

UFZ-Spezial

HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG – UFZ

OKTOBER 2012



CHEMIKALIEN IN DER UMWELT

Ob Chemikalien „gut“ oder „böse“ sind, hängt nicht nur von der Dosis ab, sondern auch davon, welchen Weg eine Chemikalie von der Produktion über den Verbrauch bis zur Entsorgung nimmt und auf welche Organismen sie dabei trifft. Denn auch wenn Chemie heute nicht mehr stinkt, umweltfreundlicher und sicherer geworden ist, gibt es für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik noch viel zu tun, Chemikalien umweltgerechter zu machen, unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden und Mensch und Umwelt zu schützen.



HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ

INHALT

- S. 2–3 Vorwort des Wissenschaftlichen Geschäftsführers des UFZ
- S. 4–5 Chemikalien systematisch umweltgerechter machen

Chemikalien – Vorkommen, Verbreitung, Wirkung

- S. 6 Von beiden Seiten graben
- S. 7 Doppelter Stress für kleine Krebse
- S. 8 Die üblichen Verdächtigen?
- S. 9 Interview: „Wir müssen Chemikalien-Datenbanken besser vernetzen“
- S. 10 Rückständen auf der Spur
- S. 11 Wasserlösliche Stoffe im Visier
- S. 12 Geheimnisvolle Cocktails
- S. 13 Intelligenter testen und integriert bewerten
- S. 14 Standpunkt: Alternative Testmethoden in der Umweltrisikoprüfung
- S. 15 Interview: „Alternativen funktionieren nicht ohne Expertenwissen“

Chemikalien und Gesundheit

- S. 16 Rechnen für die Gesundheit
- S. 17 Wie im Großen, so im Kleinen
- S. 18–19 Allergien durch Chemikalien

Chemikalien – Sanierung und Management

- S. 20 Wechselspiel von Experiment und Modell
- S. 21 Isotope machen Schadstoffabbau meßbar
- S. 22 Passende Teile finden und binden
- S. 23 Leben retten mit dem Leuchtkeferprinzip
- S. 24 Winzige Giganten
- S. 25 Eco-tech is(s)t High-tech
- S. 26 Die perfekte Welle
- S. 27 Standpunkt: Nachhaltige Nutzung von Ressourcen – der Untergrund gehört dazu!
- S. 28–29 Interview: Die öffentliche Debatte braucht belastbare und glaubwürdige Expertenaussagen
- S. 30–31 Wissenswertes in Sachen Chemie und Chemikalien
- S. 32 UFZ im Überblick

CHEMIKALIEN IN DER UMWELT

Unsere Gesellschaft produziert, verwendet und verteilt Chemikalien in großem Maßstab: Wurden 1930 etwa eine Million Tonnen Chemikalien weltweit hergestellt, sind es heute über 400 Millionen Tonnen. Sie sind Rohstoffe und Produkte. Sie sorgen dafür, dass Fernseher, Computer sowie Handys funktionieren und Arzneimittel sowie Kosmetika wirken; sie stecken in Kleidung, Möbeln, Farben und Putzmitteln, sie steigern landwirtschaftliche Erträge und konservieren Lebensmittel. Chemikalien verbessern unsere Lebensbedingungen. Sie haben aber auch unerwünschte Wirkungen, vor denen wir Mensch und Umwelt schützen wollen.

Auch wenn die Zeiten offensichtlicher Verschmutzung, rauchender Schornsteine und stinkender Abwässer in vielen Ländern Europas vorbei sind – nahezu alle Chemikalien, die in Industrie, Landwirtschaft, Verkehr oder Alltagsprodukten verwendet werden, gelangen früher oder später über verschiedene Wege in die Umwelt: Über Bäche, Flüsse und Meeresströmungen, über Wind und Regen oder über die Nahrungskette verteilen sie sich bis in die entlegensten Winkel der Welt. 1989 fanden Wissenschaftler hohe Konzentrationen Polychlorierter Biphenyle (PCB) im Robben- und Walfleisch, von dem sich die Inuit im kanadischen Nordosten ernähren. 2009 spürten UFZ-Forscher im Schnee der 6.200 Meter hohen Andengipfel ebenfalls PCB auf. Einst technisch sehr geschätzt als Weichmacher, Schmier- oder Flammschutzmittel, sind die inzwischen als krebserzeugend erkannten Substanzen seit 2001 verboten. Doch Polychlorierte Biphenyle sind – wie viele andere Chemikalien auch – nur schwer abbaubar.



Das bedeutet, sie bleiben in der Umwelt – an Bodenpartikeln, Wasserschwebstoffen oder an Pflanzenoberflächen – lange erhalten und können sich darüber hinaus im Fettgewebe von Lebewesen anreichern.

Das potenzielle Risiko von chemischen Stoffen für Mensch und Umwelt ist seit Jahrzehnten ein Dauerthema. Immer wieder geraten einzelne Stoffe in das Blickfeld öffentlicher Debatten oder in die Schlagzeilen. Oft erst dann, wenn das Kind bereits in den Brunnen gefallen ist. Wenn sich nach der Anwendung herausstellt, dass manch eine Substanz oder deren Abbauprodukte bis dahin nicht untersuchte, schädigende Nebenwirkungen aufweisen. Mit zahlreichen internationalen Vereinbarungen wurde versucht, dem weltweiten Einsatz und Handel von Chemikalien systematischer zu begegnen. Mit dem Montréal-Protokoll wurden 1987 Fluorierte Kohlenwasserstoffe (FCKW) verboten, um die Ozonschicht zu schützen. Das Basler-Abkommen von 1989 verbietet jegliche Giftmüllexporte aus der EU in Entwicklungsländer. Das auf dem Weltgipfel in Johannesburg 2002 verabschiedete internationale Abkommen SAICM (Strategic Approach to International Chemicals Management) hat zum Ziel, eine gemeinsame Strategie für den Umgang mit den gefährlichsten Chemikalien zu entwickeln. Tatsächlich wurde 2006 ein Aktionsplan mit über 200 Maßnahmen verabschiedet. So wichtig derartige Abkommen sind – fehlen Verbindlichkeit und Kontrollmechanismen, werden auf den Märkten wachsender Industrienationen wie China und Indien und in zahlreichen Entwicklungsländern auch weiterhin Substanzen zu finden sein, die

in Deutschland und Europa längst verboten sind.

Ein zentrales Problem dabei ist, dass für die meisten der weltweit produzierten und gehandelten Chemikalien sowie ihre Abbauprodukte keine oder nur unzureichende Informationen über deren Eigenschaften und potenzielle Gefahren vorliegen. Das betrifft auch rund 95 Prozent der in der EU verwendeten Chemikalien. Besonders groß ist das Unwissen über die langfristigen Wirkungen und über die sogenannten Altstoffe, die schon vor 1981 auf dem Markt waren. Mit dem seit 2007 geltenden europäischen Chemikaliengesetz REACH – Registrierung (Anmeldung), Evaluierung (Prüfung), Autorisierung (Zulassung) und Verbot von Chemikalien – will die EU nun die Voraussetzungen schaffen, durch mehr Wissen und Informationen über alte und neue chemische Substanzen Risiken für Mensch und Umwelt zu vermeiden und Wege für innovative Lösungen zu öffnen. Diese Aufgabe – Wege zu einer nachhaltigeren Chemie – erfordert das Zusammenspiel von Akteuren aus chemischer Industrie, Politik, Behörden, Umwelt- und Verbraucherverbänden und Wissenschaft.

Das UFZ leistet mit seinem Kernthema „Chemikalien in Umwelt und Gesundheit“ wichtige Beiträge zum nachhaltigen Umgang mit chemischen Substanzen für die Umwelt und die menschliche Gesundheit. In den vergangenen Jahren wurde am UFZ eine breite und international anerkannte sowie bei Ämtern und Behörden gefragte Expertise aufgebaut: Mehr als 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler forschen in der Umweltchemie und Ökotoxikologie, in der

chemischen und biologischen Analytik, in der Umweltimmunologie, Molekular- und Systembiologie sowie in der Umweltmikrobiologie und technischen Chemie mit Blick auf ein neues Verständnis der Interaktion von Chemikalien mit Menschen und Ökosystemen. Hier werden die Methoden von morgen für wissenschaftsbasierte Risikoabschätzung, Chemikalienmanagement und Reinigungstechnologien entwickelt. Dabei ist unsere Chemikalienforschung eng mit der Wasser- und Bodenforschung vernetzt. Denn auch bei der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie oder beim Bodenschutzgesetz spielen Chemikalien eine entscheidende Rolle.

Mit der Spezialausgabe unseres Newsletters „Chemikalien in der Umwelt“ möchten wir Ihnen einen Einblick in aktuelle Projekte und Themenschwerpunkte aus der Chemikalien- und Gesundheitsforschung des UFZ geben. Ich wünsche Ihnen neue Erkenntnisse und viel Vergnügen beim Lesen.

Prof. Dr. Dr. h.c. Georg Teutsch
Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ



(Foto: © Alexander Rath / Fotolia.com)

CHEMIKALIEN SYSTEMATISCH UMWELTGERECHTER MACHEN

Wer glaubt, nur durch Beobachten, Messen und Analysieren dem Auftreten von Chemikalien in der Umwelt Herr zu werden, der irrt. Umweltchemie und Ökotoxikologie nur phänologisch zu betreiben, also der Vielzahl der Stoffe, die die Gesellschaft heute einsetzt, eine Vielzahl von Beobachtungen entgegensetzen, reicht nicht. Was gebraucht wird, ist eine grundlagenorientierte Umweltchemie und Ökotoxikologie, die Mechanismen aufdeckt und so beschreibt, dass Prognosen und Extrapolationen möglich sind, die tatsächlich zum Nutzen für Mensch und Umwelt führen.

Diese Herausforderung ist nicht nur eine wissenschaftliche. Sie richtet sich auch an die Forschungspolitik. Bislang werden Umweltchemie und Ökotoxikologie vor allem als Kostenfaktor wahrgenommen. Geld steht dann zur Verfügung, wenn Katastrophen und andere Überraschungen bereits aufgetreten sind. Die Angst der Öffentlichkeit nach dem Seveso-Unfall oder Ölnfällen verhalf der umweltchemischen und ökotoxikologischen Forschung zu einem ordentlichen finanziellen Schub. Doch mit dem nachlassenden öffentlichen Interesse lässt auch die Förderung nach. Die fehlende Kontinuität auf diesem Gebiet ist kontraproduktiv zum Anspruch, Chemikalien systematisch umweltgerechter zu machen und schädliche Wirkungen von vornherein vermeiden zu wollen. Doch kontinuierliche und systematische Forschung wird angesichts vieler Fakten und Tatsachen unumgänglich sein: 60 Millionen Chemikalien sind heute weltweit

bekannt. 100.000 synthetisch hergestellte Stoffe sind allein in Europa als Industriechemikalien im Einsatz. Hinzu kommen tausende Wirkstoffe in Pflanzenschutzmitteln, Pharmaka und Bioziden, in Wasch- und Reinigungsmitteln, Lebensmittelzusatzstoffen und Kosmetika sowie die Transformations- und Reaktionsprodukte all dieser Stoffe in der Umwelt. Die chemische Produktion wird in den kommenden Jahren besonders in den Entwicklungsländern expandieren. Welche Folgen das für Lebewesen und die Qualität der Umweltressourcen wie Luft, Wasser und Boden hat, wie sich die Folgen managen oder vermeiden lassen, wird nur mit einer soliden wissenschaftlichen Basis zu beantworten sein.

Umweltchemie und Ökotoxikologie – zwei junge Wissenschaftsdisziplinen

Diese Aufgabe ist für die beiden Wissenschaftsdisziplinen Umweltchemie und Ökotoxikologie eine gewaltige Herausforderung, auch da es sich um noch junge Disziplinen handelt. Nach dem Zweiten Weltkrieg, als die chemische Industrie boomte und Wohlstand und Fortschritt versprach, wuchs auch die Sorge um schädliche Einflüsse von chemischen Substanzen auf die Umwelt. Ende der 1960er Jahre begannen die ersten Umweltschutzdiskussionen. Vor diesem Hintergrund entstanden die beiden Wissenschaftsdisziplinen Umweltchemie und Ökotoxikologie als interdisziplinärer Mix aus Chemie, Biologie und Toxikologie – maßgeblich geprägt durch den deutschen Chemiker Friedhelm Korte und sein „Lehr-

buch der Ökologischen Chemie“ sowie den französischen Toxikologen René Truhaut, der 1969 den Begriff „Ökotoxikologie“ einführte. Wissenschaftliche Tagungen und Fachgesellschaften etablierten sich erst ab 1990.

Die *Umweltchemie* beschäftigt sich mit der Ausbreitung, der Umwandlung und dem Verbleib chemischer Substanzen aus natürlichen und anthropogenen Quellen im Hinblick auf die belebte und unbelebte Umwelt. Sie entwickelt wissenschaftliche Strategien und Konzepte, um das Auftreten und Verhalten von Chemikalien in den verschiedenen Umweltmedien frühzeitig zu erkennen und zu bewerten und – wenn möglich – zu vermeiden. In der *Ökotoxikologie* stehen die Auswirkungen von chemischen Stoffen auf die belebte Umwelt – also die Wirkung auf und die Gefährdung von unterschiedlichen Organismen – im Mittelpunkt. Dass beide Disziplinen eng miteinander verzahnt sind, ist offensichtlich. Dass beide Disziplinen zudem mit anderen Wissenschaftsdisziplinen wie der Biologie, der Ökologie, der Hydrologie, den Agrarwissenschaften, der Chemie oder der Toxikologie eng vernetzt sind, liegt ebenfalls auf der Hand. Noch wird die Emanzipation der beiden jungen Disziplinen Umweltchemie und Ökotoxikologie zu wenig wahrgenommen. Vielleicht liegt darin begründet, dass sie akademisch etwa bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft oder anwendungsorientiert etwa beim Bundesforschungsministerium bisher zu wenig Gehör als eigenständiges Fachgebiet finden.

Dringender Handlungsbedarf

Fakt ist, dass die gesellschaftliche und praktische Relevanz der Disziplinen zunehmen wird. Bevölkerungs- und Konsumwachstum und damit einhergehender wachsender Nahrungs-, Ressourcen- und Energiebedarf werden dazu führen, dass auch mengen- und zahlenmäßig mehr chemische Stoffe produziert, verarbeitet, gehandelt und entsorgt werden. Das macht nationale und internationale Rahmenbedingungen erforderlich, um die lokale, regionale und globale Umwelt vor den unerwünschten Wirkungen dieser Stoffe zu schützen. Beurteilungen und Managementmaßnahmen lassen sich jedoch nur dann fundiert treffen, wenn sie wissenschaftlich untersetzt sind. Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und die europäische Chemikalienregulierung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) sind dafür zwei gute Beispiele. Denn beide sind ohne eine effiziente Risikobewertung von Chemikalien nicht umsetzbar.

Beispiel Wasserrahmenrichtlinie: Inzwischen haben zwar 90 Prozent der Flüsse und Seen Deutschlands den laut WRRL geforderten guten chemischen Zustand. Den notwendigen guten ökologischen Zustand schaffen hingegen nur etwa 10 Prozent der Oberflächengewässer. Dieser Befund könnte glauben machen, dass heute kaum noch Gefahren von Chemikalien ausgehen. Allerdings sind die standardmäßig für die Beurteilung der Wasserqualität zugrunde gelegten 30 Stoffe heute kaum noch im Einsatz oder sogar lange verboten. Demgegenüber werden tausende von Stoffen, die aktuell in Mikromengen und als Mixturen in die Gewässer gelangen, toxikologisch bislang nicht beurteilt. Hier sollte auch der Frage nachgegangen werden, ob auftretende Stoffmixturen andere Wirkungen haben als die einzelnen Substanzen. Solche Vermutungen können nicht mit klassischer chemischer Analytik geprüft werden. Hier bedarf es eines neuen Forschungsansatzes, der chemische und wirkungsorientierte Analytik geschickt miteinander verknüpft. Die große Bandbreite und enge Verzahnung verschiedener Disziplinen am UFZ – moderne chemische Analytik, theoretische Umweltchemie, Umweltmikrobiologie sowie systemische und bioanalytische Ökotoxikologie – bieten dafür ausgezeichnete Voraussetzungen.

Beispiel Chemikalienregulierung: REACH verpflichtet Hersteller oder Importeure, gefährliche Eigenschaften von Industrie-

chemikalien und Naturstoffen zu ermitteln, deren Wirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt abzuschätzen und darüber zu informieren. Das gilt für Stoffe, die neu auf den Markt gebracht und gehandelt werden sollen. Das gilt aber auch für schätzungsweise 30.000 Altchemikalien, die bereits vor 1981 in Mengen von einer Tonne und mehr pro Jahr auf den Markt gekommen sind. Mit REACH sollen Chemikalien von der Produktion über den Verbrauch bis zur Entsorgung sicher werden. Es gibt aber wie so oft eine Kehrseite der Medaille: Um die human- und umwelttoxikologischen Eigenschaften der Chemikalien zu ermitteln, sind sehr häufig noch Tierversuche notwendig. Am UFZ verfolgen daher verschiedene Teams das Ziel, Standardtestprogramme in der Umweltrisikobewertung von Chemikalien, die auf Tierversuchen basieren, durch intelligente Teststrategien zu ersetzen. Durch den Einsatz von alternativen Testverfahren und theoretischen Prüfmethode sowie die Verknüpfung verschiedener Ansätze und Informationen kann das Ziel, trotz wachsender Zahl von Chemikaliengestaltungstests Tierversuche zu reduzieren, erreicht werden. Als hoffnungsvolle und kostengünstige Ansätze gelten sowohl experimentelle in vitro-Tests als auch computerbasierte Modelle (QSAR, Quantitative or Qualitative Structure-Activity Relationships) und Entscheidungshilfen (read across Verfahren).

Was, wenn Chemikalien bereits in der Umwelt sind?

Bis zum Ziel, Chemikalien und deren Lebenszyklen hinsichtlich ihrer Umwelteigenschaften bereits optimiert zu entwickeln, liegt noch ein weiter Weg vor Wissenschaft, Industrie und Politik. Das gilt auch für die Identifizierung von Chemikalien, die sich bereits in der Umwelt befinden und die eine Sanierung von kontaminierten Standorten erforderlich machen. Wie können Schadstoffe aus Böden oder Gewässern entfernt werden? Unter welchen Bedingungen sind Ökosysteme selbst in der Lage, die Dienstleistung „Schadstoffabbau“ für den Menschen zu erbringen? Wie können diese Abbauleistungen von Mikroorganismen nutzbar gemacht oder unterstützt werden? Wo sind innovative physikalisch-chemische Lösungen notwendig? Antworten auf diese Fragen erfordern auch Feldversuche. Denn bevor gute umwelttechnologische Lösungen aus dem Labor in marktreife Technologien überführt werden können, müssen sie im Feld erprobt werden. Auch dafür

existieren am UFZ mit Pilotanlagen und Forschungsplattformen wie SAFIRA und TERENO hervorragende Voraussetzungen. Wissenschaftliche Studien an Feldstandorten bieten darüber hinaus die Chance, den biologischen Abbau von Chemikalien als Leistung von Ökosystemen zu verstehen. Die ableitbaren Prinzipien wiederum lassen die Vision von ökokompatiblen Chemikalien ein wenig näher rücken.

Und was, wenn der Mensch betroffen ist?

Wenn Chemikalien unerwünschte Nebenwirkungen in der Umwelt verursachen, ist oft auch der Mensch betroffen, denn er ist Teil der Umwelt, lebt und arbeitet in der Umwelt, nutzt und konsumiert Umweltressourcen wie Trinkwasser, Atemluft oder Nahrungsmittel. Menschliche Reaktionen auf Umweltstressoren werden häufig über das Immunsystem vermittelt. Deshalb wird im Rahmen der Gesundheitsforschung am UFZ auch untersucht, wie Umweltchemikalien auf Zellen des menschlichen Immunsystems wirken und zu umweltbedingten Krankheiten wie Allergien beitragen. Dabei gewinnt in der Forschung die Systembiologie immer mehr an Bedeutung. Diese noch recht junge Wissenschaftsdisziplin vereint Biologie, Mathematik und Physik in experimentellen und modellbasierten Ansätzen, um biologische Prozesse in Zellen, Geweben und Organismen als Ganzes zu verstehen und mit diesem Wissen Präventionsstrategien zu entwickeln.

Mit dem Kernthema „Chemikalien in Umwelt und Gesundheit“ wollen die UFZ-Forscher dazu beitragen, dass Chemikalien ökokompatibel werden, dass ihre unerwünschten Wirkungen reduziert und Mensch und Umwelt geschützt werden. Das erfordert exzellente Forschung, anspruchsvolle Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und steten Wissenstransfer in die Gesellschaft.

UFZ-Ansprechpartner:

■ **PD Dr. Rolf Altenburger**
Leiter Dept. Bioanalytische
Ökotoxikologie

Sprecher des Topics „Chemikalien in der Umwelt“ im Helmholtz-Forschungsprogramm „Erde und Umwelt“
e-mail: rolf.altenburger@ufz.de

Der Einsatz von Pestiziden wie in dieser Pfirsichplantage in Italien sorgt dafür, dass die Artenvielfalt in einem Ökosystem zurückgeht. (Foto: ©ermess / Fotolia.com)



VON BEIDEN SEITEN GRABEN

Der Kollaps von Bienenvölkern beschäftigt die Imker seit Jahren. Trotzdem sind die Ursachen noch immer nicht geklärt. Neben Infektionen mit Varroamilben spielten die Auswirkungen von Chemikalien offenbar eine bedeutende Rolle. Wahrscheinlich ist die kombinierte Wirkung von althergebrachten Stressoren und Pestiziden. Im Verdacht stehen dabei vor allem Neonicotinoide, eine Gruppe gängiger, moderner Insektenvernichtungsmittel, die von den Nutzpflanzen aufgenommen werden. Eines davon ist beispielsweise Thiametoxam. Entsprechend der klassischen Testverfahren müsste dies ein harmloses Pflanzenschutzmittel sein, denn die untersuchten Insekten überleben in der Regel. Dennoch gibt es Nebenwirkungen, wie eine Gruppe französischer Agrarforscher erst kürzlich in SCIENCE zeigte: Das synthetisch hergestellte Mittel mit nikotinartigen Wirkstoffen lässt die Bienen die Orientierung verlieren. Sie finden nicht mehr in ihren Stock zurück, was sich dramatisch auf den Fortbestand des Volkes auswirkt.

Für Dr. Matthias Liess vom UFZ ist das Beispiel der Neonicotinoide symptomatisch: „Wenn die falschen Parameter im Labortest bewertet werden, dann sind solche Stoffe scheinbar unschädlich. Bei DDT zeigte sich auch erst Jahre später, dass es erbgutschädigend wirkt. Wir müssen deshalb vermehrt darauf achten: Was passiert draußen in der Natur? Und uns immer wieder fragen: Was haben wir übersehen?“ Dass etwas schief läuft, ist für Liess und seine Kollegen offensichtlich: Erst vor kurzem veröffentlichten die Ökotoxikologen aus Landau, Leipzig, Aarhus und Sydney eine Metastudie, für die

sie 111 unterschiedliche Fließgewässer aus sechs verschiedenen Ländern Europas sowie Sibirien und Australien ausgewertet hatten. Das Ergebnis: Der bestehende Bewertungsprozess reicht nicht aus, um das Ökosystem Fluss nachhaltig vor den Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln zu schützen. Bei Konzentrationen, die laut Standardverfahren unbedenklich sind, wurde das Vorkommen empfindlicher Organismen noch um 27 bis 61 Prozent reduziert – je nachdem, ob es unbelastete Flussabschnitte gab, die Effekte zum Teil puffern können. Die Forscher empfehlen daher nicht nur, den Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in die Gewässer drastisch zu reduzieren, sondern auch Pufferzonen einzurichten, die als Refugium dienen können.

Auch wenn z. B. die EU und die USA Pestizide vor der Zulassung streng prüfen, der Chemikalieneinsatz in der modernen Landwirtschaft ist offensichtlich ein Faktor, der die Biodiversität bedroht und zum Rückgang der Artenvielfalt beiträgt. Problematisch ist, dass bei den Zulassungsverfahren die Testorganismen unter optimierten Bedingungen untersucht werden. Die Vielzahl natürlicher Umweltfaktoren, die die Wirkung der Pestizide in der Natur verstärken können, ist im Labor nicht zu testen. Auch hat sich die eingesetzte Menge der Insektenvernichtungsmittel in den letzten 15 Jahren in Deutschland mehr als verdoppelt.

„Zusätzlich problematisch ist nicht nur die Menge, sondern auch die Toxizität. Diese Mittel sind heute effektiver als früher, was dem Landwirt nutzt, aber der Vielfalt auf seinem Land schadet“, erklärt Matthias Liess.

Der international angesehene Pestizidexperte, der unter anderem die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit berät, sieht noch ein anderes Problem auf europäischer Ebene: Verschiedene EU-Richtlinien wie die Wasser-Rahmenrichtlinie, die Pestizidrichtlinie oder die Naturschutzrichtlinie laufen aneinander vorbei, weil für sie unterschiedliche Behörden zuständig sind. Für einen wirksamen Schutz der Biodiversität müssten diese besser abgestimmt werden.

Doch es sind nicht nur die Politiker und Behörden, die umdenken sollten. Entscheidungsträger sind auf verlässliche Informationen angewiesen. Und an dieser Stelle ist die Wissenschaft gefragt. „Wir brauchen einen Paradigmenwechsel. Es reicht nicht mehr aus, einerseits isolierte, naturferne Experimente zu machen, um danach die Wirkung auf das gesamte Ökosystem abzuschätzen, und andererseits unspezifische Zustandserhebungen zur Umweltsituation durchzuführen. Wenn wir die Situation verbessern wollen, müssen wir beide Ansätze zusammenführen und kontrollierte Experimente sowie großräumige Erhebungen ergänzend interpretieren. Ähnlich wie bei einem Tunnel, der dann am besten gelingt, wenn man von beiden Seiten gräbt“, appelliert Liess. Die Toxikologen könnten in diesem Punkt viel von den Ökologen lernen, bei denen dieses Umdenken schon vor vielen Jahren stattgefunden habe. *Tilo Arnhold*

UFZ-Ansprechpartner:

■ **PD Dr. Matthias Liess**
Leiter Dept. System-Ökotoxikologie
e-mail: matthias.liess@ufz.de



Der Bachflohkrebs *Eulimnogammarus verrucosus* lebt ausschließlich im Baikalsee. Die kleinen Krebstiere sind ein wichtiges Glied in der Nahrungskette dieses UNESCO-Weltnaturerbes. Klimawandel und Chemikalien könnten dafür sorgen, dass die auf den Baikalsee spezialisierte Art von ihrer Verwandtschaft verdrängt wird. (Foto: Vasilij Pavlichenko)

DOPPELTER STRESS FÜR KLEINE KREBSE

Der Baikalsee ist ein See der Superlative. Er gilt nicht nur als tiefster und ältester See der Erde, sondern speichert auch eine kaum vorstellbare Menge an Süßwasser. Sein Wasser allein würde theoretisch reichen, um die ganze Weltbevölkerung ein halbes Jahrhundert mit Trinkwasser zu versorgen. Auch wenn der Baikalsee weit weg von den Industriezentren der Erde ist, unberührt vom globalen Wandel ist er schon lange nicht mehr. Der Klimawandel hat dafür gesorgt, dass sich das kristallklare Wasser an der Oberfläche langsam erwärmt. 1,2 Grad in einem halben Jahrhundert klingt wenig, könnte aber für das einzigartige Ökosystem, das in dieser Form seit Millionen von Jahren existiert, auf Dauer zu viel sein.

Im See leben über 1.500 Tierarten, zwei Drittel davon nur hier. „Das ist eine der Besonderheiten, die den Baikalsee für uns Forscher so interessant macht“, erklärt Dr. Maxim Timofeyev vom Baikalsee Research Center in Irkutsk. „Weshalb kommen diese endemischen Arten nur hier vor und andere Arten, die sonst überall in diesen Breiten zu finden sind, nicht? Wir vermuten, dass die endemischen Arten besser an die ganz spezifischen Bedingungen des Baikalsees, aber nicht an die anderer Gewässer angepasst sind.“ Ob die Spezialisten hier in Zeiten des Klimawandels immer noch im Vorteil gegenüber den Generalisten sind, wollen die russischen Wissenschaftler nun zusammen mit deutschen Kollegen herausfinden. Beim Projekt „LabEglo“ (Lake Baikal and biological effects of global change) arbeiten Wissenschaftler verschiedener Disziplinen des UFZ, der Universität Leipzig, des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und

Meeresforschung (AWI) sowie des Baikalsee Research Centers und der Universität Irkutsk zusammen. Gefördert wird das Projekt von der Helmholtz-Gemeinschaft und der Russischen Stiftung für Grundlagenforschung.

Während die russischen Biologen jahrzehntelange Beobachtungsreihen in das Projekt einbringen, steuern die deutschen modernste Labortechnik bei. „Taxonomisch sind diese Arten gut untersucht, aber über genetische Grundlagen ist bisher kaum etwas bekannt. Der Einsatz von Hightech könnte uns nun völlig neue Einblicke erlauben“, berichtet Dr. Till Luckenbach vom UFZ. Dem Zellbiologen, der auch schon mehrere Jahre in den USA gearbeitet hat, ist das Kribbeln anzumerken, das Forscher immer dann befällt, wenn sie wie die großen Entdecker früherer Jahrhunderte die Chance wittern, weiße Flecken auf der wissenschaftlichen Landkarte zu entdecken. Der weiße Fleck für Luckenbach sind die Veränderungen auf Zellebene, die Chemikalien auslösen. Normalerweise haben Zellen verschiedenste Mechanismen entwickelt, um sich gegen Chemikalien oder andere Stress verursachende Umweltfaktoren zu schützen, wenn sie es nicht im Laufe der Evolution verlernt haben. So fehlt arktischen Fischen beispielsweise ein bestimmtes Protein, das die Zellen bei Temperaturanstieg intakt hält. „Wir vermuten, dass viele der Arten an die sehr konstanten Bedingungen mit geringen Temperaturschwankungen des extrem sauberen Wassers im Baikalsee so stark angepasst sind, dass deren Zellen die Fähigkeit verloren haben, Temperaturschwankungen und organische Schadstoffe zu tolerieren.“ Neben dem Temperaturanstieg nehmen

Nährstoffe und Chemikalien im Wasser zu. Die berühmte Zellstofffabrik in Baikalsk ist nur eine Ursache. Veränderte Landnutzung in der Mongolei, dessen nordwestliche Flusseinzugsgebiete in den Baikalsee fließen, trägt ebenfalls dazu bei.

Um diesen Wandel unter die Lupe zu nehmen, haben die Wissenschaftler *Eulimnogammarus verrucosus* ins Visier genommen. Ein kleiner, blau-grüner Bachflohkrebs, der nur hier im UNESCO-Weltnaturerbe lebt, dessen Verwandte aber das ganze nördliche Eurasien erobert haben. Das ermöglicht gute Vergleiche. Die kleinen Krebstiere stellen einen hohen Anteil der gesamten Biomasse, besiedeln verschiedenste Bereiche des Sees und sind ein wichtiges Glied in der Nahrungskette. Sollten sich die Befürchtungen bewahrheiten, dann könnten die Jahrzehnte der auf den Baikalsee spezialisierten Arten gezählt sein und sie in Zukunft von ihrer Weltenbummler-Verwandtschaft verdrängt werden. Doch vorher hat der bisher nur Spezialisten bekannte *E. verrucosus* zumindest die Chance, in die Geschichte der Ökotoxikologie einzugehen. Er könnte wichtiges Grundlagenwissen liefern, welche Risiken Klimawandel und Chemikalien für die Ökosysteme des Planeten bergen. Denn dieser doppelte Stress steht Organismen auch andernorts bevor. Tilo Arnhold

UFZ-Ansprechpartner:

■ Dr. Till Luckenbach
Dept. Bioanalytische Ökotoxikologie
e-mail: till.luckenbach@ufz.de

Probenahme an der Bilina, einem Nebenfluss der Elbe, der durch ein Braunkohletagebauegebiet in Tschechien fließt. Erstaunlich war für die Wissenschaftler, dass die im Wasser und Sediment gefundene Chemikalie Triclosan, die als Bakterienhemmer in Textilien eingesetzt wird, problematischer für die Umwelt ist als die hohen Konzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen.
(Foto: André Künzelmann)



DIE ÜBLICHEN VERDÄCHTIGEN?

Eigentlich sollte es ein Grund zur Freude sein: Gut 90 Prozent der Flüsse und Seen Deutschlands haben einen „guten chemischen Zustand“. Nur leider sind es beim „guten biologischen Zustand“ nur ganze 10 Prozent. Wie kann das sein? Schließlich gehen die Klassiker der Umweltüberwachung wie Atrazin, Lindan oder DDT doch tatsächlich zurück. Diese Chemikalien gehören mit 30 anderen (ab 2012 mit 45 anderen) zu den prioritären Stoffen, die nach der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) für die Bestimmung des „chemischen Zustands“ herangezogen werden. Ihr Rückgang ist allerdings nicht so erstaunlich. Schließlich ist die Anwendung der meisten dieser Stoffe längst verboten. „Es sind heute nicht mehr die üblichen Verdächtigen, die unsere Gewässer belasten“, ist Dr. Werner Brack vom UFZ überzeugt. Der Umweltchemiker will diejenigen Stoffe in der Umwelt aufspüren, die messbare Wirkungen hervorrufen – oft eine Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen. Allein in Europa sind mehr als 100.000 synthetische Substanzen im Einsatz.

Auch wenn viele Behörden mehr als die vorgeschriebenen prioritären Stoffe messen, ist die Gefahr groß, dass neu auftretende Chemikalien durchs Raster fallen. Die Lösung des Dilemmas kann jedoch nicht sein, alle Chemikalien zu überwachen. Das hilft schon deshalb nicht, weil für die meisten Stoffe keine Daten zur Giftigkeit vorhanden oder zugänglich sind. Auch ist der politische Prozess, neue Stoffe in die Überwachung aufzunehmen und Umweltqualitätskriterien zu erstellen, oft viel langsamer als die Innovationen der chemischen Industrie.

Werner Brack schlägt deshalb einen ganzheitlichen Ansatz zur Überwachung von Gewässern vor, bei der die chemische Analytik von Einzelstoffen mit Biotests zur Analyse der Wirkungen verknüpft wird. Dazu wird das Extrakt einer Wasserprobe, das durchaus 10.000 Einzelstoffe enthalten kann, in verschiedene Substanzgruppen aufgeteilt. Im nächsten Schritt wird untersucht, wie jede dieser einzelnen Fraktionen auf Gewässerorganismen wie Grünalgen, Wasserflöhe, Fischembryonen, Bakterien oder Zellen wirkt. Stoßen die Wissenschaftler auf Fraktionen, die eine Wirkung hervorrufen, werden diese weiter untersucht, bis am Ende die tatsächlichen Übeltäter – also alle Stoffe mit einem bestimmten Effekt im Gewässer – eingegrenzt sind. Dieser Ansatz hat einen großen Vorteil: Wird zum Beispiel ein Pestizid aus dem Verkehr gezogen und durch ein neues, aber ähnlich wirkendes ersetzt, wird dieses bei einer solchen wirkungsbezogenen Überwachung mit erfasst, auch wenn es sich der chemischen Analytik entzieht. „So können wir vermeiden, dass uns eine Verbesserung der chemischen Wasserqualität vorgegaukelt wird“, sagt Werner Brack und untersetzt seine These mit aktuellen Untersuchungen an der Bilina, einem Nebenfluss der Elbe, der durch Braunkohletagebauegebiete in Tschechien fließt. Für die Wissenschaftler war es keine Überraschung, hohe Konzentrationen an toxischen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) zu finden, denn diese sind natürlicher Bestandteil von Kohle und Erdöl. Erstaunlich dagegen war die Tatsache, dass von einer anderen Substanz eine viel größere Umweltgefahr ausging: Triclosan. Die Chemikalie ist seit 1972 auf

dem Markt. 1998 wurden erste gravierende Wirkungen entdeckt. Bis heute wird Triclosan in Körperpflegemitteln und Sporttextilien als Bakterienhemmer genutzt – überwacht wird es in großen Teilen Europas nicht. Überwachungsdaten aus Sachsen brachten ans Licht, dass Triclosan auf Platz 6 der besonders problematischen Stoffe in sächsischen Flüssen steht. Durch diese und andere Studien hat Triclosan nun Eingang in den Priorisierungsprozess zur Gewässerüberwachung gefunden.

Ein schöner Erfolg. Aber nicht genug: Mit dem von ihm koordinierten EU-Trainingsnetzwerk EDA-Emerge möchte Werner Brack für eine effizientere Stoffidentifizierung durchsatzstarke Screening- und Fingerprintanalysen (EDA) entwickeln und zugleich die Ausbildung internationaler Nachwuchswissenschaftler auf diesem Gebiet vorantreiben. Bei der Stoffidentifizierung soll zudem eine umfangreiche Spektrendatenbank helfen, die Brack gemeinsam mit Kollegen aus ganz Europa im Rahmen des Netzwerkes NORMAN aufbaut. Und er wünscht sich, dass die Wasserrahmenrichtlinie mit der Europäischen Chemikalienregulierung REACH verknüpft wird. Denn der Zugang zu den vielen REACH-Daten erleichtert die Umsetzung der WRRL – und die Überwachungsergebnisse aus der WRRL helfen REACH. *Doris Böhme*

UFZ-Ansprechpartner:

■ **Dr. Werner Brack**
Leiter Dept. Wirkungsorientierte Analytik

e-mail: werner.brack@ufz.de



Der Chemiker Dr. Bernd Manfred Gawlik leitet das Umweltüberwachungslabor „MAPLE“ am Institute for Environment and Sustainability (IES), einer der sieben Generaldirektionen des Joint Research Centres (JRC) der Europäischen Kommission. MAPLE (Monitoring across Policies and Environmental Media) begleitet die Entwicklung, Implementierung und Überwachung Europäischer Gesetzgebung mit gezielten und unabhängigen Messungen von Umweltchemikalien. Schwerpunkte seiner Arbeit sind insbesondere die Implementierung von chemischem Umweltmonitoring der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und ihrer begleitenden und benachbarten Richtlinien. (Foto: André Künzelmann)

„WIR MÜSSEN CHEMIKALIEN-DATENBANKEN BESSER VERNETZEN.“

Die EU hat am 31. Januar 2012 die Revision der Liste prioritärer Stoffe im Bereich der Wasserpolitik veröffentlicht. Was bedeutet das für die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)?

Die WRRL nennt eine Reihe von prioritären Stoffen, für die Umweltqualitätsstandards (UQS) im Wasser festgesetzt werden, d. h. Maximal-Konzentrationen, deren Überschreitung die ökologische Qualität des Gewässers gefährdet. Die regelmäßige Überarbeitung dieser Liste ist ebenfalls vorgesehen und der Europäischen Kommission anvertraut. Die nun veröffentlichte Liste ist das Ergebnis dieses Prozesses und wurde dem Parlament und dem Rat zur Verabschiedung vorgelegt. Obwohl diese Liste im Laufe dieses Verfahrens noch geändert werden kann, ist es wichtig festzuhalten, dass nun zum einen mehr Stoffe überwacht werden. Zum anderen werden aber auch erstmals Umweltqualitätsstandards für alternative Matrices (Sedimente und Biota) eingeführt.

Nach welchen Kriterien werden diese Stoffe festgelegt?

Die Kriterien, die berücksichtigt werden, beinhalten natürlich Aspekte der Persistenz, Anreicherung und (Öko)toxizität, aber auch andere Informationen. Die genaue Prozedur ist wissenschaftlich abgeleitet und mit den EU-Mitgliedsstaaten fest vereinbart. Ein großes Problem dabei ist weniger das Verfahren selbst, als vielmehr die Verfügbarkeit und Qualität der zugrundeliegenden experimentellen Daten u. a. aus der Umweltüberwachung. Das führt zu teilweise recht hohen Sicherheitsfaktoren, die wir

zur Risikoabsicherung brauchen, die aber dann zu extrem niedrigen Umweltqualitätsstandards führen, die uns wiederum an die Grenze der Machbarkeit in der analytischen Routine bringen – ein Aspekt, den wir als Wissenschaftler nach meinem Dafürhalten nicht genügend beachten.

Chemiker wollen messen, was moderne Analytik hergibt. Biologen fordern ein Biomonitoring. Wissenschaftler des UFZ fordern eine ganzheitliche Betrachtung – chemische Analytik, um zu erfassen, welche Stoffe in welcher Menge vorhanden sind, kombiniert mit einem Biomonitoring, um die Wirkung der Chemikalien auf Organismen in Gewässern zu erfassen. Welche Strategie verfolgt die EU?

Das ultimative Ziel der WRRL ist ein „guter ökologischer Zustand der Gewässer“, was eine gesamtheitliche Betrachtungsweise darstellt. Das Dilemma in Bezug auf die Chemikalien ist, dass die Masse an Informationen für Substanzen generiert wird, die ohnehin schon reguliert sind. Neue Stoffe werden eher durch exploratives Monitoring „entdeckt“, und flächendeckende Informationen sind kaum verfügbar. Der angesprochene Gegensatz zwischen chemischer und biologischer Betrachtungsweise ist eigentlich keiner; um die Biologie zu verstehen, brauchen wir eine Fülle an Informationen mittels der chemischen Analytik – und ich kann das UFZ in seinem Ansatz nur bestärken. Ich bin fest davon überzeugt, dass insbesondere ein gezieltes Generieren von Umweltmonitoring-Daten mittels breitgefächert Methoden, wie zum Beispiel

effektbezogener Analysen oder Nontarget Screening auf überschaubare, aber repräsentative Probensets uns helfen kann, unser Dilemma zu lösen. Anders gesagt, wir müssen die europäische Kompetenz in diesem Bereich besser experimentell auf die gleichen Proben fokussieren und dann die Informationen verknüpfen und integrieren. Das ist auch der Ansatz, den wir im Joint Research Centre verfolgen.

Die europäische Chemikalienregulierung REACH liefert jede Menge Daten über Chemikalien, die produziert werden. Wie wird dieses Wissen für die Umsetzung der WRRL genutzt?

Selbstverständlich ist REACH eine wichtige Informationsquelle, und gerade die darin enthaltenen ökotoxikologischen Daten waren ein wichtiger Beitrag zu der Prioritätsstoffliste der Kommission. Leider deckt REACH nicht alle Bereiche ab. So bleiben zum Beispiel Pharmazeutika oder auch Lebensmittelzusatzstoffe oder auch Substanzen im Bereich der Körperhygiene außen vor. Gerade aber diese Bereiche erregten in den letzten Jahren die Aufmerksamkeit der Umweltforscher und beunruhigen auch in zunehmendem Maße den Bürger. Um den Informationsfluss zu verbessern, z. B. auch um Mischungen von Chemikalien in Bezug auf ihre (öko)toxikologischen Effekte besser beurteilen zu können, schlägt die Kommission vor, die verschiedenen Datenbanken in Form eines „Chemical Data Centre“ miteinander zu vernetzen. So können die in REACH verfügbaren Daten besser genutzt werden.

Das Interview führte Doris Böhme.

Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt Bakterien (*Hyphomicrobium* sp.; gelb), die z. T. auf festen Oberflächen, Böden oder Sedimentkörnern aufwachsen. Während des Wachstums sterben auch immer Zellen ab und deformierte bzw. fragmentierende Zellhüllen bleiben zurück. Kleinteilige Fragmente dieser Hüllen (rot) stellen dann die mikropartikeluläre Matrix in Böden und Sedimenten dar. Biogene Rückstände von Chemikalien sind dann in diesen Fragmenten eingebaut. (Foto: Burkhardt Schmidt-Brücken, Institute of Material Science, TU Dresden)

2 µm

RÜCKSTÄNDEN AUF DER SPUR

Es gibt Chemikalien, die schützen Pflanzen und Tiere, die der Mensch nutzen will, vor Krankheiten und Schädlingen. Dafür wurden sie entwickelt. Der Nachteil: Sie verschwinden selten ganz aus der Umwelt, sondern lassen sich in höchst unterschiedlichen Konzentrationen auch noch lange nach ihrem Gebrauch nachweisen: Zum Beispiel in Gewässern als Rückstand von im Stallmist oder Gülle verbliebenen Antibiotikaresten aus der Tierhaltung, im Boden als Reste von Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft oder im Fleisch als Reste von Pharmazeutika bzw. Antibiotika, die multiresistente Keime erzeugen. Deshalb ist der Einsatz vieler Schädlingsbekämpfungsmittel wie etwa des Insektizids DDT oder des Herbizids Atrazin in Europa schon seit Jahren gesetzlich weitestgehend verboten. Das hatte gute Gründe: Zum einen blieben deren Rückstände im Boden erhalten, zum anderen bildeten sich daraus neue gefährliche Zwischenprodukte oder sie reicherten sich in der Natur über die Nahrungskette an. Mittlerweile erobern neue, sogenannte biodegradierbare Pestizide den Markt, die biologisch im Boden abgebaut werden können. Doch auch für diese gilt aus Vorsorgeerwägungen die Annahme, dass ein Risiko besteht, da sie teilweise Rückstände bilden und der Stoffumsatz noch nicht vollständig aufgeklärt ist, wie das beispielsweise für die Herbizide 2,4-D (2,4-Dichlorphenoxyessigsäure) oder MCPA (2-Methyl-4-chlorphenoxyessigsäure) der Fall ist. Deshalb will das Umweltbundesamt (UBA) verbesserte Handlungsanweisungen erstellen lassen.

Für Prof. Dr. Matthias Kästner vom UFZ ist diese generelle Risiko-Einstufung nicht mehr

zeitgemäß. „Eine differenzierte Betrachtung ist notwendig“, sagt er. Zum Beispiel wird die Phenyllessigsäureverbindung 2,4-D als prinzipiell biodegradierbares Herbizid auf Getreidefeldern, in Obstplantagen oder auf Wiesen und Weiden gegen Knöterich, Kamille oder Distel eingesetzt. Der Stoff selbst konnte danach auf den Feldern nicht mehr in seiner ursprünglichen Form festgestellt werden, wohl aber dessen Rückstände, deren Struktur bisher nicht identifiziert wurde. „Wir konnten nachweisen, dass ein Großteil des in 2,4-D oder MCPA enthaltenen Kohlenstoffs beim Abbau in mikrobielle Biomasse übergeht“, erklärt Kästner. Die Rückstände sind damit also unkritisch und können gefahrlos im Boden bleiben. Möglicherweise gilt dies auch für Rückstände eines Teils der 400 weiteren Pestizide, die weltweit eingesetzt werden. „Die generelle Risikoannahme für diese Rückstände muss daher überprüft werden, um Unsicherheiten, Nutzungsverbote oder unnötige Kosten zu sparen“, sagt Kästner.

Schon seit mehreren Jahren arbeiten Kästner und sein Team an der Strukturaufklärung und der Risikobewertung von Rückständen aus Pestiziden, Pharmazeutika und Umweltschutzchemikalien. Dabei liegt das Augenmerk bei den nicht-extrahierbaren Rückständen auf der Transformation in Biomoleküle. Den Forschern gelang es früh, diese Rückstände chemisch zu identifizieren und deren Bildung nachzuweisen. Methodisch fündig wurden sie in einem sehr aufwendigen Verfahren: Sie zerlegten die Inhaltsstoffe von Bodenproben in einzelne molekulare Bestandteile. Markiert man den zu untersuchenden Stoff mit stabilen Isotopen, dann können die UFZ-

Biotechnologen nachweisen, ob dieser in unschädliche mikrobielle Biomasse überführt wurde oder nicht. „Aus der riesigen Ansammlung von Stoffen haben wir dann selektiv isotope-markierte Proteine und andere Bestandteile der Biomasse herausgefischt“, erklärt der Mikrobiologe Kästner.

Das methodische Know-how, das Kästners Abteilung bei der Analyse der Rückstände mittlerweile angesammelt hat, lässt sich aber nicht nur auf Pflanzenschutzmittel anwenden. So ist die Forschung über die Schädlichkeit von Rückständen aus Pharmazeutika schon weit fortgeschritten. Neue Projekte, sagt Kästner, habe er bereits für andere Molekülstrukturen von Pestiziden und Pharmazeutika von der Deutschen Forschungsgemeinschaft bewilligt bekommen. Denn die Bewertung von Rückständen ist ein drängendes Thema, bei der die Behörden auf die Zuarbeit der UFZ-Forscher angewiesen sind. Basierend auf den UFZ-Forschungsergebnissen, änderte das UBA voriges Jahr seine Bewertungsstrategie für die nicht-extrahierbaren Rückstände. Mittlerweile werden die Rückstände nach einem Typ 1 für toxisch und einem Typ 2 für natürlich biogen unterschieden. „Das ist ein deutlicher Fortschritt in Richtung einer differenzierten Bewertung und damit auch in Richtung einer besseren Vorsorge“, sagt Matthias Kästner. *Benjamin Haerdle*

UFZ-Ansprechpartner:

■ Prof. Dr. Matthias Kästner
Leiter Dept. Umweltbiotechnologie

e-mail: matthias.kaestner@ufz.de

Am UFZ wird untersucht, ob, wie und in welchem Maße Pflanzen Schadstoffe wie z. B. Arsen aus dem Boden über die Wurzeln aufnehmen. Die Mechanismen von Aufnahme, Verteilung und Abbau sind auch für wasserlösliche Schadstoffe wie Tierarzneimittel oder Pharmazeutika oft noch nicht geklärt. Sie hängen von vielen Faktoren wie Pflanzenart und Stoffeigenschaften ab.
(Foto: André Künzelmann)

WASSERLÖSLICHE STOFFE IM VISIER

Der Stoff Triclosan tut eigentlich manch Gutes für den Menschen: Er hemmt die Ausbreitung von Bakterien im Haushalt, hilft bei der Desinfektion von Arztpraxen oder verlängert die Haltbarkeit von Kosmetika. Über die negativen Folgen weiß der Mensch gut Bescheid, etwa dass die Chemikalie bei direktem Kontakt zur starken Reizung von Haut und Augen führen kann. Kaum untersucht ist dagegen, was beispielsweise passiert, wenn Schadstoffe wie Triclosan über Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen landen und sich dann in Pflanzen einlagern. Möglich ist das auf vielen EU-Agrarflächen, denn etwa 40 Prozent des Klärschlammes der EU werden in der Landwirtschaft ausgebracht. Im Visier des Chemieprofessors Dr. Thorsten Reemtsma vom UFZ sind deshalb vor allem jene Flächen, auf denen Gemüse angebaut wird, denn dort kommen Chemikalien aus dem Klärschlamm direkt mit Wurzel oder Blatt in Kontakt.

Untersucht hat Reemtsmas Forschungsgruppe diese Prozesse am Beispiel der Karotte. Das Ergebnis: Triclosan kann sich in der Möhre mit anderen Stoffen wie etwa Zuckern verbinden und Glykoside bilden. „Sieben derartige Metabolite haben wir in Karottenkulturen gefunden“, sagt Reemtsma. Das klingt erst einmal nicht so bedenklich, sind doch Glykoside ungefährlich. Tatsächlich ist aber bislang unklar, ob sich aus den Glycosiden nach dem Verzehr der Karotten im Magen nicht wieder das schädliche Triclosan bilden kann. „Diese mögliche Belastung wurde bis-

lang völlig unterschätzt“, sagt Reemtsma. Triclosan ist nur ein Beispiel für einen Schadstoff, für den die Analytiker des UFZ prüfen, ob er nicht später in pflanzlichen Lebensmitteln wieder gefunden werden kann. Erforscht hat Reemtsmas Department etwa die Aufnahme von Arsen in Reis. Bislang galt als gesichert, dass das giftige Halbmetall in Wurzel und Halm der Reispflanze deponiert wird. Dass das nicht generell stimmt, belegen aber immer wieder erhöhte Arsennachweise in Reiskörnern. Anhand moderner Methoden der Chromatographie und der Massenspektrometrie haben die UFZ-Forscher nun herausgefunden, dass Arsen in unterschiedlichen Formen auftritt und sich diese unterschiedlich in den Pflanzen verteilen. Wichtig sind wohl auch Ähnlichkeiten mit Pflanzennährstoffen wie Silicat, Phosphat oder Borat.

Ankurbeln will Reemtsma, der voriges Jahr vom Bundesinstitut für Risikobewertung in Berlin an das UFZ kam, künftig vor allem die Forschung zu wasserlöslichen Stoffen. Denn die möglichen Gefahrenquellen sind vielfältig: Ob Tierarzneimittel, die über Gülle und Mist auf Äckern verteilt werden, oder Pharmazeutika und Reststoffe von Körperpflegeprodukten, die über gereinigte Abwässer auf Obst- und Gemüseanbauflächen gelangen können – der Forschungsbedarf ist groß. „Die Mechanismen von Aufnahmen und Abbau hängen von vielen Faktoren wie Pflanzenart und Stoffeigenschaften ab und sind oft noch nicht geklärt“, weiß Thorsten

Reemtsma. Eine wichtige Rolle könnten seine Forschungsergebnisse vor allem in den Mittelmeerländern spielen. Weil dort in Zukunft die Wasservorräte knapper werden, dürfte bei der Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen der Einsatz von gereinigten Abwässern stärker in den Fokus geraten. Die Suche nach wasserlöslichen Schadstoffen, die über die Bewässerung in pflanzliche Lebensmittel und schließlich in den menschlichen Körper gelangen, stand bislang nicht im Zentrum der Gesundheitsvorsorge. Für sie gibt es – anders als für Keime oder Salze – keine Qualitätsanforderungen für Bewässerungswasser. Mit der Nutzung gereinigter Abwässer für die Landwirtschaft dürften die Ansprüche an die Qualität des Wassers deutlich steigen.

Aber noch sind viele Fragen offen: Welche Stoffe können für welche Pflanzen gefährlich werden? Unter welchen Nutzungsbedingungen werden die Schadstoffe übertragen? Wie und wo verteilen sie sich in der Pflanze? Um Antworten auf diese Fragen zu finden, hat der UFZ-Analytiker nun ein Projekt mit Forschern aus Israel und Jordanien angestoßen. Denn aus seiner Sicht gebührt den wasserlöslichen Stoffen mehr Aufmerksamkeit.

Benjamin Haerdle

UFZ-Ansprechpartner:

■ **Prof. Dr. Thorsten Reemtsma**
Leiter Dept. Analytik

e-mail: thorsten.reemtsma@ufz.de

Komplexe Chemikaliengemische wirken anders als die einzelnen Substanzen. Um die Wirkung solcher Cocktails vorherzusagen zu können, entwickeln UFZ-Wissenschaftler unterschiedliche Modellansätze.

(Foto: © Rade Lukovic / Fotolia.com)

GEHEIMNISVOLLE COCKTAILS

Wer für einen Cocktail alkoholische und nichtalkoholische Getränke mischt, muss damit rechnen, dass der Mix anders wirkt als die einzelnen Getränke. Aber fällt die Wirkung des Cocktails stärker oder schwächer aus? Das erfährt man zumeist am Tag danach. Auf derlei Folgewirkungen wollen Ökotoxikologen gar nicht erst warten. Sie wollen die Wirkung zum Beispiel von Chemikalienmischungen abschätzen, bevor es zu möglichen schädlichen Auswirkungen kommt. Das Problem: „Alleine das Wissen über einzelne Stoffe reicht in der Umweltbewertung nicht aus“, sagt der Privatdozent Dr. Rolf Altenburger, der seit 1995 am UFZ im Bereich Bioanalytische Ökotoxikologie forscht. Wie also lässt sich zum Beispiel in einer Kläranlage das Gefahrenpotenzial einer Mischung aus Waschmittel, Pharmazeutika und Unkrautvernichtungsmittel richtig analysieren und bewerten?

Diesem Beurteilungsproblem gehen die Leipziger Ökotoxikologen nach. Sie überprüfen, welche Modelle, die in der Pharmakologie und Humantoxikologie schon seit dem vorigen Jahrhundert akzeptiert sind, in der Ökotoxikologie die präzisesten Ergebnisse liefern, um die Wirkung von Chemikalienmischungen vorherzusagen. Etabliert haben sich mit dem sogenannten Konzept der Konzentrations-Additivität und dem Modell der Unabhängigen Wirkung zwei unterschiedliche Ansätze. Auf das Konzept der Konzentrations-Additivität setzen die Forscher, wenn die Chemikalien in einem Gemisch ähnlich sind. „Haben sie eine ähnliche Wirkung und den gleichen Wirkungsmechanismus, dann lassen sich auf Basis

der Informationen über die einzelnen Bestandteile die Effekte für das gesamte Gemisch formulieren“, erklärt Altenburger. Jede Komponente trägt also zur Gesamttoxizität der Mischung bei, egal wie hoch ihre Konzentration ist. Haben die einzelnen Substanzen dagegen eine unähnliche Wirkung, wirken die Stoffe also an unterschiedlichen Orten und über verschiedene Wirkmechanismen, dann gilt das Modell der Unabhängigen Wirkung. Damit tragen nur jene Komponenten zur schädlichen Wirkung einer chemischen Mischung bei, die auch einzeln bereits ihre Toxizität entfalten würden.

Das Ökotoxikologen-Team um Altenburger hat nun anhand verschiedener Experimente mit Algen, Fischeiern oder Leuchtbakterien für sehr viele verschiedene Stoffgruppen herausgefunden, dass sich die giftige Wirkung von chemischen Gemischen mit beiden Methoden ziemlich exakt vorherzusagen lässt. Wie viele Komponenten in welchem Verhältnis vermischt werden oder wie lange das Stoffgemisch bereits vorliegt, ist dabei egal. Allerdings gibt es feine Unterschiede. „Mit dem Konzept der Konzentrations-Additivität lässt sich in der Regel eine etwas höhere Toxizität vorherzusagen als mit dem Modell der Unabhängigen Wirkung“, bilanziert der Biologe Altenburger. Vor allem bei Schadstoffkombinationen, bei denen einzelne Bestandteile in sehr niedrigen Konzentrationen vorliegen, sei damit eine Vorhersage relativ sicher kalkulierbar. Die Gefahr, die Giftigkeit einer Mischung zu unterschätzen, ist mit dem Konzept der Konzentrations-Additivität folglich geringer.

Wichtig ist der Einsatz solcher Testverfahren schon bei der Produktbewertung von Chemikalien, die zum Beispiel in Bioziden wie Holzschutzmitteln oder den sogenannten Antifouling-Farben enthalten sind, mit denen Schiffsbauer das Anlagern von Muscheln oder Krebsen an Schiffsaußenwände verhindern wollen. „Die Folgen von Antifoulingmitteln werden fälschlicherweise oft nur anhand eines Stoffes beurteilt, dabei bestehen die Produkte ja aus mehreren chemischen Stoffen“, sagt Rolf Altenburger.

Beim Praxistest in der Umwelt kommt aber noch ein weiteres Problem der Bewertung auf: Denn unklar ist für sehr viele komplexe Chemikaliengemische immer noch, wie sie in realen Ökosystemen und eben nicht unter Laborbedingungen reagieren. Zudem haben die Forscher bislang noch keine Verfahren entwickelt, wie sie die Belastung von Schadstoffen nacheinander und die Interaktion etwa mit anderen Stressoren wie zum Beispiel UV-Licht modellieren könnten. „Das Wissen über die Wirkmechanismen von Umweltchemikalien ist bisher noch äußerst spärlich“, sagt Altenburger. Forschungsbedarf gibt es für die Leipziger Ökotoxikologen also noch reichlich.

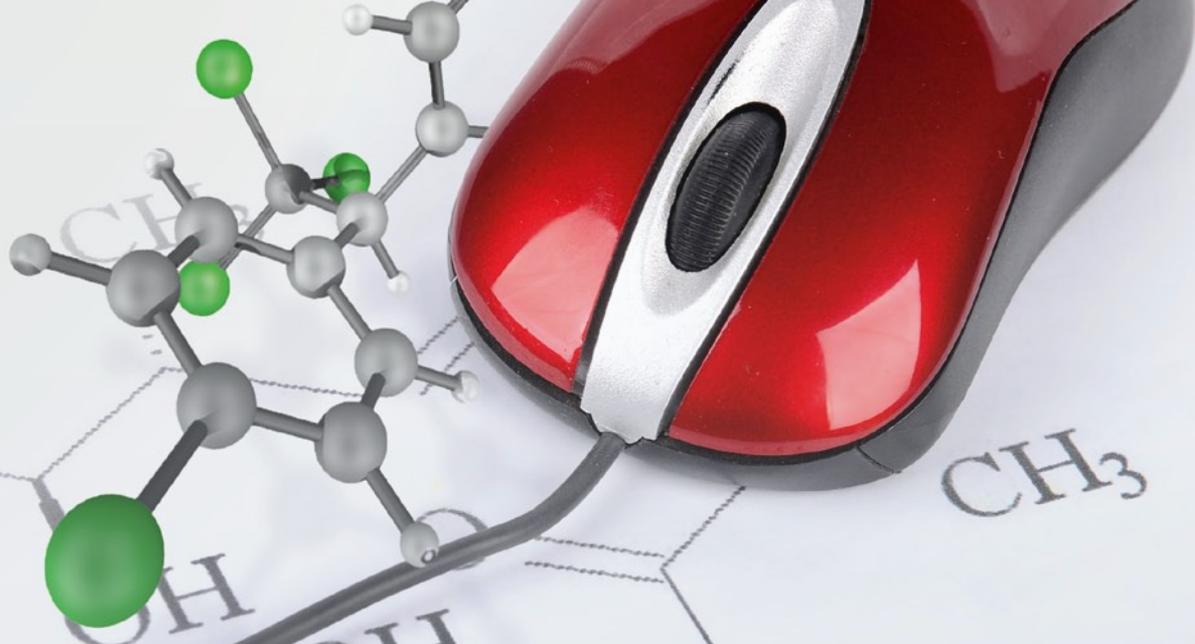
Benjamin Haerdle

UFZ-Ansprechpartner:

■ **PD Dr. Rolf Altenburger**
Leiter Dept. Bioanalytische
Ökotoxikologie

e-mail: rolf.altenburger@ufz.de

Am UFZ setzen Wissenschaftler bei der Bewertung der Wirkung chemischer Substanzen auf integrierte Teststrategien als Alternative zu Tierversuchen. Sie kombinieren dazu unterschiedliche Alternativmethoden, die vor allem auch Computermodelle und Interpolationsverfahren einbeziehen. (Foto: © Xuejun li / Fotolia.com Bildmontage: Marie-Sophie Wilde, UFZ)



INTELLIGENT TESTEN UND INTEGRIERT BEWERTEN

Um chemische Stoffe auf ihre Folgen zu untersuchen, sind Tierversuche in der chemischen Industrie oft noch Standard. Ändern sollte das eigentlich die EU-Chemikalienverordnung REACH, die im Jahr 2007 in Kraft trat. Sie sieht vor, so oft wie möglich Alternativmethoden zur ökotoxikologischen Bewertung von Industriechemikalien einzusetzen. In der Praxis läuft das häufig anders: „Die Industrie ist noch weit davon entfernt, die Sicherheitsvorsorge für den Umgang mit chemischen Substanzen vollständig ohne Tierversuche durchzuführen“, sagt Prof. Dr. Gerrit Schüürmann vom UFZ. Er hat mit seinen Mitarbeitern eine Reihe von Alternativmethoden auf den Weg gebracht, mit denen die Anzahl der Tierversuche deutlich reduziert werden könnte.

Schüürmanns Verfahren sind für die Umsetzung von REACH wichtig, weil die Verordnung mit dem Instrument Integrierter Teststrategien (ITS) auf einen neuen Bewertungsansatz setzt. Anstelle einer Fortführung der Routineanwendung von Tierexperimenten sollen nun vermehrt kombinierte Anwendungen von mehreren Alternativmethoden eingesetzt werden. „Durch diese Kombination wollen wir vermeiden, dass Informationen, die ein Tierversuch hätte liefern können, verloren gehen“, sagt Schüürmann. Entwickelt haben er und sein Team computerbasierte Instrumente, die Aussagen zu quantitativen und qualitativen Struktur-Wirkungs-Beziehungen liefern, sogenannte QSAR-Modelle. Ein Beispiel dafür ist das Computerprogramm „ChemProp“. Es kann bewertungsrelevante

Eigenschaften von Stoffen berechnen und für bestimmte Bereiche auch Wirkstärken und Wirkmechanismen vorhersagen. Forscher können damit beurteilen, wie giftig die Chemikalie in der Umwelt ist. Die Software benutzt nicht nur bekannte Methoden aus der wissenschaftlichen Literatur, sondern auch am UFZ entwickelte Rechenverfahren. Beispiele sind die Löslichkeit organischer Stoffe und ihr damit zusammenhängendes Aufnahmevermögen in Wasserorganismen sowie die akute Fischgiftigkeit.

Ein wichtiger neuer Ansatz für Computermodelle ist das Read-across, also die Interpolation aus Daten ähnlicher Stoffe. Dabei gehen die Wissenschaftler davon aus, dass sich die Gefährlichkeit einer Substanz aus bereits vorhandenen experimentellen Befunden zu ähnlichen Stoffen vorhersagen lässt. Für die Suche nach ähnlichen Substanzen hat das UFZ-Team um Schüürmann Algorithmen entwickelt und zur Vorhersage unterschiedlicher Stoffeigenschaften erfolgreich getestet. „Das neue Verfahren bringt häufig eine Aussagegenauigkeit von etwa 80 Prozent“, sagt der Chemiker. Das gilt als guter Richtwert, den die Forscher sogar noch auf mehr als 90 Prozent steigern können, wenn sie diesen Ansatz mit zusätzlichen alternativen Testverfahren verschneiden. Die vor kurzem publizierte Methode setzten die Wissenschaftler bereits ein, um in einer Langzeitstudie für Elbe, Weser, Aller und Ems die dort chemisch identifizierten Stoffe im Hinblick auf ihre Giftwirkung gegenüber Fischen einzuschätzen.

Das wissenschaftliche Know-how für Computermodelle als Komponenten einer ITS-Bewertung chemischer Stoffe ist also bereits vorhanden. Noch fehlt aber der politische Durchbruch. Die Europäische Chemikalienagentur (ECHA), die für die Zulassung chemischer Stoffe zuständig ist, ist noch nicht ganz so begeistert von den Alternativverfahren. QSAR, so Schüürmann, werde bei der ECHA bislang eher als Nachweis zur Belastung und weniger zur Entlastung genutzt. Ist nach QSAR ein Stoff unbedenklich, reicht das den Behörden oft nicht aus – sie fordern zusätzlich einen Tierversuch. Hat die Chemikalie laut der Alternativverfahren dagegen Folgen für Mensch und Natur, kann oft auf einen Tierversuch verzichtet werden.

Doch auch wenn sich die Behörden noch etwas sträuben, werden sich „intelligente Teststrategien unter Einsatz von QSAR letztlich doch durchsetzen“, ist Schüürmann überzeugt. Der Grund: Kann die Industrie statt der Tierversuche Alternativmodelle nutzen, muss sie bei der Umsetzung von REACH weniger Geld ausgeben. Außerdem können Computermodelle auch zur Beurteilung von erst in Planung befindlichen Stoffen eingesetzt werden. Damit könnten chemische Strukturen mit großer Giftigkeit von vornherein vermieden werden. *Benjamin Haerdle*

UFZ-Ansprechpartner:

■ Prof. Dr. Gerrit Schüürmann
Leiter Dept. Ökologische Chemie

e-mail: gerrit.schuurmann@ufz.de

STANDPUNKT: ALTERNATIVE TESTMETHODEN IN DER UMWELTRISIKOPRÜFUNG



Dr. Stefan Scholz ist Biologe und forscht seit mehr als 20 Jahren zum Thema Ersatz von Tierversuchen durch alternative Testmethoden. Er ist Mitarbeiter des UFZ seit 2002 und leitet seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Department Bioanalytische Ökotoxikologie die Arbeitsgruppe „Molekularbiologie“. Er ist u. a. Mitglied im DIN Arbeitskreis Biotests und dem HESI¹ animal alternatives in environmental risk assessment project committee steering team. (¹Health and Environmental Sciences Institute Washington, USA)

e-mail: stefan.scholz@ufz.de

Sollen Chemikalien für den Markt zugelassen werden, müssen sie einer Umweltrisikobewertung unterzogen werden. Integraler Bestandteil der Umweltrisikobewertung sind Tierversuche. Etwa 100.000 Wirbeltiere, die meisten davon Fische, werden jährlich in der EU in Tierexperimenten eingesetzt, um Industriechemikalien, Pflanzenschutzmittel, Pharmaka oder Futterzusätze bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit zu bewerten. Aus ethischer und ökonomischer Sicht ist das ein erheblicher experimenteller Aufwand, auch wenn das im Vergleich zur Gesamtzahl an Tierversuchen – rund 12 Millionen jährlich in der EU – relativ gering erscheinen mag. Mit dem europäischen Chemikalienrecht REACH wird die Zahl an Tierversuchen jedoch vermutlich weiter ansteigen, denn bis 2018 sollen auch alle bisher unzureichend charakterisierten, aber bereits vermarkteten Altsubstanzen geprüft werden.

Tierversuche sollen helfen, mögliche negative Auswirkungen von Chemikalien auf die Umwelt abzuschätzen und somit potenzielle Gefährdungen abzuwenden. Kritisiert man also den Einsatz von Tierversuchen, so muss man sich über mögliche Alternativen Gedanken machen. Im einfachsten Falle kann eine Reduktion bereits durch ein geändertes Test-Design erreicht werden. Weiterhin können strukturelle, physikochemische Stoffeigenschaften von Chemikalien vergleichend analysiert werden, um daraus für eine unbekannte Substanz die biologische Wirkung abzuleiten. Neue experimentelle Ansätze basieren auf der Analyse molekularer Wirkungsmechanismen sowie der Nutzung von Embryonen bzw. Eiern oder Zellen von Fischen. Sie gelten nach der „EU-Richtlinie zum Schutz der für wissenschaftliche Zwecke verwendeten Wirbeltiere“ als Ersatzmethode zu Tierversuchen. Bisher stellt das deutsche Wasserabgabengesetz die einzige gesetzliche Regelung dar, bei der ein Tierversuch, der akute Fischtest, bereits durch eine Alternative, den Fischeitest, ersetzt wurde.

Wie kann die Einführung von Alternativmethoden beschleunigt werden?

Für die Etablierung von Alternativmethoden benötigt man einen langen Atem, denn es bedarf einer internationalen Harmonisierung und Validierung. Harmonisierung bedeutet, dass nationale Interessen in OECD-Gremien (Organisation for Economic Co-operation and Development) abgestimmt werden müssen, um den Aufwand von global agierenden Unternehmen bei der Entwicklung und Zulassung von Alternativmethoden zu reduzieren. Validierung heißt, dass die Ergebnisse der Alternativmethoden zwischen verschiedenen Labors übertragbar und reproduzierbar sein müssen und der Anwendungsbereich festgelegt werden muss. Eine Validierung ist in der Regel auf die freiwillige Teilnahme von Industrie- und Forschungslaboratorien angewiesen. *Zusätzliche finanzielle Mittel* könnten die Motivation erhöhen, sich an Validierungsstudien zu beteiligen und damit die Zulassungen von Ersatzversuchen zu beschleunigen.

Zu hohe Hürden für Ersatzmethoden?

Häufig wird kritisiert, dass etablierte Tierversuche an vielen Qualitätskriterien, die für Ersatzversuche eingefordert werden, scheitern würden – die Hürden für die Alternativen also unnötig hoch seien. Doch deshalb im Umkehrschluss die Anforderungen an Ersatzverfahren zu reduzieren, ist sicher nicht sinnvoll. Vielmehr sollten die existierenden Tierversuche dringend überprüft und optimiert werden. Denn sie stellen die Referenzverfahren für die Entwicklung von Ersatzmethoden dar – und nur die Verfügbarkeit *gesicherter Daten mit hoher Qualität* erlaubt langfristig die Etablierung einer Ersatzmethode und damit die Reduktion der Anzahl von Tierversuchen. Darüber hinaus sind Tierversuchsdaten bzw. -datensätze aufgrund von Urheberrechtsbestimmungen zum Teil nicht frei oder nur begrenzt verfügbar. Auch kodierte Daten konnten dieses Problem nicht beheben. Hier sind dringend neue Regelungen erforderlich, die einen – insbesondere für wissenschaftliche Einrichtungen – leichten und unbürokratischen *Zugriff auf gesicherte Daten* von hoher Qualität ermöglichen.

Umdenken bei Behörden und Anwendern notwendig

Die Einführung alternativer Teststrategien erfordert zudem eine praktische Umsetzung neuer Konzepte, wie z. B. die häufig diskutierte Verwendung von Informationen über (molekulare) Wirkmechanismen. Hierzu ist auch ein Umdenken insbesondere bei Behörden und Anwendern (Industrie, Vertragslabore) erforderlich, das durch entsprechende *Personalschulung* gefördert werden könnte. In der Regel ist nicht zu erwarten, dass eine einzelne Methode einen Tierversuch vollständig ersetzen kann. Vielmehr wird eine komplexe Kombination verschiedener Verfahren von Test-freien Ansätzen bis zur Identifizierung von Wirkmechanismen und molekularen Wechselwirkungen zu einer Abschätzung des Risikopotenzials von Chemikalien führen.



Die Chemikerin Dr. Petra Greiner leitet im Fachbereich Chemikaliensicherheit des Umweltbundesamtes (UBA) die Abteilung Internationales und Pestizide. Sie ist Experte für die Umweltrisikobewertung von Chemikalien (u. a. Biozide und Pflanzenschutzmittel) sowie für internationales Chemikalienmanagement und nachhaltige Chemie. Sie ist seit nunmehr 13 Jahren nationale Koordinatorin für das OECD Test Guidelines Programme. Mit diesen Prüfvorschriften werden Chemikalien u. a. hinsichtlich ihrer Gefährdung für die Umwelt auf nationaler und internationaler Ebene geprüft. (Foto: André Künzelmann)

„ALTERNATIVEN FUNKTIONIEREN NICHT OHNE EXPERTENWISSEN!“

Wie hat sich die Gesamtzahl der Tierversuche zur Untersuchung chemischer Stoffe infolge der REACH-Verordnung seit 2007 entwickelt?

Eine Tendenz mit Bezug auf REACH ist nicht wirklich ablesbar. Laut aktueller Statistik des Bundesverbraucherschutzministeriums hat sich von 2000 bis 2010 in Deutschland die Gesamtzahl an Wirbeltieren in Tierversuchen von 1,8 Mio. auf 2,8 Mio. Tiere erhöht. Die für die Umweltprüfung von Chemikalien relevanten Fischtests haben zwischen 2001 und 2003 auffällig abgenommen. Das hängt sicher mit der Zulassung des Fischeitests als Ersatz für den akuten Fischtest bei der Abwasserüberwachung zusammen. 2010 lag die Zahl der Fischversuche bei 166.000. Das sind rund sechs Prozent der gesamten Wirbeltierversuche in Deutschland. In der EU wurden 2010 etwa 8,7 Prozent der insgesamt 12 Mio. Versuchstiere für toxikologische Sicherheitsprüfungen verwendet. Der Löwenanteil an Tierversuchen geht also in die biologische Grundlagenforschung wie Gentechnikexperimente. Interessant ist, dass die Zahl der Tierversuche mit REACH nicht – wie von vielen vorausgesagt – sprunghaft angestiegen ist. Es wurden bisher weniger Chemikalien registriert und weniger Testvorschläge eingereicht, als durch die Voranmeldungen zu erwarten waren. Warum das so ist? Sicher eine Mischung aus Überschätzung, Nutzung vorhandener Daten und der in REACH gegebenen Möglichkeiten, auf Tests zu verzichten. Vielleicht auch eine Art Marktberreinigung.

Wie weit ist man beim Ersatz von Tierversuchen für die Umweltrisikoprüfung?
Angetrieben von der Kosmetikindustrie

wurden im humantoxikologischen Bereich in den letzten zwei, drei Jahren schon sehr häufig *in vitro*-Methoden, also außerhalb des lebenden Organismus, als Alternativen bei Endpunkten wie Haut- und Augenreizung eingesetzt. Nun sind diese Endpunkte einfacher abzubilden als etwa die komplexe Organ-, Entwicklungs- oder Reproduktionstoxizität. Deshalb können *in vitro*-Methoden Tierversuche nicht generell ablösen. Deutschland, die Niederlande und die USA haben sich auf OECD-Ebene erfolgreich für die Anerkennung der erweiterten Eingenerations-Reproduktionstoxizitäts-Studie eingesetzt. Wenn nämlich zukünftig auf den Test an der 2. Generation verzichtet werden kann, hat das wahrscheinlich den größten tiersparenden Effekt. Diese Studie soll nun so schnell wie möglich in die Prüfmethode-Verordnung der EU aufgenommen werden. Das UBA engagiert sich seit Jahren für die Anerkennung des Fischembryotests als Alternative zum akuten Fischtoxizitätstest und für die Überarbeitung des Bioakkumulationstests in Fischen. Das OECD-Projekt „Fish Testing Framework“ wird 2012 verabschiedet und wird zu mehr zielgerichteten und damit auch tiersparenden Prüfungen an Fischen beitragen. Deutschland ist auch sehr aktiv bei der Weiterentwicklung und Anwendung von Nicht-Test-Methoden, die auf Struktur-Wirkungs-Beziehungen (QSARs), also Analogien ähnlicher Substanzen basieren.

Dennoch geht es bei der Zulassung der Alternativen nur schleppend voran. Warum?

Die Anforderungen an die Stoffsicherheit stehen im Vordergrund. Je besser die Validierung einer Ersatzmethode, desto robuster

der Test. Das ist aufwendig und teuer. Oft fehlen Daten oder sind nicht zugänglich. Deshalb arbeitet die ECHA (European Chemical Agency) daran, Daten aus Dossiers und abgeschlossenen Studien Stück für Stück zu veröffentlichen. Wir müssen uns aber fragen, ob die als ‚Goldstandard‘ geltenden existierenden *in vivo*-Tests immer die Messlatte für die neuen *in vitro*-Test sein müssen. Deshalb schaut sich die OECD auch an, was die existierenden Tests leisten, welche wir wirklich brauchen, welche verbessert werden müssen oder gestrichen werden können. Auch so lassen sich Tierversuche vermeiden. Bei den QSARs haben wir das große Problem, dass sie in den Registrierungs dossiers oft schlecht dokumentiert sind. Und oft sind die Anleitungen so kompliziert, dass sie nicht praktikabel sind. QSARs und *in vitro*-Tests funktionieren nicht ohne Expertenwissen!

Wie kann Forschung dazu beitragen, die Hürden zu überwinden?

Wenn Forscher neue experimentelle Ansätze oder Nicht-Tests wie die QSARs entwickeln, dann müssen sie anwenderfreundlich für Industrie und Regulatoren sein. Hierfür brauchen wir eine viel engere Zusammenarbeit zwischen Forschung und Anwendern, sei es in Forschungsnetzwerken oder der SETAC-Arbeitsgruppe Non Animal Alternatives in Ecotoxicology, in der auch UFZ-Experten vertreten sind. Gerade in den Nicht-Test-Methoden steckt mehr Potenzial. Das vom UFZ koordinierte EU-Projekt OSIRIS ist ein sehr positives Beispiel. Unter anderem sind hier für den akuten Fischtest regulatorisch akzeptable und verständliche QSARs entwickelt worden. *Das Interview führte Doris Böhme.*

Mit mathematischen Modellen wollen UFZ-Forscher eine Wissenslücke schließen – zwischen den Chemikalien, die sich in der Umwelt befinden und den sichtbaren Effekten beim Menschen. (Foto: © Sam, © Sebastian Kaulitzki / Fotolia.com, Bildmontage: noonox media)



RECHNEN FÜR DIE GESUNDHEIT

Stellen Sie sich vor, Sie renovieren Ihre Wohnung. Sie malern Wände und verkleben neue Teppichböden. Der unangenehme Geruch, der auch noch Tage danach durch die Räume zieht, verunsichert Sie und Sie quartieren sich und Ihre Kinder der Vorsicht halber erst einmal bei Freunden ein. Doch wie lange soll dieser Zustand andauern? Wann können Sie wieder zurück in ihre Wohnung, ohne gesundheitlichen Schaden zu nehmen? Um das abschätzen zu können, müssten Sie nicht nur wissen, welche Chemikalien sich in Ihrer Wohnung breitgemacht haben und wie giftig sie sind, sondern auch wie Ihr Körper darauf reagiert und mit der Belastung umgeht.

Um diese Frage beantworten zu können, bedient sich Prof. Dr. Kai-Uwe Goss mit seinen Mitarbeitern eines mathematischen Modells. Das soll sie in die Lage versetzen, möglichst genaue Vorhersagen zu machen, was mit Umweltchemikalien wie Lösungsmitteln, Pestiziden oder Weichmachern passiert, nachdem sie vom Körper aufgenommen wurden.

Dabei müssen die Forscher nicht von Null anfangen. Denn es gibt solche Modelle schon in der pharmazeutischen Forschung. Dort werden sie verwendet, um den Abbau von Medikamenten im menschlichen Körper nachzuvollziehen. Aber 1:1 übertragbar sind diese Modelle leider nicht. Denn zum einen vernachlässigen sie Prozesse, die für die Klärung des Verbleibs von Umweltschadstoffen im Körper sehr wichtig sind – etwa die Atmung des Menschen als ein möglicher Aufnahmepfad. Zum anderen sind sie für Chemikalieneigenschaften optimiert, die für Medikamente typisch sind. So variieren

Eigenschaften wie etwa die Aufnahmefähigkeit im Körper bei Schadstoffen sehr viel stärker als bei Medikamenten. „Deshalb nehmen wir das aus unserer Sicht beste verfügbare Modell aus der Pharmaforschung und optimieren bzw. ergänzen es auf der Basis unserer eigenen wissenschaftlichen Arbeiten in den für uns wichtigen Details“, erklärt Kai-Uwe Goss.

Er sieht in seinem Modell ein wichtiges Werkzeug, um verschiedene umweltchemische Fragestellungen zu beantworten. Dazu zählen: Wie effektiv werden verschiedene Umweltchemikalien vom menschlichen Körper aufgenommen? Wie und in welcher Zeit verteilen sie sich in den Organen? Wie hoch ist die Permeabilität, also die Durchlässigkeit von Membranen für Schadstoffe, zum Beispiel im Magen? Welche Chemikalien reichern sich in bestimmten Organen an und wie werden sie abgebaut oder ausgeschieden? Außerdem wollen die Forscher Konzentrationsverläufe im menschlichen Körper vorhersagen können. Das wiederum wäre wichtiges Vorwissen für die Arbeit von Toxikologen, die damit weiterforschen und Korrelationen zu sichtbaren Effekten, etwa einer Allergie oder Vergiftungserscheinung, herstellen könnten. „Wir schließen mit unserem Modell also eine Wissenslücke zwischen dem, was wir an Chemikalien in der Umwelt finden und dem, was an Wirkungen beim Menschen sichtbar wird“, so Kai-Uwe Goss.

Die praktische Relevanz dieser Grundlagenforschung liegt auf der Hand, denkt man an das Eingangsbeispiel der frisch renovierten Wohnung zurück. Doch vor allem geht es darum, Behörden und Unternehmen möglichst

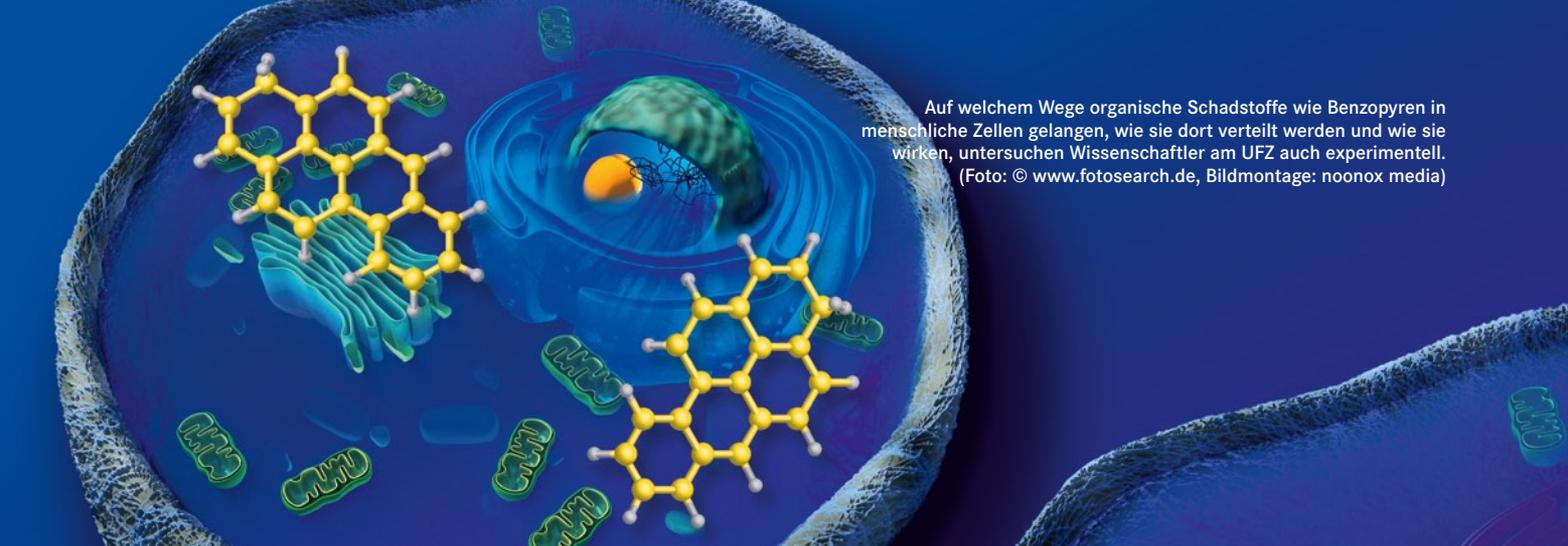
exaktes Wissen bereitzustellen, um etwa Vorschriften in punkto Gesundheits- und Arbeitsschutz oder Chemikalienzulassung anzupassen. Viel zu oft basieren diese eher auf groben Abschätzungen als auf präzisen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Dort, wo Menschen bei der Arbeit einer Schadstoffbelastung ausgesetzt sind, ließen sich zum Beispiel optimale Arbeits- und Freizeiten errechnen, um gesundheitliche Schäden zu vermeiden. Ebenso wäre eine gezieltere Dekontamination von Menschen möglich, die mit giftigen Chemikalien verseucht wurden.

Zu einer eher ungewöhnlichen Methode griff das Forscherteam, um die Zuverlässigkeit des mathematischen Modells in der derzeitigen Entwicklungsphase zu testen. Sie trafen sich nach Arbeitsschluss zu einem Selbstversuch, bei dem sie in fest definierten Zeitabständen genau abgemessene Mengen einer organisch-chemischen Verbindung – in diesem Falle Alkohol in Form von Wein und Schnaps – tranken. Mit ihren Blutalkoholwerten fütterten sie das Modell und errechneten für jeden „Studienteilnehmer“ individuell, also in Abhängigkeit von Parametern wie Alter, Gewicht oder Größe, den Anstieg und das Abklingen des Alkohols im Blut. Ein simpler Test, der aber zeigte, dass das Modell zuverlässige und präzise Ergebnisse liefern kann. *Susanne Hufe*

UFZ-Ansprechpartner:

■ Prof. Dr. Kai-Uwe Goss
Leiter Dept. Analytische
Umweltchemie

e-mail: kai-uwe.goss@ufz.de



Auf welchem Wege organische Schadstoffe wie Benzopyren in menschliche Zellen gelangen, wie sie dort verteilt werden und wie sie wirken, untersuchen Wissenschaftler am UFZ auch experimentell. (Foto: © www.fotosearch.de, Bildmontage: noonox media)

WIE IM GROSSEN, SO IM KLEINEN

Im Gegensatz zu Umweltchemiker Kai-Uwe Goss, der mithilfe eines theoretischen mathematischen Modells die Wirkung von organischen Chemikalien in Organismen nachvollziehen will, ist der wissenschaftliche Ansatz seines UFZ-Kollegen Martin von Bergen experimenteller Natur. Im Mittelpunkt seiner Forschung stehen die kleinsten lebenden Einheiten von Organismen, die Zellen. Denn da, so seine Hypothese, entscheidet sich die Frage nach den Effekten von Chemikalien. „Haben wir verstanden, was dort passiert, können wir Rückschlüsse auf das Gesamtsystem ziehen“, kommentiert Biochemiker Dr. Martin von Bergen seinen systembiologischen Forschungsansatz, der seit 2008 Gegenstand des vom UFZ koordinierten Projektes innerhalb der Helmholtz-Allianz „Systembiologie“ ist. Denn er geht davon aus, dass für das Verständnis der molekularen Wirkungen in den Zellen dieselben Faktoren entscheidend sind, wie sie auch für einen ganzen Organismus gelten: Da gibt es Quellen und Senken, die Kinetik der Verteilung, die Interaktion mit Oberflächen sowie unspezifische und spezifische Abbaumechanismen.

Die Substanz, mit der das interdisziplinäre Team aus Biologen, Biochemikern, Bioinformatikern und Modellierern am UFZ gemeinsam mit Partnern in Dresden, Zürich und Heidelberg experimentiert, ist das Benzopyren. Die auch unter dem Namen Benzo(a)pyren bekannte Chemikalie ist ein Kohlenwasserstoff, der bei der unvollständigen Verbrennung von organischen Stoffen entsteht, z. B. beim Grillen von Fleisch oder bei der Verbrennung von Diesel und Benzin sowie beim Rauchen von Tabak. Daher ist

es auch über Wissenschaftlerkreise hinaus sehr bekannt. Selbst nicht hochgiftig, gilt Benzopyren aufgrund seiner bei der Verstoffwechslung entstehenden Zwischenprodukte als krebserregend und umweltgefährlich.

Wenn man so viel über Benzopyren weiß, warum wird dann überhaupt noch dazu geforscht? „Uns interessiert, welche Mengen dieser Substanz wirklich schädlich für den Menschen sind“, so von Bergen, und macht damit klar, dass bislang nichts über die Wirkung von Benzopyren in subakuten, also sehr niedrigen Konzentrationen bekannt ist.

Um zu verstehen, auf welchem Wege Schadstoffe wie Benzopyren in die Zellen kommen, wie sie dort verteilt werden und wie sie wirken, gehen die Wissenschaftler in etwa folgendermaßen vor: Die Aufnahme und die Verteilung des Schadstoffes in der Zelle werden mittels Fluoreszenzmikroskopie sichtbar gemacht. Aus der Modellierung dieser Daten können dann Rückschlüsse auf die Anzahl der Bindungspartner des Rezeptors in verschiedenen Zellbestandteilen gezogen werden. Die hochkomplexen Prozesse, die durch Chemikalienkontakt in den Zellen ablaufen, werden auf der Ebene der Gene, der Proteine und der Stoffwechselprodukte mit sehr hoher Auflösung und Genauigkeit untersucht. Aus den identifizierten Signalwegen und Reaktionsmustern der Zellen erstellen die Forscher ein Modell, das Vorhersagen für verschiedene Konzentrationen erlaubt – bestenfalls auch Prognosen für andere Chemikalien.

Das Forscherteam um Martin von Bergen arbeitet bei diesen Experimenten insbesondere mit Leberzellen, weil diese für die

Metabolisierung von körperfremden Stoffen im Körper zuständig sind. „In diesen Zellen entscheidet sich deshalb oftmals, ob eine Gefahr für den Körper droht oder nicht“, so von Bergen. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen seine Vermutung: Auch subakute Konzentrationen von Benzopyren wirken zellschädigend.

Perspektivisch geht der Blick des Forscherteams weit über einzelne Substanzen wie Benzopyren hinaus. Aus den umfassenden Daten entwerfen die Wissenschaftler Modelle, die helfen sollen, die Wirkung von Stoffen in Zellen generell schneller zu testen, und schaffen damit die Basis für neue Methoden in der toxikologischen Forschung – zum Erkennen und zum Schutz vor schädlichen Chemikalien.

Münden sollen von Bergens grundlagenorientierte Forschungsergebnisse aber auch – ähnlich wie die seines Kollegen Goss – in ganz praktischen Regelungen, Grenzwerten oder Vorschriften, die sich bislang noch viel zu oft an zu groben wissenschaftlichen Erkenntnissen orientieren. Und ginge es nach den beiden Wissenschaftlern, so gibt es eines Tages auch ein Modell, das die beiden wissenschaftlichen Ansätze – theoretische wie experimentelle – miteinander vereint. *Susanne Hufe*

UFZ-Ansprechpartner:

■ PD Dr. habil. Martin von Bergen
Leiter Dept. Proteomics

Sprecher Dept. Metabolomics

e-mail: martin.vonbergen@ufz.de



Nirgendwo scheint der Mensch so geschützt wie im Mutterleib. Doch schon hier muss das Immunsystem seine ersten Kämpfe absolvieren, etwa mit Chemikalien, die über die werdende Mutter aufgenommen werden.
(Foto: zven0 / www.fotosearch.de)

ALLERGIEN DURCH CHEMIKALIEN

Allergien sind der Preis, den wir für unseren westlichen Lebensstil zahlen müssen. Schätzungen zufolge leiden weltweit über 300 Millionen Menschen an Allergien. Allein in den letzten beiden Jahrzehnten hat sich die Zahl der registrierten Fälle in Westeuropa verdoppelt. Ein Zusammenhang mit Lebensstil und Umwelt ist naheliegend. Wurde früher das Immunsystem von Kindern zum Beispiel durch Infektionen trainiert, so fehlt ihm dieses Training heute vielfach – das Immunsystem ist quasi unterbeschäftigt. Deshalb kann es passieren, dass es auf eigentlich harmlose Stoffe wie Gräserpollen überreagiert. Kommen Chemikalien dazu, die in unserem Lebensumfeld aus Farben, Bodenbelägen, Möbeln, Reinigungsmitteln oder auch Zigarettenrauch freigesetzt werden, ist der Weg in Richtung Allergie vorprogrammiert. Dabei ist der Effekt umso stärker, je früher im Leben Chemikalien auf unser Immunsystem treffen.

Die ersten Kämpfe schon vor dem ersten Schrei

Nirgendwo scheint der Mensch so geschützt wie im Mutterleib. In der weichen, warmen, dämpfenden Hülle wachsen die Organe heran und beginnen ihre Funktion. Und doch drohen schon Gefahren, die die Mechanismen des Werdens blockieren und verändern. So hat das entstehende Immunsystem seine ersten Kämpfe zu absolvieren und muss mitunter seine ersten Niederlagen einstecken. Selbst bei völlig gesunden Neugebore-

nen können sich im Nabelschnurblut Zellen finden, deren Funktion bereits gestört ist. Und irgendwann später schießt dieses irritierte Immunsystem weit über das Ziel – den Schutz des Körpers vor Krankheitserregern und schädigenden Fremdstoffen – hinaus. Heuschnupfen, Asthma bronchiale oder Neurodermitis belasten das Leben, die Symptome müssen behandelt werden.

Die Immunologin Dr. Irina Lehmann und ihr Team schauen besonders auf den weit zurückliegenden Zeitpunkt in der Schwangerschaft, an dem das Immunsystem nach anderen Regeln zu funktionieren beginnt, und auf den Mechanismus dieser Regelveränderung. Sie wollen die Irritation des Immunsystems schon vor den ersten Allergiesymptomen erkennen und möglicherweise sogar gegensteuern, so dass eine Erkrankung gar nicht erst ausbricht. Denn hat das Immunsystem erst einmal angefangen, auf bestimmte Faktoren heftig zu reagieren, ist es nur mit langwierigen Therapien möglich, diese Reaktion wieder aus dessen Gedächtnis zu streichen. Um zu wissen, was sich da im Mutterleib genau abspielt, müssen die Forscher eine Reihe grundlegender Fragen beantworten: Welche Faktoren beeinflussen schon vor der Geburt das Immunsystem? Über welche Mechanismen ist das Immunsystem der Mutter mit dem des Embryos verbunden? Und in welchem Maße unterscheidet sich die Sensibilität des Immunsystems von Kindern und Erwachsenen?

Dass sie bei der Suche nach belastbaren Fakten ohne die Mitarbeit von Betroffenen, in diesem Fall also Schwangeren, nicht sehr weit kommen würden, war den Wissenschaftlern um Irina Lehmann schnell klar. Deshalb begannen sie gemeinsam mit einer Kinderklinik im Frühjahr 2006 mit einer groß angelegten Mutter-Kind-Studie – LiNA. Im Rahmen dieser Studie wurden mehrere hundert schwangere Frauen, deren Belastungen im Wohnumfeld sowie die Neugeborenen untersucht und die gewonnenen Daten zueinander in Beziehung gesetzt. Außerdem werden die Kinder bis zu ihrer Volljährigkeit umweltmedizinisch begleitet.

Gespannt waren die beteiligten Wissenschaftler und Mediziner vor allem auf die Ergebnisse der Blutuntersuchungen. Analysiert wurden sowohl das Blut der Schwangeren als auch später das Nabelschnurblut der Neugeborenen. Unter anderem ging es darum herauszufinden, was im Zuge einer Chemikalienbelastung mit den T-Lymphozyten passiert, jenen Zellen im Blut, die die Funktion aller Immunzellen steuern. Reagieren sie zu stark beim Kontakt mit Allergenen, werden chemische Signale ausgesendet, die die Produktion von Immunglobulin E auslösen. Das sind Antikörper, die zu allergischen Reaktionen führen. Das allein wäre nicht dramatisch, denn es gibt ja immer noch die regulatorischen T-Zellen, die eine solche Überreaktion bremsen können – im Normalfall. Gibt es zu wenig dieser

Zellen oder arbeiten diese nicht richtig, steigt das Risiko für Allergien. „Und genau das konnten wir bereits im Nabelschnurblut beobachten“, sagt Irina Lehmann. Die UFZ-Forscher fanden bei Neugeborenen, deren Mütter während der Schwangerschaft rauchten oder einer Chemikalienbelastung ausgesetzt waren, geringere Zahlen dieser so wichtigen regulatorischen T-Zellen im Nabelschnurblut. Kinder mit diesen Veränderungen entwickelten später viel häufiger eine Allergie.

Ziel des Leipziger Forscherteams ist es, derartige kritische Veränderungen frühzeitig zu diagnostizieren und damit Risikokinder zu identifizieren. Dies könnte dann zum Beispiel spezielle Therapien begründen. „Und wir helfen den Eltern, die Umwelt ihres Kindes zu beeinflussen, also beispielsweise während Schwangerschaft und im Säuglingsalter kritische Belastungen zu vermeiden“, so Wissenschaftlerin Lehmann. Gleichzeitig geht es ihr darum, den Gesetzgeber dafür zu sensibilisieren, dass sich das Immunsystem eines Menschen bereits im Mutterleib entwickelt und auch dort schon geschädigt werden kann. Denn möglicherweise sind in Räumen, in denen sich Schwangere und Säuglinge aufhalten, andere Belastungsgrenzwerte relevant. Sicherlich müssen auch Hersteller von Baumaterialien und Inneneinrichtungen ganz neue Kriterien ins Auge fassen.

Entzündungen der Atemwege

Doch die Chemikalien, mit denen die meisten von uns beinahe tagtäglich in Berührung kommen, schädigen nicht nur das Immunsystem unserer Kinder vor der Geburt. Flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds – VOC), die uns oft aus Klebstoffen, Möbeln und Farben in die Nase steigen, sind auch tückisch für unsere Atemwege. Denn sie verursachen dort Entzündungen.

Die Forschungen des UFZ haben das Ausmaß dieser Auswirkungen ermittelt: So steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kind nach Renovierungsarbeiten im Haushalt in den ersten Lebensjahren an Atembeschwerden leidet, auf das Vierfache.

Wie VOC im Inneren der Lunge genau wirken, konnten die Forscher mithilfe von speziellen *in vitro*-Modellen im Labor nachvollziehen. Solche Modelle bestehen aus menschlichen Lungenepithelzellen, die problemlos in Brutschränken vermehrt werden können, einer dünnen Membran, auf die die Lungenepithelzellen aufgebracht werden, und einem Nährmedium. Setzt man das Ganze nun VOC-haltiger Luft aus, ist das Modell fertig, mit dem sich die Bedingungen in der Lunge, wo die Epithelzellen mit den VOC in der Atemluft in Kontakt kommen, wunderbar simulieren lassen. „Jetzt messen wir, wie die Lungenzellen reagieren, ob und in welcher Richtung die normalen Prozesse

gestört werden“, erläutert Irina Lehmann das Experiment. „Was wir beobachtet haben, ist eine Aktivierung der Lungenzellen unter dem Einfluss von VOC, die zur Freisetzung von Entzündungssignalen führt. In der Lunge werden durch diese Signale andere Immunzellen angelockt und ebenfalls aktiviert, so dass die Entzündungsreaktion sich weiter ausbreitet.“

Die UFZ-Forscher fanden heraus, dass oxidativer Stress die Ursache dieser Entzündungsreaktionen in der Lunge ist. Darunter ist zu verstehen, dass reaktive Sauerstoffmoleküle, bekannt auch als Sauerstoffradikale, entstehen. Das sind den Organismus schädigende Formen des Sauerstoffs, die bei verschiedensten Erkrankungen sowie beim Altern eine entscheidende Rolle spielen.

Nachdem einmal klar war, was die Lungenzellen schädigt, versuchten die Forscher, dagegen anzukämpfen. Sie setzten Antioxidanzien ein, Chemikalien, die die in der Zelle gebildeten reaktiven Sauerstoffmoleküle neutralisieren können. Mit diesen Antioxidanzien, die als Medikament bereits zur Verfügung stehen, konnten die Lungenzellen im Modell vor den schädigenden VOC-Effekten geschützt werden.

Vor rund zehn Jahren begann das Team um Irina Lehmann mit diesen Testreihen. „Wir konnten mit den Ergebnissen belegen, dass VOC tatsächlich Allergien und entzündliche Reaktionen in der Lunge hervorrufen können, und wir konnten die auf zellulärer Ebene ablaufenden Prozesse ergründen. Dadurch haben wir nun auch eine Möglichkeit gefunden, wie man die durch Chemikalien in der Lunge hervorgerufenen Reaktionen behandeln oder ihnen sogar vorbeugen könnte.“ Antioxidanzien scheinen hier eine Lösung zu liefern. Diese kann man auch mit der Nahrung aufnehmen, zum Beispiel mit Fruchtsäften und Gemüse. Inwiefern eine Ernährung, die reich an Antioxidanzien ist, vielleicht sogar vor den schädigenden Einflüssen von Umweltbelastungen schützen kann, ist eine der spannenden Fragen, die die UFZ-Forscher zukünftig beantworten wollen. *Marlis Heinz*

LINA – LEBENSSTIL UND UMWELTFAKTOREN UND DEREN EINFLUSS AUF DAS NEUGEBORENEN-ALLERGIERISIKO



Partner des UFZ: Städtisches Klinikum „St. Georg“ Leipzig, Universität Leipzig (Klinische Immunologie und Dermatologie)

Anzahl Studienteilnehmer: 622 werdende Mütter und ihre 629 geborenen Kinder

Rekrutierungsphase der Schwangeren: 2006 bis 2008

Ende der Untersuchungen: voraussichtlich 2024 bis 2026

Untersuchte Belastungen: Rauchen, Chemikalien in der Wohnung (VOC), Schimmelpilze, Verkehr, Lärm, Stress

Methoden:

- ▶ Durchführung von Blutanalysen, um den Einfluss von Umweltbelastungen auf das Immunsystem der Schwangeren und deren Neugeborenen zu erfassen und deren Allergiestatus zu untersuchen – beginnend in der 34. Schwangerschaftswoche und im Nabelschnurblut der Neugeborenen.
- ▶ Jährliches Erfassen des Gesundheitsstatus der Kinder bis zu ihrem 18. Lebensjahr. Dazu werden sie einmal pro Jahr in der Kinderklinik des Klinikums „St. Georg“ untersucht, und die Eltern beantworten jährlich einen Fragebogen zu Erkrankungen der Kinder.

UFZ-Ansprechpartnerin:

■ **Dr. Irina Lehmann**
Leiterin Dept. Umweltimmunologie

e-mail: irina.lehmann@ufz.de

Die Hyphen von *Pythium ultimum* durchziehen in einem dichten Geflecht weiträumig das Erdreich. UFZ-Forscher fanden heraus, dass darin nicht nur Bakterien leben, sondern auch Schadstoffe transportiert werden. Können solche unterirdischen Netzwerke deshalb vielleicht einen Beitrag zur Sanierung belasteter Böden leisten? (Foto: Ausschnitt einer Lasermikroskopischen Aufnahme von Katrin Pätzold und Dr. Thomas R. Neu, UFZ)

1.000 µm

WECHSELSPIEL VON EXPERIMENT UND MODELL

Bei der Sanierung kontaminierter Böden spielen Mikroorganismen eine wichtige Rolle. Die Substanzen, die in unseren Augen Schadstoffe sind, dienen Bakterien als Nahrungsquelle. Auf diese Weise helfen sie beim Abbau von Schadstoffen und fungieren als Ökosystemdienstleister. Doch klappt das leider nicht immer und überall – die Voraussetzungen im Boden müssen stimmen und die Bakterien benötigen Zugang zu ihrer Nahrung. So kann schon allein eine winzige Luftpore von wenigen Mikrometern Durchmesser ein unüberwindbares Hindernis darstellen. „Bakterien sind in ihrer Bewegung an Flüssigkeitsfilme gebunden“, erklärt der Umweltmikrobiologe und Chemiker Dr. Lukas Y. Wick. „Auch wenn die Nahrungsquelle – in dem Fall der Schadstoff – zum Greifen nah erscheint: Ist kein direkter Zugang vorhanden, müssen sie hungern.“

Doch die Helfer in der Not sind nicht weit: In einem reich verzweigten, dichten Geflecht durchziehen Pilze mit ihren fädigen Strukturen, den so genannten Hyphen, weiträumig den Boden. Die Hyphen sind von einer Schleimschicht umgeben, auf der sich Bakterien wie auf einer Autobahn fortbewegen können (*„fungal highway“*). Auf diese Weise gelangen sie zu den Stellen im Boden, wo es Nahrung für sie gibt. Da Pilzhypen in der Lage sind durch Luftporen hindurchzuwachsen, bauen sie für die Bakterien Brücken durch unwegsames Gelände. Doch die Pilze bringen die Bakterien nicht nur zu den Schadstoffen hin, sie können Schadstoffe auch selbst transportieren: Innerhalb ihres Zellplasmas pumpen sie die Schad-

stoffe in ihrem riesigen Netzwerk quer durch den Boden und machen sie so für weitere Bakterien verfügbar (*„fungal pipeline“*).

Die Infrastruktur erscheint optimal. Doch nicht alle Mikroorganismen können Schadstoffe verwerten, nicht immer stimmen die Umweltbedingungen und nicht alle Bakterien kommen gleich gut mit Pilzen zurecht, da Pilze auch Antibiotika absondern. „Wir sind auf der Suche nach besonders effektiven Bakterien-Pilz-Kombinationen mit dem Ziel, diese in Zukunft unter Herstellung idealer Bedingungen für ihr Wechselspiel in der Praxis stimulieren zu können“, erklärt Lukas Y. Wick.

Auf der Suche nach dem Traumpaar arbeitet er eng mit Dr. Thomas Banitz zusammen, der als Mathematiker einen ganz anderen Blick auf das System mitbringt. Er schaut aus der Sicht eines ökologischen Modellierers auf die Abläufe im Boden. Dadurch ergeben sich selbst bei gleicher Beobachtung unterschiedliche Betrachtungsweisen und Erklärungsansätze.

Mit Hilfe von Computermodellen können die UFZ-Forscher immens viele Szenarien simulieren. Beispielsweise variieren sie verschiedene Bedingungen, wie das Angebot von Wasser oder Sauerstoff, die Konzentration und die Verteilung von Schadstoffen oder auch die Konkurrenz verschiedener Bakterienarten. Außerdem schauen sie, welche Rolle diese Bedingungen für unterschiedliche Bakterien-Pilz-Paare spielen, wie die Gegebenheiten miteinander in Wechselwirkung treten und welchen Einfluss sie

letztlich auf den Schadstoffabbau haben. So wird ermittelt, unter welchen Bedingungen im Boden besonders große Steigerungen der Abbauraten zu erwarten sind und welche physiko-chemischen und ökologischen Faktoren dabei eine Schlüsselrolle einnehmen.

Die beiden Forscherteams untersuchen das Zusammenspiel von Bakterien und Pilzen beim Schadstoffabbau mit Hilfe der Kombination von Computermodellen und Laborversuchen. Dabei fließen die Ergebnisse aus den Laborversuchen in die ökologischen Modelle ein, und die Erkenntnisse aus den Modellen dienen wiederum als Grundlage für das Versuchsdesign weiterer Experimente. Wick: „Das ist eine äußerst effektive und gewinnbringende Synergie dieser beiden doch sehr unterschiedlichen Disziplinen. Die ökologischen Prozesse, die im Großen stattfinden, finden womöglich auch im Kleinen, in den mikrobiologischen Sphären des Bodens, statt. Aus der Kombination von Experiment und Modell hoffen wir, den tatsächlichen Abläufen im Boden auf die Spur zu kommen, um dem natürlichen Schadstoffabbau in Zukunft besser unter die Arme greifen zu können.“ *Nicole Silbermann*

UFZ-Ansprechpartner:

■ **Dr. Lukas Y. Wick**
Dept. Umweltmikrobiologie

e-mail: lukas.wick@ufz.de

■ **Dr. Thomas Banitz**
Dept. Ökosystemanalyse

e-mail: thomas.banitz@ufz.de



(Foto: Tobias Hametner)

ISOTOPE MACHEN SCHADSTOFFABBAU MESSBAR

Ist der Boden mit Schadstoffen belastet, wird häufig eine kostengünstige Sanierungsmethode eingesetzt, das sogenannte *Natural Attenuation* (NA). Dabei wird auf natürliche Selbstreinigungsmechanismen im Boden gesetzt. Oftmals sind dafür aber ganz spezifische Bedingungen erforderlich. So benötigen manche schadstoffabbauenden Mikroorganismen eine bestimmte Konzentration an Sauerstoff oder andere sogenannte Elektronenakzeptoren zur Mineralisierung des Schadstoffes. Und nicht selten muss der Mensch nachhelfen, um für die Bakterien optimale Bedingungen zu schaffen und auf diese Weise die natürlichen Selbstreinigungsprozesse in Gang zu setzen oder zu verstärken (*Enhanced Natural Attenuation, ENA*).

Doch wie kann man herausfinden, ob diese überhaupt stattfinden? „Eine einfache chemisch-analytische Nachweismethode ist da nicht ausreichend. Denn durch abiotische Prozesse wie Verlagerung, Verflüchtigung oder Verdünnung vermindert sich die Konzentration der Schadstoffe im Boden, doch ein natürlicher Abbau hat womöglich gar nicht stattgefunden“, sagt der Geochemiker Dr. Hans-Hermann Richnow vom UFZ. Mithilfe des sogenannten Isotopenmonitorings jedoch können solche Abbauprozesse nachgewiesen und sogar quantifiziert werden. Isotope sind verschiedene Varianten eines chemischen Elements, die sich in der Anzahl ihrer Neutronen unterscheiden. So hat das Kohlenstoffisotop ^{12}C insgesamt sechs Neutronen und ist damit etwas leichter als das Kohlenstoffisotop ^{13}C mit sieben Neutronen. Beide Kohlenstoffisotope kommen in der Natur vor, allerdings ist ^{12}C mit 98,9 Prozent

sehr viel häufiger als ^{13}C mit nur 1,1 Prozent. Dieses Verhältnis der beiden Isotope zueinander wird beim Isotopenmonitoring als Referenzwert zur Einschätzung des Schadstoffabbaus zugrunde gelegt.

Soll die Methode für die Quantifizierung des Schadstoffabbaus genutzt werden, ist es wichtig zu wissen, dass Mikroorganismen Moleküle aus den leichteren ^{12}C -Isotopen schneller verwerten können. Das gilt im Prinzip für alle kohlenstoffhaltigen Schadstoffe. Während des biologischen Abbaus reichern sich daher schwere ^{13}C -Isotope im verbleibenden Schadstoffpool an, und das Verhältnis der beiden Isotope verschiebt sich. Aus dieser Verschiebung, die mithilfe von Massenspektrometern gemessen wird, kann man rückschließen, wie weit der Abbauprozess fortgeschritten ist, und gegebenenfalls unterstützend eingreifen. Im Gegensatz zu anderen Analyseverfahren hat das Isotopenmonitoring einen entscheidenden Vorteil: Das Isotopenverhältnis eines Schadstoffs wird ausschließlich durch mikrobiellen Abbau bestimmt und kaum durch andere Prozesse beeinflusst. „Keine andere Analyseverfahren kann in der Blackbox Boden so eindeutig Abbauprozesse nachweisen und sogar quantifizieren“, sagt Hans-Hermann Richnow.

Gemeinsam mit seinem Kollegen Prof. Rainer Meckenstock vom Helmholtz-Zentrum München gründete Richnow im Jahr 2005 die Firma Isodetect GmbH, die das Isotopenmonitoring zur Beurteilung von Schadensfällen in der Praxis anwendet. In Zukunft soll das Verfahren auch für das Monitoring des Abbaus von Pestiziden und

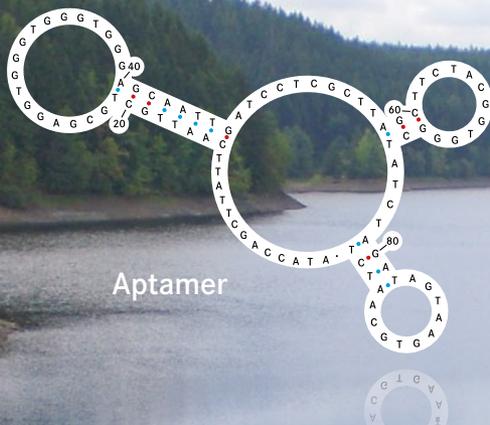
Pharmaka Anwendung finden. Das Isotopenmonitoring ist nicht nur in Deutschland ein anerkanntes Verfahren, sondern wird auch in den USA von der *Environmental Protection Agency* (EPA) empfohlen.

Richnow und Meckenstock sind die Pioniere auf diesem Gebiet. Sie haben in den vergangenen 15 Jahren ein neues Forschungsfeld aufgebaut – von der Grundidee bis hin zur Anwendung in der Praxis: Ende der 1990er Jahre arbeitete Richnow als junger wissenschaftlicher Mitarbeiter mit stabilen Isotopen als Markersubstanz und stieß bei seinen Versuchen auf Unstimmigkeiten im Abbauverhalten dieser Stoffe. In diesem Zusammenhang fiel ihm sofort das Prinzip der Isotopenfraktionierung bei der Photosynthese ein. Dabei greifen Pflanzen zur Herstellung von Zuckermolekülen bevorzugt auf Kohlendioxid (CO_2) mit leichten ^{12}C -Isotopen zurück, da sie es mit weniger Energieaufwand verwerten können als die schwereren ^{13}C -Isotope. „Ich habe dann eins und eins zusammengezählt und vermutet, dass das Prinzip vielleicht auch auf Abbauprozesse übertragbar sein könnte“, sagt Richnow. Gemeinsam mit Rainer Meckenstock führte er kurze Zeit später erste Versuche zur Isotopenfraktionierung von Schadstoffen durch. Heute, 2012, gibt es weltweit sehr viele Forschergruppen, die in dieser Richtung arbeiten. *Nicole Silbermann*

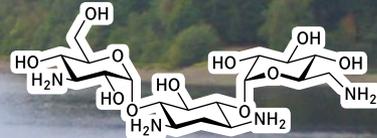
UFZ-Ansprechpartner:

■ PD Dr. Hans-Hermann Richnow
Leiter Dept. Isotopenbiogeochemie

e-mail: hans.richnow@ufz.de



Aptamer



Kanamycin A

Aptamere sind das Herzstück von Biosensoren, die am UFZ entwickelt werden, um schnell und kostengünstig bspw. Antibiotika wie Kanamycin A in der Umwelt nachzuweisen. (Foto: Beate Strehlitz, Bildmontage: Fuenferken Design AG)

PASSENDE TEILE FINDEN UND BINDEN

Weltweit sterben jedes Jahr mehrere Millionen Menschen an Krankheiten, die durch verunreinigtes Wasser übertragen werden. Besonders dramatisch ist die Situation in wasserarmen Ländern. Aber auch hierzulande verunsichern Nachrichten wie die Verunreinigung von Trinkwasser in Thüringen mit *E. coli*-Bakterien oder Krankheits- und Todesfälle durch ungeklärte Infektionen in Krankenhäusern die Bevölkerung. Um herauszufinden, welche Verunreinigungen dafür verantwortlich sind, sind meist noch sehr zeit- und kostenaufwendige Labormethoden notwendig. Zeit und Kosten – zwei Faktoren, auf die es wie so oft ankommt – hat Dr. Beate Strehlitz bei ihrer Forschung im Blick: Sie entwickelt mit ihrer Arbeitsgruppe Biosensoren, mit denen einfach, kostengünstig, schnell und trotzdem sicher gemessen werden kann, ob Trinkwasser oder ein anderes Lebensmittel genießbar ist oder nicht.

Biosensoren sind Messsysteme, die eine biologische Erkennungsreaktion zwischen dem zu messenden Zielmolekül – z. B. dem Schadstoff – und einem entsprechenden biologischen Rezeptor in ein elektronisch verwertbares Signal umwandeln. Das ist grundsätzlich nicht neu. Bei der Blutzuckerbestimmung bei Diabetikern oder bei der Messung von Laktatwerten im Blut von Sportlern haben sich Biosensoren bereits fest etabliert. Während das Herzstück dieser Sensoren jedoch meist Enzyme oder Antikörper sind, werden für Schadstoffe wie pathogene Mikroorganismen oder Reststoffe aus Arzneimitteln und Antibiotika aus der Tiermast stabilere Rezeptoren gebraucht. Aptamere, vereinfacht übersetzt

mit „passende Teile“ (lat. *aptus* = passend, griech. *meros* = Teil), können eine Lösung sein. Das sind Einzelstrang-DNA oder RNA-Nukleinsäuren, die aufgrund ihrer spezifischen dreidimensionalen Struktur eine sehr starke Bindung mit ihrem Zielmolekül eingehen können. Wie ein Schlüssel in sein Schloss passt die 3D-Struktur des Aptamers an spezifische Bindungsstellen ganzer Zellen, bakterieller Gifte, Proteine oder aus nur wenigen Atomen bestehender Moleküle. „Wir suchen für definierte Zielmoleküle die passenden Aptamere – das funktioniert so ähnlich wie eine Partnervermittlung, allerdings mit einer unüberschaubar großen Datenbank“, erklärt Beate Strehlitz augenzwinkernd. Es wird also die „Stecknadel im Heuhaufen“ gesucht, indem mittels eines gezielten evolutiven Verfahrens im Reagenzglas die besten Bindungspartner aus einer großen Vielfalt von Nukleinsäuremolekülen – es sind 10^{15} – herausgesucht und angereichert werden. Einmal entwickelt, erfolgt die Herstellung der Aptamere mittels chemischer Synthese. Dabei können Modifikationen für bestimmte Eigenschaften wie Stabilität, Immobilisierbarkeit und Nachweisbarkeit „eingebaut“ werden. Beate Strehlitz und ihr Team wollen aber mehr als nur das Aptamer. Ihr Ziel ist eine Art Aptamer-Toolbox, die Methoden zur Aptamerentwicklung, fertige Aptamere sowie Sensor- und Assayprinzipien – also praktikable Geräte – bietet, vornehmlich für Anwendungen in der Umweltanalytik.

Aktuell arbeitet die Forschungsgruppe vor allem an Aptameren für Pharmaka und Pathogene. Bereits patentiert wurde ein selektiertes Aptamer für das Aminoglycosid-

Antibiotikum Kanamycin A, das vorwiegend in der Tierzucht eingesetzt wird. Gefunden wurden auch Aptamere zum Nachweis von Ofloxacin und Ciprofloxacin, Antibiotika, die in der Humanmedizin häufig bei Harnwegsinfektionen verschrieben werden.

Bei dem Projekt geht es aber nicht nur darum, die Arzneimittel nachzuweisen, sondern aus Abwässern zu entfernen. Denn in Kläranlagen werden Pharmaka oft nur sehr schlecht abgebaut, gelangen so in die Umwelt und über Trinkwasser und Nahrung bis zum Menschen. Die winzigen Mengen sind für den Menschen zunächst einmal unbedenklich. Die langfristige Wirkung auf die Gesundheit ist allerdings noch unklar. Was man aber weiß, ist, dass Antibiotika in der Umwelt Resistenzen in Bakterien erzeugen können. Konkrete Gefahr droht dann, wenn der Mensch mit resistenten Bakterien in Kontakt kommt, z. B. über infizierte Lebensmittel oder im Krankenhaus. Antibiotika-Aptamere könnten in solchen Fällen lebensrettende Erkennungselemente sein, mit denen die gefährlichen Arzneimittelreste nachgewiesen und angereichert werden, um sie anschließend zu entfernen. Damit es aber am besten gar nicht so weit kommt, empfehlen die UFZ-Forscher, den Antibiotika-Einsatz zu begrenzen und damit den Eintrag in die Umwelt zu minimieren.

Gundula Lasch

UFZ-Ansprechpartnerin:

■ **Dr.-Ing. Beate Strehlitz**
Dept. Umwelt- und Biotechnologisches Zentrum (UBZ)

e-mail: beate.strehlitz@ufz.de

Kommen bestimmte genveränderte Bakterien mit Arsen in Kontakt, beginnen sie zu leuchten. Die Leuchtkraft der Bakterien gibt Auskunft über die Arsenkonzentration im Wasser. (Foto: André Künzelmann, UFZ)



LEBEN RETTEN MIT DEM LEUCHTKÄFERPRINZIP

„Etwa 50 Forschergruppen auf der ganzen Welt haben sich an diesem Problem die Zähne ausgebissen“, sagt Umweltmikrobiologe Prof. Dr. Hauke Harms. „Wir hatten den längsten Atem – auch deshalb, weil uns die Helmholtz-Gemeinschaft den Rücken frei gehalten hat. Dadurch sind wir die Ersten, die es mit Bioreportern bis in die Anwendung geschafft haben“. Es geht um ein biologisches Testverfahren, mit dem man einfach und schnell hochgiftiges Arsen im Grundwasser nachweisen kann.

Hauptakteure bei dieser Methode sind genmodifizierte Bakterien, die bei Kontakt mit Arsen zu leuchten beginnen. Daher auch der Name des Biosensors – ARSOLux. Die Wissenschaftler verwenden Kolibakterien, denn diese können sich gegen toxische Stoffe zur Wehr setzen. Sie schalten einen Abwehrmechanismus ein, der den Stoff, der in die Zelle eindringt, immer wieder rauspumpt. Dieser Schalter ist mit einer Lichtquelle gekoppelt. Sobald die genveränderten Bakterien mit Arsen in Kontakt kommen, produzieren sie Licht. Ein Spektakel im Reagenzglas. Das „Luminometer“, ein Gerät so groß wie ein Tischtelefon, misst die Leuchtkraft der Bakterien und rechnet es in Arsenmengen um. Die Methode ähnelt dem Leuchtkäferprinzip. In der Natur spricht man von Biolumineszenz. Die Raffinesse ist, dass die Forscher zwei unterschiedliche Systeme zusammengebracht haben: Ein Abwehr- und ein Signalsystem. Eine Person kann 160 Tests pro Tag durchführen – von der Probensammlung bis zu deren Auswertung. „Das ist bislang unschlagbar“ resümiert der Wissenschaftler Harms.

Seit 1995 befasst sich Hauke Harms mit der genetischen Reaktion von Bakterien auf Schadstoffe – damals noch an der Schweizer Universität in Lausanne, zusammen mit dem Mikrobiologen Prof. Dr. Jan Roelof van der Meer. Die beiden Forscher waren sich einig, dass genveränderte Bakterien nicht in die Umwelt gelangen dürfen. Deshalb musste die Frage nach der Notwendigkeit einer solchen Erfindung gestellt werden. „Schnell wurde uns klar, dass nur ein sehr gravierendes Problem die Anwendung derart gentechnisch veränderter Organismen rechtfertigen kann“, blickt Hauke Harms zurück. Auf das gravierende Problem stießen die Forscher im Jahr 2000: Arsen im Grundwasser, das in den meisten Fällen durch natürlich vorhandene geologische Gegebenheiten oder Bergbauaktivitäten der Menschen dort hinein gelangt. Da, wo es kein Trinkwassernetz gibt und das Wasser ungefiltert aus dem Boden geholt wird, erkranken die Menschen – typisch sind schwere Hautschäden und Funktionsstörungen von Niere und Leber bis hin zu Krebs. Nach Schätzungen der WHO müssen weltweit zirka 150 Millionen Menschen mit arsenbelastetem Trinkwasser leben, insbesondere in Ländern wie Bangladesch, Nepal, Indien, Vietnam oder der Mongolei.

2004 kam Hauke Harms ans UFZ nach Leipzig und kümmerte sich unter anderem um die Implementierung des Tests in die Praxis. Das hieß: ARSOLux sollte raus aus dem Labor, hin zu den „Arsen-Brennpunkten“ der Welt. Und bedeutete: Internationale und lokale Genehmigungsbehörden sowie Organisatoren von Messkampagnen in den

betroffenen Ländern mussten vom Sensor überzeugt werden. Ein Unterfangen, das für alle Beteiligten Neuland war und sich als außerordentlich langwierig und mit den typischen Zeitläufen wissenschaftlicher Projektfinanzierung nicht immer vereinbar erwies. „Das Interesse in den betroffenen Ländern ist zwar meistens groß“, ergänzt ARSOLux-Teamleiterin Sonja Hahn-Tomer, „aber konkrete Zusagen sind schwer zu bekommen. Denn in den meisten betroffenen Ländern stehen Arsenvergiftungen nicht an erster Stelle der Agenda. Diesen Platz nehmen Hunger und Umweltkatastrophen ein“. Zudem werden die genveränderten Bakterien oft mit Misstrauen betrachtet. „Macht es doch erst einmal in eurem Land“ ist ein Argument. Das geschah 2011 mit einer Messkampagne in Sachsen, durch die die Wissenschaftler Vertrauen aufbauen wollen. Eine echte Gefährdungslage durch die im Biotest eingesetzten Bakterien gibt es zu keinem Moment, betont Harms. „Die verwendeten *E. coli* K12 sind harmlose Laborbakterien und würden in der Natur kaum überleben.“ 2010 wurde die ARSOLux-Forschung auf ganz besondere Weise honoriert. Das deutsch-schweizerische Forscherteam bekam den mit 50.000 Euro dotierten Erwin Schrödinger-Preis für herausragende interdisziplinäre Forschung verliehen. *Annegret Faber*

UFZ-Ansprechpartner:

■ Prof. Dr. Hauke Harms
Leiter Dept. Umweltmikrobiologie

e-mail: hauke.harms@ufz.de



Einsammeln und zerstören – das ist die Aufgabe von Carbo-Iron, einer kohlenstaubfeinen Substanz, die am UFZ entwickelt wurde, um Grundwasser zu reinigen. (Foto: André Künzelmann, UFZ)

WINZIGE GIGANTEN

Professor Dr. Frank-Dieter Kopinke greift im Labor nach einem kleinen Gefäß und kippt eine Messerspitze schwarzen Pulvers auf den Finger seines Besuchers. Eine kohlenstaubfeine Substanz klebt nun wie Ruß an seiner Haut, unspektakulär und schmutzig. Für Kopinke aber steckt in der Substanz eine Art Zauberformel im Kampf gegen chemisch verunreinigtes Wasser: Carbo-Iron hat die Gruppe der Wissenschaftler um ihn den Stoff getauft, den sie hier im UFZ entwickelt haben und damit an der Spitze der Technologieentwicklung in diesem Bereich stehen.

Er wägt sorgsam die Worte, um den Stoff treffend zu beschreiben. Denn ein einziges Partikel dieser klassischen Anwendung der Nano-Technologie ist so klein, dass Größeneinheiten keine anschauliche Vorstellung vermitteln. „Kleiner als ein Bakterium“, sagt Kopinke schließlich. Carbo-Iron wird aus Kohlenstoff und Eisen hergestellt, kostengünstigen und umweltverträglichen Ausgangsstoffen. Im Labor steht ein Drehrohrföfen, in dem die Eisensalze zu metallischem Eisen reduziert werden. Die Wissenschaftler erzeugen Eisen-Nanopartikel auf Kohlenstoff-Mikropartikeln und verleihen dem Material so chemische Reaktivität. Heraus kommen Winzlinge mit einer riesigen inneren Oberfläche. „Es ist kaum vorstellbar“, veranschaulicht Dr. Katrin Mackenzie, eine der beteiligten Wissenschaftlerinnen, die Dimensionen. „Aber könnte man die hauchdünnen Innenwände von zehn Gramm dieser Partikel auseinanderfalten, würden sie tatsächlich das Spielfeld eines Fußballplatzes bedecken.“ An dieser großen Oberfläche werden die Schadstoffe

aus dem Wasser gesammelt. Das besorgt der Kohlenstoff. Das metallische Eisen in den Poren wiederum zerstört chlorierte Schadstoffe. Einsammeln und zerstören: Mit dieser Formel lässt sich die Innovation des UFZ beschreiben. Zudem ist Carbo-Iron aufgrund seiner geringen Dichte so leicht, dass die Teilchen in sandigen Grundwasserleitern gut transportiert werden. Diese Beweglichkeit erhöht seine Wirksamkeit.

Die gängigen Methoden zur Grundwasserreinigung hält Kopinke für mangelhaft. Das klassische „Pump and Treat“, also das Abpumpen und anschließende Säubern von Wasser, ist oft unwirtschaftlich, weil es sehr lange Zeiträume, häufig Jahre oder gar Jahrzehnte, benötigt. Aber auch neuere Methoden, so genannte *in situ*-Verfahren, haben Nachteile, obwohl sie die Schadstoffe direkt in der Umwelt ohne den Umweg über chemische Reaktoren angreifen. Advanced Oxidation Processes (AOPs) beispielsweise zerstören die Schadstoffe durch Oxidation mittels starker Oxidationsmittel. „Damit bekommt man zwar fast jede Chemikalie kaputt, aber das ist die ganz große Keule“, sagt Kopinke. Bei der *in situ*-Chemical Oxidation (ISCO), so Kopinke, könne man die Reaktionsbedingungen, anders als in einem chemischen Reaktor, nicht kontrollieren. So entstünden häufig unerwünschte Nebenprodukte. „Das Verfahren ist en vogue, hat aber einen fragwürdigen Charme“, sagt Kopinke, „denn Behörden überprüfen nach einer Sanierung in der Regel, ob der zu beseitigende Schadstoff weg ist, nicht aber, ob neue hinzu gekommen sind.“

Die Anforderungen an ein neues Verfahren waren somit klar: Es sollte treffsicher und wirtschaftlich sein, vor allem aber nicht Probleme dadurch lösen, dass es neue schafft. „Wir haben ein Verfahren entwickelt, das mehr dem Einstreuen von Krümeln gleicht als dem Abwurf einer Bombe“, sagt Kopinke und betont damit die vielleicht entscheidende Eigenschaft von Carbo-Iron: Umweltverträglichkeit. Carbo-Iron kann im Grundwasserleiter verbleiben, nachdem es die chemischen Schadstoffe gesammelt und zerstört hat. Es ist völlig ungefährlich und stellt keinerlei Umweltrisiko dar. Denn die Bestandteile von Carbo-Iron kommen auch in der Natur vor, jedenfalls beinahe, weil die Aktivkohle in ihren Eigenschaften dem Ruß ähnelt, wie er etwa bei Waldbränden entsteht. Auch den kann die Natur verkraften.

Die Wissenschaftler um Frank-Dieter Kopinke haben ein effizientes Reagenz ohne schädliche Nebenwirkungen entwickelt. Durch die Eigenproduktion im Labor konnte kürzlich der erste Feldversuch mit Carbo-Iron in einem kontaminierten Grundwasserleiter durchgeführt werden. Dabei wird sich zeigen, ob Carbo-Iron-Partikel tatsächlich winzige Giganten der Wasserreinigung sein können. Jetzt ist die Industrie am Zug, die Innovation zum Stand der Technik zu machen.

Michael Kraske

UFZ-Ansprechpartner:

■ Prof. Dr. Frank-Dieter Kopinke
Leiter Dept. Technische Umweltchemie
e-mail: frank-dieter.kopinke@ufz.de



Filterbecken am UFZ-Versuchsstandort Leuna. Hier wird mit robusten ecotech-Verfahren Grundwasser von Benzol und MTBE, einem Benzinzusatzstoff, befreit. (Foto: André Künzelmann, UFZ)

ECO-TECH IS(S)T HIGH-TECH

Dr. Manfred van Afferden steht vor einem tennisplatzgroßen Kiesbecken und blinzelt in die Sonne. Gleich daneben ist ein zweites, ähnliches Becken. Dieses ist mit Weiden bepflanzt. „Deren Durchwurzelung bewirkt einen größeren Sauerstoffeintrag“, erklärt er und blickt dabei in Richtung Chemiestandort. Was er sieht, kann gegensätzlicher nicht sein. Dort, auf 1.300 Hektar, rauchende Schornsteine, Industriebauten und Kühltürme. Hier ein Ensemble, das an eine Gartenanlage erinnert.

Was so unscheinbar daher kommt, löst auf sehr effiziente Weise ein Problem, das Sachsen-Anhalt schon lange unter den Nägeln brennt. Das Grundwasser unter dem Chemiestandort Leuna ist stark toxisch und muss dringend gereinigt werden. Methyl-tertiär-butylether, kurz MTBE, und Benzol kommen hier in hohen Konzentrationen im Grundwasser vor – ein Erbe der DDR-Erdölindustrie sowie aus noch früheren Zeiten. MTBE wird seit vielen Jahren als Ersatz für bleiorganische Verbindungen dem Super-Benzin beigemischt, um die Oktanzahl und damit die Klopfestigkeit des Motors zu erhöhen. Bis zu 5.000 Mikrogramm der Trinkwasser gefährdenden Chemikalie wurden unter Leuna in einem Liter Grundwasser gemessen. Beim krebserregenden Benzol sieht es ähnlich aus, da wird der Grenzwert für Trinkwasser um das 15.000-fache überschritten.

„Wir haben in den letzten Jahren ein neues Verfahren für solche Schadensfälle entwickelt, das die Abbauvorgänge der Natur nachempfunden“, sagt Umweltbiotechnologe van Afferden. Aus vier bis sechs Metern Tiefe holen die Forscher dazu das vergiftete

Grundwasser an die Oberfläche. Dort wird es über spezielle Verteilersysteme innerhalb der Kiesbecken verrieselt. Einige der im Grundwasser natürlich vorkommenden Bakterien nutzen Benzol und MTBE als Nahrung. An die Oberfläche geholt, werden sie aktiv und beginnen damit, die toxischen Stoffe zu verwerten. Im Einzelnen funktioniert das zweistufige ecotech-Verfahren folgendermaßen:

Das erste Becken ist ein Vertikalfilter, der vorwiegend mit grobkörnigem Blähtonmaterial gefüllt ist. Hier wird vor allem Eisen ausgefällt, was sonst zu Verblockungen von Rohren, Pumpen und sensiblen Gerätschaften führen würde. Außerdem ist die Anlage so designed, dass kein Kalk ausfällt – ein großer Vorteil gegenüber herkömmlichen chemischen Anlagen, wo Kalkausfällungen sehr hohe Betriebs- und Wartungskosten nach sich ziehen können. Im zweiten Verfahrensschritt passiert das Grundwasser einen Filter, der mit feinkörnigem Material gefüllt ist und eine große Oberfläche für die Ansiedlung der Mikroorganismen bietet. Beeindruckende 15.000 Mikrogramm Benzol pro Liter werden hier schließlich innerhalb weniger Tage auf ein Mikrogramm reduziert und 5.000 Mikrogramm MTBE auf unter zehn Mikrogramm pro Liter. Das sind Konzentrationen, die unter den Grenzwerten liegen, die für Trinkwasser gelten.

Doch auf dem Weg in die Praxis tauglichkeit gab es weitere Hürden zu überwinden, etwa die verfahrenstechnische Einstellung auf winterliche Temperaturen. Denn damit der mikrobielle Abbau auch bei Minusgraden nicht gehemmt wird, darf es im Filter nie kälter als 5 °C werden. Die Lösung liegt nicht, wie man vermuten könnte, in einer externen

Heizung. Durch eine spezielle Betriebsführung der Anlage wird das konstant 8-10 °C „warme“ Grundwasser in so großen Mengen kontinuierlich durch die Filter gepumpt, dass auch bei -20 °C Außentemperatur ein Abkühlen unter die kritische Marke vermieden wird. Ein integrierter „Abluftfilter“, in dem ebenfalls Mikroorganismengemeinschaften die Hauptakteure sind, verhindert zudem, dass flüchtige Schadstoffe emittieren.

Die Firma BAUER Umwelt bekam den Auftrag, die Pilotanlage in Leuna zu bauen. „Im Vergleich zu den gängigen hightech-Anlagen ist diese hier sehr robust, anspruchslos in der Wartung, dadurch viel kostengünstiger und schön sieht sie auch noch aus“ sagt BAUER-Projektleiter Dr. Uwe Schlenker. Bewährt sich die Anlage, werden weitere Filterbecken daneben gebaut. Schon heute ist sie ein weiterer Beweis für die Verbindung von UFZ-Forschung und Technologieentwicklung mit der aktiven Implementierung im technischen Maßstab. Und sie stellt einen wichtigen Meilenstein der langjährigen und guten Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt (LAF) dar, ohne die die Verfahrensentwicklung nicht möglich gewesen wäre.

Annegret Faber

UFZ-Ansprechpartner:

■ **Dr. Roland A. Müller,**
Dr. Manfred van Afferden
Dept. Umwelt- und Biotechnologisches
Zentrum (UBZ)

e-mail: manfred.afferden@ufz.de



Dr. Ulf Roland experimentiert seit vielen Jahren mit Radiowellen. Er ist sich sicher, dass sie das Zeug haben, in vielen Anwendungsbereichen Probleme zu lösen: etwa bei der Boden- und Gebäudesanierung oder der Aufbereitung von Biogas. (Foto: André Künzelmann, UFZ)

DIE PERFEKTE WELLE

Die Sanierung von Böden, die mit Chemikalien kontaminiert sind, ist nach wie vor schwierig. Die einfachste Lösung ist so teuer wie aufwendig: den Boden samt Schadstoffen abbagern und entsorgen. Weitaus eleganter ist es dagegen, den Boden während der Reinigung an Ort und Stelle zu belassen und *in situ* von den Verunreinigungen zu befreien. Doch die derzeit gängigen Methoden stoßen schnell an Grenzen, weil sie häufig nicht effektiv und universell genug einsetzbar sind. Das motivierte den Physiker Dr. Ulf Roland vor einigen Jahren, über Alternativen nachzudenken. Er wusste, dass Nachholbedarf vor allem für Verfahren bestand, mit denen die Bodentemperatur gezielt beeinflusst werden kann. Denn sie bestimmt eine Reihe von physikalisch-chemischen Parametern, die sowohl für den Schadstoffaustrag als auch die Effektivität von mikrobiologischen Abbauprozessen entscheidend sind.

Doch wo sollte man ansetzen? Heizlatten, Wasserdampf, Strom – alles wurde schon probiert, oft mit nur mäßigem Erfolg. Schließlich brachten ihn und weitere Leipziger Kollegen amerikanische Wissenschaftler, die sich mit dem Aufschluss von Ölschiefern befasst hatten, auf den Gedanken, es mit einer speziellen Form von elektromagnetischen Wellen zu probieren, den Radiowellen. Sie funktionieren wie die „Küchen-Mikrowelle“, können jedoch aufgrund ihrer größeren Wellenlänge viel tiefer ins Material eindringen.

Also experimentierte Ulf Roland in seiner Arbeitsgruppe mit Radiowellen und wies im Labor nach, dass sie so viele positive Eigenschaften in sich vereinen, dass sie für die Sanierung kontaminierter Böden perfekt

geeignet sind: Radiowellen gelangen sehr effektiv an die zu erwärmenden Stellen und arbeiten deshalb energiesparend und kostengünstig. Anders als bei der Mikrowelle funktioniert das praktisch in allen Böden – seien sie nun trocken oder feucht, sandig oder schluffig. Außerdem können Radiowellen große Volumina gleichmäßig bis in mehrere Meter Tiefe und in einem weiten Temperaturbereich von unterhalb 0 °C bis oberhalb 400 °C erwärmen. Diese Eigenschaften eröffnen eine Reihe von Optionen für die Bodensanierung. So kann der mikrobielle Abbau von Schadstoffen jahreszeitunabhängig bei optimalen 30 °C bis 40 °C thermisch unterstützt werden. Oder Schadstoffe werden bei Temperaturen bis zu 200 °C thermisch desorbiert und danach mit der Bodenluft abgesaugt. Bei Temperaturen über 400 °C können dagegen chemische Reaktionen initiiert werden, die ebenfalls zum Schadstoffabbau führen.

Den Weg in die Praxis hat das Verfahren längst gefunden, auch international. In Kopenhagen etwa testete man es auf dem Gelände einer chemischen Reinigung, um chlorierte Kohlenwasserstoffe zu beseitigen. In London wurden stark kontaminierte Bereiche eines Industriestandortes saniert und im britischen Manston eine Tankstelle mit einem Mineralölschaden.

Mit der Marktreife des Verfahrens für die Bodensanierung ist die Forschung in diesem Bereich weitestgehend abgeschlossen – nicht aber darüber hinaus. Denn „Radiowellen haben das Zeug zum Problemlöser in vielen Anwendungsbereichen“, so Ulf Roland, „und da ist noch eine Menge Forschung gefragt“.

Ein riesiger Markt wartet zum Beispiel im Bereich der Gebäudesanierung: Radiowellen können zur Trocknung, aber auch zur Beseitigung von Holzschutzmittel- oder Heizöl-Rückständen oder zur chemikalienfreien Bekämpfung von Holzschädlingen bzw. Hausschwamm eingesetzt werden. Zudem bieten sie sich an, verschiedene technologische Prozesse in der Industrie kostengünstiger und effektiver zu gestalten, beispielsweise bei der thermischen Regenerierung von sogenannten Schüttbetten. Das sind Sammler, über die in vielen chemischen Anlagen Abluft gereinigt wird und die bislang entweder entsorgt oder energieintensiv regeneriert werden. Auch bei der Aufbereitung von Rohbiogas, aus dem Wasser und Kohlendioxid entfernt werden, um Erdgasqualität zu erreichen, könnten Radiowellen helfen.

Für Ulf Roland und seine UFZ-Kollegen hat sich damit ein ganzes Spektrum an Möglichkeiten für den Einsatz von Radiowellen im Umweltbereich aufgetan, dem sie nun im Labor, im Technikum oder schon in der Anwendung gemeinsam mit Partnern aus der Industrie nachgehen. Dass sie das sehr erfolgreich tun, zeigt sich auch daran, dass ihnen kürzlich der Kurt-Schwabe-Preis 2012 durch die Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig für hervorragende wissenschaftliche und technische Leistungen verliehen wurde. *Susanne Hufe*

UFZ-Ansprechpartner:

■ **Dr. Ulf Roland**
Dept. Technische Umweltchemie

e-mail: ulf.roland@ufz.de

STANDPUNKT: NACHHALTIGE NUTZUNG VON RESSOURCEN – DER UNTERGRUND GEHÖRT DAZU!



Foto: André Künemann, UFZ

Prof. Dr. Holger Weiß leitet am UFZ das Department Grundwassersanierung. Er studierte an der TU Clausthal Geologie und promovierte über Sedimentologie, Tektonik und Metamorphose einer Eisenerzlagerstätte in Minas Gerais (Brasilien). Aktuelle Forschungsschwerpunkte sind die Sanierung von kontaminierten Böden und Grundwässern sowie die Nutzung des geologischen Untergrundes als Stoff- und Energiespeicher.

e-mail: holger.weiss@ufz.de

Die Entscheidung, die Energieversorgung Deutschlands – beginnend mit dem Verzicht auf die Nutzung der Kernenergie – zunehmend von fossilen Energieträgern auf erneuerbare umzustellen, stellt eine gewaltige Herausforderung für Forschung und Gesellschaft dar. Dass die Nutzung erneuerbarer Energien nicht *per se* dem Nachhaltigkeitsgebot genügt, sondern vielmehr im Vorfeld die Auswirkungen auf die belebte und unbelebte Umwelt zwingend einer fundierten wissenschaftlichen Analyse bedürfen, ist evident.

Diskussionen über Nachhaltigkeit in der Ressourcennutzung konzentrieren sich bisher auf die dem Menschen unmittelbar bewussten und erfahrbaren Ausschnitte seiner Umwelt, also Wasser, Boden, Luft, vielleicht noch Landschaften und Klima. Dies spiegelt sich auch im entsprechenden regulatorischen Umgang wider: Diese Umweltkompartimente sind schutzwürdiger Gegenstand der umfangreichen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke. Sobald man sich – nicht nur im Wortsinne – in die Tiefe des geologischen Untergrundes begibt, stellt man fest, dass Kenntnisse über die Folgen dessen Nutzung und Regulierungen einer solchen gleichermaßen fehlen.

Der geologische Untergrund wird bereits seit langer Zeit genutzt, um mineralische und feste Energie-Rohstoffe bergmännisch zu gewinnen, Erdöl und Erdgas zu fördern, direkt Energie zu gewinnen oder Stoffe temporär oder dauerhaft einzulagern. Als unmittelbare Folge der Energiewende werden die Nutzungsansprüche an den Untergrund allerdings in einem Umfang zunehmen, der es dringend notwendig macht, die damit verbundenen Umweltauswirkungen nicht nur unter naturwissenschaftlich-technischen, sondern auch unter sozio-ökonomischen Aspekten zu untersuchen. Selbst jenseits aller Aspekte der öffentlichen Perception, Partizipation und Akzeptanz ist festzustellen, dass tatsächlich erhebliche Kenntnisdefizite zu den Auswirkungen einer verstärkten Untergrundnutzung auf Geo- und Biosysteme ebenso bestehen wie Defizite im regulatorischen Umgang mit diesen Entwicklungen.

Aktuell ist besonders die boomende Exploration auf nichtkonventionelle Erdgasvorkommen („Schiefergas“) Gegenstand teilweise erbitterter geführter Diskussionen. Hierbei werden zur Schaffung für eine Förderung ausreichender Gaswegsamkeiten Risse im Gestein erzeugt; dies geschieht durch das Einbringen geeigneter Flüssigkeiten unter hohen Drücken („fracking“). Diese Flüssigkeiten enthalten eine Anzahl unter Gewässerschutzaspekten durchaus problematischer Chemikalien. Risiken für schutzwürdige Grundwasservorkommen bestehen durch mögliche hydraulische Kurzschlüsse zwischen den tiefen gasführenden Horizonten oder auch durch technische Defekte an Bohrungen. Dies bezieht sich nicht nur auf den Einsatz dieser Fluide, sondern auch auf deren Entsorgung. Trotz erster wissenschaftlicher Analysen und Bewertungen von Umweltverträglichkeit und Sicherheit steht eine umfassende (stoffliche) Risikobewertung dieser Stoffgemische weiterhin aus. Das absichtliche Einbringen solcher Schadstoffgemische in die Umwelt, wie es beim Fracking praktiziert wird, macht deutlich, dass ein Rahmen für den Gewässerschutz gegen Gefährdungen aus dem Untergrund dringend erforderlich ist.

Doch der geologische Untergrund wird nicht nur durch die Aufsuchung und Förderung von Schiefergas beansprucht: Die Notwendigkeit einer Speicherung diskontinuierlich erzeugter Energie (Wind, Sonne) wird auf dem Wege der Stoffspeicherung geschehen. Druckluft, Wasserstoff, Synthesegas, Methan, all dies wird in zunehmendem Maße in unterirdischen Kavernenspeichern (zwischen-)gelagert werden müssen.

Die (notwendige) Nutzung des Untergrundes zur Endlagerung ist ein weiteres Feld, auf dem mangelnder gesellschaftlicher Konsens und ein fehlender Rechtsrahmen die dringend gebotenen Forschungs- und Technologieentwicklungsaktivitäten lähmen. Hier sei nur an das Scheitern der CCS-Gesetzgebung erinnert.

Schließlich wird der geologische Untergrund auch in rasant zunehmendem Umfang zur direkten Gewinnung und Speicherung von Energie beansprucht. Mangelnde wissenschaftliche Erkenntnisse und (auch) darauf beruhende genehmigungsrechtliche Restriktionen beschränken derzeit den realisierbaren Temperaturbereich bei der thermischen Inanspruchnahme von Grundwasser auf unter 10 °C, mithin auf einen energetisch wenig effektiven Bereich.

Der geologische Untergrund beinhaltet gewaltige Potenziale zur Nutzung. Es gilt, die mit unterschiedlichen Ansprüchen zwangsläufig verbundenen Risiken nicht nur hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit zu erkennen und abzuwägen. Raumordnung muss endlich auch die dritte Dimension umfassen – den geologischen Untergrund. Nur so, im Ausgleich aller konkurrierender Nutzungs- und Schutzansprüche wird ein wirklich nachhaltiger Umgang mit unseren Ressourcen möglich sein.

Dr. Christoph Ewen ist Inhaber von „team ewen“, einer 2003 gegründeten Firma aus Darmstadt, die sich auf Konflikt- und Prozessmanagement im öffentlichen Raum spezialisiert hat. Die Referenzen reichen von der Organisation runder Tische über die Moderation und Mediation bis zur Führung von Dialogprozessen zu den verschiedensten Themen in Industrie und Naturschutz sowie Stadt- und Landschaftsplanung. Gemeinsam mit der Hammerbacher GmbH Osnabrück begleitete team ewen von März 2011 bis April 2012 den Informations- und Dialogprozess zum Fracking. (Foto: Jürgen Mai)



DIE ÖFFENTLICHE DEBATTE BRAUCHT BELASTBARE UND GLAUBWÜRDIGE EXPERTENAUSSAGEN

Immer vehementer fordern viele Bürgerinnen und Bürger unseres Landes ein stärkeres Mitspracherecht bei gesellschaftlich und politisch relevanten Projekten – das zeigen die heftigen Proteste und Diskussionen um Bahnprojekte, Biogasanlagen, Windparks, Stromtrassen oder Geothermie. Wie erklären Sie sich diese Welle der Empörung?

Ich kann darauf keine empirisch fundierte Aussage treffen, sondern lediglich meine Wahrnehmungen schildern: Ich empfinde es als eine Kombination von Verunsicherung (Was macht das mit mir, mit meinem Wohnumfeld, mit meiner Gesundheit?) und Emanzipation (Ich lasse mir nicht mehr irgendwas vor die Nase setzen!). Interessanterweise zeigen Umfragen, dass nichtbetroffene Bürgerinnen und Bürger sehr viel Verständnis für Betroffene haben, die sich gegen solche Anlagen wehren – selbst wenn die Anlagen für das Gemeinwohl sinnvoll oder gar notwendig sind. Es hat auch etwas mit Sättigkeit zu tun: Die Wirtschaft funktioniert doch, der Strom fließt doch und die Landschaft ist eh schon vollgestellt – warum immer mehr?

Sie haben sich darauf spezialisiert, solche Konflikte im öffentlichen Raum zu lösen. Wie?

Ich vermeide gern das Wort „lösen“. Denn wir lösen keine Konflikte, sondern wir unterstützen die Entscheidungsfindung, die in unserer Demokratie vorgegeben ist. Das tun wir, indem wir destruktive Austragungsformen von Konflikten in konstruk-

tivere Bahnen zu lenken versuchen. Indem wir Gespräche möglich machen, wo der Gesprächsfaden gerissen oder in Vergessenheit geraten ist. Indem wir dabei helfen, eine neutrale Position („Dritter“) aufzubauen, von der aus eine Rationalisierung von Debatten möglich wird. Eine Voraussetzung dafür ist, dass komplexe Sachverhalte verstanden und strukturierbar werden. Nicht alles, was von Vorhaben-Kritikern vorgetragen wird, ist gleich stichhaltig. Manche Punkte kann man objektivieren: Wie stark sind die Erschütterungen bei der Geothermie? Wie laut sind Windräder? Hier kommt es darauf an, von einer Beliebigkeit fachlicher Aussagen pro und contra in der öffentlichen Debatte zu belastbaren und glaubwürdigen Expertenaussagen zu kommen.

Wie nachhaltig sind die Ergebnisse, und wie verbindlich sind sie für die Konfliktparteien bzw. behördliche Entscheidungen?

Hier muss man unterscheiden zwischen im Dialog erarbeiteten Ergebnissen (etwa der Empfehlung des Runden Tisches an der Werra oder der Flughafenmediation in Frankfurt) und langfristigen gesellschaftlichen Entwicklungen. Nicht jeder Dialogprozess endet mit einem Ergebnis. Und selbst wenn es Ergebnisse gibt, können sie kaum rechtsverbindlich sein. Die Zulassungsbehörden dürfen keine Ergebnisse informeller Verhandlungsgruppen übernehmen. Aber es gibt eine faktische Wirksamkeit, die umso stärker ist, je stärker die oben beschriebene

Rationalisierungswirkung auf den öffentlichen Diskurs wirkt.

Welche Rolle spielt dabei die Wissenschaft und wie hat sie sich in den letzten Jahren verändert?

Seit den 1960er Jahren lässt sich ein Prozess der schleichenden Säkularisierung der Wissenschaft beobachten. Es gibt Gutachten und Gegengutachten, es gibt gekaufte und sogenannte Experten... Dazu kommt, dass der Anteil akademisch ausgebildeter Menschen massiv gestiegen ist – es ist kein Problem mehr, einen Menschen mit Hochschulabschluss in der Nähe einer strittigen Anlage zu finden, der Messwerte interpretiert und Gutachten auseinandernimmt. Interessanterweise gibt es dennoch die Sehnsucht nach der objektiven wissenschaftlichen Wahrheit. Ich erlebe oft, wie verwirrt und hilflos die Menschen sind, wenn sie einem Streit unter WissenschaftlerInnen beiwohnen. Denn angesichts des verbindlichen Satzes an Regeln und Kriterien unter den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern darüber, was eine wissenschaftlich gute Herangehensweise an Fachfragen ist, sollte man doch annehmen, dass verschiedene Experten zu ähnlichen Antworten kommen. Meine Erfahrung ist: Bringen Sie Gutachter und Gegengutachter dazu, ein gemeinsames Gutachten zu formulieren und vermeiden Sie, dass diese beiden öffentlich gegeneinander auftreten – dann tragen Sie zu einem konstruktiveren Umgang mit dem Konflikt bei.

Nehmen wir ein aktuelles Beispiel, an dem auch eine Reihe von UFZ-Experten beteiligt waren – den Dialog über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking-Technologie für die Erdgasgewinnung. Wie sah der gerade beendete einjährige Dialog aus?

Zu Beginn stand der Wunsch von ExxonMobil, die Vorwürfe gegen Fracking wissenschaftlich zu entkräften. Als Prozessbegleiter habe ich gemeinsam mit meiner Kollegin Ruth Hammerbacher ExxonMobil beraten und eine Veränderung angestoßen. Es ging nicht um „Entkräften“, sondern um eine gemeinsame wissenschaftliche Suche. Wichtig war uns, dass man sich dafür nicht der Wissenschaftler bedient, die üblicherweise für die Kohlenwasserstoffindustrie arbeiten, sondern einen Kreis von Experten sucht, der unbefangen und neugierig an die Sache herangeht. Wir haben dann auf drei Ebenen gearbeitet: Der Neutrale Expertenkreis hat einen intensiven interdisziplinären Erkenntnisprozess gestartet. Für viele der Experten war es ungewöhnlich, wie oft wir sie zusammengerufen und wie intensiv wir zwischen den Fachdisziplinen diskutiert haben. Aber spätestens als wir dann am Ende noch gemeinsam in die USA gereist sind, um uns dort das Fracking in der Praxis anzuschauen und um mit relevanten Akteuren ins Gespräch zu kommen, haben die Experten zurückgemeldet, wie sehr sie diese doch sehr zeitintensive Arbeitsweise schätzen. Als zweite Ebene haben wir einen Kreis an gesellschaftlichen Akteuren aus dem Bereich der Kommunen, Wasserversorger und Verbände zusammengerufen (die Behörden waren als Beobachter bzw. Gäste dabei). Dort stellte der Neutrale Expertenkreis seine Vorgehensweise und Zwischenergebnisse zur Debatte und holte sich viele wertvolle Anregungen. Und die dritte Ebene war die Öffentlichkeit, deren Fragen wir gesammelt und bearbeitet haben und die wir via Internetseite und über Veranstaltungen zu Kommentaren eingeladen haben (www.dialog-erdgasundfrac.de).

Interessant ist, dass sich durch diese intensive Kommunikation innerhalb des Expertenkreises und mit gesellschaftlichen Akteuren und Öffentlichkeit der Fokus sukzessive erweitert hat. Wir haben im Zuge der Arbeit weitere Gutachten vergeben, zur Abwasser- und Stoffflussproblematik, zum Flächenverbrauch und zur Klimabilanz. Stück für Stück haben wir dabei herausgearbeitet, dass weniger der einzelne Frack, als vielmehr der flächenhafte Einsatz dieser Technologie das Problem darstellt.

Am Ende haben wir die Ergebnisse in einer zweitägigen Statuskonferenz in Berlin vorgestellt und dort mit international renommierten Peer-Reviewern diskutiert. Danach folgte noch eine Überarbeitungsschleife, um die Kommentare zu berücksichtigen, und dann wurden die Ergebnisse in der Region vorgestellt – zusammen mit einer klaren Empfehlung der Experten. Die Empfehlung lautete in Kürze: Eine Analyse der Risiken erlaubt es nicht, Fracking generell zu verbieten. Aber es gibt viele Hinweise auf ernstzunehmende Gefahren. Daher sollte man vorsichtig vorgehen: Mit Demonstrationsvorhaben sollten noch offene Fragen beantwortet und lokale Risikoabschätzungen vorgenommen werden können. Und das Ganze sollte von einem intensiven Dialog und einer Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen begleitet werden.

Ein entscheidender Punkt für die Wirksamkeit dieses Prozesses ist dabei die Mitarbeit des Unternehmens ExxonMobil. Nicht nur, dass wir ohne eine absolute Offenheit des Unternehmens zu vielen Fragen nicht weit gekommen wären. Das Unternehmen hat sich auch von Anfang an committed, dass man die Empfehlungen umsetzen werde – der Vorstandsvorsitzende des Unternehmens hat dies am Ende noch einmal bekräftigt. Aus der Beobachtung kann ich sagen, dass der Informations- und Dialogprozess zur Fracking-Technologie zu Veränderungen im Unternehmen geführt hat. Wurden wir anfangs in manchen Abteilungen des Unternehmens eher distanziert wahrgenommen, habe ich jetzt das Gefühl, dass das Unternehmen begriffen hat, dass es etwas anders machen muss. Dazu gehört Transparenz, dazu gehört Bereitschaft zum Dialog auch mit Kritikern, und dazu gehört die Bereitschaft, auch Wissenschaftler jenseits der Bergbau-Hochschulen einzubeziehen.

Wirkte sich die Tatsache, dass ExxonMobil der Auftraggeber war, nicht negativ auf die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse aus?

Hier muss man zuallererst die Vorgeschichte betrachten: Die Erdgasförderung in Niedersachsen hatte in der Vergangenheit eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung, Bergbehörden und Unternehmen der Kohlenwasserstoffindustrie hatten einen unkomplizierten Umgang miteinander. Das änderte sich, als mit der Fracking-Technologie neue Regionen in den Fokus der Exploration gerieten, in denen bislang keine Kohlenwasserstoff- und auch keine andere umweltintensive Industrie agierten.

Während sich die öffentlichen Stellen sortierten, ergriff ExxonMobil die „Flucht nach vorn“ und setzte auf Transparenz und Dialog. Der Neutrale Expertenkreis erhielt von ExxonMobil die finanziellen Ressourcen, um die Risikostudie Fracking zu erarbeiten.

Auch wenn er die wirklich kritischen Akteure, die nach wie vor Greenwashing wittern, nicht erreichte, hat der Expertenkreis in der Fachwelt und bei vielen professionellen Akteuren eine hohe Glaubwürdigkeit erzielt. Die Gründe dafür liegen aus meiner Sicht auf mehreren Ebenen: Da ist einmal die Auswahl der Experten. Keiner der Experten hat jemals für die Kohlenwasserstoffindustrie gearbeitet. Teilweise sind sie eher für industrietritische Positionen bekannt, etwa Prof. Alexander Roßnagel, der den Atomausstieg juristisch beratend begleitete, Dr. Hans-Joachim Uth als ehemaliger Störfallexperte des UBA oder Uwe Fritsche als Mitarbeiter des Öko-Instituts. Da ist als zweites der Peer-Review-Prozess mit international renommierten Wissenschaftlerinnen zu nennen, der in dieser Form in der Auftragsforschung absolut unüblich ist. Und da ist die Konstruktion, die sicherstellt, dass ExxonMobil zwar das Geld bereitstellt, aber der wissenschaftliche Leiter, Prof. Dietrich Borchardt vom UFZ, über die Vergabe des Geldes entschied.

Trotz der Empfehlung der Expertenkommission, das Verfahren in einem Pilotprojekt zu testen, lehnten das die Landesregierungen in Niedersachsen und NRW ab. Ist der Dialog damit gescheitert?

Die Landesregierung NRW lehnt das Fracking nach wie vor ab, und die Landesregierung in Niedersachsen ist eher erdgasfreundlich eingestellt, auch nach wie vor. Wie oben schon angesprochen, solche Dialoge verändern in der Regel nicht die Positionen der Akteure. Aber sie führen dazu, dass mehr Nachdenklichkeit herrscht und dass man bereit ist, auch die Argumente der Gegenseite wahr- und ernst zu nehmen. Die Gutachter, die jetzt im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Landes NRW die Risiken des Fracking untersuchen, werden sich mit der Risikostudie des Expertenkreises auseinandersetzen. Und bis dahin wird Exxon schon die ersten Empfehlungen umgesetzt haben. Auf mittelfristige Sicht wird dies die Form der Auseinandersetzung entschärfen und Lösungen möglicher machen.

Das Interview führte Susanne Hufe

WISSENSWERTES IN SACHEN CHEMIE

CHEMISCHE ELEMENTE

Es gibt **94** natürliche chemische Elemente und **20** künstlich erzeugte, die also in der Natur nicht vorkommen. Jedes Element verfügt über ein spezifisches Gewicht und besondere Eigenschaften. Im **menschlichen Körper** kommen **57** Elemente vor. Den größten Anteil am Gesamtgewicht eines Menschen hat Sauerstoff mit rund **60 Prozent**.

CHEMIE

Die Chemie ist eine Naturwissenschaft, in der der Aufbau, die Eigenschaften und die Umwandlung von Substanzen (Elemente und Verbindungen) untersucht werden. Sie entstand als exakte Naturwissenschaft im 17. und 18. Jahrhundert. Als „Vater der Chemie“ wird Antoine de Lavoisier (1743-1794) bezeichnet. Durch Messen, Beobachten und Experimentieren begründete er die moderne Chemie – u. a. mit der chemischen Nomenklatur als systematische Methode zur Benennung von Stoffen.

CHEMISCHE INDUSTRIE



Foto: © Tom Bayer / Fotolia.com

Mit mehr als 10 Prozent des Gesamtumsatzes des verarbeitenden Gewerbes rangiert die Chemiewirtschaft hinter der Automobil-, Maschinenbau- und Elektronikindustrie auf Platz 4 in Deutschland. Deutschland gehört zu den exportstärksten Chemienationen der Welt: Mehr als 50 Prozent der Chemieprodukte werden exportiert. Rund 500.000 Arbeitnehmer sind heute in Deutschland in rund 2.000 Chemieunternehmen tätig. Die wichtigsten Erzeugnisse sind anorganische und organische Grundchemikalien, Düngemittel, Kunststoffe, Lacke, Pharmazeutika und Pestizide, außerdem Kleb- und Farbstoffe, Textilien, Papier, fotochemische Erzeugnisse, Kosmetika, Konservierungsmittel und Sprengstoffe. Wachstumsmotoren der chemischen Industrie sind vor allem die Elektromobilität, für die Großbatterien, Katalysatoren, Elektrolyte, neuartige leichte und stabile Kunststoffe und Karbonfasern benötigt werden, aber auch die Solarenergie oder Photovoltaik.

(Quellen: Verband der Chemischen Industrie e.V. und Manager Magazin online)

GLOSSAR IN SACHEN CHEMIKALIEN IN DER UMWELT

Chlor. In der Hitliste der Umweltschadstoffe schafft es das Element mit der Ordnungszahl 17 auf Platz 1. Viele kohlenstoffhaltige – also organische – Produkte der Chlorchemie sind hochgiftig und nur schwer abbaubar. Auch in der Natur gibt es zahlreiche chlororganische Verbindungen. Dort sind sie nützlich – als Mikrobentöter oder Botenstoffe für Pflanzen.

DDT – Dichlordiphenyltrichlorethan. Das breit wirksame Insektizid mit Berührung- und Fraßgiftwirkung ist in Deutschland seit 1974 verboten.

FCKW – Fluorchlorkohlenwasserstoffe. FCKW wurden in den 1920er und 1930er Jahren als völlig ungiftige Verbindungen gefeiert. Sie waren Ersatz für leicht brennbare Kühlmittel in Klimaanlage und Kühlschränken, wurden in Lösungs- und Reinigungsmitteln

sowie als Treibgase für geschäumte Dämmstoffe und Spraydosen eingesetzt. Erst 50 Jahre später offenbarte sich ihre Kehrseite: FCKW tragen zur Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre bei. Deshalb wurden sie Anfang der 1990er Jahre geächtet und verboten.

Metabolismus – auch Stoffwechsel – ist die Gesamtheit aller chemischen Prozesse in einem Organismus, die dafür sorgen, dass Stoffe im Verlauf der Aufnahme und des Transportes umgewandelt und schließlich als Stoffwechselendprodukte an die Umgebung abgegeben werden.

PAK – Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Die sich im Fettgewebe anreichernden und teilweise Krebs erzeugenden Stoffe kommen in Ruß

und Teer vor. Sie entstehen auch bei der Verbrennung von Fett – z. B. beim Grillen.

Pathogene – Mikroorganismen und Stoffe, die Krankheiten verursachen. Beim Menschen spricht man von Humanpathogenen. Krankheitsauslösende Erreger bei Pflanzen heißen Phytopathogene.

PBT – Persistente, Bioakkumulierende und Toxische Stoffe. PBTs gelten als besonders gefährliche Chemikalien, da sie sich in Organismen und in der Umwelt nicht abbauen (persistent), sich über die Nahrungskette anreichern (bioakkumulierend) und giftig (toxisch) sind.

Pestizide – Chemikalien, die in der Landwirtschaft zur Bekämpfung von unerwünschten Organismen

BEHÖRDEN IN SACHEN CHEMIE

UBA – Umweltbundesamt. Das UBA ist Deutschlands zentrale Umweltbehörde. Seine wichtigsten gesetzlichen Aufgaben sind die wissenschaftliche Unterstützung der Bundesregierung (u. a. Bundesministerien für Umwelt, Gesundheit sowie Forschung), der Vollzug von Umweltgesetzen (z. B. Emissionshandel, Zulassung von Chemikalien, Arznei- und Pflanzenschutzmitteln) sowie die Information der Öffentlichkeit zum Umweltschutz.

ECHA – European Chemicals Agency. Die Europäische Chemikalienagentur ECHA ist eine Behörde der EU mit 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und Sitz in Helsinki, Finnland. Sie ist die zentrale Schaltstelle für REACH, die die technischen, wissenschaftlichen und administrativen Aspekte bei der Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien regelt.

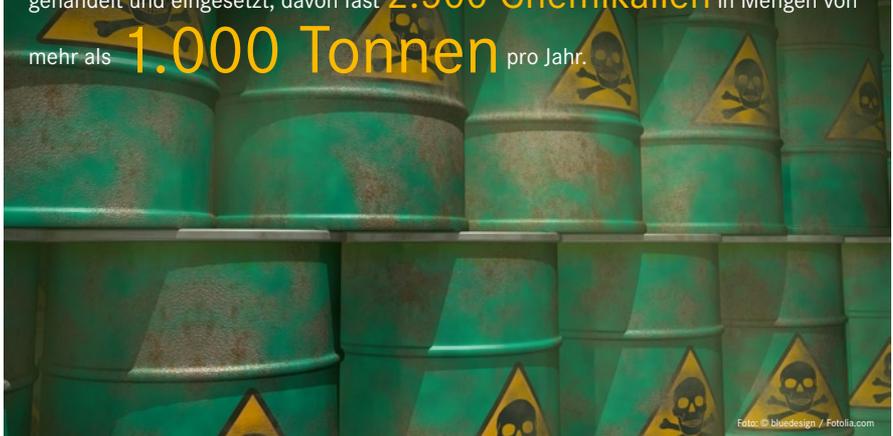
CHEMIKALIEN

Mehr als **60 Millionen** Chemikalien sind weltweit bekannt.

1930 wurde zirka **1 Million Tonnen** Chemikalien produziert – heute sind es weit mehr

als **400 Millionen Tonnen**.

In Europa werden etwa **100.000** synthetisch hergestellte **Substanzen** gehandelt und eingesetzt, davon fast **2.500 Chemikalien** in Mengen von mehr als **1.000 Tonnen** pro Jahr.



EU-RICHTLINIEN ZUR PROSPEKTIVEN UND UMWELTQUALITÄTSORIENTIERTEN REGELUNG VON CHEMIKALIEN (AUSWAHL)

REACH – Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals.

Nach der europäischen Chemikalienregulierung REACH müssen seit dem 1. Juni 2008 Hersteller und Importeure, die pro Jahr mehr als eine Tonne einer Chemikalie produzieren oder einführen, diese bei der Europäischen Chemikalienagentur ECHA registrieren und dazu Informationen über mögliche Gefahrenpotenziale liefern. Für Chemikalien, die bereits vor 1981 auf dem Markt waren, gelten Übergangsfristen. Ansonsten gilt „Ohne Daten kein Markt“ –

ohne Vorregistrierung darf eine neue Chemikalie nicht vermarktet werden.

CLP – Classification, Labelling, Packaging.

Mit dieser Verordnung wurde 2009 europaweit ein neues System für die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen eingeführt.

Biozid-Produkte-Richtlinie. Mit dem 1998 geschaffenen Instrument werden Biozid-Produkte bewertet und zugelassen. Gleichzeitig wird ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und die Umwelt

sichergestellt. Seit 2003 besteht eine Zulassungspflicht für alle Biozid-Produkte. Die Richtlinie wurde 2009 novelliert.

Richtlinie zur nachhaltigen Verwendung von Pestiziden. 2009 hat die EU neue Regeln zum Pflanzenschutz in Kraft gesetzt. Die neue Zulassungs-Verordnung verbietet die Anwendung besonders gefährlicher Wirkstoffe in Pflanzenschutzmitteln.

WRRL – Europäische Wasserrahmenrichtlinie. Mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie – verabschiedet im Dezember 2000 – wurde ein einheitlicher rechtlicher Rahmen für eine integrierte Gewässerschutzpolitik innerhalb der EU geschaffen mit dem Ziel, die Wasserpolitik stärker auf eine nachhaltige und umweltverträgliche Wassernutzung auszurichten. 2006 wurde die **Grundwasserrichtlinie** als Tochterrichtlinie der WRRL verabschiedet. Sie legt zusätzliche Maßnahmen zur Verhinderung und Begrenzung der Grundwasserverschmutzung fest, um der Verschlechterung des Zustands aller Grundwasserkörper entgegenzuwirken.

men verwendet werden. Sie können nach ihren Zielorganismen weiter unterteilt werden, z. B. in Bakterizide, Fungizide, Insektizide, Herbizide, etc. Im nicht-agrarischen Bereich werden sie Biozide genannt.

POPs – Persistent Organic Pollutants. Sie gehören zu den PBTs, sind extrem langlebig und schwer abbaubar. Seit 2001 gibt es für zwölf POPs – das dreckige Dutzend – eine international gültige, rechtliche Grundlage für ein weltweites Produktions- und Anwendungsverbot. Zum dreckigen Dutzend gehören neun Pestizide (darunter DDT), zwei Industriechemikalien (unter anderem Polychlorierte Biphenyle, PCB) und zwei bei Verbrennungsprozessen unbeabsichtigt entstehende Chemikalien (Dioxin und Furan).

PVC – Polyvinylchlorid. Der Kunststoff ist sehr umstritten, weil er zwar preiswert herstellbar und flexibel einsetzbar ist, aber Schwierigkeiten bei der Entsorgung bereitet: Bei Brandunfällen entstehen neben Kohlendioxid und Wasser Chlorwasserstoff (HCl) und hochgiftige Dioxine. Außerdem enthält Alt-PVC oft noch Cadmium- oder Bleiverbindungen als Stabilisatoren oder PCB (Polychlorierte Biphenyle) als Weichmacher.

Toxin – Gift biologischen Ursprungs. Schimmelpilze beispielsweise produzieren Mykotoxine (Schimmelpilzgifte). Eine durch Mykotoxine verursachte Erkrankung wird Mykotoxikose genannt.

Xenobiotika – Vom Menschen hergestellte, naturfremde chemische Verbindungen.

FORSCHEN FÜR DIE UMWELT

Als internationales Kompetenzzentrum für Umweltwissenschaften untersucht das **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ** die komplexen Wechselwirkungen zwischen Mensch und Natur unter dem Einfluss des globalen Wandels. In enger Kooperation mit Entscheidungsträgern und Vertretern der Zivilgesellschaft erarbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des UFZ Systemlösungen, um komplexe Umweltsysteme besser zu managen und Umweltprobleme zu überwinden.

Die Helmholtz-Forscher befassen sich mit dem Management von Wasserressourcen und den Folgen des Landnutzungswandels für die biologische Vielfalt und die Ökosystemfunktionen. Sie entwickeln Sanierungsstrategien, Monitoring- und Erkundungsmethoden für kontaminiertes Grund- und Oberflächenwasser, Böden und Sedimente. Sie untersuchen das Verhalten und die Wirkung von Chemikalien in der Umwelt und auf die Gesundheit des Menschen und arbeiten an Modellen zur Vorhersage von Umweltveränderungen sowie an Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

Die Lösung dieser Aufgaben setzt nicht nur eine solide wissenschaftliche Basis voraus. Sie erfordert auch, dass die naturwissenschaftlich dominierte Umweltforschung mit den Human-, Sozial- und Rechtswissenschaften mehr und mehr vernetzt wird.

Umweltforschung muss sich von den Umweltproblemen leiten lassen und lernen, mit Komplexität, Unsicherheit und Handlungsbezug umzugehen. Das erfordert Austausch von Wissen, Verständnis und Verständigung, Zusammenführen verschiedener Kompetenzen und Spezialisierungen, Einbindung von Entscheidungsträgern und Betroffenen aus Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit – kurzum Integration auf höchstem Niveau.

Ziel ist es, Wege aufzuzeigen für eine Balance zwischen ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklung auf der einen und langfristigem Schutz unserer Lebensgrundlagen auf der anderen Seite.

Das UFZ ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft und hat an den Standorten Leipzig, Halle und Magdeburg etwa 1.100 Beschäftigte. Es verfügt über ein jährliches Budget von zirka 100 Millionen Euro (Grundfinanzierung und Drittmittel). Die Grundfinanzierung tragen zu 90 Prozent die Bundesregierung und zu je 5 Prozent der Freistaat Sachsen und das Land Sachsen-Anhalt. www.ufz.de

DIE HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Die **Helmholtz-Gemeinschaft** leistet Beiträge zur Lösung großer und drängender Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch wissenschaftliche Spitzenleistungen in sechs Forschungsbereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie sowie Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr. Die Helmholtz-Gemeinschaft ist mit über 31.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 17 Forschungszentren und einem Jahresbudget von rund 3,3 Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Ihre Arbeit steht in der Tradition des großen Naturforschers Hermann von Helmholtz (1821-1894). www.helmholtz.de



UFZ-Standort Leipzig
in der Permoserstraße 15



UFZ-Standort Halle
in der Theodor-Lieser-Straße 4



UFZ-Standort Magdeburg
in der Brückstraße 3a

■ Impressum

Herausgeber:

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Permoserstraße 15 · 04318 Leipzig
Tel.: 0341 / 235-1269 · Fax: 0341 / 235-1468
e-mail: info@ufz.de · Internet: www.ufz.de

Gedruckt auf 100% Recyclingpapier

Bestellung UFZ-Newsletter: www.ufz.de/newsletter-bestellung

Gesamtverantwortung:

Doris Böhme, Leiterin Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Text- und Bildredaktion:

Doris Böhme und Susanne Hufe

Satz und Layout: noonox media GmbH, Leipzig

Druck: Fritsch Druck GmbH, Leipzig



HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ

ISSN 1868-7512