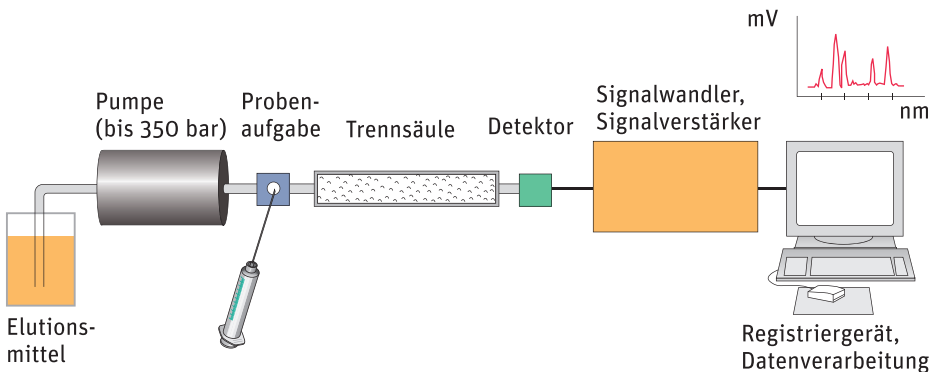


Abb. 1.29 High pressure liquid chromatography (HPLC)

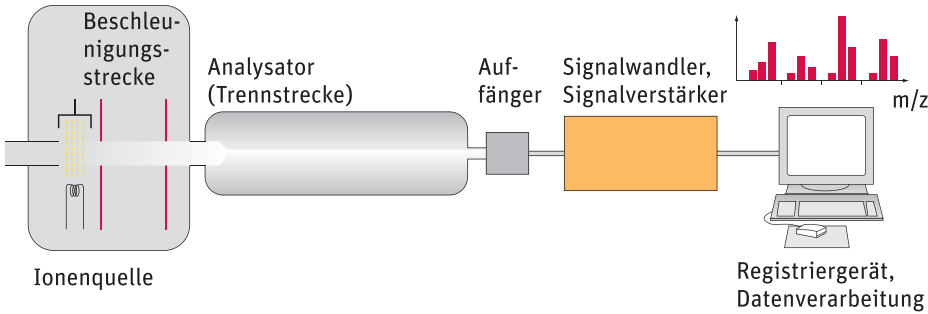


Abb. 1.30 Massenspektrometrie

Massenspektrometrie (MS) (Abb. 1.30)

Die MS ist ein physikalisches Verfahren, das geladene Atome oder Moleküle (Ionen) entsprechend ihrem Verhältnis Masse/Ladung (m/z) auftrennt. Ein Massenspektrometer besteht prinzipiell aus drei Teilen:

1. einer **Ionenquelle**, in der das Untersuchungsmaterial im Hochvakuum in Ionen überführt wird. Dies kann durch Beschuss mit Elektronen in der Gasphase (Elektronenstoß-Technik) erfolgen, wobei die Moleküle durch große Energieaufnahme weitgehend fragmentiert werden. Eine schonende Ionisierung gelöster nichtflüchtiger Substanzen mit großem Molekulgewicht kann durch Ladungsaustausch (chemische Ionisation, z. B. Thermospray-Technik) oder durch starke elektrische Felder (Elektrospray-Ionisierung) erreicht werden. Die erzeugten Ionen werden anschließend ladungsabhängig in einem elektrischen Feld beschleunigt und zu einem monoenergetischen Ionenstrahl gebündelt.

2. einem **Analysator**, in dem die Ionen durch verschiedene Prinzipien aufgetrennt werden:
 - Sektorfeld-MS:** Der Ionenstrahl wird in einem Magnetfeld (magnetisches Sektorfeld) massenabhängig abgelenkt (ältester MS-Typ).

- Flugzeit-MS:** Die beschleunigten Ionen werden auf einer feldfreien Flugstrecke allein durch ihre massenabhängige Flugzeit differenziert.

- Quadrupol-MS:** Der Ionenstrahl wird durch ein Hochfrequenzfeld, das durch vier konzentrische, parallel zueinander angeordnete Stabelektroden erzeugt wird, massenabhängig in

Schwingung versetzt. Die Schwingungsamplitude bleibt nur für Ionen einer bestimmten Masse so klein, dass sie passieren können.

3. einem **„Auffänger“** (Faraday-Käfig, Sekundärionen-Vervielfacher), durch den die aufgetrennten Ionen elektrisch als Ionenstrom registriert werden können.

„Highly sophisticated“ chemischphysikalische Analysemethoden

Leistungsfähige Geräte, die Strukturaufklärung und empfindlichen Nachweis von Stoffen in Gemischen erlauben (Abb. 1.31), entstehen durch *Kopplung der Massenspektrometrie mit chromatographischen Methoden* wie der Gaschromatographie (GC/MS) oder der Flüssigkeits-Chromatographie (LC/MS). Die MS wird dabei dem Chromatographen als Detektor nachgeschaltet. Eine neuere Entwicklung ist die Tandem-MS (MS/MS), d.h. die Kopplung von mehreren MS-Systemen.

Immunchemische Methoden

Immunchemische Methoden erlauben eine einfache, schnell durchführbare und empfindliche Bestimmung einer Vielzahl von Verbindungen (u. a. Pestizide, Aflatoxine, Proteine). Sie gewinnen in der Umweltanalytik zunehmend an Bedeutung. Ihre Nachweisgrenze liegt in der Größenordnung z. B. der GC/MS-Technik (Abb. 1.31).

Beim **kompetitiven Immunoassay** (Abb. 1.32) konkurrieren die zu analysierende Substanz (Analyt) und ein detektierbares Derivat

Verfahren	Nachweisgrenze* (absolute Stoffmengen)
Metallanalytik – AAS (Atomabsorptionsspektrometrie) – ICP-AES (induktiv gekoppelte Plasma-Atomemissionsspektrometrie)	pmol – nmol nmol
Analytik von organischen Verbindungen – HPLC (Hochdruckflüssigkeitschromatographie) – GC (Gaschromatographie) – GC/MS (GC mit massenspektrometrischer Detektion) – ELISA (Enzyme-linked immunosorbent assay)	pmol – nmol pmol fmol – pmol pmol

*ungefährer Bereich, im Einzelfall stark Stoff-, Matrix- und Detektor-abhängig

Abb. 1.31 Nachweisgrenzen verschiedener analytischer Verfahren

(markierter Ligand = Tracer) um die begrenzte Menge eines spezifischen, monoklonalen Antikörpers. Je mehr Analyt vorhanden ist, desto weniger Tracer wird vom Antikörper gebunden und desto kleiner ist das Messsignal im Immunkomplex. Die Abtrennung des Komplexes erfolgt durch eine Fällungsreaktion oder bei fixiertem Antikörper (z. B. an Mikrotiterplatten-Oberflächen) durch Entfernen der Reaktionslösung.

Bei der **Sandwich-Technik** (Abb. 1.33) wird im Gegensatz zum kompetitiven Verfahren ein zweiter markierter Antikörper als Tracer verwendet. Er wird im Überschuss zum Liganden eingesetzt. Hier gilt dann: Je mehr Ligand gebunden wird, desto größer ist das Messsignal. Beim **Radioimmunoassay (RIA)** wird mit radioak-

tiv (^{125}I - oder ^3H -)markiertem Ligand (kompetitives Prinzip) bzw. Antikörper (Sandwich-Verfahren) gearbeitet. Die Anwendung des RIA geht zunehmend zugunsten des **Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA)** zurück (Abb. 1.32 und 1.33). Beim ELISA werden statt radioaktiver Marker Enzyme (z. B. Alkalische Phosphatase, Meerrettich-Peroxidase Glucoseoxidase) und ihre Substrate als Detektionssystem verwendet. Alternativ werden auch Fluoreszenzfarbstoffe als Tracer (**Fluoreszenzimmunoassay, FIA**) bzw. fluorogene Enzymsubstrate (**fluorometrischer ELISA**) eingesetzt.

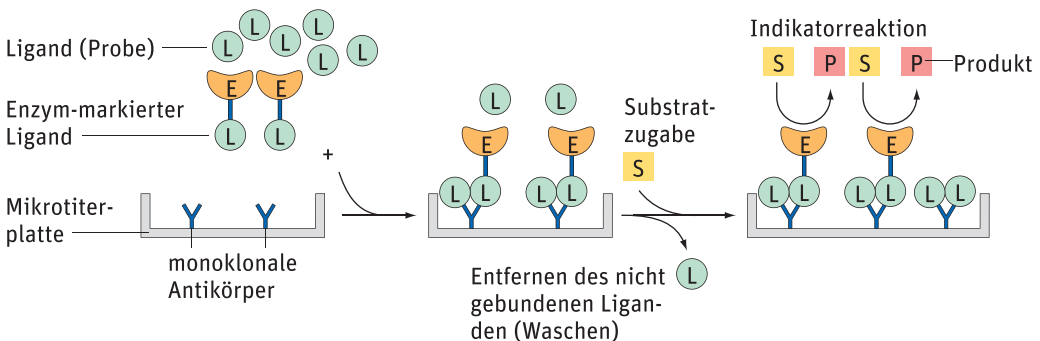


Abb. 1.32 Festphasen-ELISA vom kompetitiven Typ

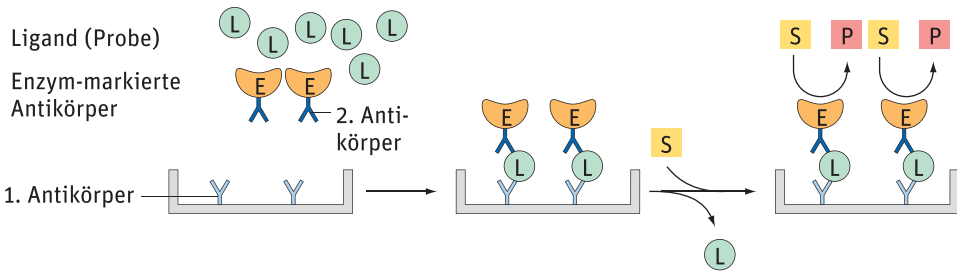


Abb. 1.33 Festphasen-ELISA vom Sandwich-Typ

Anforderungen an analytische Laboratorien, Qualitätssicherung

Alle Laborarbeiten (Analytische Phase, (Abb. 1.34), müssen nach den Richtlinien der „guten Laborpraxis“ (GLP, good laboratory praxis) durchgeführt werden. Diese enthalten detaillierte Vorschriften zur Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte (SOP, Standard operating procedures). Sie regeln Zahl und Qualifikation der Mitarbeiter, Ausstattung der Laboratorien, Dokumentation, Umgang mit Chemikalien und v.a. die Qualitätssicherung der analytischen Tätigkeit selbst.

Die Einhaltung der Richtlinien ist in der Umweltanalytik ungleich schwieriger als etwa in der Klinischen Chemie. Hauptproblem sind die oft sehr niedrigen Konzentrationen der interessierenden Stoffe. Zudem liegen diese meist in komplizierten Gemischen vor, in denen andere Stoffe deutlich höhere Konzentrationen aufweisen. Trotz empfindlicher Messsysteme können viele Stoffe erst nach aufwändiger Probenvorbereitung mit Anreicherungs-schritten und/oder nach chemischer Umwandlung (Derivatisierung) identifiziert und quantifiziert werden.

Bewertung

Deskriptiver Ansatz: Grundlage ist in erster Linie das Kriterium, ob die in einem bestimmten Medium gemessenen Konzentrationen im Bereich der Hintergrundbelastung („üblicher Bereich“) liegen, oder ob „unüblich hohe“ Konzentrationen gemessen wurden. Voraussetzung ist das Vorliegen entsprechender Referenzwerte (s. S. 201).

Präanalytische Phase	<ul style="list-style-type: none"> - Auswahl des Analytes, der Matrix und des Zeitpunktes der Probenahme - Probenahme - Lagerung, Transport
Analytische Phase	<ul style="list-style-type: none"> - Dosierung der Analysenprobe - Aufbereitung der Analysenprobe - Analytische Bestimmung - Gewinnung des Messwertes - Qualitätskontrolle, z. B. Schwankungen des internen Standards:
Postanalytische Phase	<ul style="list-style-type: none"> - Bewertung

Abb. 1.34 Vollständiges Analyseverfahren

Die Belastungssituation der Außenluft (Ozon, NO_x, SO₂, Schwebstaub) wird kontinuierlich von den Instituten der Länder überwacht und regelmäßig veröffentlicht. Repräsentative Daten über den häuslichen Bereich (Innenraumluft, Hausstaub, Trinkwasser) wurden im Rahmen der „Umwelt-Surveys“ (1985/86, 1990/92) durch das Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Umweltbundesamtes (UBA) erhoben. Die aktuelle Belastung ausgewähl-