AUSGABE 11

ufz magazin

NOVEMBER | 2004

MAGAZIN DES UFZ-UMWELTFORSCHUNGSZENTRUMS LEIPZIG-HALLE IN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Chemikalien in der Umwelt

Grafik: WOHLFAHRT

Chemie

gehört zum Leben wie die Luft zum Atmen. Sie treibt Fernseher, Radio und CD-Player, Telefon, Computer und Handy an, sie steckt in Kleidern und Putzmitteln, in Arznei und Kosmetika, in Farben und Hausgeräten, sie steigert landwirtschaftliche Erträge und konserviert Lebensmittel.

Oft wird der Begriff Chemie mit der chemischen Industrie gleich gesetzt. Läuft hier etwas schief, ist „die Chemie" schuld – Errungenschaften und Fortschritte hingegen werden als selbstverständlich angesehen. Dabei bedeutet Chemie erst einmal nichts anderes als: Die Wissenschaft von den Eigenschaften, Umwandlungen und Anwendungen der Stoffe. In diesem Sinne nutzt sie der Mensch seit jeher – bewusst oder unbewusst, direkt oder indirekt –, um die stoffliche Qualität seiner Umwelt zu verändern. Bis zur industriellen Revolution blieben diese Eingriffe räumlich und zeitlich, quantitativ und qualitativ beschränkt. Inzwischen jedoch droht das ökologische Gleichgewicht der Erde zu kippen. Auch wenn der Mensch im Grundsatz auf die Verbesserung seiner Lebensbedingungen zielt, die Nutzung von Biosphäre und natürlichen Ressourcen zeitigt „Nebenwirkungen", die die Natur nur in begrenztem Maße auszugleichen vermag.

Kenntnisse über chemische Substanzen – über ihre Stoffeigenschaften, ihr Stoffverhalten in der Umwelt, ihre Toxizität und Ökotoxizität sowie Exposition – sind die maßgebliche Grundlage, um Natur und Gesundheit zu schützen. Um das Risiko abzuschätzen, das mit chemischen Stoffen verbunden sein kann, sind Daten und Wissen zu ihrem Vorkommen, ihrer Verfügbarkeit und Wirksamkeit in der Umwelt nötig.

Am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ) nehmen deshalb Umweltchemie und Ökotoxikologie einen wichtigen Platz ein. Das Magazin „Chemikalien in der Umwelt" vermittelt einen Einblick in die Forschungsarbeit, bei der sich unterschiedliche wissenschaftliche Kompetenzen miteinander verflechten – eben so wie das Verhalten chemischer Stoffe in der Natur komplexer Art ist.

DIE REDAKTION

Thema S. 10

Thema S. 18

Thema S. 24

Thema S. 28

Inhalt

Zukunft ohne Gift? – Zeitbombe Chemikalien
Unsere Gesellschaft ist abhängig von synthetischen Chemikalien – etwa 100.000 Substanzen sind allein in Europa im Einsatz. Mit ihnen sind viele Annehmlichkeiten verbunden, doch dafür zahlen wir einen hohen Preis. **6**

Die üblichen Verdächtigen? – Schadstoffen auf der Spur
Die Vielfalt von Umweltchemikalien in Grund- und Oberflächenwässern, Sedimenten und Böden – insbesondere in Industrieregionen – ist oft unüberschaubar. Zu Produktionsrückständen und unerwünschten Nebenprodukten kommen zahlreiche Umwandlungs- und Abbauprodukte. Doch was davon muss saniert werden und mit welcher Methode? **10**

Umweltanalytik ohne Grenzen?
Der chemischen Analytik sind kaum noch Grenzen gesetzt. Vorausgesetzt, man weiß, was, wo und wie man suchen muss. In der Umweltforschung muss sich die Analytik ständig neuen Herausforderungen stellen. **14**

Biomimetika – Die Biologie nachahmen
Als Biomimetika werden künstliche Sammelmedien bezeichnet, die die passive Schadstoffaufnahme in Lebewesen simulieren. Zielsubstanzen sind insbesondere die inzwischen geächtete Gruppe der POPs (Persistent Organic Pollutants), die bekanntermaßen ein hohes Bioakkumulationspotenzial besitzen. **16**

Eins plus Eins gleich Zwei? – Die Kombinationswirkung von Chemikalien
Organismen in Gewässern – Bakterien, Algen, Wasserpflanzen, Fische – sind oftmals einer Vielzahl unterschiedlicher Stoffe, Schadstoffgemischen, gleichzeitig ausgesetzt. Sollen Gewässer geschützt bzw. saniert werden, müssen solche so genannten Kombinationseffekte zukünftig berücksichtigt werden. **18**

Schnell, sicher, sensitiv – Der Pollenschlauch-Wachstumstest
Bereits seit über 50 Jahren wird der Pollenschlauch-Wachstumstest (Pollen Tube Growth – PTG-Test) eingesetzt, um die toxische Wirkung von Chemikalien oder Stoffgemischen zu bestimmen. **22**

Der Fisch als Modellsystem
Um die biologische Wirkung von Chemikalien zu erforschen, werden häufig im Wasser lebende Organismen genutzt. Denn dort, in der aquatischen Umwelt, landet ein Großteil der Schadstoffe. Neben Wasserflöhen, Algen und Leuchtbakterien sind vor allem Fische wichtige Helfer für die Wissenschaftler. **24**

Die Zelle als Zielort
Wenn Schadstoffe in hohen Konzentrationen die Umwelt erreichen, können sie akut giftig auf Organismen wirken und sogar zu ihrem Tod führen. Bei der Suche nach der Wirkung dieser Substanzen bringen traditionelle wissenschaftliche Methoden den Forschern nicht den gewünschten Erfolg. Deshalb schauen einige von ihnen in die Zellen hinein. **28**

Gen Chips – 10.000 auf einen Streich
Um falschen Schlüssen sofort vorzubeugen – in diesem Beitrag geht es nicht um genmanipulierte Kartoffelchips. Vielmehr dreht sich alles um die Anwendung der Chiptechnologie in der Molekularbiologie. **32**

Falschspieler unterwegs
Hormone sind körpereigene Signalmoleküle. Beim Menschen sollen es bis zu 156 verschiedene sein, die in einem hoch komplexen System unter anderem den Blutzuckerspiegel, das Wachstum oder den Sexualzyklus regulieren. Es ist ein System, das bei allen Organismen funktionsgemäß sehr sensibel reagieren muss, dadurch jedoch störanfällig ist.
. 34

Reines Trinkwasser
In fünf Wasserwerken fördern die Kommunalen Wasserwerke Leipzig (KWL) täglich rund 75.000 Kubikmeter Wasser. Um die Versorgung im Großraum Leipzig zu sichern, kommen etwa 25.000 Kubikmeter über die Fernwasserversorgung aus der Region Torgau hinzu. Wir sprachen mit Sonja Riebe, Bereichsleiterin Betriebslabor, über die Reinhaltung des Trinkwassers.
. 38

Vom Charakter zum Verhalten –
Physikalische und chemische Eigenschaften von Stoffen
Je genauer wir Chemikalien kennen, desto leichter lässt sich vorhersagen, wie sie sich in der Umwelt verhalten, wie sie transportiert, verteilt und umgewandelt werden. Entscheidend dafür, wie sie sich verhalten, sind physikalische und chemische Eigenschaften.
. 42

Balanceakt in der Politik – Umweltschutz versus Wettbewerb
Die Modernisierung des Chemikalienrechts innerhalb der Europäischen Union folgt dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung. Stand bei der Veröffentlichung des Weißbuchs „Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik" im Februar 2001 noch der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt an oberster Stelle, so dreht sich die gegenwärtige Debatte vor allem um den Schutz der chemischen Industrie vor einer angeblich ruinösen Chemikalienpolitik.
. 48

Die Menge macht's –
Chancen und Grenzen des neuen europäischen Chemikalienrechts
Wir sprachen mit Dr. Klaus Steinhäuser, Leiter des Fachbereiches für Chemikaliensicherheit und Gentechnik beim Umweltbundesamt (UBA), über Chancen und Grenzen der europäischen Chemikalienregulierung.
. 52

Aus für das dreckige Dutzend
POPs – im Englischen „Persistent Organic Pollutants" – sind giftige und zugleich langlebige (persistente) organische Schadstoffe. Man findet sie in Regionen, wo sie nie angewendet wurden. Sie reisen mit den atmosphärischen Strömungen, durch Verdunsten und wieder Kondensieren – auch „globale Destillation" genannt – von den warmen Zonen nahe des Äquators zu den Polen oder kälteren Regionen der Erde.
. 56

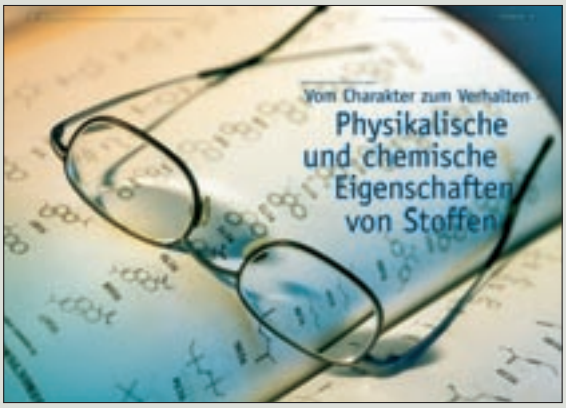
Zeit – Eine neue Dimension der Ökotoxikologie
Entstanden ist die Ökotoxikologie als Prüfdisziplin, die die Schadwirkung von einzelnen Stoffen testet. Als neue Dimension hält der Faktor Zeit Einzug. Wir sprachen mit Prof. Gerrit Schüürmann, Leiter des Departments Chemische Ökotoxikologie am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, über die Zukunft seines Fachs.
. 58

Glossar 62

Impressum 63

Thema S. 34

Interview S. 38



Thema S. 42

Interview S. 58

Patricia Cameron

Zukunft ohne Gift? Zeitbombe Chemikalien

Unsere Gesellschaft ist abhängig von synthetischen Chemikalien – etwa 100.000 Substanzen sind allein in Europa im Einsatz. Mit ihnen sind viele Annehmlichkeiten verbunden, doch dafür zahlen wir einen hohen Preis.

Rund 30.000 der Chemikalien, die auf dem europäischen Markt im Umlauf sind, wurden vorher weder auf gesundheitliche noch ökotoxikologische Gefährdungen, geschweige denn auf ihre kombinative Wirkung untereinander getestet. Derweil haben Studien bis zu 300 verschiedene Chemikalien im menschlichen Gewebe nachgewiesen, die es vor hundert Jahren noch gar nicht gab.

Aus den letzten 40 Jahren wissen wir: Chemikalien, die einst als „ungefährlich“ in die Umwelt entlassen wurden, können später neue, anfänglich unbekannte Wirkungen aufzeigen, wie zum Beispiel DDT. Diese Erkenntnis stellt sowohl für etablierte Wissenschaftstheorien als auch für aktuelle Chemikaliendiskurse eine Herausforderung dar. Sollten Langzeitstudien oder Fortschritte in der Wissenschaft künftig belegen, dass bestimmte Chemikalien doch zu Erkrankungen oder irreparablen Beeinträchtigungen führen, dann sind diese Schäden irreversibel – die Schadstoffe können nicht mehr aus dem Körper entfernt werden.

Revolution der Wissenschaft: „Hazard Assessment“ statt „Risk Assessment“

Insbesondere die Forschung über hormonell wirksame Schadstoffe hat zwei weithin anerkannte Thesen infrage gestellt. Da bereits winzigste Mengen dieser Chemikalien die Funktion von Hormonen imitieren oder blockieren können, lassen sich weder toxische Effekte allein über die Dosierung der betreffenden Substanz erfassen noch Schädigungen vermeiden. Die Formel „Die Dosis bestimmt die Toxizität“ greift an dieser Stelle zu kurz. Ebenso genügt es nicht, die Toxizität anhand des Auslösens von Krebs, des Veränderns von Erbgut und des Beeinträchtigens der Fortpflanzung von erwachsenen Menschen zu bestimmen. Die meisten Schäden verursachen hormonell wirksame Stoffe in der frühen embryonalen Entwicklung sowie in den ersten Lebensabschnitten. Diese sind mit Langzeitfolgen für das spätere Leben und möglichen Störungen des Immunsystems sowie des Zentralnervensystems und somit von geistigen Fähigkeiten und Verhalten verbunden. Noch aber sind Eingriffe in das Hormonsystem des Menschen nicht als nachteilige Effekte anerkannt.

Mehr unabhängige Forschung ist notwendig, um die Eigenschaften von Chemikalien zu identifizieren und ihr Gefährdungspotenzial einzuschätzen.

Ohne Zweifel benötigen wir mehr unabhängige Forschung. Zum einen, um die bestehende Lücke bei der Identifizierung hormoneller Schadstoffe und ihrer Generationen übergreifenden Wirkung zu schließen. Zum anderen, um unter verstärktem Einsatz von Struktur-Wirkungs-Modellen zur Bewertung von Chemikalien zunehmend auf Tierversuche zu verzichten. Schließlich muss die chemische Analytik verbessert werden, um die effektive Umsetzung von Regulierungsmaßnahmen zu überprüfen.

Quelle: Photodisc®Environmental Concerns

Chemikalien, die einst als „ungefährlich“ in die Umwelt entlassen wurden, können später neue, anfänglich unbekannte, Wirkungen aufzeigen.

Quelle: Photodisc®Environmental Concerns

Die Regulierung von Chemikalien darf sich jedoch nicht nur an der Nachweisbarkeit einer Substanz in der Biosphäre ausrichten. Es sind letztlich Eigenschaften wie Persistenz und Bioakkumulierbarkeit, die – im Kontext der konkreten Anwendung – ein Auftreten von Chemikalien in der Umwelt zwangsläufig bedingen. Und es ist letztlich immer vom aktuellen Stand der Wissenschaft abhängig, ob und inwieweit hiervon ausgehende toxische Effekte tatsächlich erfasst werden. Somit ist es dringend geboten, dass diese Eigenschaften als vorrangig bei der Bewertung der Gefährlichkeit von Chemikalien gelten. Das bedeutet, Regulierung muss sich in erster Linie auf das „Hazard Assessment“ stützen; und nicht – wie traditionell immer noch üblich – mittels „Risk Assessment“ lediglich den bereits nachweisbaren schädlichen Effekt betrachten.

Neue Prinzipien für die Politik: Vorsorge und Substitution

Doch selbst wenn wir die Forschung auf Mehrfacheffekte und Kombinationswirkungen, auf Ökosysteme und Lebensgemeinschaften ausweiten, die Lösung der akuten Schadstoffprobleme dürfen wir von einer solchen Ausweitung unserer Perspektive nicht erwarten. Natürlich müssen derzeitige Defizite der Forschung identifiziert und künftige Entwicklungen von Chemikalien durch die Wissenschaft begleitet werden. Aber Gelder, die hierfür eingesetzt werden, dürfen nicht in Argumente gegen verantwortliches Handeln umgemünzt werden. Es liegt in der Logik mancher chemischen Stoffe, dass jede Risikoeinschätzung lückenhaft sein wird – und folglich liegt es in der Logik verantwortlichen Handelns, Maßnahmen der Regulierung dieser Substanzen vorsorglich zu treffen.

Zu handeln, ehe ein Schaden auftritt – darauf zielt das Prinzip Vorsorge. Und das auch in solchen Fällen, in denen der Schaden eventuell erst später eintritt, dann aber unumkehrbar sein kann. Die heutige, traditionelle Risikobewertung wird dies nicht leisten. Sie berücksichtigt lediglich bereits wissenschaftlich belegbare toxische Wirkungen und richtet sich nach den Grenzwerten für Einzelsubstanzen – da jedoch die Voraussage von Anwendungsfolgen aufgrund der Komplexität des Ökosystems trotz wachsender wissenschaftlicher Erkenntnisse oder gerade deswegen immer problematischer wird, gehen diese beiden Vorgehensweisen an der Realität vorbei.

Viel deutlicher ist hingegen das Wissen vom „Noch-nicht-Wissen“ und vor allem von der „Nicht-Wissbarkeit“ angewachsen. Daraus muss sich die Konsequenz ergeben: Substanzen allein aufgrund ihrer inhärent gefährlichen Eigenschaften aus jeglicher umweltoffenen und konsumentennahen Verwendung zu verbannen und durch ungefährlichere Alternativen zu ersetzen. Wollen wir zukünftige Generationen nicht mit bislang unbekannten Krankheiten oder Naturzerstörungen belasten, müssen schädliche Chemikalien vorsorgend kontrolliert werden.

Genau dieser Frage nimmt sich die Europäische Union derzeit an. Mit dem Entwurf zur Registrierung, Evaluation and Autorisierung von Chemikalien (REACH) hat die Umweltdirektion im Oktober 2003 ein bahnbrechendes Konzept zur Regulierung von Chemikalien vorgelegt. Wohl mindestens bis Anfang 2006 wird die politische Diskussion zur Verabschiedung des Gesetzes dauern. Die nächsten zwei Jahre werden zeigen, ob unsere Industriegesellschaft einen entscheidenden Schritt hin zum verantwortungsvollen Umgang mit toxischen Stoffen gehen kann. Oder ob wir weiter durch die Nebelwand aus ungeprüft verbreiteten Stoffen stolpern. ■

WISSENSWERTES

Als gefährlich werden insbesondere Chemikalien verstanden:

- die sich im Körper und in der Umwelt nicht abbauen, die sich über die Nahrungskette in immer höheren Konzentrationen anreichern und die toxisch sind – es sind persistente, bioakkumulative, toxische Stoffe, kurz PBT genannt;
- die sich im Körper und in der Umwelt in hohem Maße ablagern und anreichern, über deren toxische Wirkung bisher noch nichts bekannt ist – dies sind sehr persistente und sehr bioakkumulative Stoffe, kurz vPvB;
- die als Krebs erregend, Erbgut schädigend und die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigend eingestuft werden.

Des Weiteren erregen Chemikalien, die das Hormonsystem beeinflussen (Endocrine Disrupting Substances, EDC), erhöhte Besorgnis. Sie stören das embryonale Wachstum und können zu schwerwiegenden Langzeitfolgen führen. Hinzu kommen viele Stoffe, die sich mit bisher nicht bekannten Auswirkungen im menschlichen Körper ablagern.

Quelle: BUND

Patricia Cameron leitet seit Anfang 2003 das Chemiereferat bei der Bundesgeschäftsstelle des BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland) in Berlin; ihr Schwerpunkt liegt derzeit auf der neuen Reform zur Regulierung von Chemikalien innerhalb der EU (REACH). Sie greift dabei auf 20 Jahre Erfahrung zurück: Von 1983 bis 1992 war die Biologin in der ökotoxikologischen Forschung über die Beeinträchtigung der Fortpflanzungsfähigkeit von Fischen durch Schadstoffe tätig (Bundesforschungsanstalt für Fischerei und Biologische Anstalt Helgoland); von 1997 bis 2002 war sie bei der Umweltstiftung WWF Deutschland für den „Internationalen Meeresschutz vor gefährlichen Chemikalien“ zuständig.

WISSENSWERTES

Zwischen 1880 und 1937 stieg die Zahl der registrierten organischen Verbindungen von 15.000 auf etwa 450.000. (1)

Heute sind rund **fünf Millionen chemische Verbindungen** bekannt. Davon sind etwa 100.000 Chemikalien im Gebrauch; jährlich kommen zirka 500 bis 1000 neue hinzu. (2)

Im Jahr 1930 wurde weltweit eine Million Tonnen Chemikalien erzeugt, gegenwärtig werden über **400 Millionen Tonnen Chemikalien** produziert. Die Hauptmenge der heutigen Produktion entfällt auf etwa tausend Stoffe, weitere 10.000 Stoffe werden in Mengen über zehn Tonnen hergestellt. (3)

In der Bundesrepublik gehört die chemische Industrie mit 1750 Betrieben, einer knappen halben Million Beschäftigten und mehr als 130 Milliarden Euro Jahresumsatz zu den **wichtigsten Industriezweigen**. Zudem sichert die Branche 381.000 Arbeitsplätze bei inländischen Zulieferern. Gemessen am Umsatz steht die deutsche Chemieindustrie in Europa an erster und weltweit an dritter Stelle hinter den USA und Japan. Für Forschung und Entwicklung werden jährlich sieben Milliarden Euro ausgegeben; in Sachanlagen wurden 2002 insgesamt 6,7 Milliarden Euro investiert. (4)

Innerhalb der **Europäischen Union** liegt der Anteil der Chemieindustrie an der Bruttowertschöpfung zwischen knapp neun Prozent (Portugal) und über 38 Prozent (Irland). In 34.000 Unternehmen arbeiten etwa 1,7 Millionen Menschen; weitere 4,5 bis fünf Millionen Arbeitsplätze sind indirekt von der Chemiebranche abhängig. Weltweit ist die EU der führende Chemiestandort; mit der Ost-Erweiterung wurde diese Position gestärkt. (5)

(1) Paul Walden: Geschichte der organischen Chemie. Zweiter Band zu C. Graebe: Geschichte der organischen Chemie. Verlag von Julius Springer. Berlin 1941. Unveränd. Nachdr. d. Reprints 1972. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York 1989. S. 29.

(2) Kurt Fent: Ökotoxikologie. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag. Stuttgart, New York 2003. S. 5.

(3) Weißbuch – Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik. 2001; sowie Kurt Fent: Ökotoxikologie. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag. Stuttgart, New York 2003. S. 5.

(4) http://www.bmbf.de/press/1133.php, http://www.presseportal.de/story.htx?nr=481784 sowie http://www.bmwi.de/Navigation/Wirtschaft/Branchenfocus/chemie-und-pharmazie.html

(5) Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (Hg.): Chemie – eine europäische Schlüsselindustrie. Produktion und Beschäftigung in einem Kontinent ohne Grenzen (Flyer zum Jahr der Chemie 2003). Hannover 2003.

Doris Böhme und Patricia Schmitters

Die üblichen Verdächtigen?

Schadstoffen auf der Spur

Die Vielfalt von Umweltchemikalien in Grund- und Oberflächenwässern, Sedimenten und Böden – insbesondere in Industrieregionen – ist oft unüberschaubar. Zu Produktionsrückständen und unerwünschten Nebenprodukten kommen zahlreiche Umwandlungs- und Abbauprodukte. Diese entstehen erst unter dem Einfluss bestimmter Umweltbedingungen, wie Sonnenlicht, Mikroorganismen, veränderten pH- und Redoxbedingungen oder durch die Reaktion mit anderen chemischen Stoffen. Der Ausweg heißt dann: Sanierung der betroffenen Areale. Doch was genau soll saniert werden? Welche Schadstoffe müssen weg? Mit welcher Methode?

Daphnien sind Kleinkrebse (Wasserflöhe), die empfindlich auf Schadstoffe im Wasser reagieren. Wird beispielsweise deren Bewegung (Schwimmfähigkeit) beeinträchtigt, lassen sich Rückschlüsse über Giftstoffe im Wasser ziehen. Der hierfür genormte Test wird Daphnientest genannt.

Die moderne chemische Analytik kann viel, aber nicht alles. Sie kann chemische Substanzen in sehr geringen Konzentrationen und mit großer Genauigkeit nachweisen, aber unbekannte oder unerwartete Substanzen werden normalerweise nicht erfasst. Selbst wenn die chemische Analytik fündig wird, ist es fast unmöglich, das Gefährdungspotenzial dieser Substanzen zu bewerten. Denn für die meisten nachweisbaren Umweltschadstoffe existieren keine oder nur mangelnde Daten zu deren toxischer Wirkung. Werden also Sanierungsmaßnahmen ergriffen, bei denen es den „falschen" Substanzen an den Kragen geht, bleiben diese – zumindest was das Gefährdungspotenzial betrifft – wahrscheinlich erfolglos. Was nun?

Eine Alternative, das Gefährdungspotenzial selbst zu bestimmen, sind biologische Tests an Organismen wie Leuchtbakterien, Wasserflöhen, Algen, Fischeiern oder der Test mit Fischzelllinien. Aus der beobachteten Wirkung kann abgeschätzt werden, wie gefährlich oder toxisch Umweltproben sind. Schadstoffe beeinflussen zum Beispiel die pflanzliche Photosynthese oder die Reproduktion von Organismen, sie können die Zellsubstanz oder das Erbmaterial verändern. Um möglichst alle relevanten Wirkungen zu erfassen, kombiniert man idealerweise einzelne Biotests zu einer „Biotestbatterie". Aber auch diese Methode hat einen Haken. Sie liefert keine Hinweise auf den eigentlichen Übeltäter. Welche Sanierungsmethode ist also die richtige, wenn unklar ist, welche Schadstoffe beseitigt werden sollen?

Chemiker, Biologen und Ökotoxikologen am UFZ suchen nach Methoden und Wegen, die Gefahr, die von solchen komplexen Schadstoffmixturen ausgeht, richtig abzuschätzen und den ursächlichen Übeltätern zuzuordnen. Mit Erfolg. Sinnvoll und geschickt kombinieren sie chemische Analytik und biologische Wirkungstests. Wissenschaftlich heißt das „effektorientierte Schadstoffidentifikation".

Doch die schädigende Wirkung geht oft von Verbindungen aus, die bisher nicht wahrgenommen worden sind", sagt Rolf Altenburger. „Besonders schwierig sind Mischungen von Schadstoffen, die zum Teil noch mit Licht oder Luft reagieren und deren Gefahrenpotenzial nur schwer vorherzusehen ist. Substanzen, die für sich betrachtet keine nachweisbare Wirkung haben, aber in der Kombination durchaus zu massiven Schäden führen."

Das Spittelwasser ist ein kleiner Bach in der Industrieregion Bitterfeld-Wolfen, der über viele Jahrzehnte von der ansässigen Industrie als Abwasserkanal missbraucht wurde. In seinen Sedimenten haben sich organische Schadstoffe und Schwermetalle angereichert.

Was das bedeutet und wie es funktioniert, zeigt folgendes Beispiel, recherchiert von Patricia Schmitters.

Wenn Wasserflöhe keine Purzelbäume schlagen

Sie sind Gangstern auf der Spur, die in keinem Fahndungsregister stehen. Werner Brack und Rolf Altenburger sind Ökotoxikologen und Chef-Detektive, wenn es im UFZ um Schadstoffe geht. Ihr Revier ist das Spittelwasser. Ein kleiner Bach in Bitterfeld, aber ein großer Umweltverschmutzer. Denn der ehemalige Industrie-Abwasserkanal mündet in die Mulde, und seine Schadstofffracht verschmutzt das Wasser bis hinauf zur Elbe.

„In Bitterfeld haben wir einen Cocktail aus unterschiedlichen Substanzen, die in Wasser und Böden Schäden anrichten. Mit den klassischen chemischen Analysen lassen sich die üblichen Verdächtigen wie Arsen, Blei oder Quecksilber nachweisen.

Chemische Analysen für die vielen tausend Verbindungen, die im Spittelwasser vorkommen, durchzuführen, wäre technisch gar nicht möglich. Deshalb testen die beiden Forscher an Wasserflöhen, Fischeiern, Wasserlinsen, Algen und Leuchtbakterien, wie schädlich die verschiedenen Proben sind.

„Wir setzen unsere Flöhe ins Wasser und schauen uns an, was es mit ihnen macht", bringt Werner Brack das Prinzip auf den Punkt. Aber woran erkennt man, wie es den winzigen Flöhen geht? „Wasserflöhe sind quirlige Gesellen, sie schlagen im Wasser Purzelbäume, um Nahrung aufzunehmen. Wenn sie keine Purzelbäume mehr schlagen, ist das ein schlechtes Zeichen. Deshalb nimmt unsere Kamera die Flöhe auf und der angeschlossene Computer misst, ob und wie schnell sich die Flöhe bewegen."

Rolf Altenburger fährt fort: „Am deutlichsten wäre es natürlich, wenn alle

sterben. Aber Umweltschutz wartet heute nicht mehr so lange, bis auch das letzte Tierchen in einem See zugrunde gegangen ist. Es ist für uns zum Beispiel genauso wichtig zu erkennen, ob die Schadstoffe die Flöhe unfruchtbar machen." Sprich, welches Gefährdungspotenzial von den Schadstoffen ausgeht.

Brack und Altenburger ermitteln nach dem Ausschluss-Verfahren: „Wir stellen eine schädliche Wirkung fest. Dann versuchen wir, die Ursache dafür zu finden, indem wir nach und nach die Stoffe aus dem Wasser trennen, die definitiv nicht für den Schaden verantwortlich sind." Wissenschaftlich gesprochen heißt dieses Verfahren Fraktionierung. Schadstoffgruppen oder Schadstoffe werden schrittweise aus der Umweltprobe entfernt – fraktioniert. Die einzelnen Fraktionen werden wiederum auf ihre Wirksamkeit getestet, wirksame Fraktionen erneut getrennt und getestet. Dieses Vorgehen wird mit immer spezifischeren Trennmethoden so oft durchlaufen, bis sich die komplexe Umweltprobe mit ihrer Vielzahl von Substanzen auf wenige toxische Fraktionen mit wenigen Inhaltsstoffen reduziert hat. „Die isolierten Stoffe – idealerweise ist es nur einer – testen wir dann noch einmal, und wenn die Wirkung dieselbe ist wie vorher in der komplexen Mischung, ist der Täter überführt."

Die Methode hat Erfolg: N-Phenyl-ß-Naphthylamin heißt einer der in Bitterfeld identifizierten Stoffe. Ein bekanntes Abfallprodukt aus der Gummiherstellung, bislang auf keiner Fahndungsliste zu finden, weil sein Gefährdungspotenzial kaum bekannt war. Doch im Test erwies sich das N-Phenyl-ß-Naphthylamin als echter Algenkiller. Seine Wirkung kommt einem hochwirksamen Unkrautvernichter nahe. „Bislang wird der Stoff nicht berücksichtigt, wenn es darum geht, Gefahren abzuschätzen", berichtet Rolf Altenburger. Sein Kollege Werner Brack fügt hinzu: „Wir finden es wichtig, dass nicht nur die üblichen Stoffe bei der Einschätzung von Gefahren einbezogen werden. Man sollte einzelne Wirkungen und Ursachen von Umweltschäden durch kombinierte chemische und biologische Verfahren ausfindig machen. Erst dann macht gezieltes Sanieren Sinn." ■

Patricia Schmitters ist Journalistikstudentin an der Universität Leipzig.

Filtration von Sedimentsuspensionen aus dem Spittelwasser

Umweltanalytik ohne Grenzen?

Atomabsorptions- und Emissionsspektrometrie, hochauflösende Massenspektrometrie, Isotopenmassenspektrometrie, Röntgenfluoreszenzspektrometrie, Gas- und Ionenchromatographie, Hochleistungsflüssigchromatographie, Photometrie, Elektroanalytik, Kapillarzonenelektrophorese, Elementanalytik, Molekülspektroskopie, Flüssigszintillationsspektrometrie, hochauflösende Gammaspektrometrie, Alphaspektrometrie, Festkörperspurdetektoren, ... Kein Problem. Milligramm, Mikrogramm, Nanogramm? Auch kein Problem. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Naphthalene, organische Arsenspezies, ... Ebenfalls kein Problem.

Der chemischen Analytik sind kaum noch Grenzen gesetzt. Vorausgesetzt, man weiß, was, wo und wie man suchen muss. In der Umweltforschung muss sich die Analytik ständig neuen Herausforderungen stellen.

Wissenschaftler aus dem Department Analytik des UFZ tüfteln an neuen oder an optimierten Methoden, um beispielsweise Spuren von Chemikalien in unterschiedlichen Matrizes zu finden, deren Quellen aufzuspüren, Transportwege nachzuvollziehen oder Ab- und Umbauprodukte der Umweltchemikalien zu identifizieren. Dazu nutzen sie bekannte analytische Verfahren und Geräte, entwickeln neue Ausrüstungen und Strategien. In der mobilen Analytik sind schnelle Methoden gefragt, um bereits vor Ort erste wichtige Aussagen zu Kontaminationen und deren möglicher Verbreitung zu treffen. Komplexe oder komplizierte Schadensfälle bedürfen der Kombination von chemischer und biologischer Analytik. Schwer abbaubare, langlebige Schadstoffe, die oft nur in sehr geringen Spuren vorkommen, sich aber mit der Zeit anreichern können, müssen über lange Zeiträume gesammelt und mit hochempfindlichen Analysengeräten detektiert werden.

Wesentliche Voraussetzung bei allen Methoden ist: Die Qualität muss gesichert sein. Und das beginnt bereits bei der Probennahme. ■

ANZEIGE

Der Leipziger KUBUS –

DAS NEUE KONFERENZ- UND BILDUNGSZENTRUM DES UFZ

» Kongresse, Tagungen und Seminare bis 450 Teilnehmer

Die Säle lassen sich für Parallelveranstaltungen aufteilen. Sie sind mit moderner Medien- und Vortragstechnik ausgestattet. Die Wahl des Caterers ist frei. Die Tiefgarage verfügt über 100 Stellplätze.

» Ausstellungen und sonstige Veranstaltungen

Das außergewöhnliche Kunstkonzept im Eingangsbereich des Leipziger KUBUS bietet einen ansprechenden Rahmen dafür.

» Weiterbildung und Schulungen z.B. im Schülerlabor

Im Schülerlabor werden anspruchsvolle Experimente aus der Umweltforschung für die Sekundarstufe II angeboten.

Kontakt:
UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
Tel. 0341 / 235 2413
Fax 0341 / 235 2782
E-Mail: kubus-info@ufz.de
http://www.leipziger-kubus.de

Albrecht Paschke und Doris Böhme

Biomimetika – Die Biologie nachahmen

Robuste und preiswerte Alternative zu Polymer beschichteten Magnetrührstäben (oben) als künstliches Speichermedium: Silikonstücke in Form von Stäben (unten). Maßstab: 7,5 : 1

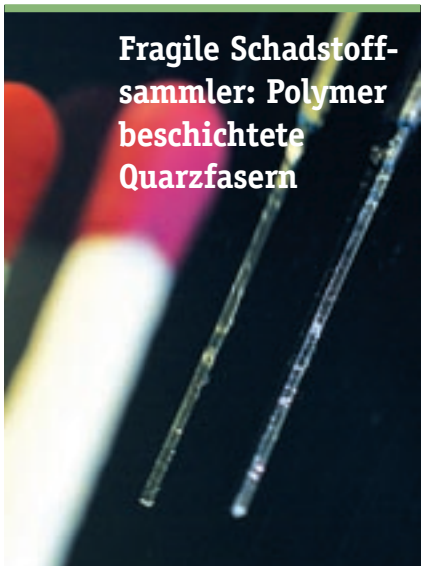
SPMDs (Semipermeable Membrane Devices) sind synthetische *in situ* Speichermedien, mit denen Schadstoffe in Flüssen und Seen gesammelt werden.

Nicht die Konzentration von Schadstoffen in Luft, Wasser oder Boden, sondern deren Bioverfügbarkeit ist von entscheidender Bedeutung für ihre ökotoxische und auch humantoxische Wirkung. Während dieses Problem für Schwermetalle schon bis in den Bereich kleinster Spuren untersucht werden kann, gibt es bei organischen Schadstoffen erhebliche analytische Schwierigkeiten. Diese resultieren vor allem aus den vielfältigen Wechselwirkungen mit den biologischen Matrices. Erst im letzten Jahrzehnt wurde eine Untersuchungsmethode entwickelt, die wesentliche Fortschritte bringen kann: Die biomimetische Extraktion. Als Biomimetika werden künstliche Sammelmedien bezeichnet, die die passive Schadstoffaufnahme in Lebewesen simulieren. Zielsubstanzen sind insbesondere die inzwischen geächtete Gruppe der POPs (Persistent Organic Pollutants), die bekanntermaßen ein hohes Bioakkumulationspotenzial besitzen.

Die Anreicherung Luft getragener organischer Schadstoffe in terrestrischen Pflanzen lässt sich mit so genannten SPMDs (Semipermeable Membrane Devices) über Wochen und Monate zeitgemittelt abschätzen. SPMDs – man könnte sie auch als synthetisches *in situ* Speichermedium bezeichnen – sind mit dem Lipid Triolein (Triglycerid der Ölsäure) gefüllte Polyethylen-Schläuche, die kommerziell in Standardkonfigurationen erhältlich sind. Ein großer Vorteil gegenüber dem herkömmlichen Biomonitoring ist ihre relativ unproblematische Aufbereitung vor der Analyse. Beim Luftmonitoring werden die in SPMDs akkumulierten Schadstoffmengen mit denen in parallel dazu exponierten Pflanzen verglichen oder mit einem Effektmonitoring kombiniert. Allerdings sind die SPMDs sehr teuer, und bei ihrer Aufarbeitung werden beträchtliche Mengen an Lösungsmitteln verbraucht. Deshalb werden zunehmend alternative Sammler entwickelt, die beispielsweise mit festen Sorbentien, Polymer beschichteten Gläsern oder Quarzfasern, als Aufnehmerphase arbeiten.

SPMDs werden ebensfalls bei der biomimetischen Extraktion von organischen Schadstoffen aus dem Wasser eingesetzt. Aber auch für die passive Beprobung der Wasserphase wurden neue Systeme entwickelt, wie zum Beispiel ein mit Sorbentien gefülltes Keramik-Dosimeter oder Sammler mit Membran umhülltem Silikonmaterial – eine UFZ-Entwicklung (Magazin Lebensräume, Ausgabe Nr. 8, S. 28).

Ein viel versprechender Ansatz, einfach und schnell durchführbar, ist die Festphasen-Mikroextraktion (englisch: Solid Phase MicroExtraction, SPME), die mit Polymer beschichteten Quarzfasern arbeitet. Das Prinzip der SPME beruht auf der Verteilung organischer Spurenstoffe zwischen wässriger Phase und Sorptionsschicht an der Faser. Mit dieser minimal-invasiven Extraktionstechnik können die effektiven Wirkkonzentrationen von organischen Schadstoffen in natürlichen Wasserproben oder synthetischen Testmedien ermittelt, aber auch vermeintliche Schadstoffquellen oder -senken aufgeklärt werden. Nachteil der Polymer beschichteten SPME-Fasern oder Magnetrührstäbe: Sie sind sehr fragil. Eine preiswerte und robuste Alternative könnten dünne Silikonstücke in Form von Folien, Schläuchen oder Stäben sein. Sie werden derzeit von UFZ-Wissenschaftlern im Labor und Freiland getestet.



Fragile Schadstoffsammler: Polymer beschichtete Quarzfasern

Allgemeine Aussagen zur Bioverfügbarkeit organischer Umweltchemikalien in Böden und Sedimenten sind besonders problematisch, da diese stark heterogen zusammengesetzt sind und der Wassergehalt ständig schwankt. Auch hier kommen neben synthetischen Sorbentien SPMDs als Biomimetika zur Anwendung. Versuche zeigen, dass einfache Schläuche aus Polyethylen ohne Lipidfüllung als kostengünstige Alternative eingesetzt werden können. Interessant sind insbesondere Vergleiche zur Bioakkumulation in Regenwürmern. Um zukünftig Bodenkontaminationen schneller und genauer beurteilen zu können, werden biomimetische Methoden mit den entsprechenden Toxizitätstests kombiniert. ■

Albrecht Paschke ist Chemiker und leitet die Abteilung Expositionsanalyse im Department Chemische Ökotoxikologie am UFZ.

Doris Böhme

Eins plus Eins gleich Zwei?

Die Kombinatio von Chem

Haben Sie schon einmal mehrere Medikamente gleichzeitig eingenommen? Und haben Sie alle Beipackzettel nach möglichen Risiken oder Nebenwirkungen durchforstet oder gar Ihren Arzt oder Apotheker gefragt, ob das eine Medikament die Wirkung des anderen irgendwie beeinflusst, schwächt oder eventuell verstärkt? Auch Organismen in Gewässern – Bakterien, Algen, Wasserpflanzen, Fische – sind oftmals einer Vielzahl unterschiedlicher Stoffe, Schadstoffgemischen, gleichzeitig ausgesetzt. Sollen Gewässer geschützt bzw. saniert werden, müssen solche so genannten Kombinationseffekte zukünftig berücksichtigt werden.

nswirkung
ikalien

Auch die Wasserlinse (Lemna spec.) *wird als Biotestorganismus genutzt. Sie reagiert sehr unterschiedlich auf äußere Umwelteinflüsse: Neben völliger Entfärbung (Nekrose) kann ihre Form verändert oder ihre Wachstumsrate gehemmt werden.*

Keine einfache Aufgabe, denn wo soll man anfangen bei der erdrückenden Anzahl potenziell gefährdender Chemikalien in der Umwelt? Welche Methoden und Instrumentarien sind überhaupt geeignet, Mischungstoxizitäten und Kombinationseffekte zu bestimmen oder vorherzusagen? Ökotoxikologen am UFZ haben sich diesen Fragen gestellt. Sie prüfen, ob Modelle, die in der Pharmakologie und Humantoxikologie als Vorhersagekonzepte entwickelt wurden, auch in der Ökotoxikologie geeignet sind.

Seit fast 100 Jahren werden in der Pharmakologie Kombinationswirkungen von Einzelstoffen untersucht, um Wirkungsmechanismen zu verstehen, gewünschte Effekte zu optimieren, unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden, Risiken zu prognostizieren oder zu bewerten. Dafür haben Wissenschaftler verschiedenste Verfahren entwickelt, die sich im Wesentlichen in zwei Modellgruppen zusammenfassen lassen: Die eine beruht auf dem Prinzip der Konzentrations-Additivität, die andere legt das Prinzip der Unabhängigen Wirkung zugrunde.

Angenommen, Chemikalien in einem Gemisch wirken ähnlich ...

... dann lässt sich das Konzept der Konzentrations-Additivität nutzen. Auf der Basis von Informationen über die einzelnen Chemikalien wird formuliert, welche Effekte für eine Mischung aus diesen Chemikalien zu erwarten sind. Bereits 1926 entwickelte der deutsche Pharmakologe Loewe mit seinen Kollegen die Vorstellung einer „Similar Action", was nichts anderes heißt, als dass Mischungskomponenten ähnlich wirken. Anders formuliert beschreibt dieses Modell das Phänomen, dass sich eine Substanz wie die Verdünnung einer anderen verhalten kann. Die Mischungskomponenten haben also alle eine ähnliche Wirkung, den gleichen Wirkungsmechanismus und den gleichen Wirkungsort. Sie unterscheiden sich lediglich in ihrer relativen Wirksamkeit. Jede im Gemisch vorhandene, wirksame Komponente trägt – unabhängig von ihrer Konzentration – zur Gesamttoxizität bei. Der Effekt eines Stoffgemisches bleibt konstant, wenn eine Komponente der Mischung ganz oder teilweise durch eine andere, ähnlich wirksame Substanz ersetzt wird.

Einige Wissenschaftler diskutieren dieses Vorhersage-Modell sogar als generelle Lösung, also auch für die Beurteilung der Kombinationswirkung von unähnlich wirkenden Stoffen – allerdings nicht ohne Kontroversen.

Angenommen, Chemikalien in einem Gemisch wirken nicht ähnlich ...

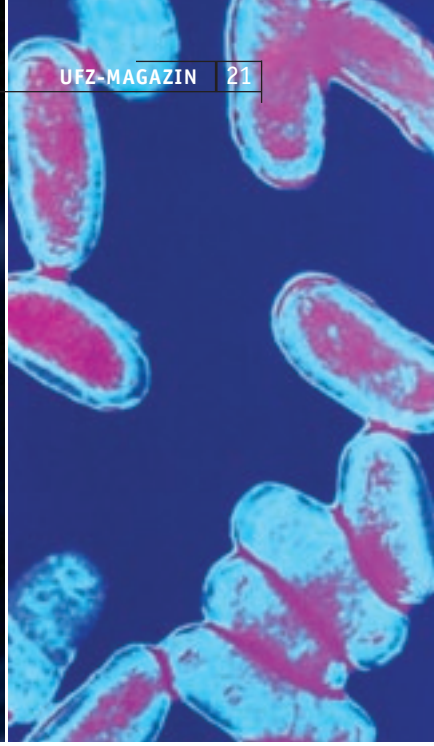
... dann wird oftmals das Modell der *Unabhängigen Wirkung* für Vorhersagen angewendet. Erstmals vom englischen Biometriker Bliss im Jahre 1939 unter dem Begriff „Independent Joint Action" eingeführt, geht dieses Konzept – im Gegensatz zur Konzentrations-Additivität – von der Annahme aus, dass die einzelnen Komponenten in einem Gemisch unähnlich wirken. Mit unähnlich ist gemeint, dass die Mischungskomponenten primär an unterschiedlichen Orten wirken und über unterschiedliche Wirkungsmechanismen einen gemeinsamen Effekt auslösen. Es wird also angenommen, dass der relative Effekt einer Substanz in Gegenwart einer zweiten unverändert bleibt und sich der Kombinationseffekt unabhängig aus den Einzeleffekten ergibt. Somit tragen nur solche Komponenten zur Mischungstoxizität bei, die in einer solchen Konzentration im Gemisch vorliegen, welche auch einzeln eine Wirkung verursachen würde. Wissenschaftler, die die Vielfalt der Wirkmechanismen von Chemikalien in Organismen betrachten, halten das Konzept der Unabhängigen Wirkung für ein universales Modell und gestehen das Auftreten von ähnlicher Wirkung allenfalls als Spezialfall zu.

Doch auch dieses Modell hat seine Zweifler, insbesondere auf der Ebene komplexer Systeme wie Zellen, Organismen oder Populationen oder in chronischen Belastungssituationen. Können Wirkketten tatsächlich völlig unabhängig voneinander zum gleichen toxikologischen Endpunkt führen? Bedenkt man die Komplexität des Stoffwechsels, voneinander abhängige Entwicklungsstadien, Rückkopplungen und Kompensationsreaktionen, kann man dann tatsächlich mit einer so starken Vereinfachung – der Unabhängigkeit – annähernd richtige Vorhersagen treffen?

WISSENSWERTES

Algentest

Der Algentest ist ein unverzichtbarer Biotest, um das Umweltgefährdungspotenzial von Chemikalien sowie von Boden- beziehungsweise Wasserproben zu beurteilen. In einem standardisierten Testprotokoll für den Algentest (DIN-Norm) wird eine Kultur wachsender Grünalgen (*Desmodesmus subspicatus*) verschiedenen Konzentrationen der zu untersuchenden Proben ausgesetzt und deren Wachstumshemmung auf die Algenzellen über einen Zeitraum von 72 Stunden beobachtet. Die Auswertung kann sowohl durch Auszählen der Algenzellen als auch durch die Messung der Lichtaussendung angestrahlter Algenzellen (Fluoreszenz) erfolgen.
Aufgrund ihrer ökologischen Bedeutung, der hohen Empfindlichkeit gegenüber Schadstoffen, ihres schnellen Wachstums und der leichten Kultivierbarkeit im Labor werden Algen seit langem zur Beurteilung von Chemikalien und Umweltproben in unterschiedlichsten biologischen Testverfahren verwendet.



Welches Modell ist besser geeignet?

Um eine Antwort auf diese Frage zu bekommen, haben die UFZ-Ökotoxikologen in aufwändigen Experimenten die Giftigkeit von Gemischen und ihren Komponenten in zwei Biotests – mit Grünalgen und Leuchtbakterien – untersucht. Dazu haben sie Gemische aus definierten Umweltchemikalien hergestellt, zum einen binäre Gemische, bestehend aus zwei Komponenten (Pestizid+Pestizid; Pestizid+Tensid; Tensid+Tensid) und zum anderen multiple Mischungen aus mehreren ähnlich und unähnlich wirkenden Substanzen.

Parallel zu den Experimenten haben die Wissenschaftler mithilfe der beiden Vorhersage-Modelle die Toxizität der Gemische prognostiziert. Spannend der Vergleich: Stimmen Vorhersage und Experiment überein? Wie groß ist die Abweichung? Kann sie statistisch vernachlässigt werden? Welches Konzept ist besser?

Beide Konzepte – sowohl das der Konzentrations-Additivität als auch das der Unabhängigen Wirkung – sind in der Regel geeignet, die giftige Wirkung von Stoffgemischen relativ gut bis exakt vorherzusagen. Und zwar unabhängig von der Anzahl der Komponenten, dem speziellen Gemisch, dem Mischungsverhältnis, der Art der Testorganismen oder der Expositionsdauer. Ausschlag gebend für die Auswahl des richtigen Vorhersagemodells war allein, ob die Wirkung der einzelnen Substanzen ähnlich oder unähnlich ist.

WISSENSWERTES

Leuchtbakterientest

Der Test beruht auf der natürlichen Fähigkeit von bestimmten marinen Bakterien zu leuchten. Dieses Leuchten, das aufgrund enzymatischer, energiestoffwechselabhängiger Prozesse (Luciferin-Luciferase-System) abläuft, kann durch Schadstoffe gehemmt werden.
Durch die Hemmung des Leuchtens wird die Toxizität von Einzelsubstanzen oder Stoffgemischen photometrisch im Vergleich zu unbelasteten Organismen ermittelt. Der Leuchtbakterientest ist eine standardisierte Methode (DIN-Norm) zur Prüfung von Abwässern der chemischen Industrie, für Deponiesickerwässer und für Kühlwässer.

Bei allen Versuchen wurde mit dem Konzept der Konzentrations-Additivität eine etwas höhere Toxizität vorhergesagt als mit dem der Unabhängigen Wirkung. Vor allem für Schadstoffgemische, die einzelne Komponenten in sehr niedrigen Konzentrationen enthalten, sind Vorhersagen damit sicher kalkulierbar und lassen sich mit geringem Aufwand überprüfen. Die Gefahr, eine Mischungstoxizität zu unterschätzen, ist also bei der Anwendung der Konzentrations-Additivität geringer.

Lösung gefunden – Forschung erledigt?

Sicherlich nicht! Auch wenn mit den Experimenten und Prognosen zahlreiche Referenzfälle vorliegen, bleiben viele Fragen offen: Gibt es Ausnahmen von der Regel? Ist das, was im Labor und Modell funktioniert, für reale Ökosysteme, die komplexer und komplizierter sind als ein Versuch im „Reagenzglas“ – Bäche, Flüsse, Seen, Grundwasser – anwendbar? Oftmals finden Belastungen mit Schadstoffen sequenziell, nacheinander statt. Hierfür gibt es bislang keine Modelle. Für die Diagnose von komplexen Gemischen, die bereits in der Umwelt vorliegen, oder auch für die Interaktion mit anderen Stressoren, wie etwa UV-Licht, wird die Kenntnis über Wirkmechanismen wichtig – für Umweltchemikalien jedoch ist das Wissen bisher äußerst spärlich.

Dabei darf nicht vergessen werden, dass alle Vorhersagemodelle auf Informationen über die Einzelstofftoxizitäten basieren. Diese wiederum werden experimentell ermittelt oder mithilfe von Computermodellen vorhergesagt – auf Basis der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Stoffe. Und die sind bisher nur für einen Bruchteil der Unmenge von Umweltchemikalien bekannt, können aber experimentell ermittelt oder – wie kann es anders sein – mit Modellen vorhergesagt werden … ■

Der Beitrag entstand auf der Basis von Arbeiten und unter Mitwirkung von Dr. Rolf Altenburger. Er leitet die Arbeitsgruppe Wirkungsanalyse im Department Chemische Ökotoxikologie des UFZ.

Udo Kristen, Klaus Jung und Daniela Weber

Schnell, sicher, sensitiv – Der Pollenschlauch-Wachstumstest

Bereits seit über 50 Jahren wird der Pollenschlauch-Wachstumstest (Pollen Tube Growth – PTG-Test) eingesetzt, um die toxische Wirkung von Chemikalien oder Stoffgemischen zu bestimmen. Insbesondere der Einfluss von Pestiziden, Reinigungsmitteln und anderen Chemikalien auf lebende Zellen lässt sich mit diesem einfachen biologischen Testverfahren bewerten. Das Screening zeichnet sich durch drei Merkmale aus: Die Aussagen über die Gefährdung eines biologischen Systems lassen sich schnell, sicher und sensitiv treffen.

Pollenschläuche – in ihnen werden die Spermazellen an die Eizellen herangeführt – reagieren auf Veränderungen in ihrem Kulturmedium äußerst empfindlich. Schwankungen, verursacht beispielsweise durch Schadstoffe, behindern die Keimung der Pollen sowie das Wachstum der Schläuche. Im PTG-Test werden fast immer diese beiden Parameter genutzt, um die Phytotoxizität von Chemikalien und Stoffgemischen – die giftige Wirkung gegenüber Pflanzen – zu bestimmen.

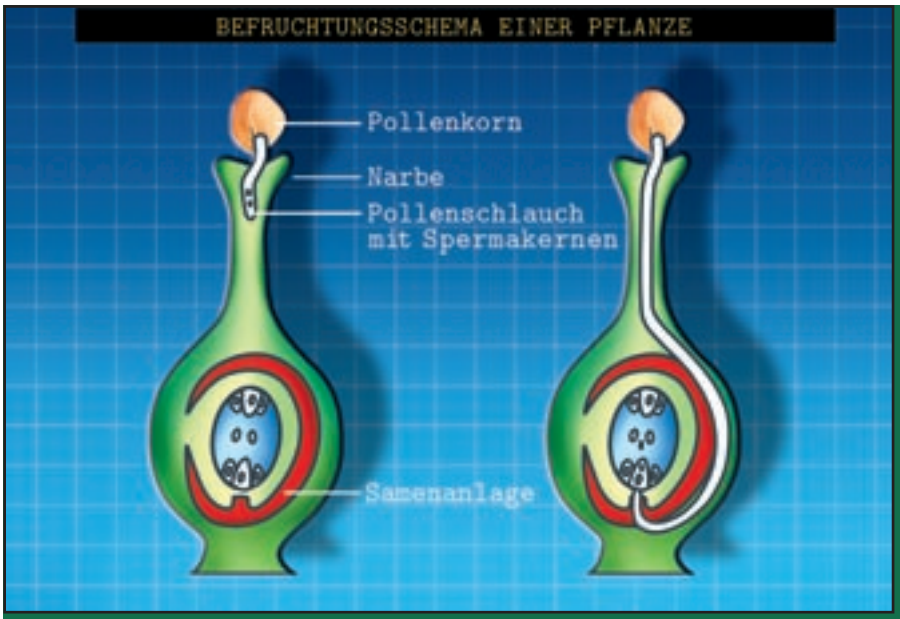
Über lange Jahre hinweg wurden die Wachstumshemmungen erfasst, indem die Länge der Pollenschläuche unter dem Mikroskop gemessen wurde. Da Pollenschläuche jedoch nicht schnurgerade wachsen, sondern sich ineinander verschlingen, ist diese Methode mühevoll und zeitaufwändig. Effizienter sind hingegen photometrische Auswertungen von PTG-Tests; sie haben sich in den letzten 15 Jahren durchgesetzt.

Eines dieser Verfahren, das am UFZ eingesetzt wird, erfasst den Zusammenhang zwischen der Länge eines Pollenschlauchs und der Schadstoffbelastung im Kulturmedium über die photometrische Messung von Farbintensität. Hierfür werden Pollen von Tabakpflanzen (*Nicotiana sylvestris*) verwendet – ihr langes Blühstadium ermöglicht eine Pollenernte über fünf, sechs Monate hinweg; und die Lagerfähigkeit des Pollens bei -20°C erlaubt langjährig vergleichende Kontrollen.

Das Wachstum des Pollenschlauches wird quantitativ durch die spezifische Bindung des Farbstoffs Alzianblau an die Pollenschlauchwand bestimmt. Der Farbstoff wird dem Kulturmedium zugefügt – die Polysaccharide, aus denen die Zellwände des Pollenschlauches vornehmlich bestehen, saugen ihn auf. Danach wird das überschüssige Alzianblau entfernt; und schließlich jener Farbanteil gelöst, der von den Polysacchariden gebunden ist. Da längere Pollenschläuche mehr Farbstoff binden als kürzere, zeigt die photometrische Bestimmung: Die Färbung des gelösten Alzianblaus fällt umso intensiver aus, je mehr Pollenschlauchmaterial produziert wurde.

Quelle: Uwe Lochstampfer, FloraFoto / www.botanikus.de

Blüten der Tabakpflanze *Nicotiana sylvestris*



Im Laufe der Bestäubung einer Pflanze werden Pollenkörner auf der Narbe (oder einer funktionell vergleichbaren Struktur) deponiert. Dort keimen sie unter Ausbildung eines Pollenschlauches, der schließlich bis zur Samenanlage reicht. Über diesen Pollenschlauch werden die Spermazellen zur Eizelle geführt, wo Ei- und Spermakern miteinander verschmelzen. Dieser Prozess heißt Befruchtung. Umgangssprachlich werden Bestäubung und Befruchtung häufig gleich gesetzt.

Mit dem Übergang von der mikroskopischen zur photometrischen Messung des Pollenschlauchwachstums erweiterten sich die Möglichkeiten, den PTG-Test anzuwenden, erheblich: Zum einen nutzt die Ökotoxikologie das Verfahren, um die biologische Wirksamkeit von Umweltprobematerialien zu bewerten, deren chemische Zusammensetzung weitgehend unbekannt ist und die sich in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen ändern können. Die Eignung des PTG-Tests für diesen Einsatz wurde am Beispiel der Deponie Möckern geprüft. Auf die Halde im Nordwesten Leipzigs gelangten bis zur Schließung 1983 etwa fünf Millionen Kubikmeter Bauschutt und Braunkohleasche sowie Industrie-, Gewerbe- und Hausmüll – Eine solche Deponie gleicht je nach Temperatur und Feuchtigkeit einem chemischen Reaktor. Für die PTG-Untersuchung wurden an sechs Messpunkten unterschiedlich belastete Sickerwässer entnommen; zum Vergleich wurde Trinkwasser aus dem Bereich Leipzig-Schönefeld analysiert. Im Ergebnis zeigte sich bei allen Sickerwässern eine signifikante Hemmung des Pollenschlauchwachstums gegenüber den Kontrollansätzen. Dabei lässt sich die Minderung oft nicht mit den zuvor gemessenen chemischen Belastungen der Sickerwässer erklären. Vielmehr bedingt die komplexe Zusammensetzung der Deponieausflüsse den zytotoxischen Effekt.

Der Pollenschlauch-Wachstumstest eignet sich als Alternative zu Tierversuchen und dient der Abschätzung des Risikopotenzials von chemisch komplexen Umweltproben

Zum zweiten lässt sich der PTG-Test in der Humantoxikologie einsetzen. Da die einfachen Zellen des Pollenschlauches in ihrem Aufbau weniger pflanzlichen als vielmehr tierischen Zellen entsprechen, wurde die Methode in die „COLIPA Validation Study“ aufgenommen. Im Rahmen der Studie wurde eine Vielzahl kosmetischer Formulierungen mit dem Ziel untersucht, den Draize Augentest bei Kaninchen zu ersetzen. Gesucht wurde ein Verfahren, dass die toxikologische Wirkung von Probematerial genauso zuverlässig, aussagekräftig und nachvollziehbar bewertet wie der Tierversuch. Dabei schnitt das PTG-Screening äußerst erfolgreich ab: Unter 29 geprüften Verfahren zeigte der pflanzliche Zelltest eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Kaninchenaugen-Irritationstest. Angesichts der Gesetzgebung in der Europäischen Union und den Vereinigten Staaten, die zunehmend eine Reduzierung von Tierversuchen fordert, bietet sich der PTG-Test mit diesem eindeutigen Resultat als optionales Prüfverfahren an.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Der Pollenschlauch-Wachstumstest, der sich in der Untersuchung der Zytotoxizität von löslichen Einzelsubstanzen und wässrigen Probematerialien durch Sensitivität, Sicherheit und Schnelligkeit auszeichnet, eignet sich im humantoxischen Bereich als Alternative zu Tierversuchen und dient im ökotoxischen Bereich der Abschätzung des Risikopotenzials von chemisch komplexen Umweltproben. ■

Prof. Dr. Udo Kristen ist Biologe am Institut für Allgemeine Botanik der Universität Hamburg.

Prof. Dr. Klaus Jung ist Biochemiker. Er arbeitete als Abteilungsleiter und stellvertretender Leiter im Department Chemische Ökotoxikologie am UFZ. Seit Ende 2003 ist er im Ruhestand.

Susanne Hufe

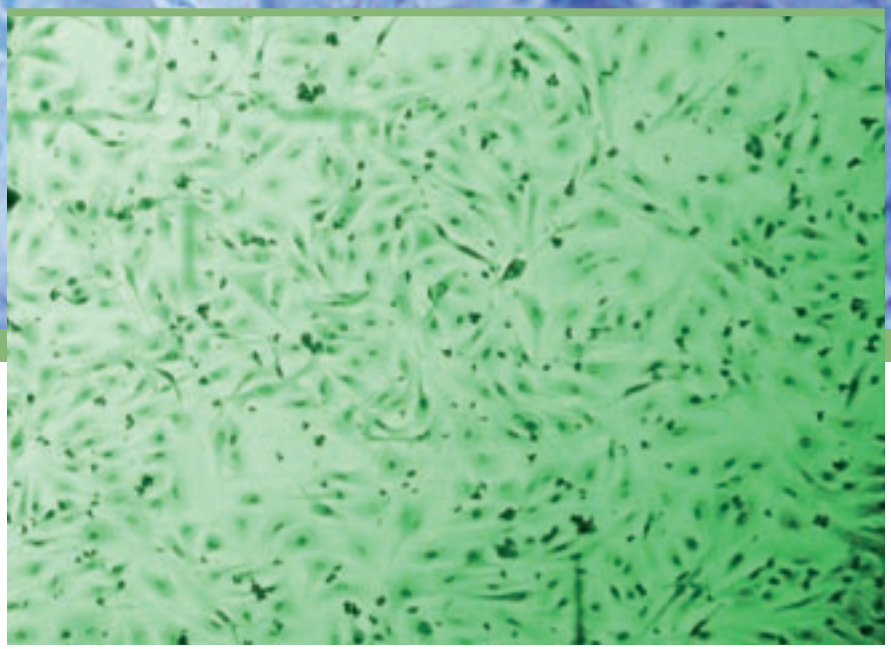
Der Fisch als Modellsyst

Um die biologische Wirkung von Chemikalien zu erforschen, werden häufig im Wasser lebende Organismen genutzt. Denn dort, in der aquatischen Umwelt, landet ein Großteil der Schadstoffe. Neben Wasserflöhen, Algen und Leuchtbakterien sind vor allem Fische wichtige Helfer für die Wissenschaftler. Warum?
Fische sind als Konsumenten ein wichtiges Glied in der Nahrungskette. Außerdem reagieren sie sensibel auf Schadstoffe. Aus diesen Gründen kommen heute in vielen Industrieländern Letalitätstests mit Fischen routinemäßig zum Einsatz, um Industrieabwässer oder Kläranlagenausläufe auf ihre Toxizität zu prüfen oder Chemikalien während des Genehmigungsverfahrens zu testen. Im Hinblick auf eine Gefahrenabwehr für den Menschen ist das ein erster wichtiger Schritt, denn akut giftige Wirkungen können eindeutig identifiziert werden. Trotzdem, das ist nicht der Weisheit letzter Schluss.

em

*Der Medaka oder auch Reiskärpfling (*Oryzias latipes*) zeichnet sich durch seine anspruchslose Haltung, eine unter Laborbedingungen mögliche Reproduktion, einen kurzen Generationszyklus und die Transparenz seiner Eier aus. Das macht ihn zu einem häufig verwendeten Modellorganismus.*

Zellen aus Leber, Darm oder Kiemen von Fischen lassen sich im Labor kultivieren und vermehren. Eine etablierte Zelllinie lässt sich somit unter Umständen unendliche Male für Forschungszwecke nutzen.



Die Sensitivität des Letalitätstests, der nur zwischen Leben und Tod der Fische unterscheidet, reicht zum Identifizieren der Wirkung von vielen, vor allem in kleinen Dosen vorkommenden Chemikalien nicht aus. Hinzu kommt eine vorgeschriebene Testzeit von knapp 100 Stunden. Für die Ökotoxikologen und die Zelltoxikologen des UFZ liegt die wissenschaftliche Herausforderung also längst nicht mehr im „ganzen Fisch" als Testorganismus. Sie suchen vielmehr Äquivalente, die sensitiver und schneller reagieren und zudem den Charme haben, die Zahl von Tierversuchen zu reduzieren. Neben der Neuentwicklung solcher Tests arbeiten sie daran, bereits existierende Methoden so zu vervollkommnen, zu vereinfachen und zu standardisieren, dass sie in gesetzliche Regelungen einfließen und damit auch außerhalb von Forschungsinstituten genutzt werden können.

Das Beispiel Zelllinien

Basis einer Zelllinie sind einzelne, isolierte Zellen von Organen eines bestimmten Organismus. Gelingt es, diese außerhalb des Organismus, also *in vitro*, zum Wachsen zu bringen, so entsteht eine Zelllinie. Diese ist unter Umständen unendlich kultivierbar und somit immer wieder nutzbar. In der medizinischen Forschung ist die Arbeit mit Zelllinien seit längerem gebräuchlich, beispielsweise um in einem definierten Milieu die Wirkung von Pharmaka zu erproben. Und auch bei der Testung von Kosmetika sollen sie zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen.

Die Idee, Zelllinien vom Fisch für den Umweltbereich zu verwenden, ist vergleichsweise jung; ihre Anwendung steckt noch in den Kinderschuhen. Und doch lassen sich schon eine Reihe kleiner Erfolge vermelden. So entwickelten beispielsweise die UFZ-Wissenschaftler um Dr. Kristin Schirmer gemeinsam mit der Universität in Waterloo (Kanada) eine Strategie, um die Toxizität von Wasserproben mithilfe einer bereits etablierten Fisch-Kiemenzelllinie zu testen. Aufgrund anonym durchgeführter Vergleiche mit herkömmlichen Fischletalitätstests beschloss die kanadische Regierung vor zwei Jahren den Zelllinientest als Alternative für den Einsatz in der Praxis zu prüfen. Mithilfe von Zelllinien – in diesem Fall einer Fisch-Leberzelllinie – gelang es den Wissenschaftlern kürzlich auch, Dioxin ähnliche Schadstoffe im Grundwasser

Gegenwärtig wird intensiv daran gearbeitet, den so genannten Fischeitest als Alternative zum herkömmlichen Fischtest gesetzlich zu etablieren.

Medaka-Eier, acht Stunden nach der Befruchtung

Eier des Zebrabärblings 48 Stunden nach der Befruchtung

eines ehemaligen Industriestandortes in Zeitz (Sachsen-Anhalt) dort nachzuweisen, wo keiner sie vermutet hatte. Außerdem beschäftigt die Wissenschaftler derzeit die Etablierung einer Darmzelllinie aus der Regenbogenforelle. Vom Vergleich der Ergebnisse mit der Kiemenzelllinie erhoffen sie sich unter anderem Informationen zu gewebespezifischen Unterschieden der Tests, zum Beispiel im Hinblick auf Schadstoffaufnahme, -toleranz und Stoffwechsel.

Das Beispiel Fischeitest

Fischeier sind schon seit langem Gegenstand von entwicklungsbiologischen Forschungen. Doch erst seit etwa zehn Jahren nutzen Wissenschaftler sie, um die Wirkung von Chemikalien in aquatischen Systemen zu untersuchen.

Gegenwärtig wird intensiv daran gearbeitet, den so genannten Fischeitest als Alternative zum herkömmlichen Fischtest gesetzlich zu etablieren und eine entsprechende DIN-Norm zu erarbeiten. Während des Tests werden die durchsichtigen, frisch abgelaichten Eier 48 Stunden mit der zu untersuchenden Wasserprobe zusammengebracht, um Embryo schädigende Wirkungen identifizieren und auf die Giftigkeit der Probe schließen zu können.

Solche Wirkungen können beispielsweise eine gestörte Fischentwicklung oder Körpersegmentierung, ein abnormes Körperwachstum, eine fehlerhafte Pigmentierung oder eine Störung des Herzkreislaufsystems sein. Natürlich wird auch noch weiterhin Forschung betrieben. Dr. Eberhard Küster und seine UFZ-Kollegen beispielsweise versuchen, die Sensitivität des Tests zu verbessern und den praktischen Einsatz für die Analyse von Umweltproben weiter zu vereinfachen. Sie arbeiten derzeit an einem Test, der die Wirkung giftiger Stoffe auf Enzyme und Proteine im entwickelten Fischei untersucht und damit hoch sensitiv sein wird.

Die UFZ-Bemühungen, den Fischeitest zu verfeinern, gehen zudem in die molekularbiologische Richtung. So untersuchen die Kollegen um Dr. Stefan Scholz, ob im Fischei solche Gene als reguliert identifiziert werden können, die als Markergene eine chronische Wirkung anzeigen können. Sollte dies gelingen, könnten künftig insbesondere die aufwändigen und teuren Langzeitversuche mit Fischen, so genannte chronische Tests, eingeschränkt werden. ■

Wenn Schadstoffe in hohen Konzentrationen die Umwelt erreichen, können sie akut giftig auf Organismen wirken und sogar zu ihrem Tod führen. Solche Fälle gibt es noch an vielen Orten der Erde – zum Beispiel verursacht durch Chemieunfälle oder durch generell mangelnde Umweltüberwachung. Tendenziell geht diese Art der Verschmutzungen jedoch zurück. Kopfzerbrechen bereiten den Wissenschaftlern in aller Welt heute eher die Schadstoffe, die in nur geringen Konzentrationen in die Umwelt gelangen. Sie zeigen zwar keine solch' offensichtliche Wirkung auf Organismen, könnten aber ihre Gesundheit langfristig und nachhaltig negativ beeinflussen. Bei der Suche nach der Wirkung dieser Substanzen bringen traditionelle wissenschaftliche Methoden den Forschern nicht den gewünschten Erfolg. Deshalb schauen einige von ihnen in die Zellen hinein. Denn dort greifen alle Chemikalien zuerst an und entfalten ihre Wirkung. Aber welche Teile der Zelle reagieren auf Schadstoffe? Welche Mechanismen stecken dahinter und mit welchen Methoden können sie erkannt werden?

Susanne Hufe

Die Zelle als Zielort

Nur wenige Mikrometer groß sind sie, die Zellen – Grundbausteine des Lebens. Zum Teil hoch spezialisiert und zu Geweben und Organen verbunden, bilden sie mehrzellige Organismen. Der menschliche Körper zum Beispiel vereint zirka 100 Billionen Zellen in etwa 220 verschiedenen Zell- und Gewebetypen. Trotz dieser Verschiedenheit verbindet alle Zellen eine Reihe von Gemeinsamkeiten in ihrem Bauplan und ihren grundlegenden Fähigkeiten. So verfügen sie alle über Membranen, die sie nach außen abgrenzen, sowie über genetische Information, gespeichert in Nukleinsäuren wie der DNA. Zellen teilen sich, haben einen Stoffwechsel und bauen – je nach Zelltyp – verschiedene Proteine auf. Die wiederum können chemische Reaktionen beschleunigen oder hemmen, ermöglichen die Kontraktion von Muskeln oder transportieren den Sauerstoff im Blut.

Diese Gemeinsamkeiten machen Zellen für Toxikologen zu einem „universellen" Forschungsobjekt, an dem sie – stellvertretend für eine Vielzahl von Organismenarten – die Wirkung von Chemikalien testen und sowohl allgemeingültige als auch spezifische Aussagen zu deren Toxizität treffen können.

Was passiert, wenn Schadstoffe auf Zellen treffen?

Im Laufe von vielen Millionen Jahren haben die Zellen gelernt, flexibel auf sich ändernde Umweltbedingungen zu reagieren – eine natürliche Überlebensstrategie, die sie auch bei der Konfrontation mit anthropogenen, also vom Menschen erzeugten Schadstoffen abrufen.

Dreh- und Angelpunkt der zellulären Antwort auf Schadstoffe sind in vielen Fällen die auf molekularer Ebene stattfindenden Veränderungen in der Regulation von Genen. Die einzelnen Mechanismen, die sich dahinter verbergen, sind hoch komplex und vielfältig. Einige davon sind bekannt – ebenso viele jedoch unerforscht. So weiß man von Chemikaliengruppen, die die Durchlässigkeit von Membranen und damit die Kalziumkonzentration in der Zelle verändern.

Quelle: IWF Wissen&Medien gGmbH, Göttingen

Anschnitt einer tierischen Zelle im 3D-Modell

Der Zellkern ist die Informations- und Steuerungszentrale der Zelle. In ihm liegt das Erbgut der Zelle, die DNA, zu Chromatin verpackt. Durch Poren in der Kernhülle findet der Stoffaustausch mit den im Zellplasma befindlichen Zellorganellen statt wie beispielsweise der Transport der mRNA zu den Ribosomen, wo mithilfe deren Information Proteine synthetisiert werden.

Folge dessen sind Veränderungen der Enzymaktivitäten sowie in der Expression von Genen, die eine Rolle beim Auslösen von Apoptose, dem programmierten Zelltod, spielen. Andere Schadstoffe binden sich an Zell-Proteine oder inaktivieren diese und führen so zur Induktion so genannter Stressgene. Dritte wiederum wirken spezifisch und induzieren nur bestimmte Gene. Und damit es richtig kompliziert wird, können all diese Effekte auch gleichzeitig auftreten und sich schließlich und endlich noch überlagern.

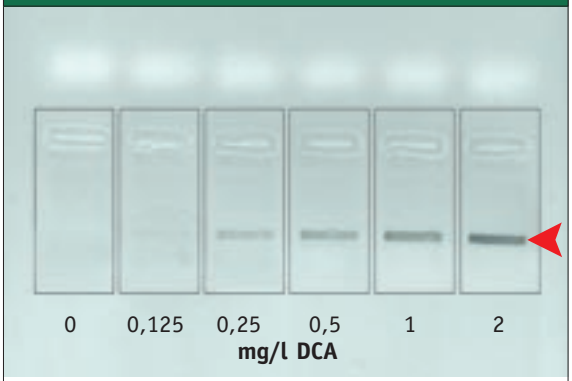
Ein Beispiel: Es gibt eine Reihe von Schadstoffen, dazu zählen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) und (poly)chlorierte Biphenyle (PCBs), die sich nach ihrem Eintreten in die Zelle an ein bestimmtes Protein, einen Rezeptor, binden können. Die Zelle reagiert darauf mit einer verstärkten Expression des Gens Cytochrom P4501A. Das Produkt, ein Enzymkomplex, ist mit verantwortlich für den Abbau von Schadstoffen – dessen Synthese stellt also eine Abwehrreaktion der Zelle dar. Negativer Nebeneffekt: Manchmal entstehen giftigere Produkte als es die aufgetroffenen Schadstoffe waren. Diese nun reagieren mit weiteren Zellbestandteilen und rufen dadurch toxische Effekte hervor. Wenn man also die verstärkte Expression von Cytochrom P4501A nachweisen kann (zum Beispiel bei Fischen in verschmutzten Gewässern), so kann man einerseits ein möglicherweise unbekanntes Schadstoffspektrum eingrenzen und andererseits die Aussage treffen, dass eine schädliche Wirkung auf Organismen zu befürchten ist.

WISSENSWERTES

Gene als Baupläne

Gene sind die Träger der Erbinformationen – so formuliert man es häufig im allgemeinen Sprachgebrauch. Im molekularbiologischen Sinne ist ein Gen in der Regel der Bauplan einer Aminosäuresequenz eines Proteins. Dieser Bauplan liegt verschlüsselt in Form einer Nukleotid-Sequenz in Nukleinsäuren, der DNA (Desoxyribonukleinsäure), vor. Erstaunlicherweise reichen für diese Verschlüsselung vier Grundbausteine, die vier organischen Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin. Deren Abfolge ist charakteristisch für jedes Gen. Je eine von ihnen bildet in Kombination mit einem Zuckermolekül (Desoxyribose) und einem Phosphatsäurerest ein Nukleotid. Die Gemeinschaft von drei Nukleotiden – das Triplet – enthält den Bauplan für eine Aminosäure, mehrere Triplets demzufolge für ein Protein.

Das Resultat einer PCR



Das Resultat einer PCR (grafisch überarbeitet) – hier die Induktion von Cytochrom P4501A durch Dichloranilin (DCA), einer stark giftigen Chemikalie. Mit ansteigender Konzentration an DCA sind Banden wachsender Intensität zu sehen. Sie zeigen, dass höhere DCA-Konzentrationen zu einer stärkeren Expression des Gens führen. Es ist auf dem Gel mit einer Bande der Größe von 330 Basenpaaren repräsentiert (roter Pfeil).

WISSENSWERTES

Die Umsetzung der Baupläne – Genexpression

Von „Genexpression" spricht man allgemein, wenn man die Übersetzung der in einem Gen gespeicherten Information in seine spezielle Funktionseinheit in der Zelle (Gen-mRNA-Protein) meint. In groben Zügen umfasst das zwei Schritte:
Bei der **Transkription** werden die in den Genen verschlüsselten Informationen, sprich die spezielle Nukleotidsequenz, zu einem komplementären Abdruck „kopiert" – vergleichbar mit einem Bild von einem Negativ. Die dabei entstehende Boten-Ribonukleinsäure, kurz m-RNA, verlässt den Zellkern und gelangt zu den Ribosomen, den Zellorganellen, die für die Proteinbiosynthese zuständig sind.
Während der **Translation** wird die in der m-RNA enthaltene Information in eine Aminosäuresequenz umgeschrieben, die in ihrer Gesamtheit ein Protein bildet. Jedes Protein wird – entsprechend des Zelltyps und des jeweiligen Zustandes der Zelle – in einer bestimmten Menge hergestellt.

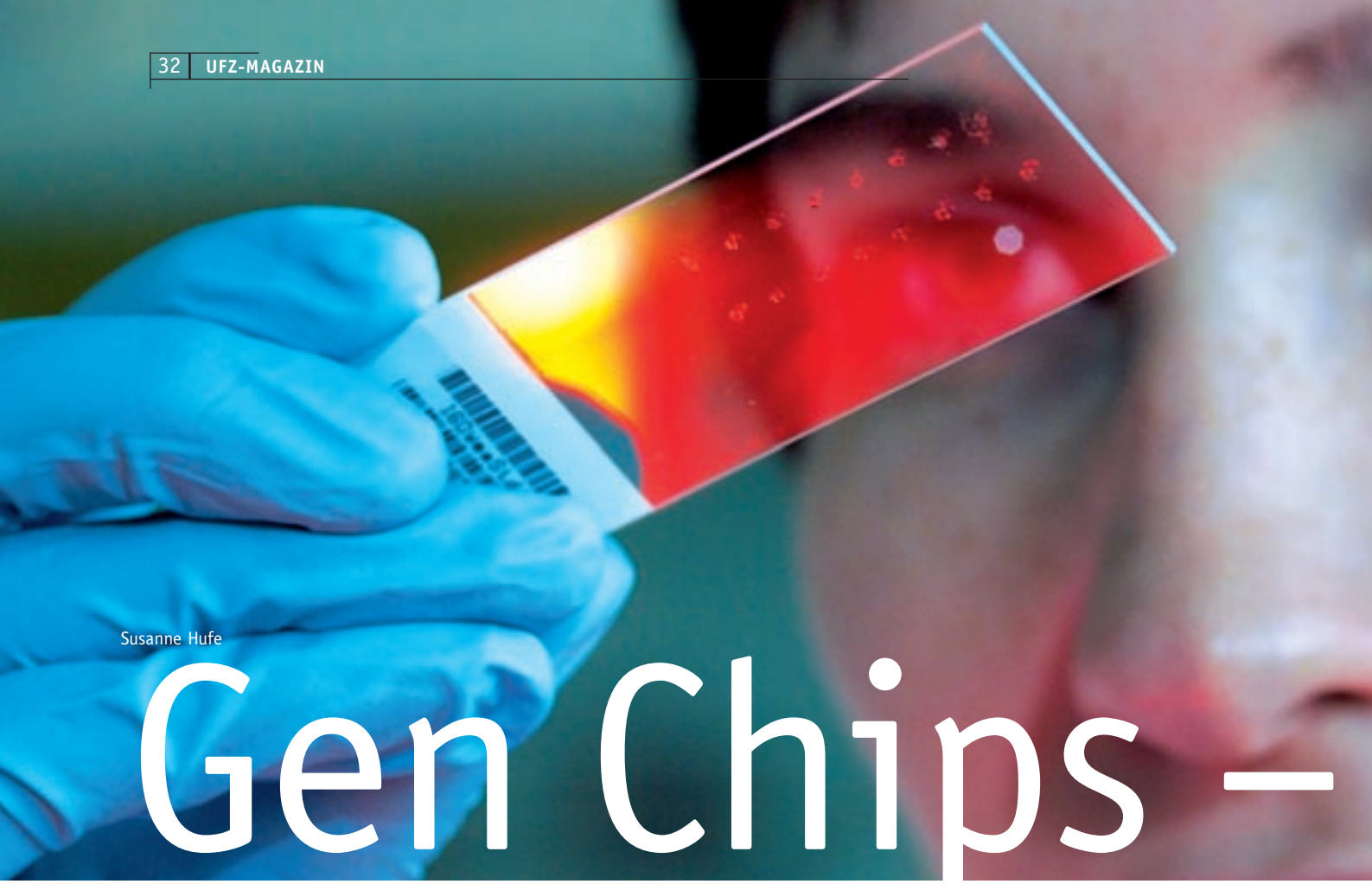
Wie wird Genexpression „sichtbar"?

Man bedient sich dabei eines seit den 1980er Jahren bekannten molekularbiologischen Verfahrens, der Polymerasekettenreaktion (PCR). Sie ermöglicht es, DNA-Abschnitte durch wiederholte Verdopplung in mehreren Zyklen mithilfe eines Enzyms, der DNA-Polymerase, künstlich zu vervielfältigen. Der US-amerikanische Biochemiker Kary Mullis erhielt für diese Entwicklung 1983 den Nobelpreis für Chemie. Die vervielfältigten DNA-Abschnitte kann man sichtbar machen, indem man sie in einem elektrischen Spannungsfeld auftrennt (Elektrophorese) und mit einem Farbstoff anfärbt. Heute, natürlich weiter entwickelt, gehört die PCR zur Standardausrüstung in jedem biologischen oder medizinischen Forschungslabor, beispielsweise um Erbkrankheiten zu untersuchen, genetische Fingerabdrücke zu erstellen oder eine mögliche Vaterschaft zu testen.

Will man die PCR für den Nachweis einer Genexpression nutzen, geschieht dies durch Vervielfältigung der Boten-RNA des entsprechenden Gens. Da die PCR jedoch nur mit DNA und nicht mit RNA funktioniert, nutzt man einen kleinen Trick: Mit einem aus Viren isolierten Enzym stellt man zunächst eine DNA-Kopie der RNA her und benutzt diese dann für die PCR. Schlägt man den gedanklichen Bogen zurück zum Beispielgen Cytochrom P4501A, so erkennt man mithilfe der PCR, ob ein Schadstoff dieses Gen „angeschaltet" hat und es demzufolge zu einer Zellen- bzw. Organismen schädigenden Wirkung kommen kann.

In vielen Fällen haben die Wissenschaftler jedoch – anders als beim Cytochrom P4501A – noch keine Informationen darüber, welche Gene durch einen bestimmten Schadstoff in ihrer Expression verändert werden. Bedenkt man, dass eine Zelle tausende verschiedene Gene besitzt, so scheint die Suche nach demjenigen, das auf den Schadstoff mit veränderter Expression reagiert, vergleichbar mit der berühmten Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Es sei denn, es würde gelingen, eine sehr große Anzahl von Genen in einem Arbeitsgang zu testen … ■

Der Text entstand auf der Basis von Arbeiten und unter Mitwirkung von Dr. Kristin Schirmer und Dr. Stefan Scholz. Dr. Kristin Schirmer ist Leiterin des UFZ-Departments Zelltoxikologie, Dr. Stefan Scholz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in diesem Department.



Susanne Hufe

Gen Chips – 10.000 auf einen Streich

Um falschen Schlüssen sofort vorzubeugen – in diesem Beitrag geht es nicht um genmanipulierte Kartoffelchips. Vielmehr dreht sich alles um die Anwendung der Chiptechnologie in der Molekularbiologie. DNA-Chips gibt es dort tatsächlich – zumeist allerdings in medizinischen und pharmakologischen Forschungslabors. Doch auch andere Bereiche wie Lebensmittel- und Agrarforschung sowie Umweltforschung beginnen, sie für sich zu entdecken. Denn mit ihrer Hilfe ist man in der Lage, innerhalb kürzester Zeit tausende von Genen genau unter die Lupe zu nehmen.

Der Chip, wissenschaftlich korrekt Mikroarray, ist ein etwa 2,5 x 7,5 Zentimeter kleiner Objektträger aus Glas. Spezielle Techniken machen es möglich, auf diesem unscheinbaren Plättchen aus Glas zehntausende von DNA-Stücken zu fixieren. Jedes DNA-Stück erscheint als ein winziger, etwa 100 Mikrometer großer Punkt auf dem Chip, in ihrer Gesamtheit ergeben sie ein Raster aus tausenden von Punkten. Das Gegenstück zum Chip bildet eine konkret zu untersuchende Probe. Sie kann je nach Forschungsziel aus dem Freiland stammen, beispielsweise von Fischen aus Schadstoff belasteten Gewässern. Oder sie stammt aus einem Laborexperiment, in dem Zellen oder Zellkulturen mit bestimmten Chemikalien beimpft werden. Unabhängig davon liegt der Idee die Annahme zugrunde, dass sich eine Veränderung der Umweltbedingungen in einer Veränderung der Boten-RNA, dem Bindeglied zwischen den in der Erbsubstanz enthaltenen Genen und den Proteinen, widerspiegelt. Deshalb stellen die Forscher eine Kopie der Boten-RNA der Zellen her, die sogenannte cDNA, und markieren sie mit einem fluoreszierenden Farbstoff.

Der Gen-Chip.

Ein unscheinbares Glasplättchen, das es in sich hat.

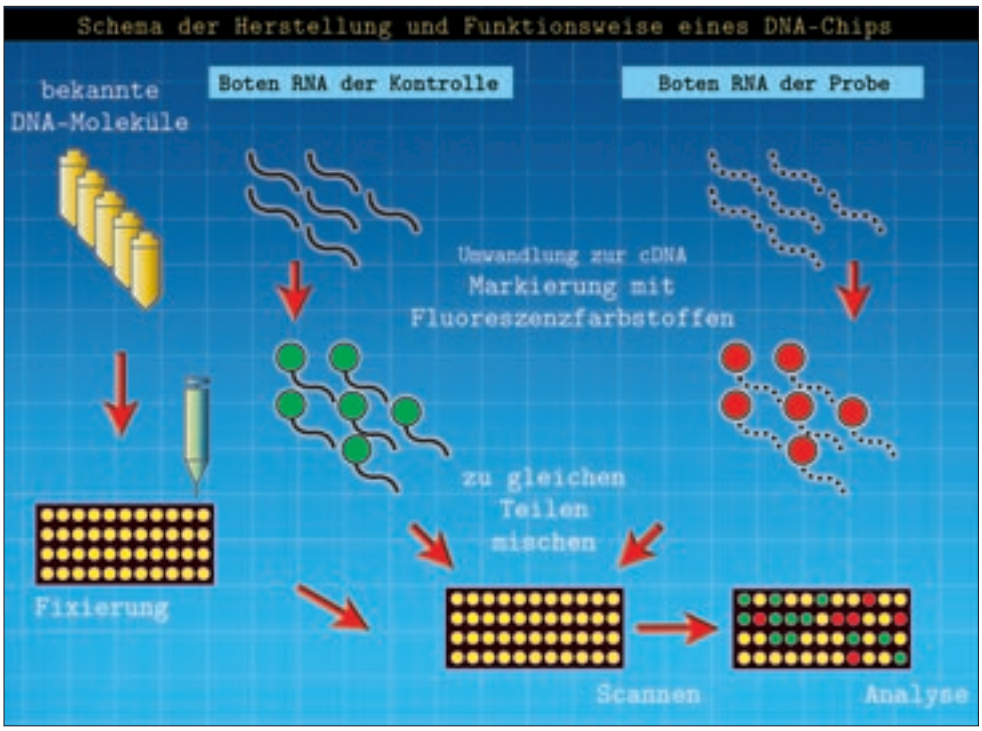
Chip und cDNA werden danach zusammengebracht, woraufhin sich die cDNA der Probe sofort an das für sie passende Gegenstück auf dem Objektträger bindet. Ist in einer Probe mehr cDNA eines Gens vorhanden, bindet sie in entsprechend großer Menge. Und da sie fluoreszierend markiert ist, leuchtet sie in entsprechender Intensität. Ein spezieller Laserscanner tastet den Chip ab und gibt den Wissenschaftlern Informationen über die Stärke der Fluoreszenzsignale. So können Veränderungen in der Menge der Boten-RNA einzelner Gene erkannt werden.

Darüber hinaus macht es die Chiptechnologie möglich, Schadstoff belastete und unbelastete Proben (als Kontrolle) in einem Arbeitsgang zu analysieren. Dazu markieren die Wissenschaftler die cDNAs mit zwei unterschiedlich fluoreszierenden Farbstoffen. Die Überlagerung der Fluoreszenzsignale und deren digitale Verarbeitung liefern dann eine farbige Darstellung des Ergebnisses. So kann Rot zum Beispiel eine erhöhte Menge der Boten-RNA, Grün eine reduzierte und Gelb eine unveränderte Menge der Boten-RNA eines Gens im Vergleich zur Kontrolle anzeigen.

Das alles klingt zunächst sehr einfach und riecht geradezu nach hervorragender Eignung für Routineanalysen in der Praxis. Leider stehen dem momentan noch einige Hürden im Weg. Vor allem die Auswertung der riesigen Datenmengen, die zehntausende fluoreszierende Messpunkte umfassen kann, gestaltet sich schwierig und aufwändig. So kann der Laborarbeit von zirka einer Woche ohne weiteres eine Datenauswertung über mehrere Monate hinweg folgen. Ein zweiter Grund, der einer Routineanwendung entgegensteht, ist der hohe Preis für den Kauf eines Chips – immerhin bis zu 500 Euro. Und schließlich ist die Nutzung dadurch beschränkt, dass Chips gegenwärtig nur für solche Modellorganismen zur Verfügung stehen, deren Genom bereits vollständig oder zumindest zu einem Großteil entschlüsselt ist. Das ist bislang nur bei einigen Tieren, unter anderem bei der Maus und dem Zebrabärbling, einer Fischart, sowie dem Menschen der Fall. All diese Gründe führen dazu, dass Gen-Chips derzeit hauptsächlich in der Forschung eingesetzt werden, beispielsweise um Schlüsselgene zu identifizieren oder um weitere Informationen über die Funktion einzelner Gene zu gewinnen.

Prognosen für diese Technologie sind verheißungsvoll. Schenkt man ihnen Glauben, so trägt sie ein Potenzial in sich, das weltweit Milliarden Dollar Gewinne verspricht. Neben Pharma-, Agrar- und Lebensmittelbranche betrifft das auch den Umweltbereich. Angesichts dieser enormen Potenzen scheint es nur eine Frage der Zeit, bis DNA-Chips eine breitere Anwendung finden. ■

Der Text entstand auf der Basis von Arbeiten und unter Mitwirkung von Dr. Kristin Schirmer und Dr. Stefan Scholz. Dr. Kristin Schirmer ist Leiterin des UFZ-Departments Zelltoxikologie, Dr. Stefan Scholz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in diesem Department.



Susanne Hufe

Falschsp unterwe

Hormone sind körpereigene Signalmoleküle. Beim Menschen sollen es bis zu 156 verschiedene sein, die in einem hoch komplexen System unter anderem den Blutzuckerspiegel, das Wachstum oder den Sexualzyklus regulieren. Es ist ein System, das bei allen Organismen funktionsgemäß sehr sensibel reagieren muss, dadurch jedoch störanfällig ist.

ieler gs

Auch künstlich hergestellte Hormone, die in vielen Medikamenten wie beispielsweise in der Pille enthalten sind, gelangen über den Stoffwechsel in unsere Abwässer und sind dort zunehmend zu finden.

Aus diesem Blickwinkel diskutiert man zunehmend die Rolle von Hormonen, die durch Menschenhand in die Umwelt gelangen und dort, zwar in kleinen Mengen, aber doch stetig und unspezifisch durch Tiere und Menschen aufgenommen werden. Gleiches gilt für chemische Substanzen, die selbst keine Hormone sind, jedoch so tun als ob. Das sind die Falschspieler.

Eine zunehmende Anzahl von wissenschaftlichen Studien in aller Welt belegt sowohl die Existenz hormonähnlich wirkender Stoffe in der Umwelt als auch ihre lange Zeit angezweifelte und zum Teil heute noch umstrittene Gefahr für Organismen. Im Mittelpunkt der Diskussionen stehen Chemikalien, die – obgleich sie eine andere chemische Struktur als Hormone haben – in Organismen die gleichen Wirkungen hervorrufen können. Belege für Deregulationen, die damit in Zusammenhang stehen, gibt es bislang für verschiedene, im Wasser lebende Tiere. So treten bei einigen Fischarten vermehrt Zwitter auf, und bei männlichen Fischen wurde die Bildung von Dotterproteinen beobachtet – beides Indizien dafür, dass hormonwirksame Stoffe in unsere Gewässer gelangt sind. Noch ist unklar, ob die in westlichen Ländern beim Menschen vermehrt auftretenden Fruchtbarkeitsstörungen sowie die Zunahme an Brust- und Hodenkrebserkrankungen ebenfalls auf diese Substanzen zurückzuführen sind. Diese Annahmen sind Grund genug für eine Palette von Forschungsaktivitäten an Instituten wie dem UFZ. Sie haben das Ziel, die zugrunde liegenden Vorgänge aufzuklären und Methoden für einen wirksamen Schutz zu erforschen.

Erstmals wurde Anfang der 1980er Jahre vom Zusammenhang zwischen Entwicklungs- und Reproduktionsstörungen von Vögeln mit einem hormonell wirksamen Umweltschadstoff, dem Insektizid DDT, berichtet. Ausgehend von dieser im Wissenschaftsmagazin „Science“ publizierten Studie, wurden in den Folgejahren zahlreiche Industriechemikalien als Verursacher hormonartiger Wirkungen in der Umwelt nachgewiesen. Beispielsweise wurden polychlorierte Biphenyle (PCBs), die über viele Jahre wegen ihrer Hitzebeständigkeit unter anderem in Hydraulikölen und Transformatoren verwendet worden waren, als Verursacher für eine niedrige Reproduktionsrate und ein gestörtes Immunsystem bei europäischen Robben identifiziert – die Herstellung wurde in der Bundesrepublik 1989 verboten. Tributylzinn, ein Biozid, das Fäulnis an

Quelle: Photodisc®Environmental Concerns

Mit Abwässern können pharmazeutische Reststoffe und hormonähnlich wirkende Substanzen in Spurenkonzentrationen in unsere Oberflächengewässer gelangen. Ihre Wirkung auf bestimmte Tiere ist erwiesen, die auf den Menschen ist umstritten.

Wer weiß heute noch, was Natur ist und was reine Chemie? Um die Trageeigenschaften von Textilien stetig zu verbessern, kommen eine Reihe von Chemikalien zum Einsatz. Nicht alle davon sind der Gesundheit des Menschen zuträglich. So fand man Di- und Tributylzinn in T-Shirts und Sporttrikots, Chemikalien, die man wegen ihrer antimikrobiellen Wirkung den Stoffen zusetzte, die jedoch im Verdacht stehen, das Hormonsystem des Menschen zu beeinflussen.

Schiffsrümpfen verhindern soll, gilt als Auslöser einer Vermännlichung weiblicher Schnecken. Und Dicofol, ein heute in Deutschland verbotenes Pflanzenschutzmittel, führte zu drastischen Fehlbildungen der Fortpflanzungsorgane männlicher Alligatoren im See Apoka im US-Bundesstaat Florida. Es zeigte sich ebenfalls, dass nicht ausschließlich die Chemikalien selbst, sondern auch deren Abbauprodukte hormonell wirken. So führt Nonylphenol zur Verweiblichung. Eingesetzt wird es als Antioxidationsmittel bei der Herstellung von PVC. Es entsteht aber auch als Abbauprodukt einer Gruppe von Chemikalien, die in Pestiziden, Reinigungsmitteln oder Cremes verwendet werden.

Viele Chemikalien, die als Hormonfalschspieler identifiziert sind, werden großtechnisch hergestellt. Sie werden zum Teil in enormen Mengen in Handel und Gewerbe vertrieben und gelangen über viele Produkte in den menschlichen Lebensraum.

Da man davon ausgeht, dass viele der hormonell wirksamen Substanzen über das Abwasser aus der Chemie- oder Pharmaindustrie aber ebenso aus den Haushalten, in die Umwelt gelangen, wäre es aus Gründen der Vorsorge wichtig, beispielsweise an Kläranlagenausläufen eine entsprechende Prüfung durchzuführen.

Geeignete Methoden für die routinemäßige Anwendung, die schnell und umfassend solche Substanzen und deren Wirkungen identifizieren könnten, gibt es bislang nur ansatzweise. Chemische Analysen identifizieren beispielsweise nur Substanzen, die bereits als Hormon regulierend bekannt sind. Kombiniert mit einem biologischen Test kann man diese Lücke schließen, muss jedoch in Kauf nehmen, dass nur einzelne der vielen möglichen Wirkweisen angezeigt werden. Man müsste viele verschiedene Tests anwenden, um ein umfassendes Ergebnis zu erzielen.

Auch hier könnte der DNA-Chip eine Alternative bieten. Mit der Spezifikation auf Hormone und mit entsprechend ausgewählten Genen könnte ein solcher Chip in einem Detektionsschritt möglichst viele potenzielle Wirkweisen erfassen. Die Zelltoxikologen des UFZ jedenfalls sind überzeugt von dieser Idee und arbeiten seit 2002 mit mehreren Forscherkollegen im In- und Ausland an der Entwicklung solcher Arrays. ■

WISSENSWERTES

Stoffe, die Hormone simulieren, gelangen im Falle von einigen Industriechemikalien durch Menschenhand in unsere Umwelt. Die Natur ist aber auch voll von natürlich vorkommenden Substanzen mit hormonellen Eigenschaften. Bekannteste Vertreter sind die pflanzlichen Östrogene (Phytoöstrogene). Sie haben in den letzten Jahren einen enormen Markt im pharmazeutischen Bereich erobert und werden angepriesen als Wundermittel im Kampf gegen Osteoporose, Wechseljahresbeschwerden und Brustkrebs bei Frauen sowie Herzinfarkt und Schlaganfall. Auch die Kosmetikindustrie hat sie für sich entdeckt und vertreibt phytoöstrogenhaltige Cremes en masse als Anti-Aging-Mittel. Wissenschaftliche Studien können jedoch diese Wirkungen nur zum Teil bestätigen, auch sind die genauen Wirkmechanismen und biologischen Konsequenzen nicht vollständig geklärt. Sie sind das Ziel vieler wissenschaftlicher Untersuchungen weltweit und Gegenstand kontroverser Diskussionen.

Quelle: NASA/Kennedy Space Center

Von hormonellen Wirkungen betroffen sind vor allem marine Lebewesen.

Quelle: Dr. Joachim Plötz, AWI Bremerhaven

Reines Trinkwasser

In fünf Wasserwerken fördern die Kommunalen Wasserwerke Leipzig (KWL) täglich rund 75.000 Kubikmeter Wasser. Um die Versorgung im Großraum Leipzig zu sichern, kommen etwa 25.000 Kubikmeter über die Fernwasserversorgung aus der Region Torgau hinzu. Wir sprachen mit Sonja Riebe, Bereichsleiterin Betriebslabor, über die Reinhaltung des Trinkwassers.

Sonja Riebe ist Bereichsleiterin im Betriebslabor der Kommunalen Wasserwerke Leipzig (KWL).

FRAGE: Woraus speisen sich die vier Großwasserwerke, die die Region Leipzig mit Trinkwasser versorgen?
Die Wasserwerke Naunhof I und II aus Grundwasser, das Wasserwerk Canitz zudem zu zirka 30 Prozent aus Uferfiltrat, und das Wasserwerk Thallwitz erfasst überwiegend Uferfiltrat – darunter versteht man Wasser, das im Uferbereich eines Flusses versickert, bei der Bodenpassage gereinigt und über Brunnen ins Wasserwerk gefördert wird.

FRAGE: Das Wasser reinigt sich selbstständig – das Labor ist überflüssig?
Nein. Trinkwasser muss per Gesetz ständig analytisch kontrolliert werden, denn Trinkwasser soll natürlich frei von Krankheitserregern, rein und genusstauglich sein. Wir untersuchen täglich die bakteriologischen Parameter, den pH-Wert, die Leitfähigkeit, die Trübung und die organoleptischen Faktoren Farbe, Geruch, Geschmack.

FRAGE: Und Sie kontrollieren relativ häufig Schwermetalle?
Das Flusssediment der Mulde stammt vor allem aus dem Erzgebirge, und wie der Name sagt, sind dort vielfach erzreiche Gesteine anzutreffen. Diese werden noch heute von der Mulde in das Gebiet von Naunhof sowie von Canitz und Thallwitz gebracht. Daher beinhalten die Flussablagerungen auch in geringen Mengen die Schwermetalle Arsen, Cadmium und teils Nickel.
Cadmium und Arsen entfernen wir in unseren Wasserwerken mittels Eisenfiltration. Um den Grenzwert für Nickel einzuhalten, der in der novellierten Trinkwasserverordnung vom 1. Januar 2003 von 40 auf 20 Mikrogramm pro Liter abgesenkt wurde, müssen wir zusätzliche neue Aufbereitungsverfahren anwenden.

FRAGE: Ein ziemlicher Aufwand?
Ja. Aber nichts ist unmöglich – es gibt verschiedene Verfahren, um Nickel zu eliminieren. Derzeit testen wir mit dem Leipziger Institut für Energetik verschiedene Verfahren. Voraussichtlich werden wir uns für einen chelatbildenden Ionenaustauscher entscheiden, dabei wird Nickel gebunden und dem Wasser entzogen.

FRAGE: Bringt die neue Trinkwasserverordnung weitere vergleichbare Änderungen?
Am deutlichsten greift die Novellierung in die bakteriologischen Untersuchungen ein. Hier vollzog sich ein Wechsel von qualitativen zu quantitativen Methoden. Nach der jetzigen Trinkwasserverordnung untersuchen wir Indikatorparameter wie coliforme Keime und *E.-coli* – dabei verletzt schon ein Keim auf 100 Milliliter den Grenzwert. Zudem wurden Enterokokken in die reguläre Untersuchung aufgenommen. Diese sind im Wasser lebensfähiger als *E.-coli* und können auf eine bereits länger zurückliegende fäkale Verschmutzung hinweisen. Neu hinzugekommen ist auch der Umweltkeim

WISSENSWERTES

1 Leben = 60.000 Liter Wasser

Eine gigantische Menge Trinkwasser, die ein Mensch im Verlauf seines Lebens aufnimmt. Sie entspricht rund 182.000 großen Gläsern – sauber, rein und klar, wie es die Trinkwasserverordnung schon seit 1892 vorschreibt. Wasserquelle ist sowohl das Grundwasser als auch das Oberflächenwasser aus Flüssen, Seen oder Talsperren. Grundwasser heißt auch Rohwasser – und das ist in Leipzig gerade aus dem Muldetal von nachgewiesen hoher Qualität. Damit Trinkwasser in aller Frische – Härtegrad 3, pH-Wert zwischen 7,4 und 7,9 – aus dem Hahn fließen kann, durchläuft es einen mehrstufigen Reinigungs- und Filterungsprozess. Im Labor wird es auf seine Reinheit geprüft und auf den Geschmack hin untersucht – schließlich ist es Lebensmittel Nummer Eins.

Clostridium perfringens, einschließlich seiner Sporen. Dieser Parameter fungiert als Indikator für chlorresistente Parasiten – wird Oberflächenwasser und Uferfiltrat zur Aufbereitung von Trinkwasser genutzt, können sie von Bedeutung sein. Und schließlich geht es um die Prüfung der Zahl der Bakterienkolonien. Das ist eine einfache, aber bewährte Methode, um Trinkwasser hygienisch zu beurteilen.

FRAGE: Umwelt- und Verbraucherverbände kritisieren zunehmend persistente, gentoxische und karzigene Stoffe …

Gemäß der Trinkwasserverordnung untersuchen wir auch auf solche Stoffe. Hier sind vor allem die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, chlororganische Substanzen, polychlorierte Biphenyle und Schwermetalle zu nennen. Diese sind, ebenso wie die Schwermetalle, zum Teil geogen bedingt. Zunehmend werden sie aber auch durch menschliche Einflüsse ins Grundwasser eingebracht.

FRAGE: Lässt sich das regeln?

Nur bedingt – indem wir intensiv kontrollieren. Für die Wasserwerke Canitz, Thallwitz und Naunhof, deren Einzugsgebiete überwiegend landwirtschaftlich genutzt werden, haben wir ein ausgedehntes Pegelmessfeld aufgebaut. Daran können wir frühzeitig erkennen, ob sich die Beschaffenheit des Rohwassers verändert. Und mithilfe moderner Aufbereitungstechniken können fast alle Stoffe aus dem Wasser entfernt werden.

FRAGE: Also ist es egal, was in den Abguss fließt – die Wasserwerke holen schon alles wieder raus?

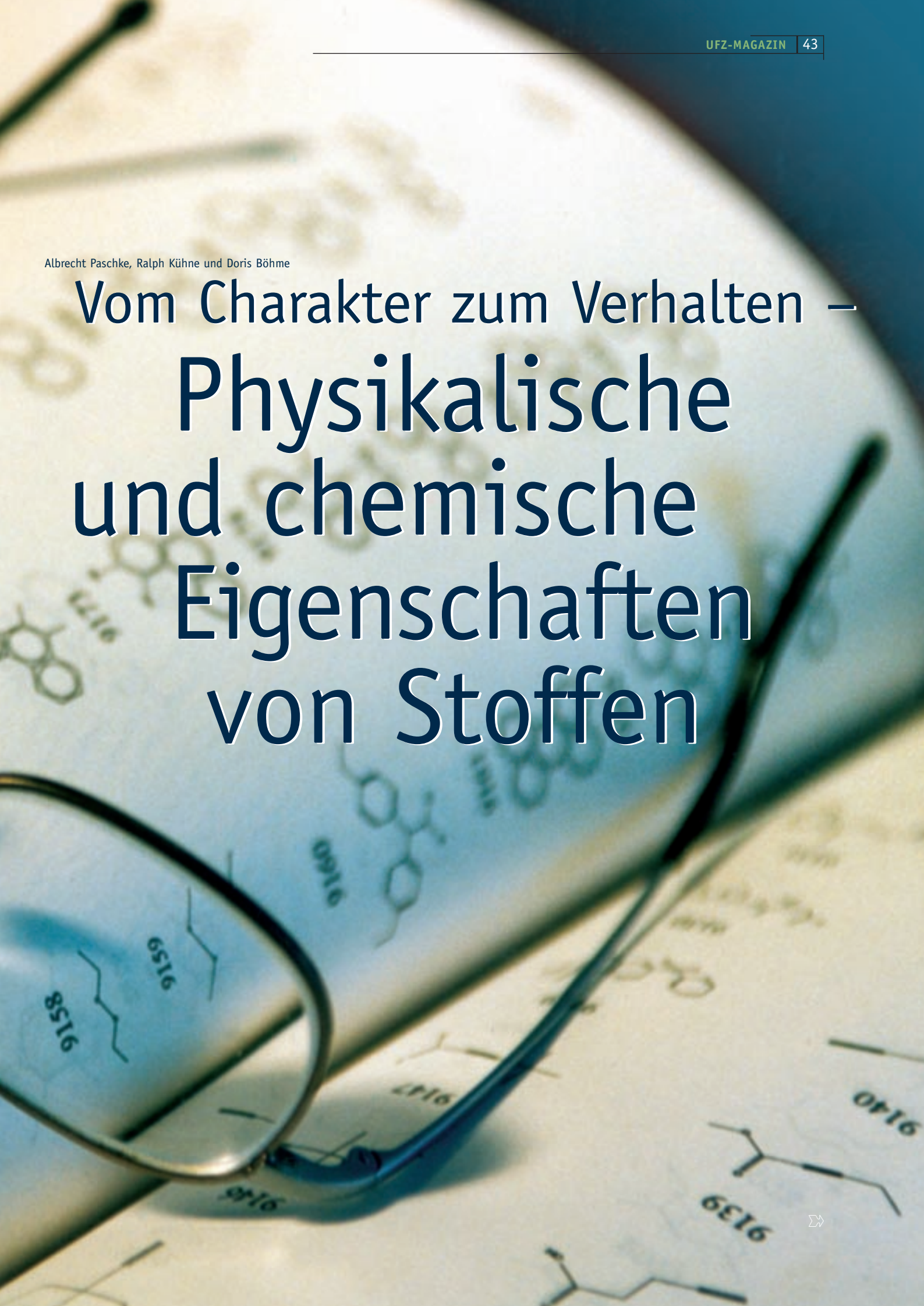
Nein! Das wäre ein großes Problem und auch teuer. Nach wie vor ist der Ressourcenschutz die beste Lösung. Im Einzugsgebiet unserer Großwasserwerke betreiben wir aktiv Ressourcenschutz. Durch ökologischen Landbau konnte beispielsweise der Nitratgehalt im Rohwasser deutlich verringert werden. ■

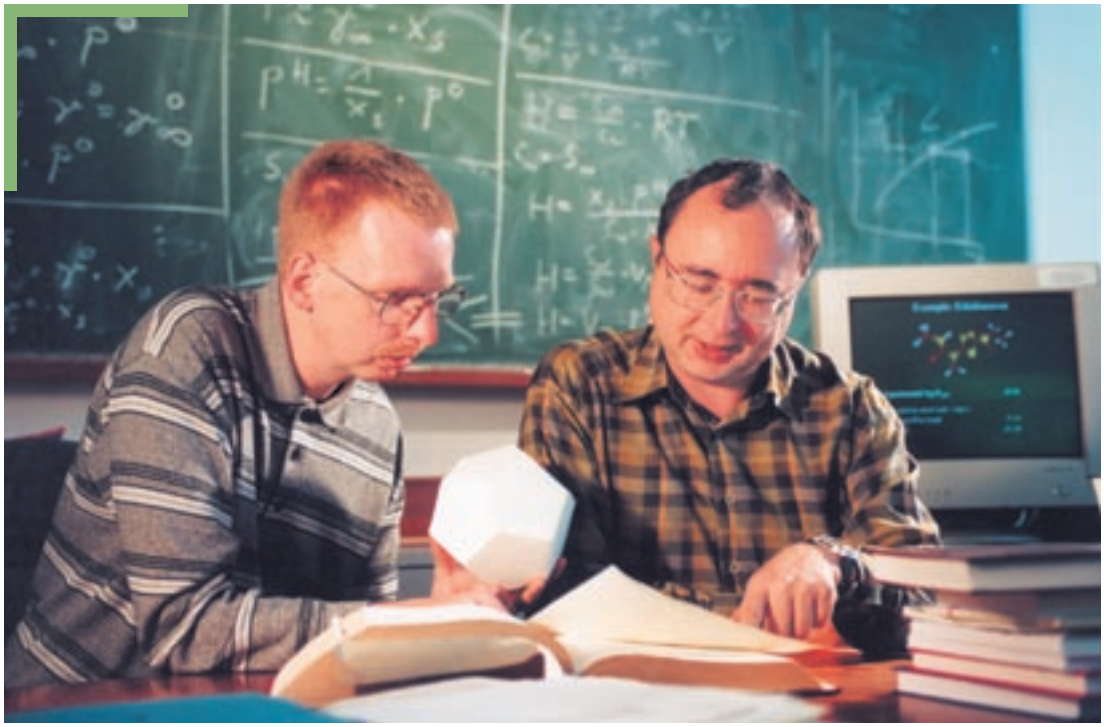
Das Gespräch führte: Daniela Weber

In einem braunen Bach kommt ein Großteil des Leipziger Abwassers im Klärwerk Rosenthal, dem größten der 30 von der KWL betriebenen Klärwerke, an. Es durchläuft eine mechanische Klärung, eine chemische Reinigungsstufe und wird schließlich mithilfe von Mikroorganismen biologisch geklärt. Danach wird es in den Vorfluter, die Luppe, eingeleitet.

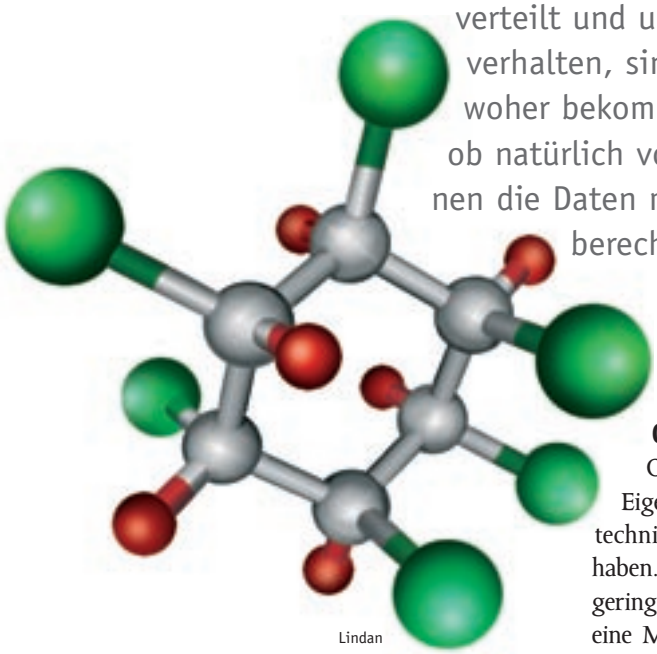
Albrecht Paschke, Ralph Kühne und Doris Böhme

Vom Charakter zum Verhalten – Physikalische und chemische Eigenschaften von Stoffen





Menschen verhalten sich normal oder eigenartig, sie reagieren vorhersehbar oder überraschend. Je genauer wir ihren Charakter und ihre Eigenschaften kennen, desto leichter fällt es uns, vorherzusagen, was sie in bestimmten Situationen und unter bestimmten Bedingungen tun. Mit Chemikalien ist es ähnlich: Je genauer wir sie kennen, desto leichter lässt sich vorhersagen, wie sie sich in der Umwelt verhalten, wie sie transportiert, verteilt und umgewandelt werden. Entscheidend dafür, wie sie sich verhalten, sind physikalische und chemische Eigenschaften. Doch woher bekommen wir dieses Wissen über chemische Verbindungen – ob natürlich vorkommende oder technisch synthetisierte? Wir können die Daten messen, sie aber auch aus ihrer chemischen Struktur berechnen. Dabei schließen sich Messung und Berechnung nicht aus, sondern ergänzen einander.

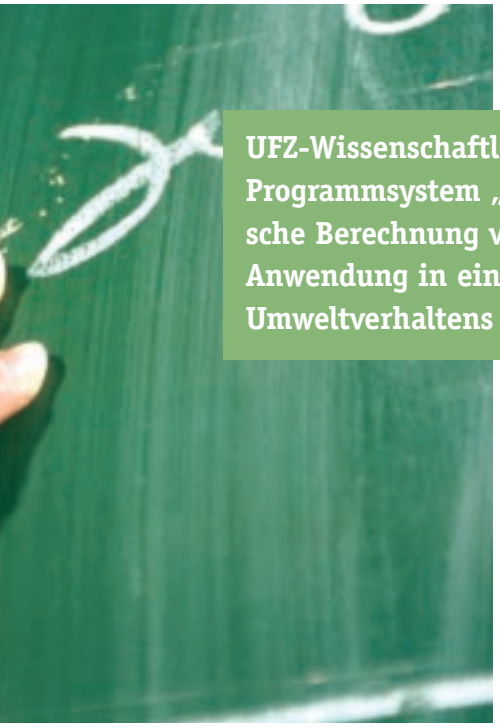


Lindan

Berechnen mit Mathe und Computer

Oft ist es nicht möglich, bestimmte Eigenschaften zu messen. Das kann technische oder finanzielle Gründe haben. Oder der Stoff steht nur in einer geringen Menge zur Verfügung, die für eine Messung nicht genügt. In solchen Fällen kommen Vorhersagemodelle – heute in der Regel auf Computer gestützt – zum Einsatz. Außerdem ist ein validiertes Berechnungsverfahren geeignet, experimentelle Werte kritisch zu prüfen.

Die einfachsten Vorhersagemethoden benutzen naturwissenschaftliche Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen: Aus den bekannten Werten einer Eigenschaft wird mithilfe einer Gleichung eine andere, unbekannte Eigenschaft errechnet. Komplizierter sind Methoden, die Vorhersagen aus der chemischen Struktur erlauben. Basis hierfür ist die zweidimensionale Struktur der Verbindung. Daraus lassen sich über mathematische Formeln für das Molekül komplexe Schlüsselgrößen und Indizes – so genannte Deskriptoren – ermitteln, die wiederum in einem Modell für die interessierende Eigenschaft verknüpft werden. Eine besonders wichtige Gruppe



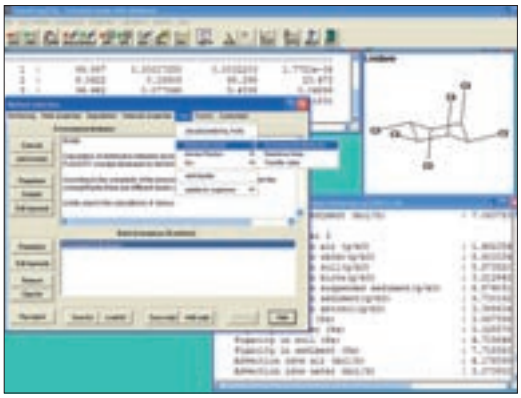
UFZ-Wissenschaftler entwickelten das Computer-Programmsystem „ChemProp“, das die automatische Berechnung von Stoffeigenschaften und die Anwendung in einem Modell zur Vorhersage des Umweltverhaltens ermöglicht.

sind Fragmentmethoden, bei der die Strukturformel in bestimmte Bestandteile zerlegt wird. Für jeden Bestandteil sind Zahlenwerte (Inkremente) tabelliert. Aus der Summe dieser Werte über das gesamte Molekül ergibt sich die gesuchte Größe. Noch kompliziertere Methoden benötigen Größen, die aus der dreidimensionalen Struktur abgeleitet werden. Hierfür werden die Koordinaten der Atome – das heißt, die räumliche Anordnung der Atome im Molekül – benötigt. Sie können zum Beispiel quantenchemisch berechnet werden.

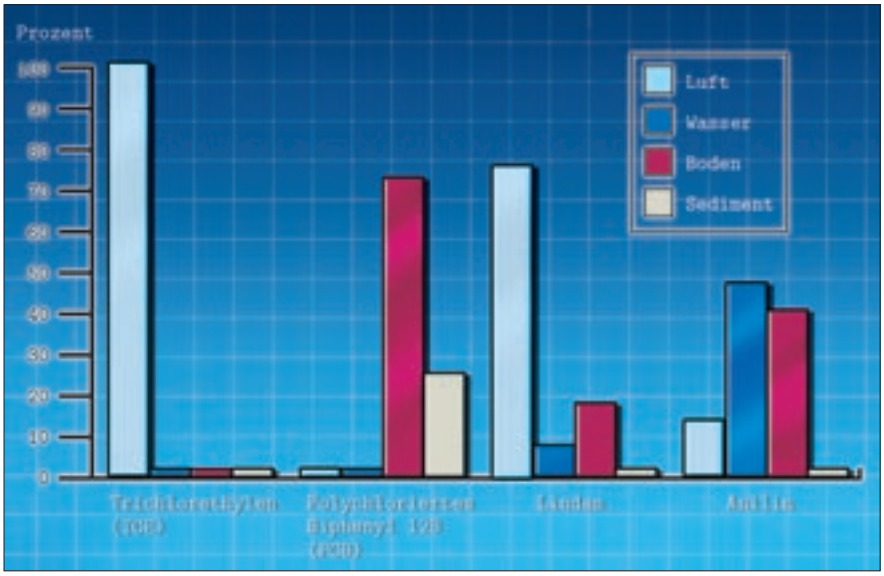
Hat man mithilfe dieser Methoden die Stoffeigenschaften ermittelt, können nunmehr mit Rechenmodellen weitere Vorhersagen über Transport, Verteilung und Abbau der Chemikalien getroffen werden. Von besonderem Interesse ist zum Beispiel, wie lange ein Stoff in der Umwelt verbleiben kann, wie weit er transportiert wird und in welchen Umweltmedien er hauptsächlich zu finden ist. Auch hier gilt, dass sich Modellierung und Messung ergänzen. Modelle können einfach und grob sein, aber auch hoch komplex. Dabei sind sehr viele Eingangsdaten über die Umwelt erforderlich – und die Aussagekraft der Ergebnisse hängt stark von der Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsdaten ab. Experimentelle Werte können zur Anpassung der Parameter und zur Überprüfung dieser Modelle genutzt werden.

Die UFZ-Modellierer haben das Computer-Programmsystem „ChemProp“ entwickelt, das die automatische Berechnung von Stoffeigenschaften und die Anwendung in einem Modell zur Vorhersage des Umweltverhaltens ermöglicht. Integriert sind neben einer Vielzahl bekannter Methoden aus der wissenschaftlichen Literatur auch am UFZ entwickelte Rechenverfahren für relevante Stoffeigenschaften. Das Besondere des Systems ist, dass die Methoden nicht im Programm codiert sind, sondern – in einer eigens entwickelten Sprache zur Methodenbeschreibung – als separate Tabellen verfügbar sind. Dadurch ist das System äußerst flexibel gehalten – so können Methoden variiert und neue Verfahren integriert werden, ohne Änderungen im Programm selbst vorzunehmen.

Wie sich auf Basis einer solchen, stark vereinfachten Rechnung vier umweltrelevante Chemikalien – wenn sie in einem Modellsystem in die Luft emittiert werden – zwischen Luft, Wasser, Boden und Sediment verteilen, soll ein Beispiel verdeutlichen. Die Unterschiede zwischen den vier Stoffen Trichlorethylen (TCE), Polychloriertes Biphenyl 128 (PCB), Lindan und Anilin sind enorm. TCE verbleibt nahezu vollständig in der Luft; Lindan zu zirka 75 Prozent, der Rest verteilt sich in Wasser und Boden; PCB ist nach dieser Rechnung zu knapp 75 Prozent im Boden sowie zu 25 Prozent im Sediment zu finden; Anilin reichert sich zu gleichen Teilen im Wasser und Boden an, nur ein geringer Anteil bleibt in der Luft. Diese Prognose ergibt sich allein aus den unterschiedlichen physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften, die aus den chemischen Strukturen abgeschätzt wurden.



Benutzeroberfläche von „ChemProp“



Der apparative Aufbau der Langsam-Rühr-Methode ist recht einfach – der Zeitaufwand allerdings groß, die Analytik anspruchsvoll: In einem Liter Wasserphase sind oft nur wenige Nanogramm (10^{-9} g) der Testchemikalie enthalten.

Messen mit Physik und Chemie

Ohne Messwerte gibt es keine theoretischen Modelle. Auch weist jede Vorhersagemethode Fehler und Unsicherheiten auf, so dass im Einzelfall eine genaue Messung durchaus sinnvoll ist. Dazu blenden die Chemiker zuerst einmal die Vielfalt und Komplexität stofflicher Prozesse und Wechselwirkungen in der Umwelt weitestgehend aus, sie studieren die Eigenschaften und das Verhalten der Stoffe unter standardisierten Bedingungen im Labor. So erhalten sie Informationen über die wesentlichen Faktoren und Mechanismen, die das Transport- und Verteilungsverhalten der Chemikalien bestimmen. Um sich schrittweise den realen Verhältnissen zu nähern, werden die Versuchsbedingungen zunehmend komplexer gestaltet.

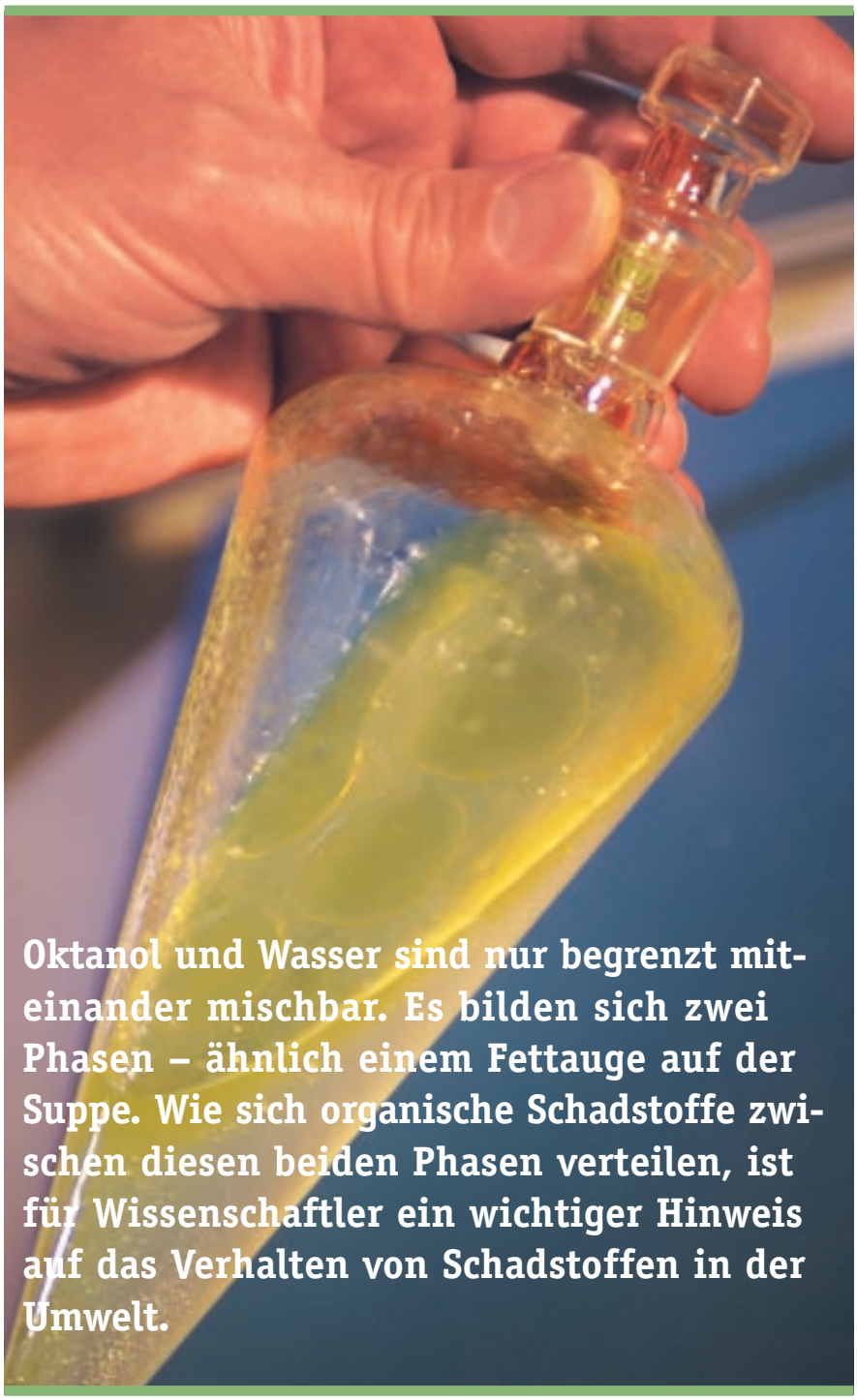
Als Schlüsselgröße nutzen Ökotoxikologen und Umweltchemiker den Verteilungskoeffizienten K_{OW}. Dieser Koeffizient sagt aus, wie sich eine organische Verbindung zwischen den beiden Flüssigkeiten Wasser (W) und Oktanol (O) verteilt. Da Oktanol und Wasser nur begrenzt miteinander mischbar sind, bilden die beiden Flüssigkeiten zwei Phasen – ähnlich einem Fettauge auf der Suppe. Dieser Koeffizient korreliert unter anderem recht gut mit der biologischen Anreicherung von Schadstoffen in Fischen, aber auch mit der Anlagerung oder Aufnahme organischer

Verbindungen an bzw. in Boden- und Sedimentpartikeln. Nun kann es passieren, dass man für viele, lange bekannte Umweltchemikalien, wie beispielsweise für das Organochlorpestizid DDT, in der Fachliteratur widersprüchliche Angaben zum Verteilungskoeffizienten findet. Außerdem sind die Daten für die ständig neu hinzu kommenden Substanzen und Stoffklassen – dazu gehören beispielsweise die Abbauprodukte des Herbizides Atrazin – äußerst lückenhaft.

Um also Chemikalien mithilfe von Rechenverfahren richtig zu bewerten, muss der Verteilungskoeffizient K_{OW} für ausgewählte Verbindungen experimentell bestimmt werden.

Die Palette von Messverfahren ist breit gefächert, oft ergänzen sie sich gegenseitig. Standardverfahren sind beispielsweise die Schüttelflaschen- oder die HPLC-Methode (High Pressure Liquid Chromatography), die jedoch auf stark wasserabweisende (hydrophobe) organische Verbindungen wie DDT nicht anwendbar sind. Für solche Substanzen, deren K_{OW}-Werte größer als 10^5 sind, eignet sich die so genannte Langsam-Rühr-Methode. Zwar ist der apparative Aufbau recht einfach, der Zeitaufwand allerdings groß und die Analytik anspruchsvoll: In einem Liter Wasserphase sind oft nur wenige Nanogramm (10^{-9} g) der Testsubstanz enthalten. Vor kurzem wurde dieses Verfahren in einem weltweiten Ringversuch für die OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris) getestet, überarbeitet und zur Aufnahme in den Richtlinienkatalog zur Chemikalientestung vorgeschlagen. Die Physikochemiker des UFZ waren erfolgreich beteiligt.

Doch auch wenn der Verteilungskoeffizient K_{OW} inzwischen eine der am häufigsten gebrauchten Größen ist, um das Verhalten von organischen Chemikalien in der Umwelt abzuschätzen, denken Forscher weiter. Bioakkumulation heißt Anreicherung von Schadstoffen im ein- oder vielzelligen Organismus. Wäre dann nicht ein Modellsystem geeigneter, das der Zelle ähnelt? Könnte der Membran/Wasser-Verteilungskoeffizient nicht eine aussagekräftigere Größe sein? Neuere Veröffentlichungen zeigen, dass es sich lohnt, weiter in diese Richtung zu forschen. UFZ-Wissenschaftler arbeiten an experimentellen Verfahren, mit denen schnell, genau und zuverlässig gemessen werden kann, wie sich Chemikalien zwischen Wasser und künstlichen Membranvesikeln verteilen. Diese Membranvesikel (oder Liposomen) sind das einfachste Modell für eine Zellmembran. Zurzeit entwickeln die Wissenschaftler eine Referenzmethode, die im Mikromaßstab und unter Nutzung der modernen Festphasen-Mikroextraktion funktionieren soll, um nicht zuletzt den Verbrauch an Testsubstanzen und Lösungsmittel einzuschränken. ■



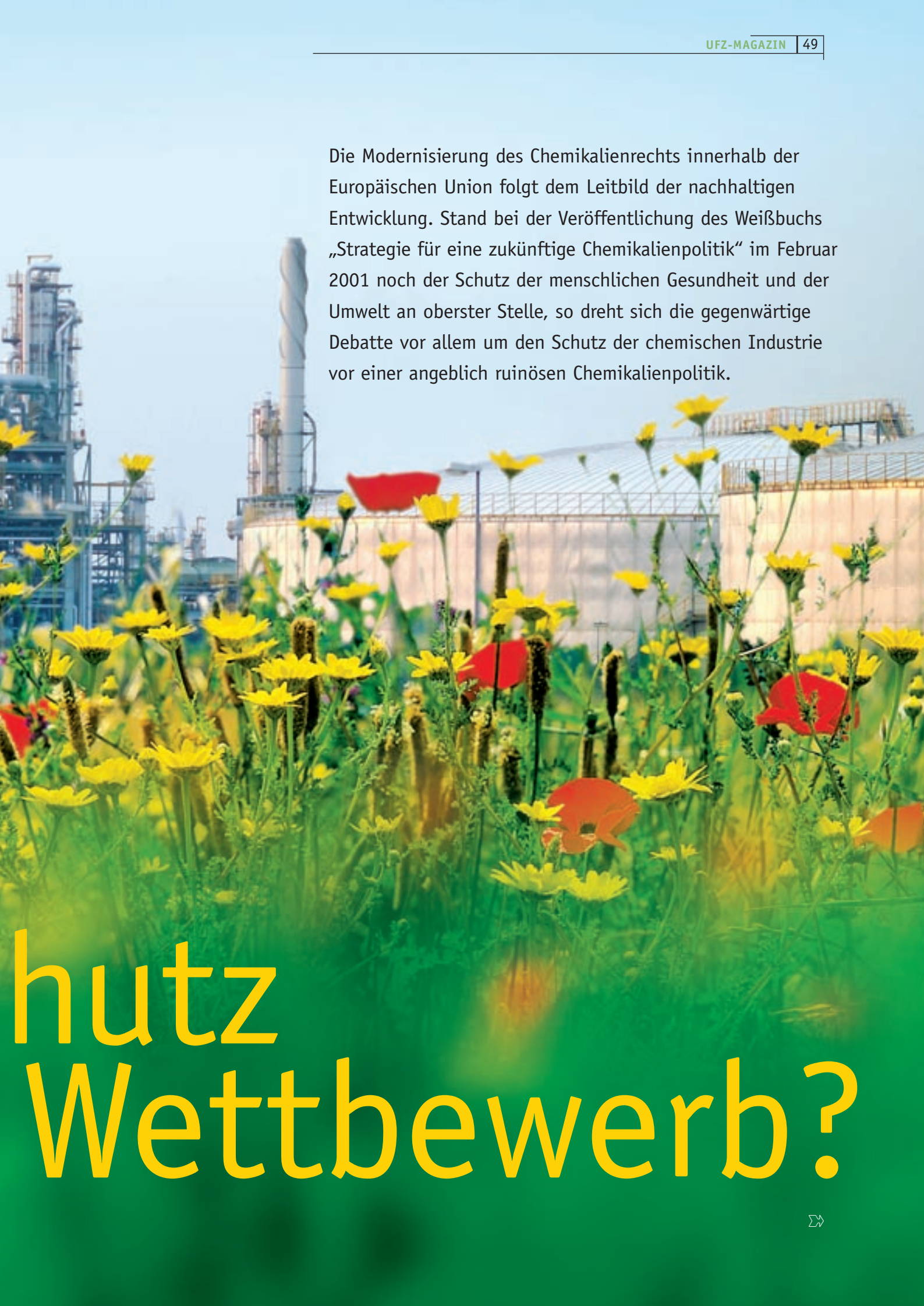
Oktanol und Wasser sind nur begrenzt miteinander mischbar. Es bilden sich zwei Phasen – ähnlich einem Fettauge auf der Suppe. Wie sich organische Schadstoffe zwischen diesen beiden Phasen verteilen, ist für Wissenschaftler ein wichtiger Hinweis auf das Verhalten von Schadstoffen in der Umwelt.

Albrecht Paschke ist Chemiker und leitet die Abteilung Expositionsanalyse im Department Chemische Ökotoxikologie am UFZ.
Ralph Kühne ist Chemiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter im Department Chemische Ökotoxikologie am UFZ.

Ralf Nordbeck

Balanceakt in der Politik – Umweltsc versus

Die Modernisierung des Chemikalienrechts innerhalb der Europäischen Union folgt dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung. Stand bei der Veröffentlichung des Weißbuchs „Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik“ im Februar 2001 noch der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt an oberster Stelle, so dreht sich die gegenwärtige Debatte vor allem um den Schutz der chemischen Industrie vor einer angeblich ruinösen Chemikalienpolitik.



hutz Wettbewerb?

Auf den ersten Entwurf der Chemikalienverordnung, der die chemische Industrie verpflichtet, die Unbedenklichkeit ihrer Stoffe nachzuweisen reagierte die Branche harsch: Wettbewerbsfähigkeit sowie Arbeitsplätze seien gefährdet. Beim neuen Entwurf der EU-Chemikalien-Verordnung wurden die Auflagen gelockert, das geht der chemischen Industrie noch nicht weit genug...

Den Kern der künftigen Chemikalienregulierung bildet das integrierte System zur Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals). Der erste Entwurf zur Chemikalien-Verordnung vom Mai 2003 sah vor, in den nächsten elf Jahren etwa 30.000 Stoffe mit einer jährlichen Produktion von über einer Tonne zu registrieren und zu untersuchen. Im Grunde sollte die chemische Industrie verpflichtet werden, die Unbedenklichkeit ihrer Stoffe nachzuweisen. Auf dieses Anliegen reagierte die Branche harsch: Der Verlust der internationalen Wettbewerbsfähigkeit sowie von Arbeitsplätzen werde befürchtet – die Belastungen seien gerade für kleine und mittlere Unternehmen nicht tragbar. Die Einsprüche schlugen sich im Entwurf der EU-Chemikalien-Verordnung nieder, den EU-Umweltkommissarin Margot Wallström am 29. Oktober 2003 vorlegte. Nur noch Hersteller und Importeure von Chemikalien wurden der Registrierungs- und Testpflicht unterworfen; Weiterverarbeiter aus dieser Pflicht entlassen. Zudem wurde die Registrierung von Zwischenprodukten erheblich erleichtert und auf eine Registrierung von Polymeren gänzlich verzichtet. Überdies wurden die Testpflichten für Stoffe, die jährlich in Mengen zwischen einer und zehn Tonnen produziert werden, deutlich gelockert: Statt für alle 30.000 Stoffe soll nur noch für 10.000 Stoffe ein Sicherheitsbericht vorgelegt werden. Nach Schätzung der EU-Kommission müssen chemische Industrie und Anwender über elf Jahre zwischen 2,8 bis 5,2 Milliarden Euro für das REACH-System aufbringen.

Die chemische Industrie begrüßte die Änderungen, hält die Vorschriften aber nach wie vor für zu weitgehend und drängt auf weitere Einschnitte. Europäische Umwelt- und Verbraucherverbände werten den neuen Entwurf hingegen als Zugeständnis an die Industrie und fordern die EU-Kommission auf, dem Schutz von Umwelt und Gesundheit wieder Vorrang vor wirtschaftlichen Interessen einzuräumen.

EU-Umweltkommissarin Wallström glaubt nun, mit Blick auf die Kritik beider Seiten, einen ausgewogenen Verordnungsentwurf eingebracht zu haben. Ihr Kollege – EU-Industriekommissar Erkki Liikanen – gibt sich sogar überzeugt, die Reform der europäischen Chemikaliengesetzgebung bewirke einen Innovationsschub in der chemischen Industrie. Genau dieser Frage – welche Innovationswirkungen sind von der neuen Chemikalienregulierung zu erwarten – widmete sich

Quelle: Photodisc®Environmental Concerns

in den vergangenen zwei Jahren ein interdisziplinäres Projekt von Ökonomen, Juristen, Politologen und Ökotoxikologen am UFZ. Um eine fundierte Aussage über Innovationswirkungen zu treffen, ist es zwingend notwendig, die Betrachtung der quantitativen Wirkungen (Innovationsrate) um die der qualitativen Wirkungen (Innovationsrichtung) zu ergänzen. Der Innovationsbegriff stellt kein homogenes Konzept dar: Innovationen führen keineswegs zwangsläufig zu gesellschaftlichem Fortschritt und steigender Lebensqualität. Zudem kann eine hohe Innovationsrate in einer sozial und ökologisch unerwünschten Innovationsrichtung verlaufen. Während die Innovationsrate anhand mehrerer, weit verbreiteter Indikatoren (Patentstatistiken, Neustoffanmeldungen) bestimmt werden kann, gibt es keine vergleichbar standardisierten Indikatoren, um die Innovationsqualität zu messen.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse ergibt sich für die erwarteten Innovationswirkungen der Chemikalienregulierung ebenfalls ein ambivalentes Bild. Die neue Verordnung wird ohne Zweifel einen wichtigen Beitrag leisten, die Innovationsrichtung bei den Herstellern, Weiterverarbeitern und Anwendern chemischer Stoffe zu ändern. Schon jetzt lassen sich zwei Wirkungsmechanismen identifizieren: Die Einführung einer verwendungsspezifischen Zulassung für potenziell Besorgnis erregende Stoffe übt einen enormen regulativen Druck auf die Hersteller aus, nach Substituten zu fahnden. Gleichzeitig bietet das Transparenzgebot, das den öffentlichen Zugang zu nichtvertraulichen Daten über Stoffeigenschaften und -verwendungen gewährleistet, den nachfolgenden industriellen und gewerblichen Anwendern die Basis für die eigenständige Substitution hochkritischer Stoffe.

Eher zweifelhaft ist hingegen, ob die Innovationsrate von gegenwärtig 300 Neustoffen pro Jahr in der EU wesentlich steigen wird – auch wenn die Anhebung der Mengenschwellen sowie die großzügige Handhabung von Ausnahmen für prozessorientierte FuE-Stoffe die Entwicklung neuer Stoffe durchaus begünstigen.

Innovationen in der chemischen Industrie gelten weniger der Entwicklung neuer Stoffe als vielmehr der Anwendung existierender Stoffe. Da auf diesem Feld vor allem kleine und mittlere Unternehmen tätig sind, erscheint es problematisch, wenn die neue EU-Chemikalienpolitik erhebliche Rationalisierungen der Produktlinien zur Folge hätte. Dies ginge zu Lasten der Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit dieser Firmen. Zudem beträfe dieser Vorgang einige Stoffe, die eher als Substitut für potenziell gefährliche Stoffe geeignet wären, denn zum Schutz von Umwelt und Gesundheit vom Markt genommen werden müssten. ■

Ralf Nordbeck ist Diplom-Politologe und war bis Februar 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Department Soziologie, Ökonomie und Recht am UFZ.

Die Menge macht's – Chancen und

Grenzen des neuen europäischen Chemikalienrechts

Die Europäische Union diskutiert seit mehreren Jahren ihre künftige Chemikalienpolitik. Nun liegt seit Oktober 2003 der Entwurf einer Richtlinie zur Chemikalienregulierung vor, der zuvor über drei Monate hinweg von Wirtschaft und Politik, Regierungen und Gewerkschaften, Umwelt- und Verbraucherverbänden sowie per Internet öffentlich erörtert worden war. Wir sprachen mit Dr. Klaus Steinhäuser, Leiter des Fachbereiches für Chemikaliensicherheit und Gentechnik beim Umweltbundesamt (UBA), über Chancen und Grenzen der europäischen Chemikalienregulierung.

FRAGE: Die Neugestaltung des Chemikalienrechts berührt weite Teile der europäischen Gesellschaft. Hier zu Lande haben die Bundesregierung, der Verband der Chemischen Industrie (VCI) und die Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE) gemeinsam Regelungen zum „wirksamen Schutz für Gesundheit und Umwelt bei möglichst geringen Kosten, in schnellen, einfachen und verlässlichen administrativen Verfahren" gefordert. Sind beide Ansprüche tatsächlich miteinander zu vereinbaren?

Ich denke ja. Die Frage – wie umfassend ist eine Chemikalie zu beurteilen – hängt natürlich zuerst von deren möglichen Risiken ab. Die muss man kennen, um sie gegebenenfalls abzuwehren. Zwei Beispiele möchte ich nennen. Soll ein neues Pflanzenschutzmittel zugelassen werden, besteht ein hoher Untersuchungsbedarf und auch -aufwand. Der Antragsteller muss nachweisen, dass das Mittel – das seiner Bestimmung nach für so genannte Schädlinge giftig ist – andere Organismen allenfalls in einem Maße trifft, die ihnen eine Wiedererholung erlaubt. Geht es hingegen um eine Chemikalie, die lediglich in geschlossenen technischen Anlagen benutzt wird, tendiert die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Stoff beim regulären Umgang in die Umwelt gelangt, ebenso wie die Belastung für Arbeitnehmer und Verbraucher gegen Null. Insofern ist hier ein geringeres Untersuchungsprogramm zu vertreten.

Diese Form der Abwägung sieht die REACH-Verordnung ja auch vor. Allerdings ist man dort zu weit gegangen: Eine Mindestinformation, die eine Beurteilung von Unfällen und Betriebsstörungen erlaubt, ist dort bei Zwischenprodukten in geschlossenen Systemen leider nicht erforderlich.

FRAGE: Aber primär gründet sich das REACH-System auf die Mengenstaffelung: Je weniger ein Stoff produziert und verwendet wird, umso dünner wird der Untersuchungskatalog. Somit unterliegen nicht alle Chemikalien den gleichen Analysen?

WISSENSWERTES

Umweltbundesamt

Das Umweltbundesamt (UBA) ist die wissenschaftliche Umweltbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Die Tätigkeit ist auf die Pflege und den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen, auf die nachhaltige Entwicklung sowie auf die Verankerung des Umweltschutzes im Denken und Handeln aller Menschen gerichtet. Das breite Themenfeld, die analytischen Kompetenzen und die fachlichen Ressourcen bestimmen die Position des UBA als eine der anerkannt gefragten Umweltinstitutionen in Deutschland.

Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22• 14191 Berlin
Tel.: 030/89 03-0
Fax: 030/89 03 22 85
Internet: www.umweltbundesamt.de

In der neuen REACH-Verordnung gibt es, wie bisher im Chemikalienrecht, ein mengengestaffeltes System: Je mehr von einem Stoff hergestellt und verwendet wird, desto wahrscheinlicher kann es zu Problemen kommen und umso mehr wird untersucht. Zugleich hängen die Tests von der Art der Verwendung ab – bleibt der Stoff eher in der Technosphäre oder gelangt er bis in Verbraucherprodukte… Beide Komponenten bestimmen künftig den Untersuchungsaufwand.

FRAGE: Derzeit müssen laut Chemikaliengesetz in der Bundesrepublik Stoffe, deren jährliche Vermarktung über 100 Kilogramm liegt, durch die Industrie bei den zuständigen Behörden angemeldet werden – das künftige EU-Chemikalienrecht hebt diese Mengenschwelle auf zehn Tonnen an.

Das ist in der Tat so. Fingen wir im normalen Neustoffverfahren bei 100 Kilogramm an, beginnt das Standarduntersuchungsprogramm künftig bei zehn Tonnen. Läge dieser Wert bei einer Tonne, hätte das UBA gesagt, es handelt sich um eine Menge, bei der eventuell auf lokaler, aber nicht auf regionaler oder überregionaler Ebene, Probleme zu erwarten wären. Aber zwei Größenordnungen weiter zu gehen, das ist aus unserer Sicht zu viel.

FRAGE: Die Mehrheit der Chemikalien liegt in ihrer Menge unter zehn Tonnen?

Von den 30.000 Stoffen, die in Europa oberhalb einer Tonne importiert oder hergestellt werden, fallen etwa 20.000 in die Mengenstaffel bis zehn Tonnen. Für diese Anzahl ist nur ein minimales Untersuchungsprogramm vorgesehen. Im Gegensatz zum ursprünglichen Entwurf vom Mai 2003 wird jetzt auf die Tests zur Algentoxizität und zur biologischen Abbaubarkeit verzichtet. Allein mit Hilfe der Daphnientoxizität lässt sich kein Umweltrisiko beurteilen. Das ist ein Punkt, mit dem wir uns nicht zufrieden geben können.

FRAGE: Warum genügt dieser eine Test für den Bereich zwischen einer und zehn Tonnen nicht?

Mit dem Daphnien-Kurzzeit-Test lässt sich keine Aussage mehr treffen, ob der untersuchte Stoff persistent, bioakkumulierend sowie toxisch sein könnte. Das heißt, so genannte PBT-Verdachtsstoffe können in diesem Tonnagebereich nicht identifiziert werden. Da fehlt die qualifizierte Beurteilungsgrundlage.

FRAGE: Die EU-Verordnung wird auch für Deutschland unmittelbar bindend sein. Kann das Umweltbundesamt auf den jetzigen Entwurf noch Einfluss nehmen?

Zunächst wird der Entwurf in den politischen Gremien des Europäischen Rates und Parlamentes beraten. In diese Diskussion werden wir unsere fachliche Meinung einbringen und

hoffen, somit insbesondere der Bundesregierung Argumente zu geben, den Entwurf an einigen wichtigen Stellen zu verbessern. Außerdem regelt ein Gesetz nicht alle fachlichen Details – diese können aber für den Aufwand und das Ergebnis sehr wichtig sein. Eine wesentliche Aufgabe von uns wird deshalb sein, auf eine gute fachliche Ausgestaltung des neuen Regelwerkes hinzuwirken.

FRAGE: Kann die REACH-Verordnung nicht auch zu Innovationen, zur Entwicklung neuer Chemikalien führen, die sowohl umweltverträglicher als auch testeffizienter sind?

Der Punkt ist spannend, lässt sich heute jedoch noch nicht sicher beurteilen. Auf alle Fälle werden nicht alle 30.000 Stoffe, die derzeit mit über einer Tonne auf dem europäischen Markt bekannt sind, zur Registrierung kommen. Aber Befürchtungen, ein Großteil der Stoffe sei nicht mehr verfügbar, ganze Produktketten würden wegbrechen und der Innovationsspielraum enger werden, die teile ich nicht. Es werden vielleicht zehn bis 20 Prozent weniger sein. Das sind Einschränkungen, die sich meist durch andere technische oder stoffliche Lösungen kompensieren lassen und sogar einen Innovationsanreiz schaffen, der bestenfalls zu neuen umwelt- und gesundheitsverträglicheren Lösungen führt. Das kann und soll das REACH-System durchaus erreichen, und aus meiner Sicht wird es das auch.

FRAGE: Sind in der Umsetzung von REACH neben der Wirtschaft auch Forschungseinrichtungen wie das UFZ Leipzig-Halle gefragt?

Also, ich denke, ja, in drei Punkten. Erstens: Nicht jede Firma, die in den nächsten elf Jahren ihre Stoffe registrieren lassen wird, ist ein Großunternehmen mit eigenen Untersuchungskapazitäten. Potenziell können hier Institutionen wie das UFZ als Auftragnehmer agieren. Der zweite Punkt berührt ein wesentliches Defizit der derzeitigen REACH-Verordnung: Es gibt kein System der Qualitätssicherung für die Registrierungsdossiers; die so genannten Chemical Safety Reports werden lediglich auf Vollständigkeit geprüft. Nun wollen wir als staatliche Behörde nicht alles kontrollieren. Aber wir brauchen ein System, das die Dossiers prüft, ob sie valid, plausibel und seriös sind. Dafür kann man sich interner Zertifizierungen oder externer Gutachter bedienen. Auch in solch' einem Kontext könnte das UFZ eine Rolle spielen. Und der dritte Punkt knüpft an die Befugnis staatlicher Autoritäten an, die Stoffe und ihre Wirkungen auf nationaler Ebene zu evaluieren. Dies umfasst einen differenzierten Komplex von Untersuchungen, Bewertungen und Maßnahmen, in dem die betreffenden Behörden Unterstützung von anderen Institutionen benötigen. Das ist zwar im Einzelnen noch nicht geklärt, aber auch hieraus könnte eine Aufgabe für das UFZ erwachsen. ■

Das Gespräch führte: Daniela Weber

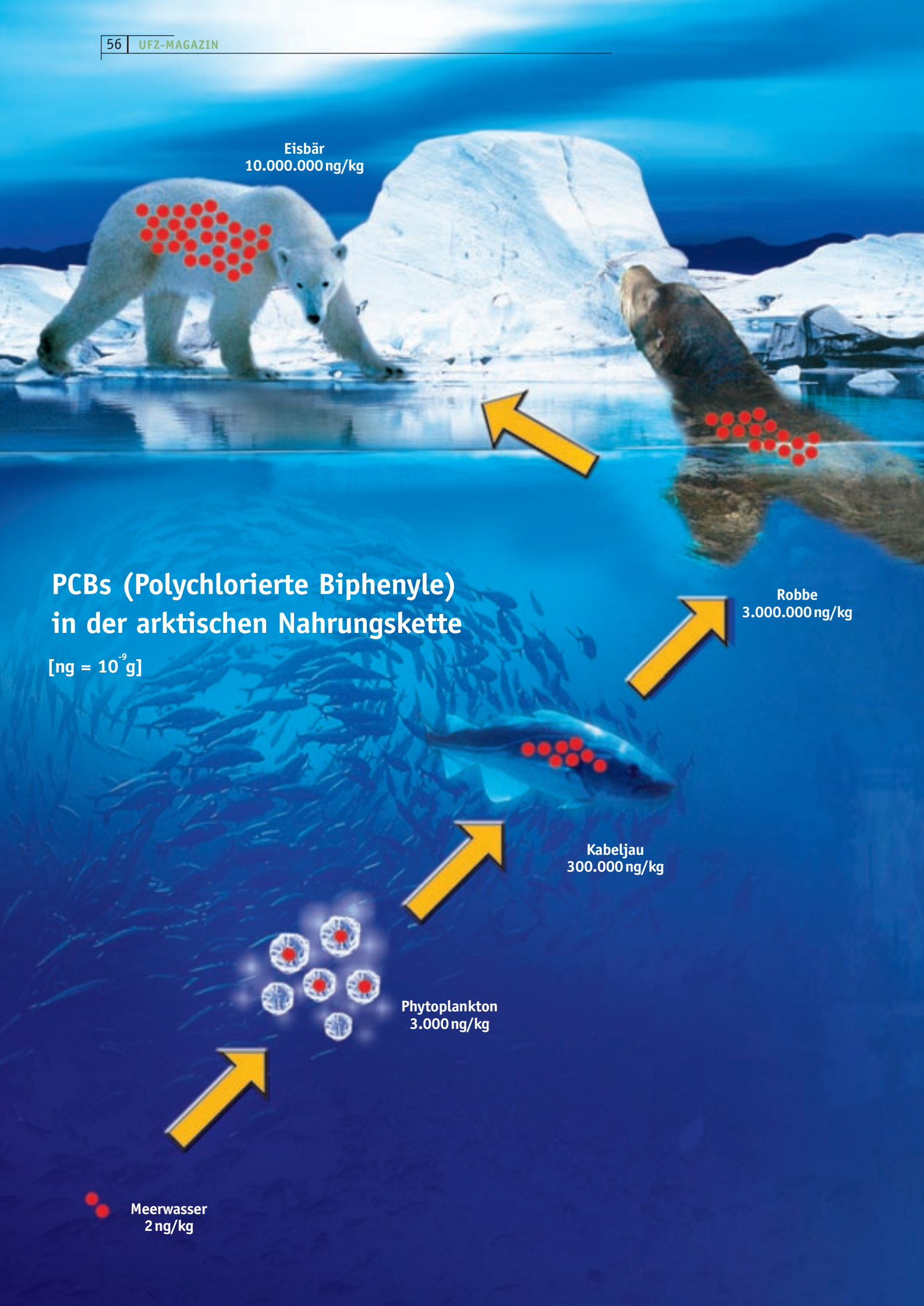
Dr. Klaus Steinhäuser (53) hat sich in seiner wissenschaftlichen Laufbahn frühzeitig mit Fragen der Ökotoxikologie befasst. Seit 2001 leitet der Chemiker den Fachbereich IV „Chemikaliensicherheit und Gentechnik" am Umweltbundesamt. Seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern obliegt es vornehmlich, Pflanzenschutzmittel und andere Stoffe hinsichtlich ihrer Umweltrisiken zu bewerten und Maßnahmen zur Risikominderung festzulegen. Zudem wirken sie auf europäischer, nationaler und internationaler Ebene mit, die Chemikaliensicherheit weiterzuentwickeln.

WISSENSWERTES

Grünbuch – Weißbuch – Aktionsprogramm

Die Europäische Kommission veröffentlicht zu bestimmten Politikbereichen so genannte Grünbücher. Dies geschieht, ehe ein bestimmter Vorschlag in die Gesetzgebung Eingang findet. Es dient dazu, die Vorstellungen der Kommission zur geplanten Initiative darzustellen, den betroffenen Kreisen eine Diskussionsgrundlage zu bieten und die Möglichkeit zu Stellungnahmen einzuräumen.
Nach dem Grünbuch erscheint in aller Regel ein Weißbuch. In diesem schlagen sich zum einen die Beiträge des fachlichen Diskurses nieder. Zum anderen legt die Kommission einen Katalog konkreter Vorschläge sowie geplanter Maßnahmen vor, mit denen die Ziele im betreffenden Politikfeld erreicht werden sollen. Nimmt der Rat der EU-Kommissare das Weißbuch positiv auf, kann daraus das Aktionsprogramm der Europäischen Union für diesen Bereich entwickelt werden.
Die Phasen vom Grün- über das Weißbuch bis hin zum Aktionsprogramm umfassen zumeist mehrere Jahre.

Weitere Informationen zum Weißbuch zur Chemikalienpolitik unter:
http://www.darmstadt.ihk24.de/produktmarken/innovation/Anlagen/Weissbuch-Chem-Pol.pdf
europa.eu.int/comm/environment/chemicals/0188_de.pdf
http://www.oeko.de/text.chempol.htm



PCBs (Polychlorierte Biphenyle) in der arktischen Nahrungskette

[ng = 10^{-9} g]

Aus für das dreckige Dutzend

POPs – im Englischen „Persistent Organic Pollutants“ – sind giftige und zugleich langlebige (persistente) organische Schadstoffe. Zu diesen Dauergiften zählen Pestizide und Industriechemikalien, aber auch schädliche Gase wie Dioxine und Furane, die als Nebenprodukte in der chemischen Industrie oder unbeabsichtigt bei Verbrennungsprozessen entstehen. POPs machen keinen Halt an Landesgrenzen. Man findet sie in Regionen, wo sie nie angewendet wurden. Sie sind ein globales Umweltproblem. Sie reisen mit den atmosphärischen Strömungen, durch Verdunsten und wieder Kondensieren – auch „globale Destillation“ genannt – von den warmen Zonen nahe des Äquators zu den Polen oder kälteren Regionen der Erde. Von dort gelangen sie mit der Schmelze von Schnee und Eis zurück ins Meer, lagern sich im Plankton ein und gelangen bis an die Spitze der Nahrungskette. Hohe Konzentrationen werden in Fischen, Robben, Eisbären und Vögeln gemessen. Dadurch sind die Menschen belastet, die sich hauptsächlich von Fisch und Tieren der Arktis ernähren.

WISSENSWERTES

Das dreckige Dutzend

9 Pestizide

Aldrin, Chlordan, Dieldrin, DDT, Endrin, Heptachlor, Hexachlorbenzen, Mirex, Toxaphen

2 Industriechemikalien

Polychlorierte Biphenyle (PCBs), Hexachlorbenzen

2 unbeabsichtigt produzierte Chemikalien

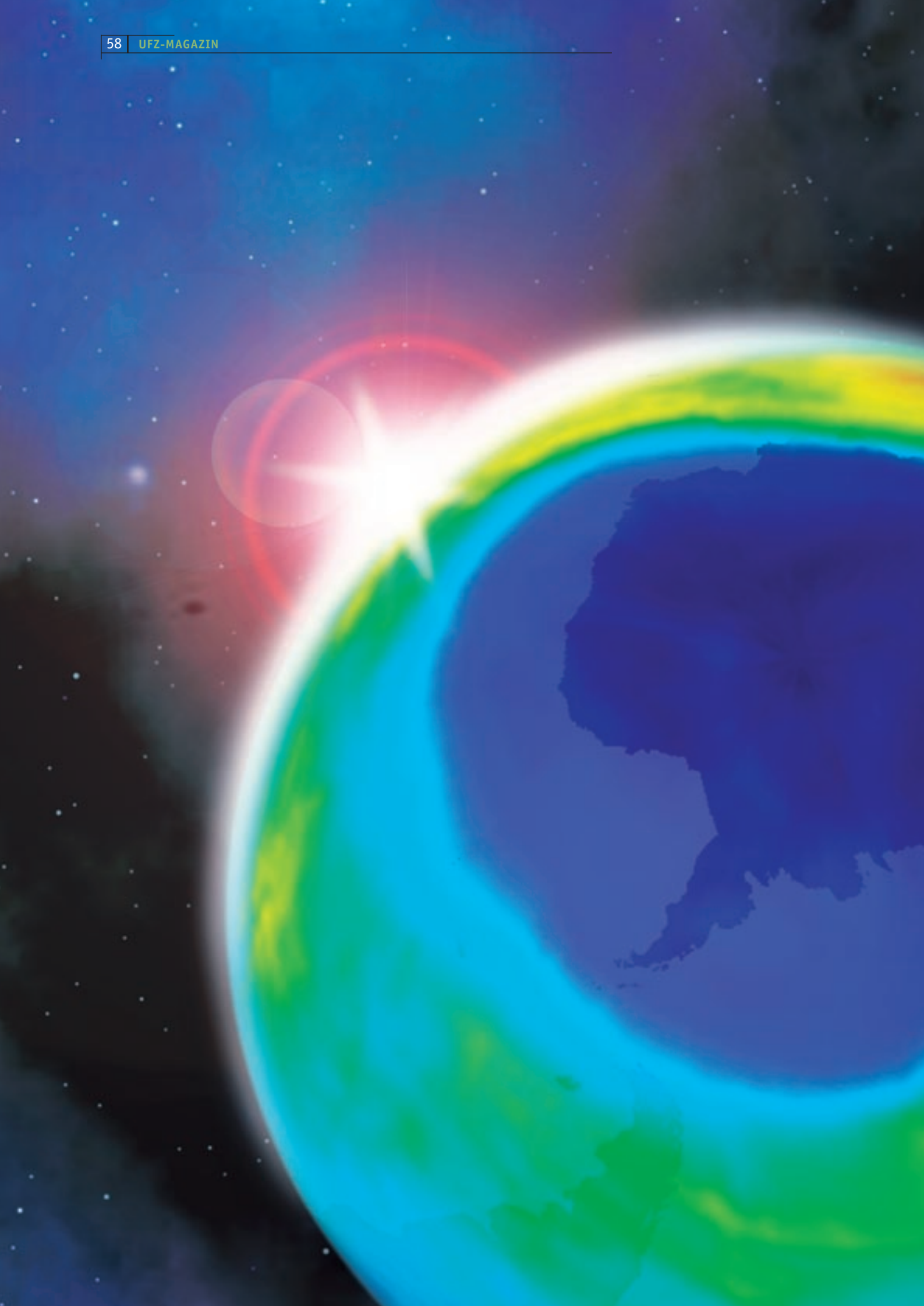
Dioxin, Furan

Die Konvention ist unter http://chem.unep.ch/pops abrufbar.

Gefährdet sind ebenso Menschen, die in Entwicklungsländern die POPs anwenden oder durch deren Nutzung diesen unmittelbar ausgesetzt sind, beispielsweise durch Pestizide in der Landwirtschaft oder Bekämpfung von Malaria mit DDT. Oft können die Menschen nicht die Gefahr einschätzen, in der sie sich befinden, und meist haben sie auch nicht die Möglichkeit, einen anderen Arbeitsplatz oder Lebensraum zu wählen.

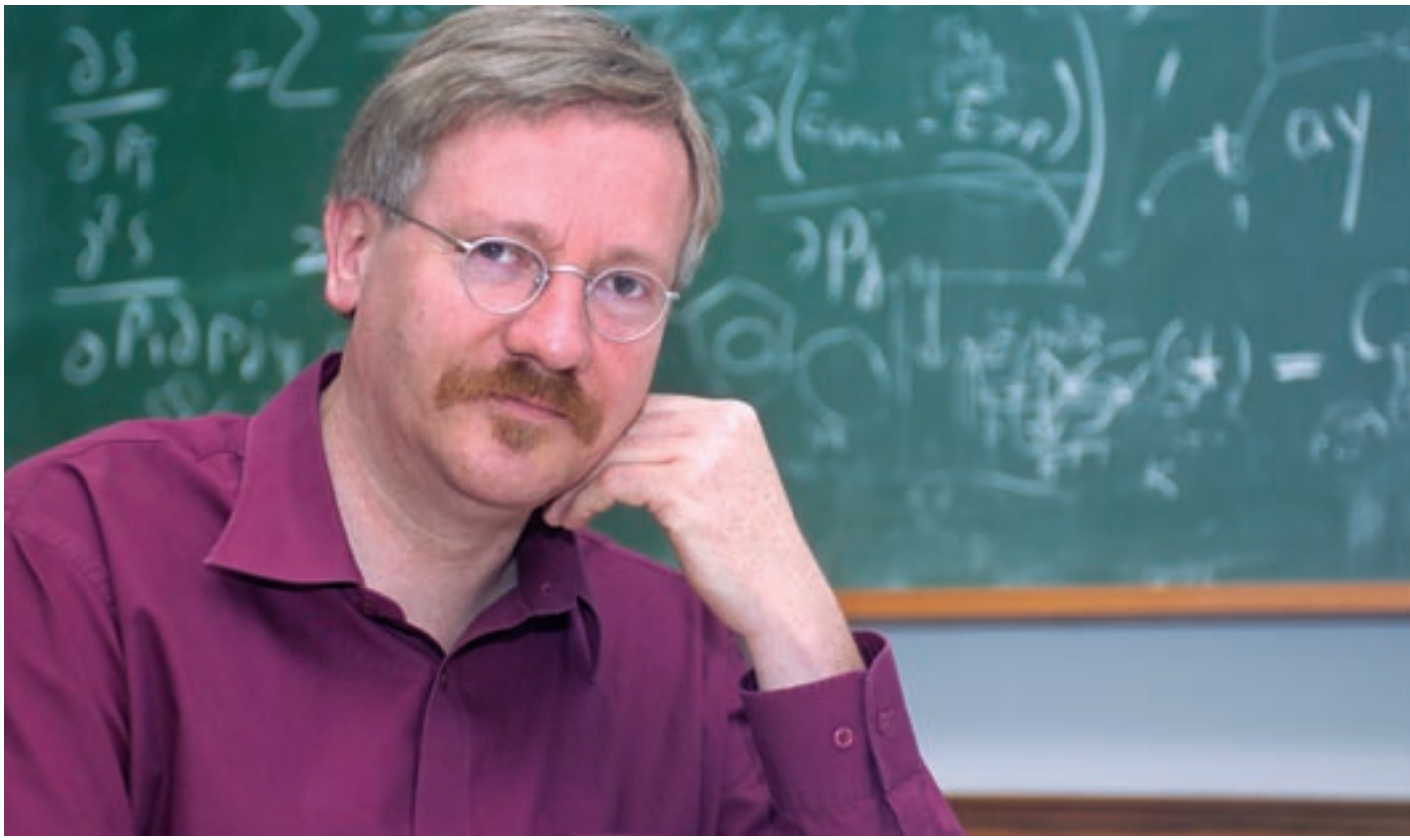
POPs sind extrem langlebig und schwer abbaubar. Einmal im Körper angereichert, verändern sie den Hormonhaushalt, können Krebs oder Fehlbildungen verursachen und das Immunsystem beeinflussen.

Im Mai 2001 wurde in Stockholm die international gültige, rechtliche Grundlage für ein weltweites Produktions- und Anwendungsverbot der zwölf giftigsten POPs – das dreckige Dutzend – verabschiedet (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants). Am 17. Mai 2004 trat die Stockholmer Konvention in den bisher 59 Unterzeichnerstaaten in Kraft, darunter auch Deutschland. Die USA und China als zwei der industrie- und bevölkerungsreichsten Staaten fehlen noch. ■



Zeit – Eine neue Dimension der Ökotoxikologie

Entstanden ist die Ökotoxikologie als Prüfdisziplin, die die Schadwirkung von einzelnen Stoffen testet. Inzwischen hat sie sich zur Systemwissenschaft gewandelt, die die Vernetztheit des Umweltsystems und die Komplexität der Wirkeffekte bewertet. Als neue Dimension hält der Faktor Zeit Einzug. Wir sprachen mit Prof. Gerrit Schüürmann, Leiter des Departments Chemische Ökotoxikologie am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, über die Zukunft seines Fachs.



FRAGE: Lange Zeit ging der Blick der Chemischen Ökotoxikologie auf das schädliche Potenzial einer Chemikalie …
Diese Sicht greift zu kurz – das hat sich erwiesen. Fluorchlorkohlenwasserstoffen hat man es schlichtweg nicht angesehen, dass sie zehn, 15, 20 Jahre nach ihrer großvolumigen Emission einen Kreislauf der Ozonzerstörung in Gang setzen.

FRAGE: … seit einigen Jahren weitet sich die Perspektive hin zur Komplexität von Wirkungen und Wirkbedingungen. Entsprechen die derzeit verfügbaren Methoden und Instrumentarien diesem Paradigmenwechsel?
Zunächst muss man unterscheiden zwischen der Ökotoxikologie als Wissenschaft und ihrer Servicefunktion für die Chemikalienbewertung. In der heutigen Prüftoxikologie sind die komplexen Zusammenhänge in der Natur nicht explizit erfasst. Es sind ausgewählte Stellvertreterorganismen, die die ökologische Relevanz in die Testsysteme einbringen. Dabei wird auf der Ebene ein Stoff/ein Organismus getestet, obwohl es tatsächlich um ein Vielstoff-Multibiologie-System geht – das ist das Dilemma der Ökotoxikologie.

Bei den POPs kommt dem Faktor Zeit wieder eine Bedeutung zu: diese Stoffe akkumulieren langfristig in der Umwelt. Das kann zu einem erheblichen und ggf. großräumigen Schadeffekt führen.

FRAGE: Lässt sich damit der Anspruch, den die Europäische Union in ihrer Chemikalienpolitik formuliert – die menschliche Gesundheit sowie die Umwelt zu schützen – umsetzen?
Um dem Anspruch gerecht zu werden, nutzt man derzeit das Konzept der Sicherheitsfaktoren: Aus den bekannten Testergebnissen wird zunächst eine Wirkschwelle ermittelt; ein zusätzlicher Sicherheitsabstand liefert dann den entscheidungsrelevanten Grenzwert – mit diesem so genannten Sicherheitsfaktor werden also indirekte Effekte und Kombinationswirkungen pauschal berücksichtigt.

FRAGE: Und der Sicherheitsfaktor ist sicher?
Im Moment bietet dieses Konzept recht viel Sicherheit für die Vorsorge und den Schutz. Im Prinzip berücksichtigt es das Unwissen über die Unwägbarkeiten in natürlichen Systemen …

FRAGE: … aber im Detail ist das nicht ausreichend?
Wir betrachten komplexe Systeme und sehen mehr als einen Organismus, mehr als eine Chemikalie und mehr als einen Aufnahmepfad – wir sehen eine chemische und eine biologische Dimension, die beide mehr sind als eins. Insofern ist die Komplexität natürlich unbegrenzt. Nun ist es nicht das Ziel, für jeden Einzelfall ein eigenes Prüfregime zu erstellen. Die Vision ist: Mehr über die entscheidenden Steuergrößen der komplexen Systeme zu wissen, um pauschale durch problemspezifische Sicherheitsfaktoren zu ersetzen und maßgeschneiderte Prüfstrategien

Prof. Gerrit Schüürmann (47) leitet das Department Chemische Ökotoxikologie am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle. Das Team analysiert die Schadwirkung chemischer Substanzen auf biologische Systeme. Dabei verfolgen die 30 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vier Ziele: Methoden zur Identifizierung toxischer Inhaltsstoffe komplexer Umweltproben zu entwickeln; biologische Wirkmechanismen chemischer Substanzen und Stoffgemische aufzudecken; Kriterien zur Bewertung des ökotoxikologischen Potenzials chemischer Substanzen zu erarbeiten und schließlich Instrumente für eine prädiktive Risikobewertung von Chemikalien bereitzustellen.

anzubieten. Da geht der Ball an die Wissenschaft zurück.

FRAGE: An diesem Thema wird aktuell gearbeitet?
Schon seit einigen Jahren ist die Systematisierung von Kombinationswirkungen ein Schwerpunkt bei uns. Ein weiteres aktuelles Feld ist die Erforschung von Mechanismen der Weiterleitung ökotoxikologischer Effekte auf höhere biologische Organisationsebenen. Und schließlich geht es derzeit darum, besser zu verstehen, welche Prozesse die Bioverfügbarkeit chemischer Substanzen – also ihre Bereitschaft, biologische Organismen unter Umweltbedingungen tatsächlich zu schädigen – beeinflussen. Das alles sind Schritte, um von künstlich mit Einzelstoffen gestalteten Testregimes zu natürlichen Situationen im Freiland zu gelangen. Das ist auch international der Trend.

FRAGE: Fließt auch der Faktor Zeit in die Betrachtung ein? Sie nannten das Beispiel FCKW ...
Der Parameter ist mit der Exposition, mit dem zuletzt skizzierten Forschungsfeld, bereits in der Diskussion. Wir stellen fest, dass sowohl die Wirkpotenz als auch die Wirkqualität abhängig von der Zeitdauer sind, in der ein Organismus einem Schadstoff ausgesetzt ist. So zeigen sich neurotoxikologische Effekte, die in Kurzzeittests nicht sichtbar werden, typischerweise erst bei längerfristigen Expositionszeiten.

FRAGE: Eine solche Gefährdung geht ja womöglich auch von den POPs, den Persistent Organic Pollutants, aus?
Ja, wir sind heute besorgt über die POPs. Aber nicht, weil diese langlebigen organischen Schadstoffe bereits zu massiven ad-hoc-Schäden geführt hätten. Sondern, weil sie in unserem Umweltsystem sehr lange erhalten bleiben werden. Dem Faktor Zeit kommt wieder eine Bedeutung zu: Wir können davon ausgehen, dass diese Stoffe langfristig in der Umwelt akkumulieren. Dies kann später – zum Beispiel nach Erreichen kritischer Gesamtmengen – zu einem erheblichen und gegebenenfalls auch großräumigen Schadeffekt führen.

FRAGE: Von dem heute niemand sagen kann, ob er sich „zurückholen" ließe?
Aus Sicht der Vorsorge müssen wir heute nicht nur den Aspekt der Schadwirkung, sondern ebenso das Expositionspotenzial erfassen. Wir sehen das Problem, dass Chemikalien wie die POPs – die nicht einfach aus der Umwelt wieder eingesammelt werden können – sich nicht nur angehäuft, sondern auch global ausgebreitet haben werden. Ihre möglichen Schadwirkungen wären zumindest für einen längeren Zeitraum nicht steuerbar. Vorsorge heute heißt: Exposition und Wirkung müssen gleichermaßen betrachtet werden. Es gibt eben Stoffe, bei denen allein die Exposition schon zur Besorgnis Anlass gibt.

FRAGE: Also müssen sich die ökotoxikologischen Testregimes weiter entwickeln?
Die Testphilosophie muss sich weiter entwickeln – weg von rein technisch ausgerichteten Prüfsystemen, hin zu einem stärkeren Realitätsbezug. Entwicklung heißt, dass die ökotoxikologische Forschung – endlich – die Komplexität des Umweltsystems ernster nimmt. Daraus können wir hoffentlich soviel lernen, dass die nächste Generation ökotoxikologischer Testinstrumente an zwei Punkten besser sein wird: In der Früherkennung schädlicher Wirkungen und in der Einbeziehung natürlicher Bedingungen.

FRAGE: Das Anliegen, die Komplexität des Umweltsystems als eines Vielstoff-Multibiologie-Systems ernster zu nehmen, wird dieses Anliegen von den Verantwortlichen in Industrie und Behörden mit getragen?
Der Einfluss von Wissenschaft auf Gesellschaft hat verschiedene Facetten. Ein Aspekt, der von uns nicht nur erwartet, sondern tatsächlich auch geleistet wird, ist die aktive Mitgestaltung von Umweltpolitik durch wissenschaftliche Beratungen im Vorfeld entsprechender Entscheidungen. Beispielsweise sitzen innerhalb der internationalen Wissenschaftsorganisation Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) Behörden, Industrie und Wissenschaft an einem Tisch. Wir sind dabei bereits in laufenden Verfahren gefordert, unseren Wissensstand und unsere Meinung einzubringen. Auf diesem Wege – einfach dadurch, dass wir die praktischen Probleme von vornherein gemeinsam angehen – verkürzen wir die sonstigen akademischen Abstände. Und das schlägt sich durchaus nieder.

FRAGE: Inwiefern?
Aus SETAC-Workshops, wie Ende der 1990er zu den POPs, entwickeln sich Impulse für die Gesetzgebung. Die werden nach meiner Erfahrung auch in der Fortschreibung entsprechender Regularien berücksichtigt. Insofern haben wir einen geringeren Abstand zu Behörden und Industrie als es aus der rein fachlichen Sicht erscheinen mag. Das ist eine Herausforderung, der wir uns gern stellen. Derzeit bereitet die EU eine neue Rahmenrichtlinie zu Pflanzenschutzmitteln vor – und es sind seit Beginn der Diskussion alle drei Gremien in Workshops etc. vertreten. Das gehört zum Selbstverständnis der Wissenschaftsgesellschaft. ■

Das Gespräch führte: Daniela Weber

Glossar

Absorption *Aufnahme von Gasen, Dämpfen, gelösten Stoffen und elektromagnetischen Wellen, zum Beispiel in Flüssigkeiten.*

Adsorption *Anlagerung von Molekülen oder Atomen aus einer flüssigen oder gasförmigen Phase an einem Festkörper. Die Umkehrung wird Desorption genannt.*

Anthropogen *Durch menschliche Tätigkeit verursacht, beeinflusst oder hergestellt.*

Bioakkumulation *Anreicherung einer Chemikalie in einem Organismus durch Aufnahme aus dem umgebenden Medium sowie über die Nahrung.*

Biometrie *ist ein Teilgebiet der Statistik, das sich mit der Anwendung mathematischer Methoden zur zahlenmäßigen Erfassung, Planung und Auswertung von Experimenten in Biologie, Medizin und Landwirtschaft befasst.*

BTEX *Sammelbezeichnung für Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole. Dies sind Lösungsmittel, die in vielen Bereichen der Produktions- und Fertigungstechnik eingesetzt werden. Die BTEX-Aromaten gehören zu den Hauptschadstoffen im Grundwasser.*

DDT *Dichlordiphenyltrichlorethan, ein breit wirksames Insektizid mit Berührungs- und Fraßgiftwirkung. In Deutschland seit 1972 verboten.*

DNA *Die Desoxyribonukleinsäure (englische Abkürzung DNA, deutsche Abkürzung DNS) speichert die Erbinformation einer Zelle.*

Emission *Sammelbegriff für die von einer Quelle an die Umwelt ausgehenden Stoffe, Verunreinigungen, Geräusche oder Wärme.*

Expositionsanalyse *Analyse der Stoffmengen, denen Organismen und Materialien in einer bestimmten Zeiteinheit ausgesetzt sind.*

FCKW *Fluorchlorkohlenwasserstoffe, werden als Kühlmittel, Treibgase oder Reinigungsmittel eingesetzt. Sie halten sich Jahrzehnte in der Atmosphäre und tragen wesentlich zum Abbau der Ozonschicht bei.*

Fluoreszenz *Phänomen, das auftritt, wenn energiereiche Strahlung von einem Molekül absorbiert wird und dieses daraufhin seinerseits Licht mit einer längeren Wellenlänge aussendet.*

Genexpression *Übersetzung der in einem Gen gespeicherten Information in eine spezielle Funktionseinheit in der Zelle.*

Immission *Einwirkung emittierter Schadstoffe (Emission) auf Pflanzen, Tiere, Menschen und Gegenstände.*

Kurzzeittest (engl. Screening test) *Labortestverfahren von ein bis vier Tagen Dauer, meist zur Bestimmung der akuten Toxizität an einer definierten Testspezies.*

Langzeittest *Labor- und Freilandtestverfahren bis zu mehreren Monaten Dauer mit Einzel- oder Multispezies zur Erfassung des Schädigungspotenzials einer Substanz (letal und subletal) unter Einbeziehung der Lebenszyklen der Testorganismen und der Elementzyklen im System.*

Metabolismus *Umwandlung von körperfremden Stoffen durch stoffwechselphysiologische Prozesse.*

Monitoring *Überwachung chemischer, biologischer oder physikalischer Qualitätsparameter über längere Zeit und / oder größere Räume.*

n-Oktanol/Wasser-Verteilungskoeffizient (K_{OW}) *Maß für die Verteilung einer Chemikalie zwischen einer wässrigen Phase und Oktanol als Stellvertretersubstanz für fetthaltige Gewebe.*

Ökosystem *Umfasst einen räumlich abgrenzbaren Lebensraum (Biotop, zum Beispiel ein Fluss- oder ein Feuchtgebiet) und die ihn bewohnenden Lebensgemeinschaften (Biozönose).*

Ökotoxikologie *Lehre von der Schadwirkung chemischer Verbindungen auf Organismen, Populationen und Lebensgemeinschaften.*

PAK *Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Giftige, zum Teil Krebs erzeugende Stoffe, die in Ruß und Teer vorkommen und unter anderem bei der Verbrennung von Fett entstehen, beispielsweise bei Gegrilltem.*

PBT *Abk. für Persistente, Bioakkumulierende und Toxische Stoffe.*

PCB *Polychlorierte Biphenyle werden unter anderem als Kühlmittel, Hydraulikflüssigkeit, Transformatorenöl, Imprägniermittel für Holz und Papier und Weichmacher für Kunststoffe verwendet. Aufgrund ihrer hohen Stabilität in der Umwelt werden sie nur äußerst langsam abgebaut und können sich über die Nahrungskette in Organismen anreichern.*

PCP *Abkürzung für Pentachlorphenol, ein im Holzschutz häufig verwendetes Fungizid.*

POPs *Abk. für Persistent Organic Pollutants, giftige und zugleich langlebige organische Schadstoffe.*

Persistenz *Beständigkeit organischer Chemikalien in der Umwelt.*

Pestizide *Chemikalien, die zur Bekämpfung von Schädlingen (Insekten, Pilze, Unkräuter) verwendet werden.*

QSAR *Quantitative Structure Activity Relationships (Quantitative Struktur-Wirkungs-Beziehungen). QSARs sind auf der Basis experimenteller Werte erstellte mathematische Beziehungen zwischen der Struktur eines Moleküls und einer bestimmten Eigenschaft der betreffenden Substanz.*

RNA *Die Ribonukleinsäure (englische Abkürzung RNA, deutsche Abkürzung RNS) speichert ebenfalls Erbinformationen, spielt jedoch in dieser Funktion gegenüber der DNA eine untergeordnete Rolle. Sie dient oft als Zwischenspeicher.*

Toxikologie *Lehre von Giften und Giftwirkungen.*

Umwandlung, abiotische *Veränderung der chemischen Struktur einer Chemikalie durch abiotische Umwelteinflüsse wie Temperatur, Licht, pH-Milieu.*

Umwandlung, biotische *Veränderung der chemischen Struktur einer Chemikalie durch Organismen bzw. deren Enzyme.*

Umweltkompartiment *Luft, Wasser, Boden bzw. deren Teilbereiche.*

Verteilungskoeffizient *Verhältnis zwischen den Konzentrationen einer Chemikalie in zwei begrenzt mischbaren Flüssigkeiten im Gleichgewichtszustand.*

Xenobiotika *Vom Menschen hergestellte, naturfremde Stoffe.*

IMPRESSUM:

HERAUSGEBER	UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH in der Helmholtz-Gemeinschaft www.ufz.de
REDAKTION	Doris Böhme und Susanne Hufe, UFZ
BERATENDES GREMIUM	Daniela Weber, Freie Redakteurin in Leipzig; Dr. Werner Brack, und Dr. Hans-Hermann-Thulke, Wissenschaftler im UFZ.
AUTOREN	Doris Böhme, Abteilung Presse- und Öffentlichkeitsarbeit am UFZ Susanne Hufe, Abteilung Presse- und Öffentlichkeitsarbeit am UFZ Daniela Weber, Freie Redakteurin in Leipzig
FOTOGRAFIE	André Künzelmann, UFZ
WEITERE BILDNACHWEISE	PhotoDisc®Environmental Concerns (Seiten 7, 9, 36, 51), Bund für Umwelt und Naturschutz (Seite 8), Uwe Lochstampfer, FloraFoto (Seite 22), IWF Wissen & Medien GmbH, Göttingen (Seite 30), Dr. Joachim Plötz, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (Seite 37), NASA/Kennedy Space Center (Seite 37)
GESTALTUNG	Mathias Kronberg, Agentur Wohlfahrt, Leipzig
DRUCK UND VERARBEITUNG	DS Druck-Strom GmbH, Leipzig
	Das UFZ Magazin „Chemikalien in der Umwelt“ wurde auf RecyMago plus gedruckt, einem Papier, das zu 100% aus Altpapier besteht.

Die Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Der Abdruck (auch von Teilen) oder die sonstige Verwendung ist nur in Absprache mit dem UFZ gestattet.

ISSN 1614-9173

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle

Das deutsche Kompetenzzentrum für Umweltforschung

NACHHALTIG FÜR DIE UMWELT AKTIV

Das Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ) forscht auf nationaler und internationaler Ebene für eine nachhaltige Landnutzung und die Sicherung der Lebensqualität in Kulturlandschaften.

Im Mittelpunkt der Forschung stehen zum einen dicht besiedelte Regionen, die der Mensch deutlich geprägt hat – städtische Räume, aber auch große verschmutzte Regionen und Bergbaugebiete – und zum anderen naturnahe Räume, insbesondere Wüsten und Halbwüsten.

Der Horizont der Forschungsthemen ist weit: Die Wissenschaftler gehen unter anderem Fragen der biologischen Vielfalt und ökologischen Stabilität auf den Grund, sie befassen sich mit dem Schutz von Wasserressourcen, untersuchen den Einfluss von Umweltbelastungen auf die Gesundheit des Menschen und entwickeln Sanierungstechnologien. Dabei verbinden sie naturwissenschaftliche Forschung eng mit sozialwissenschaftlicher, ökonomischer und rechtlicher Forschung.

Das UFZ kooperiert mit Forschungsinstituten und Universitäten auf nahezu allen Kontinenten der Erde. Gegenwärtig engagiert es sich sehr stark für eine enge europäische Vernetzung der Umweltforschung. Die bedeutendste Initiative ist PEER, eine strategische Verbindung der sieben größten Umweltforschungszentren Europas. Die globale Komponente der UFZ-Forschung kommt besonders in den Forschungskooperationen mit Lateinamerika und dem Nahen Osten zum Ausdruck.

Das UFZ wurde 1991 gegründet, ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (www.helmholtz.de) und beschäftigt an den Standorten Leipzig, Halle und Magdeburg inzwischen etwa 750 Mitarbeiter.

Es wird von der Bundesregierung (90 Prozent), dem Freistaat Sachsen (5 Prozent) und dem Land Sachsen-Anhalt (5 Prozent) finanziert.

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Permoserstraße 15
04318 Leipzig

Telefon: 0341/ 235 2278
Fax: 0341/ 235 2649
e-mail: info@ufz.de
Internet: http://www.ufz.de