

Schutz und von Was



Regenerierung Wasserressourcen



Wasser schützen, Wasser heilen

S. 100

⇒ Lizenz zur Bodenerwärmung

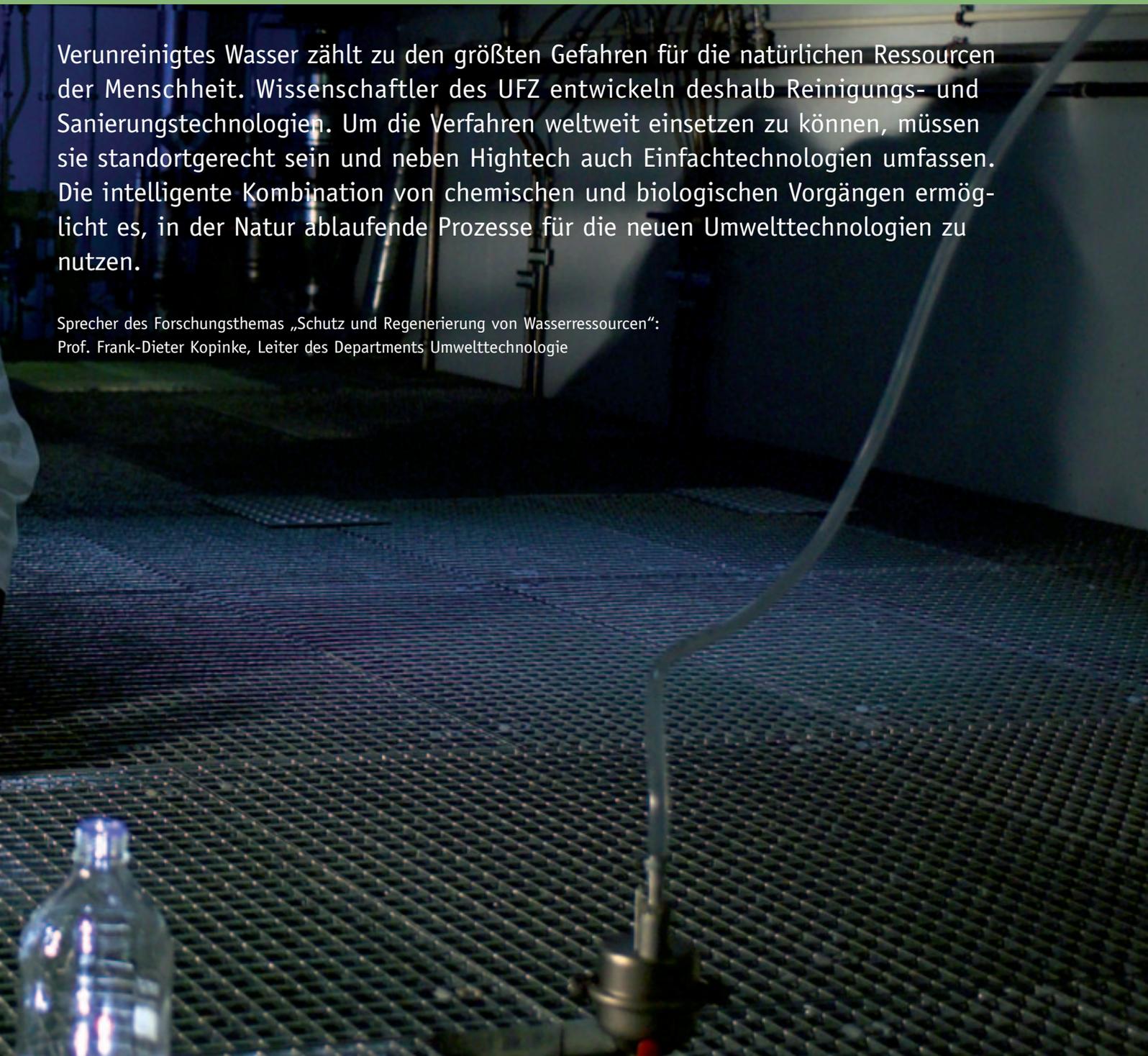
S. 104

⇒ Anpassen und Maßschneidern

S. 106

Verunreinigtes Wasser zählt zu den größten Gefahren für die natürlichen Ressourcen der Menschheit. Wissenschaftler des UFZ entwickeln deshalb Reinigungs- und Sanierungstechnologien. Um die Verfahren weltweit einsetzen zu können, müssen sie standortgerecht sein und neben Hightech auch Einfachtechnologien umfassen. Die intelligente Kombination von chemischen und biologischen Vorgängen ermöglicht es, in der Natur ablaufende Prozesse für die neuen Umwelttechnologien zu nutzen.

Sprecher des Forschungsthemas „Schutz und Regenerierung von Wasserressourcen“:
Prof. Frank-Dieter Kopinke, Leiter des Departments Umwelttechnologie



Wasser und Boden sind unentbehrliche Ressourcen für unser Leben. Sie unterliegen einem natürlichen Kreislauf. Bei nachhaltiger Bewirtschaftung werden sie nicht verbraucht, sondern nur gebraucht. Vom Menschen verursachte Stoffströme – insbesondere Emissionen aus Industrie und Landwirtschaft – sorgen jedoch dafür, dass Oberflächen- und Grundwässer in einem ständigen, teils punktuellen teils schleichenden Prozess kontaminiert werden. Trotz aller Bemühungen um nachhaltige Nutzungsformen und effiziente Technologien lässt sich diese Beeinflussung der Umwelt nur reduzieren, nicht aber gänzlich vermeiden. Luft, Wasser und Boden haben zwar ein natürliches Selbstreinigungspotenzial, aber dieses ist begrenzt. Insbesondere im Grundwasser verlaufen viele chemische und mikrobiologische Prozesse sehr langsam. Eine allmähliche Anreicherung von Schadstoffen bedroht die extrem empfindlichen und nur langsam erneuerbaren Grundwasserressourcen zukünftiger Generationen. Vorbeugender und nachsorgender Grundwasserschutz haben deshalb eine strategische Bedeutung am UFZ und in der Helmholtz-Gemeinschaft.



Frank-Dieter Kopinke, Doris Böhme und Tilo Arnhold

Wasser schützen, Wasser heilen

Wasser effizient und ökologisch akzeptabel zu reinigen, ist eine naturwissenschaftliche und technologische Herausforderung, denn ein universell einsetzbares Verfahren gibt es nicht angesichts der mit einer Vielzahl und in unterschiedlichen Konzentrationen von Schadstoffen belasteten Wässer. UFZ-Wissenschaftler arbeiten an innovativen Technologien, die – sollen sie global anwendbar sein – standortgerecht sein müssen und die Spanne von Einfachtechnologien bis zum Hightech-Niveau umfassen. Sie reichen von naturnahen *in-situ*-Methoden bis zu technisch unterstützten *ex-situ*-Verfahren zur Behandlung hoch kontaminierter Grund- und Abwässer. Entwicklungsbedarf besteht

WISSENSWERTES

Biogeochemie ist eine interdisziplinäre Systemwissenschaft, die sich mit chemischen, biologischen und physikalischen Prozessen – im Wesentlichen Stoffflüssen und Stoffumsätzen in Ökosystemen und Landschaften – befasst. Dazu gehören zum Beispiel der Kohlenstoff-, Stickstoff- oder Phosphatkreislauf.

besonders in der intelligenten Kombination von biotischen und abiotischen Prozessen sowie bei der gezielten Nutzung biogeochemischer Prozesse in Umwelttechnologien.

Von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung

Die Entwicklung von Technologien wird im UFZ als komplexe Aufgabe betrachtet, die – in Zusammenarbeit mit den Helmholtz-Forschungszentren Karlsruhe und Jülich – von der Problemanalyse über die Ideenfindung und Grundlagenforschung bis hin zur Umsetzung in den Pilotmaßstab oder gegebenenfalls zur praktischen Erprobung im Feldversuch reicht. Beteiligt sind Wissenschaftler aus den Disziplinen Chemie, Physik, Biologie und Mikrobiologie, Geologie, Ingenieurwissenschaften und Systemanalyse. Ihr Ziel sind Erkenntnisgewinn und Handlungswissen, wobei das eine ohne das andere in der Regel nicht als befriedigende $\Sigma \rightarrow$



Foto: Robert Köhler, UFZ

Bei Kolloiden (im Bild: fein gemahlene Aktivkohle) handelt es sich um mikroskopisch kleine Teilchen in der Größenordnung von 1 bis 1000 Nanometer. Sie spielen bei vielen biologischen und technischen Prozessen eine große Rolle, weil sie im Verhältnis zur Masse eine große Oberfläche besitzen. Aufgrund der geringen Größe wird für Kolloide meist eine Flüssigkeit als Trägermedium (Suspension) benutzt.

Lösung angesehen werden kann. Adressaten ihrer Forschungsergebnisse sind die internationale Fachwelt ebenso wie die europäische Umweltindustrie oder die verantwortlichen Behörden in Deutschland. Die Technologien sollen sowohl den Anforderungen von dicht besiedelten Ballungsräumen als auch von ländlichen Siedlungen mit dezentraler Infrastruktur genügen. Die internationalen Erfahrungen der Wissenschaftler aus Kooperationen mit China, Taiwan, Brasilien, Mexiko oder der Türkei helfen dabei, auch biologische Verfahren an andere klimatische Verhältnisse anzupassen.

Am UFZ konzentrieren sich die Wissenschaftler auf vier Themenfelder bei der Wasserbehandlung: Umweltkatalyse, Rhizosphärenprozesse, die Nutzung von Radio- und Mikrowellen sowie Herstellung und Anwendung reaktiver Kolloide. Zwei dieser Themen – Umweltkatalyse und Radiowellenanwendung – werden in den nachfolgenden Beiträgen ausführlicher dargestellt. Deshalb sollen hier die Grundgedanken der beiden anderen Themen skizziert werden.

Zurück zu den Wurzeln

Chemiker, Biologen und Verfahreningenieure des UFZ wollen Rhizosphärenprozesse – Wurzelraumprozesse – intelligent zur Reinigung kontaminierter Wässer nutzen. Dazu ist es zunächst notwendig, die biologischen Auf- und Abbauprozesse, die sich in der Bodenschicht zwischen Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen abspielen, zu erkennen und zu verstehen. Mit diesem Wissen ist es möglich, Prozesse gezielt zu steuern, sinnvoll zu kombinieren und in die Praxis umzusetzen. Eine wichtige Steuergröße für das Zusammenspiel Lebensgemeinschaft „Pflanze-Mikroorganismen“ und Stoff-



Besonders in wasserarmen Regionen der Welt muss nach Möglichkeiten gesucht werden, Wasser effektiver zu nutzen oder neue Quellen zu erschließen. UFZ-Wissenschaftler wollen deshalb Pflanzenkläranlagen so optimieren, dass Abwasser wieder genutzt werden kann, um Felder zu bewässern. Die Forschung beginnt mit Grundlagenuntersuchungen und reicht bis zu Pilotanlagen, um die Verfahren zu testen.

WISSENSWERTES

Huminstoffe sind natürliche organische Makromoleküle, die sich beim Abbau von Pflanzenresten im Boden bilden (Humus). Quellen für die Gewinnung von Huminstoffen sind Torf und junge Braunkohlen.

umsatz ist das Angebot an Sauerstoff und anderen Oxidationsmitteln wie Nitrat und Sulfat als so genannte Elektronenakzeptoren. Die Wissenschaftler schaffen also reduzierende oder oxidierende

Bedingungen im durchwurzelten Bodenbereich und untersuchen, wie diese den Abbau von Schadstoffen beeinflussen.

Wasser- und Abwasserprobleme treten häufig in ländlichen Regionen auf oder solchen, die von Wassermangel geprägt sind. Gerade dort wäre es sinnvoll, kommunale und industrielle Abwässer als „neue“ Wasserressource zu erschließen – doch dazu müssen sie gereinigt werden. Deshalb sollen vor allem an Standorten mit dezentraler Infrastruktur und in Ländern der Dritten Welt unterschiedlich bepflanzte Bodenfilter – also einfache Pflanzenkläranlagen – getestet und eingesetzt werden.



Benzin enthält Zusatzstoffe, die – gelangen sie ins Grundwasser – dort nur sehr schwer abbaubar sind.



Kleine Teilchen, große Wirkung

Soll kontaminiertes Grundwasser direkt im Grundwasserleiter gereinigt werden, müssen verschiedene Stoffe so vermischt werden, dass sie miteinander reagieren können. Eine schwierige Aufgabe, die die Wissenschaftler mit so genannten Kolloiden lösen wollen. Mit diesen mikroskopisch kleinen Teilchen, die in Form von kolloidalen Suspensionen in den Grundwasserleiter eingetragen werden, sollen die Schadstoffe und Reaktionspartner „gesammelt“ werden. Denn je nach Beschaffenheit und Umgebungsbedingungen können sich Kolloide an die natürlichen

WISSENSWERTES

Ein **Grundwasserleiter** ist ein Gesteinskörper mit Hohlräumen, der zur Speicherung und Leitung von Grundwasser geeignet ist. Es gibt drei Arten von Grundwasserleitern: Porengrundwasserleiter bestehen aus Locker- oder Festgestein, dessen Porenraum von Grundwasser durchflossen wird; Kluftgrundwasserleiter bestehen aus Festgestein, durch dessen Klüfte und Gesteinsfugen Grundwasser fließen kann; Karstgrundwasserleiter bestehen aus verwitterten wasserdurchlässigen Karbonatgesteinen. Ein Grundwasserleiter wird geologisch durch wasserundurchlässige Schichten (z.B. Tone) begrenzt.

Die Erkundung von Grundwasserleitern ist wichtig für die Trinkwassergewinnung und die bergbauliche Grundwasserbeeinflussung.

Materialien des Grundwasserleiters anlagern und eine Barriere bilden, die wie ein Filter wirkt. Beim Passieren dieser Barriere werden die Grundwasserschadstoffe adsorbiert – also angelagert – oder abgebaut. Das UFZ konzentriert sich auf Kolloide aus drei ökologisch unbedenklichen Stoffgruppen: Aktivkohle, Eisen und Huminstoffe.

An die Luft gesetzt

Ein völlig neuer Ansatz mit Schadstoffen umzugehen, basiert auf der Tatsache, dass das Selbstreinigungspotenzial unterschiedlicher Umweltbereiche für verschiedene Schadstoffe nicht gleich ist. Ein Beispiel: Methyltertiär-Butylether (MTBE) – ein Benzinzusatzstoff (siehe Beitrag Seite 23) – ist im Grundwasser nur sehr schwer abbaubar. Die Halbwertszeit liegt im Bereich von Jahren. In der Atmosphäre dagegen wird MTBE infolge fotochemischer Prozesse sehr schnell zersetzt. Die Halbwertszeit beträgt hier nur etwa fünf Tage. Bläst man also MTBE aus dem Grundwasser – in diesem Fall dem wenig reaktiven Bereich – mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand in die Atmosphäre – den reaktiveren Bereich – aus, hat man zwar den Nachteil einer zusätzlichen Luftverschmutzung. Diese ist jedoch zeitlich begrenzt. Der Vorteil ist: Man spart mit diesem einfachen Verfahren Ressourcen, Geld und Zeit und verhindert die schleichende Gefahr, die von MTBE im Grundwasser ausgeht. Was simpel klingt, ist im Einzelfall eine komplexe Aufgabe, denn die Abwägung und Bewertung der Vor- und Nachteile erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaften, Ökonomie und Umweltrecht. Gerade das ist eine Stärke der Forschung im UFZ und in der Helmholtz-Gemeinschaft. ■

Der Chemiker Prof. Frank-Dieter Kopinke leitet das Department Umwelttechnologie am UFZ.



Lizenz

Ulf Roland und Tilo Arnholt

zur Boden- erwärmung

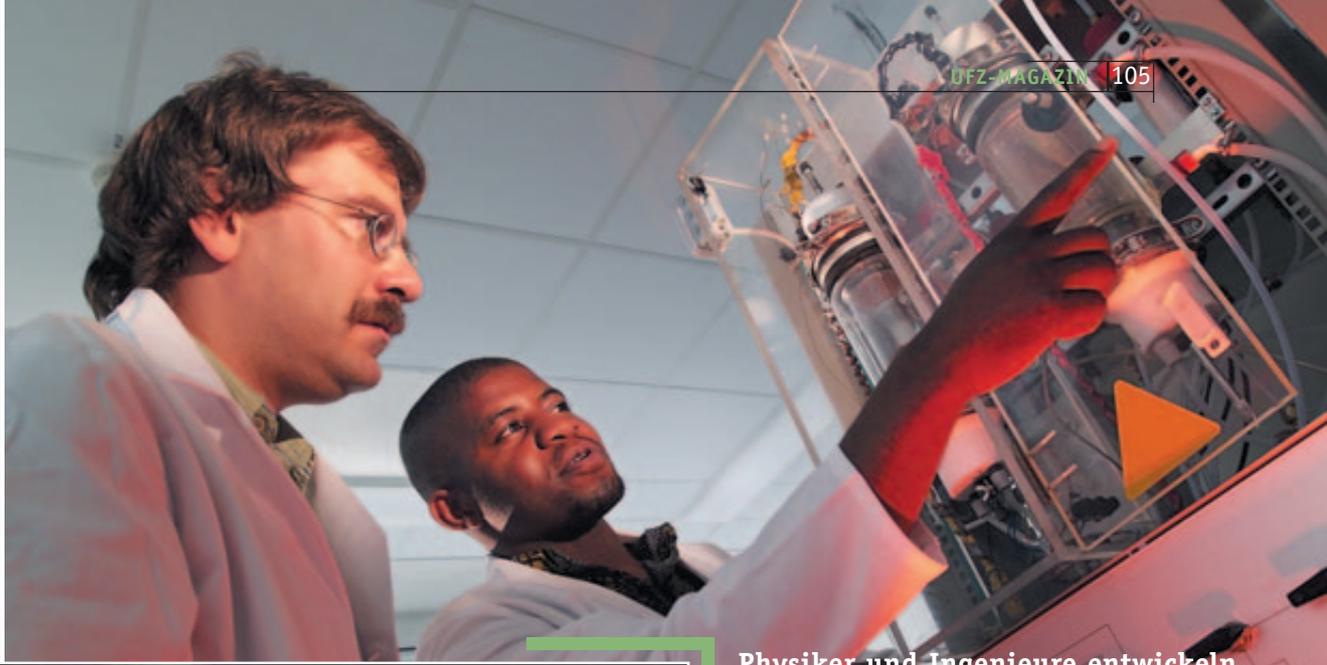
Die Temperatur spielt in praktisch allen Bereichen des Lebens eine entscheidende Rolle – sowohl für natürliche Vorgänge als auch für technische Prozesse. Während die Aufheizung flüssiger Medien technisch sehr gut gelöst ist, besteht ein Bedarf an *in-situ*-Verfahren, die eine gleichmäßige und gut steuerbare Erwärmung von Feststoffen ermöglichen. Das Problem: Feststoffe wie Boden lassen sich nur schwer durchmischen, und ihre effektive Wärmeleitfähigkeit ist häufig sehr gering. Aber durch eine Temperaturerhöhung im Boden können Schadstoffe in wesentlich kürzerer Zeit abgebaut und über die Bodenluft abgesaugt werden. Auch Mikroorganismen lieben es warm: 30 bis 40° Celsius sind für sie der optimale

Temperaturbereich, um Schadstoffe zu eliminieren. Eine etablierte verfahrenstechnische Methode ist es, Festbetten mit Heißluft oder Dampf aufzuheizen. Sie hat jedoch den Nachteil, dass die starre Verknüpfung von Gasfluss und zu übertragender Wärmemenge es oft nicht erlaubt, gewünschte Stoffkonzentrationen einzustellen.

Über kurz oder lang?

In den letzten Jahren sind als viel versprechende Alternative direkte Heizverfahren entwickelt worden, die nicht an einen Stoffstrom gebunden sind. Im Alltag hat sich beispielsweise die Mikrowellenerwärmung durchgesetzt. Sie beruht auf der Wechselwirkung eines elektrischen Wechsel-

feldes mit im Medium vorhandenen molekularen Dipolen wie Wasser. Entsprechende Mikrowellengeräte stehen mittlerweile in fast jedem Haushalt. Für viele technische Prozesse besitzt die Mikrowellenheizung jedoch entscheidende Nachteile. Einerseits kann die Strahlung nur wenige Zentimeter in das zu erwärmende Material eindringen, so dass sich größere Mengen nicht gleichmäßig erwärmen. Andererseits ist für viele Stoffe der Energieeintrag nicht effizient, da ein großer Teil der eingestrahelten Energie reflektiert wird. Physiker, Chemiker und Ingenieure des UFZ haben ein alternatives Erwärmungsverfahren entwickelt, das auf der Anwendung von Radiowellen beruht, und in unterschiedlichen Bereichen erprobt



Physiker und Ingenieure entwickeln unter Nutzung des Mikrowellenprinzips Umwelttechnologien, um mit Schadstoffen verunreinigte Böden zu reinigen. Die Technologie wird nicht nur im Labor, sondern insbesondere im Technikums- und Feldmaßstab erprobt. Im technischen Maßstab steht ein containerbasiertes, modulares System zur Verfügung.



wird. Es kombiniert die Vorteile der Mikrowellenerwärmung wie den direkten Energieeintrag in das Medium mit der Möglichkeit, bei deutlich größeren Eindringtiefen homogener aufzuheizen. Außerdem ist der Energieeintrag in unterschiedlichste Medien nahezu verlustfrei. Es kann deshalb unter anderem bei trockenen und feuchten Böden, Aktivkohlen oder Katalysatoren eingesetzt werden. Die Lösung liegt in einer Verschiebung des Frequenzbereiches vom GHz- in den MHz-Bereich – also von relativ kurzen zu langen Wellen hin.

Erfolg im Feld

Aufgrund der großen Relevanz für die Umwelt- und Verfahrenstechnik wurde die Technologie an Aktivkohlen, Silikatmineralen sowie unterschiedlichen Böden im Labor-, Technikums- und Feldmaßstab erprobt. Darunter waren

WISSENSWERTES

Radiowellen sind elektromagnetische Wellen, wie sie im Rundfunk eingesetzt werden. Physikalisch betrachtet handelt es sich bei elektromagnetischen Wellen um sich ausbreitende Schwingungen eines elektromagnetischen Feldes, das aus einer elektrischen und einer magnetischen Komponente besteht. Diese Eigenschaften werden genutzt, um Daten oder Energie zu übertragen. Elektromagnetische Wellen werden in verschiedene Wellenbereiche unterteilt. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto höher wird die Frequenz, also der Takt, in dem die Welle schwingt.

mehrere erfolgreiche Feldversuche zur Realisierung der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung, der thermisch unterstützten mikrobiellen Bodenreinigung sowie zur gezielten Erwärmung von Schadstoffquellen an unterschiedlichen Referenzstandorten. Für Anwendungen im technischen Maßstab steht mittlerweile ein containerbasiertes, modulares System zur Verfügung, in dem alle Komponenten für eine thermische Behandlung von Böden und anderen Feststoffen integriert sind. Ein erster Lizenzvertrag zur Verwertung der Technologie wurde abgeschlossen. Aber nicht nur im Bereich der Sanierungsverfahren besteht ein erhebliches Anwendungspotenzial der Radiowellentechnologie. Sie ist auch für die chemische Prozesstechnik interessant. Radiowellen gestatten prinzipiell die selektive Erwärmung einzelner Komponenten in einem Festbett, was völlig neue Perspektiven für etablierte technische Prozesse eröffnet. ■

Der Physiker Dr. Ulf Roland ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Department Umwelttechnologie und leitet die Arbeitsgruppe Radiowellentechnologien.

Katrin Mackenzie und Tilo Arnhold

Anpassen und Maßschneidern

Häufig war es „die Chemie“, die beispielsweise Grundwasser unter Industriestandorten verunreinigt hat – Chemie kann sie auch wieder heilen. Die Reaktionsbedingungen für die Wasserreinigung werden allerdings von der Natur vorgegeben und sind für eine chemische Behandlung eher ungünstig. Die Erwärmung großer Wasserströme ist ökonomisch nicht vertretbar. Deshalb steht die Temperatur als Parameter zur Steuerung der Reaktionsgeschwindigkeit nicht zur Verfügung. Eine weitere Hürde sind die Schadstoffkonzentrationen. Für den Menschen können schon geringe Konzentrationen von wenigen Milli- oder Mikrogramm pro Liter gefährlich sein. Auch für chemische Reaktionen sind solche Konzentrationen ein Problem. Dazu kommt noch, dass das Stoffspektrum eines Schadensfalls meist komplex ist. Die Behandlungsmethode soll deshalb für verschiedene Substanzklassen gleichzeitig anwendbar sein. In der Umweltchemie gehören Katalysatoren daher zum unverzichtbaren Handwerkszeug, um chemische Reaktionen schnell und selektiv ablaufen zu lassen.

Die richtige Strategie verantwortungsbewusst auswählen

Welche chemischen Reaktionen stehen zur Verfügung und wo stellen sich Probleme in den Weg? Organische Schadstoffe lassen sich oxidieren – vorzugsweise zu Kohlendioxid und Wasser. Bei einigen Schadstoffklassen wie den chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) kommt zusätzlich auch die Reduktion

zur Entgiftung der Wässer in Betracht. Beide Reaktionswege haben Vor-, aber auch Nachteile. Eine unvollständige chemische Umwandlung der Schadstoffe kann die Toxizität des Wassers sogar erhöhen, statt vermindern. Beispielsweise entstehen bei einer unvollständigen Oxidation aus chlorierten Phenolen auch die bekannten chlorierten Dibenzodioxine und -furane (Verwandte des Seveso-Gifts). Deshalb

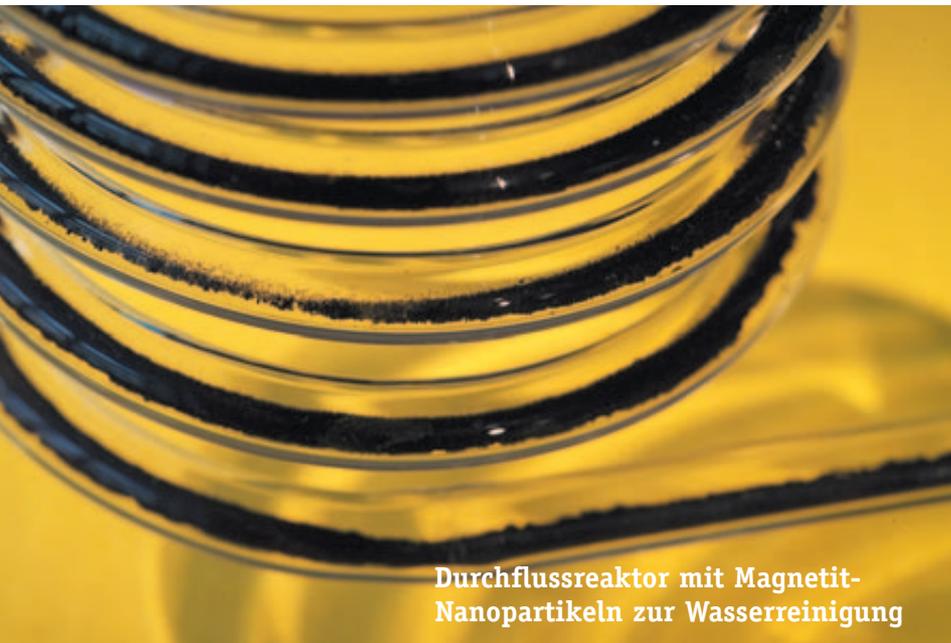
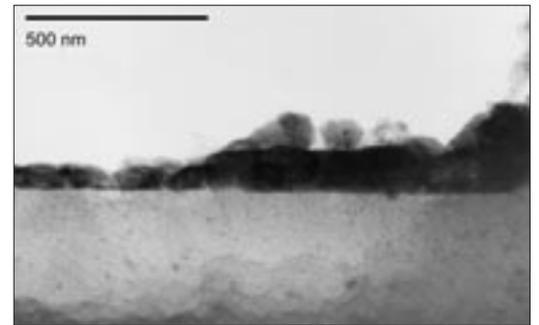
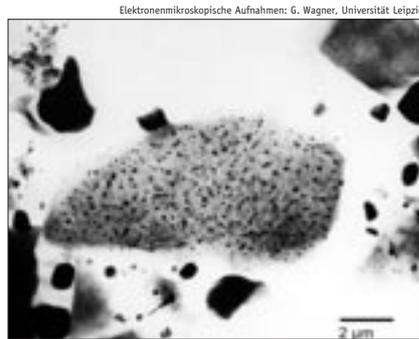
Die Anpassung von bekannten Reaktionen und Katalysatoren an die Umweltbedingungen stellt die eigentliche Herausforderung für die Entwicklung praxistauglicher katalytischer Verfahren dar. Am UFZ werden im Rahmen des Projektes "Umweltkatalyse" mehrere Wege verfolgt, um dieses Ziel zu erreichen: Schadstoffe sollen durch Adsorption an Katalysatorträgern wie Aktivkohlen angereichert und



wird für CKW-Kontaminationen der oxidative Behandlungsweg als kritisch eingeschätzt. Es muss also je nach Schadensfall die geeignete Behandlungsstrategie verantwortungsbewusst ausgewählt werden.

ihre chemische Umwandlung im adsorbierten Zustand durchgeführt werden. Durch Adsorption werden die Schadstoffe am Katalysatorträger – also nahe dem Ort der Reaktion – „gesammelt“ und so das Wasser gereinigt. Am

katalytisch aktiven Zentrum soll nun die chemische Umwandlung zu unschädlichen Produkten erfolgen. Adsorption und chemische Reaktion sollen also zusammenarbeiten. Die adsorbierten Substanzen dürfen aber nicht nur aus dem Wasser entfernt werden, sondern müssen auch der chemischen Reaktion zur Verfügung stehen. Deshalb müssen die Wissenschaftler Adsorptions-



Durchflussreaktor mit Magnetit-Nanopartikeln zur Wasserreinigung

Reaktions-Systeme für reduktive und oxidative katalytische Verfahren finden oder neu entwickeln.

Sowohl neue als auch bewährte Methoden

Eine ganz neue Richtung in der Umwelttechnologie ist der Einsatz von Nanoreagenzien und Nanokatalysatoren. Die Nanotechnologie hat also auch im Umweltbereich Einzug gehalten. Nanopartikel aus metallischem Eisen – so genannte Eisenkolloide – wurden beispielsweise schon erfolgreich zur Grundwasserreinigung eingesetzt. Chemiker und Verfahreningenieure testen verschiedene Nanokatalysatoren: Zum einen Adsorptions-Reaktions-Systeme, die für den *in-situ*-Einsatz bei der Grundwasserreinigung verwendet werden sollen. Zum anderen werden für spezielle Anwendungen in der Abwasserreinigung extrem aktive Palladium-Katalysatoren auf ferromag-

WISSENSWERTES

Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) sind eine Sammelbezeichnung für organische Verbindungen, die Chlor enthalten. Chlorkohlenwasserstoffe werden als Grundstoffe in der chemischen Industrie eingesetzt.

netischen Trägerkolloiden untersucht, die mithilfe von Permanentmagneten elegant aus dem gereinigten Wasser wieder abgetrennt werden können. Hier spielt auch das Studium ihrer Risiken wie das potenzielle Durchdringen von Zellwänden und mögliche unerwünschte Effekte dieser Kleinstteilchen in lebenden Zellen eine Rolle. Diese Fragestellung wird in enger Kooperation mit Zelltoxikologen des UFZ behandelt.

Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Aktivkohlepartikeln

Im linken Bild sind größere Eisenkristallite (schwarz) und kleine Nanopartikel auf Aktivkohle (Bildmitte) zu sehen. Das rechte Bild zeigt einen Schnitt durch einen Aktivkohlepartikel mit abgechiedenem metallischen Eisen.

Aber auch altbewährte Technologieansätze sind unverzichtbar bei der Suche nach geeigneten Behandlungsmethoden für kontaminiertes Wasser. Ein möglicher Weg, die Reaktionsbedingungen für die Umweltkatalyse zu verbessern, besteht in der Überführung der hoch verdünnten flüchtigen Schadstoffe aus der „ungünstigen“ Wasserphase in die „günstige“ Gasphase. Viele organische Verbindungen werden beim Ausblasen mit Luft, dem so genannten Strippen, in der Gasphase stark angereichert, wodurch eine Behandlung der beladenen Gasströme bei erhöhten Temperaturen ökonomisch vertretbar wird. Kombiniert man Strippen mit der heterogen katalysierten Gasphasenreaktion, dann erweitert sich der Anwendungsbereich der Katalyse für die Wasserreinigung beträchtlich.

Anpassen und Maßschneidern – das sind die Wege zu wirksamen chemischen Verfahren in der Umwelttechnologie. ■

Die Chemikerin Dr. Katrin Mackenzie ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Department Umwelttechnologie und leitet die Arbeitsgruppe Umweltkatalyse.