

# Umweltbiotechnologie: Eine Fachdisziplin im Wandel

Ulrich Stottmeister

Die Umweltbiotechnologie ist eine Fachdisziplin, deren Aufgabenfelder traditionsgemäß in der biologischen Abwasser-, Boden- und Abluftreinigung zu finden sind. Bewährte und breit angewendete Verfahren sind durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften entstanden. Eine Leistungssteigerung erfolgt durch die Einbeziehung neuer Technologien. Weiterhin zeichnet sich in der letzten Zeit eine Weiterentwicklung des Gesamtgebietes im Sinne einer „Biotechnologie für die Umwelt“ ab. Dazu ist zum einen zu zählen, daß sich natürliche Reinigungspotentiale zur Sanierung „in situ“ durch einfache technische Maßnahmen aktivieren lassen („enhanced natural attenuation“), zum anderen, daß neue technische Produktionsprozesse durch die Einbeziehung biotechnologischer Teilschritte das Entstehen von Umweltbelastungen vermeiden („Bioprävention“).

Die Biotechnologie (technische Biochemie, angewandte Mikrobiologie) ist die integrierte Anwendung des Wissens aus Biologie, Chemie und Verfahrenstechnik mit dem Ziel, Mikroorganismen; Pflanzen- und Tierzellen sowie deren Bestandteile bei technischen Verfahren und industriellen Produktionsprozessen einzusetzen. (Definition der Europäischen Föderation Biotechnologie EFB 1989).

In den vergangenen Jahren hat sich jedoch ein Bedeutungswandel vollzogen. Gentechnik wird häufig gleich Biotechnologie gesetzt. Gentechnische Methoden sind jedoch nur ein Teil des breiten Methodenspektrums der Biotechnologie. Weitere wichtige Teilgebiete beziehen die Biochemie und technische Chemie, die industrielle Mikrobiologie und die Technik der Zellkultur, die Verfahrenstechnik und die Aufarbeitungstechniken (downstream processing) mit ein.

Die etablierte Fachdisziplin „Umweltbiotechnologie“ mit den Hauptgebieten biologische Abwasser- und Boden- und Abluftreinigung vereinigt das Wissen aus der spezifischen Bioprozesstechnik, der angewandten Mikrobiologie, den angewandten Ingenieurwissenschaften (engl. „civil engineering“) mit dem auf die jeweilige Matrix (Wasser; Boden) ausgerichteten Wissen. Sie ist im wesentlichen auf die Mineralisierung durch Mikroorganismen, d.h. der Oxidation des Kohlenstoffs von organischen Last- und Schadstoffen bis zum Kohlendioxid bzw. der Beseitigung von anorganischen Verbindungen und Schwermetallen ausgerichtet.

Die klassische „Umweltbiotechnologie“ erfährt in den letzten Jahren ebenfalls eine Begriffserweiterung und ist in einem inhaltlichen Wandel begriffen. Heute können in dieses interdisziplinäre Gebiet die technisch unterstützten naturnahen Sanierungsverfahren mit einbezogen werden. Dafür stehen Begriffe wie „Ökotechniken“, „NRA-Prinzipien“ (Natürlicher Rückhalt und

Abbau), „enhanced natural attenuation“ oder „Bioremediation“.

Neu ist die Betrachtungsweise im Sinne einer „Biotechnologie für die Umwelt“, Prozesse und Verfahren des präventiven und prozeßintegrierten Umweltschutzes einzubeziehen. Aktuelle Förderprogramme im europäischen Rahmen und die internationalen Entwicklungstendenzen unterstreichen die Bedeutung dieser Entwicklung. So können bei der Produktion von Chemikalien, Pharmaka und Polymeren mit dem Ziel der Nachhaltigkeit durch biotechnologische Prozesse völlig neue Wege und neue Rohstoffe erschlossen werden.

Die folgenden Übersicht zeigt, daß

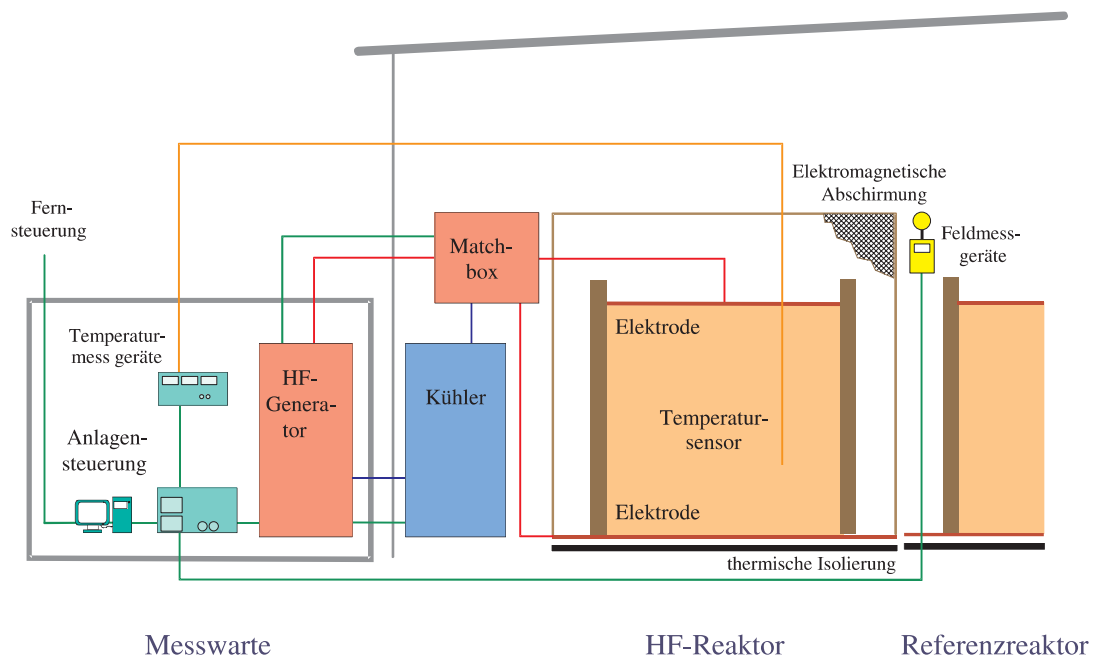
- traditionelle umweltbiotechnologischen Prozesse eine höhere Leistungsfähigkeit durch Einbeziehung innovativer Verfahrensschritte erreichen können,
- die Molekularbiologie neue Einblicke in natürliche Abbau- und Sicherungsprozesse von Altlasten eröffnet,
- mit technischen Mitteln unterstützte natürliche Abbauprozesse eine erstaunliche Leistungsfähigkeit bei der Sanierung von Altlasten zeigen,
- neue biotechnologische Verfahren umweltbelastende Prozesse ablösen können.

Das Gesamtgebiet von Sanierung und Vermeidung durch biotechnologische Prinzipien ist nicht mehr losgelöst von Aspekten der Soziologie und Regionalentwicklung, also „systemintegriert“ zu betrachten.

## Neuere Aspekte der „traditionellen“ umweltbiotechnologischen Verfahren

Anhand eines aktuellen Beispiels wird gezeigt, wie bei der biologischen Bodeneinigung die Forderung der Praxis nach multivalenten und variablen Prozessen neue technische Entwicklungen bewirkt hat.

Abb. 1  
 Schema der Pilotanlage zur Anwendung von Hochfrequenz-Energie zur Unterstützung der biologischen Bodenreinigung



**Bodenreinigung mit Hochfrequenz-Unterstützung**  
 Sehr viel komplexer und komplizierter als im Falle der Reinigung kommunaler Abwässer ist der mikrobielle Abbau organischer Schadstoffe in Böden, die meist aus industriellen Tätigkeiten oder Unfällen stammen. Die Verteilung der im Wasser oft schwerlöslichen organischen Verbindungen (meist aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe) in der Bodenmatrix ist inhomogen, es existieren häufig hoch konzentrierte „hot spots“. An Mineralpartikeln können die organischen Verbindungen sorbiert werden. Huminstoffe lagern sie in ihre dreidimensionalen Strukturen ein und verhindern so den Angriff der Mikroben, sie sind nicht bioverfügbar. Niedere Temperaturen im Boden vermindern auch die Aktivität der Mikroorganismen, deren Temperaturoptimum im Normalfall zwischen 30-35° C liegt. Der effektivste mikrobielle Abbau erfolgt unter aeroben Bedingungen. Eine ausreichende Belüftung bringt jedoch auch die Gefahr des Austriebs flüchtiger organischer Bestandteile mit sich, die dann in der Abluft einer gesonderten Behandlung unterzogen werden müssen.

Um für viele Schadensfälle eine variable Methode nutzen zu können, wurde im Pilotmaßstab (10m<sup>3</sup>) die Möglichkeit erprobt, Radiowellen der definierten und für derartige technische Nutzung zugelassenen Frequenz von 13.56 MHz zur gezielten Erwärmung des Bodens zu nutzen (Roland et al. 1998, Roland et. al. 2001). Das ist prinzipiell sowohl in ausgebagerten Böden im Mietenverfahren, als auch außerhalb der gesättigten Bodenzone „in situ“ möglich.

Abb. 1 zeigt das Schema dieser Anlage. Die in einem Hochfrequenz-Generator erzeugten Radiowellen werden über Elektroden („Antennen“)

in den Boden geleitet und erwärmen diesen. Abhängig vom Energieeintrag kann der Boden so aufgeheizt werden, daß flüchtige organische Stoffe verdampfen und rückgewonnen werden können. Es ist aber auch variabel möglich, den Boden nur so weit zu erwärmen, daß die für die schadstoffabbauenden Mikroorganismen optimale Temperatur konstant eingehalten wird. Zusätzlich muß für eine hohe Degradationsaktivität durch die Anwesenheit von Nährstoffen wie Phosphat und ausreichend Feuchtigkeit gesorgt werden.

Für den Winterbetrieb und in kalten Klimazonen ergibt sich durch die Anwendung dieses Kombinationsverfahrens eine Alternative zu den wirksamen, aber ungleich kostenintensiveren thermischen Bodenreinigungsverfahren (Boden-„Verbrennung“), die zudem einen biologisch toten Boden erzeugen, der wieder revitalisiert werden muß.

### Technisch unterstützte naturnahe Verfahren

*NRA, Natürlicher Rückhalt und Abbau, ENA „enhanced natural attenuation“.*

Die Erfahrung zeigt, daß eine Reihe organischer Verbindungen mit toxischer Wirkung, nach einiger Zeit in Böden oder im Grundwasser analytisch nicht mehr nachzuweisen sind. Natürliche Vorgänge haben zum „Verschwinden“ geführt. Dabei ist der mikrobiologische Abbau vorherrschend, physikalische oder chemische Vorgänge wie Oxidationsprozesse und UV-Einstrahlung aber auch Verdünnungen können allein oder unterstützend wirken. Der natürliche Degradationsprozeß kann jedoch sehr langsam verlaufen oder

überhaupt nicht in Gang kommen. Hemmfaktoren zu erkennen und Wege aufzufinden zu ihrer Überwindung sowie ihr Beschleunigen – mit möglichst einfachen technischen Mitteln – ist das Anliegen dieses sehr komplexen neuen Arbeitsgebietes „ENA“. Zwischen einer reinen Beobachtung (controlled natural attenuation) und der Aktivierung und Steuerung des natürlichen Selbstreinigungspotentials sind fallspezifisch Entscheidungen zu treffen.

In Mitteldeutschland und in einigen osteuropäischen Ländern spielen durch die Kohlechemie entstandene Altlasten eine besondere Rolle. Hauptschadstoffe in kontaminierten Böden, im Grundwasser und teilweise in Deponien sind Phenolderivate und Teere. Die Phenole sind starke Zellgifte, können jedoch in Verdünnung von zahlreichen Bakterien abgebaut werden, die sich im Laufe der Zeit an die besonderen Bedingungen der Altlast angepaßt haben.

Der Gedanke liegt nahe, besonders leistungsfähige Bakterien mit Eignung zum Abbau hochkonzentrierter Phenolverbindungen im Labor zu züchten und zur Beschleunigung des Abbaus in die kontaminierte Umgebung einzubringen. Dieses „Animpfen“ („augmentation“) zeigte in der Praxis jedoch sehr widersprüchliche Resultate. Es war lange unklar, wo die leistungsgesteigerten Bakterien in der Natur verbleiben und ob sie in der Lage sind, die genetische Information über ihre Leistungsfähigkeit weiter zu reichen – sowohl innerhalb der eigenen Spezies als auch an andere Bakterien aus der gleichen Familie. Diese Frage konnte durch die Anwendung molekularbiologischer Methoden (PCR-Technik und DNA-Gensonden) vom Institut für Molekular- und Zellbiologie der Universität Tartu Estland beantwortet werden (Peters et al. 1997, Heinaru et al. 2000). In phenolkontaminierte Wässer, entstanden aus einer Havarie in einer Ölschiefergrube, wurden Bakterien eines Leistungsstammes eingepflegt, (*Pseudomonas putida* PaW85 pheBA+). Es konnte eindeutig gezeigt werden, daß das für den Phenolabbau verantwortliche Genkonstrukt (pheBA-Operon) auf die natürlich im Wasser vorkommenden Bakterien übertragen wurde. Dieser Nachweis des horizontalen Gentransfers bedeutete, daß es prinzipiell jedem speziell an den Phenolabbau angepaßten Bakterium möglich sein sollte, seine besondere Eigenschaft an andere Bakterien weiterzureichen. Vereinfacht gesagt: wenige angepaßte „Spezialisten“ können auch andere Bakterien zur besonderen Leistung befähigen.

#### *Sanierung einer Schwelwasserdeponie*

Die Erkenntnisse der molekularbiologischen Grundlagenforschung unterstützten die Strategie zur Sanierung einer Schwelwasserdeponie (Stottmeister et al. 1999). Dieser „Phenolsee“ war

nach der politischen Wende eine der spektakulärsten Altlasten der ehemaligen DDR. Er galt als praktisch nicht sanierbar. Die in ein ehemaliges Tagebaurestloch eingeleiteten Starkwässer einer nahegelegenen Braunkohlenschwelerei konnten aufgrund geologischer Bedingungen nicht versickern und bildeten einen See (9 ha, 27 m Tiefe, 2 Mill. m<sup>3</sup> Deponiewasser, Sichttiefe 3 cm, kein Sauerstoff nachweisbar). Die Einwohner eines nahegelegenen Dorfes wurden durch intensive Gerüche belästigt, Grundwasserleiter waren bereits kontaminiert (Wießner et al. 1993).

Hohe Konzentrationen (Tab. 1) und chemische Veränderungen der Schadstoffe durch Luftoxidation (Bildung von polymeren huminstoffähnlichen Verbindungen, Kopinke et al. 1995) hemmten offenbar den Abbau durch die vorhandenen Mikroorganismen, so daß über Jahrzehnte keine Veränderung in den Konzentrationen erfolgte.

In Laboruntersuchungen wurde gezeigt, daß die wenigen vorhandenen Bakterien durchaus ein großes Degradationspotential für die Hauptinhaltsstoffe des Deponiewassers besaßen (Becker et al. 1997). Solange die Hemmfaktoren nicht beseitigt wurden, konnten sie jedoch ihre Wirkung nicht entfalten. Die Hemmung ließ sich aufheben, indem die hauptsächlich dafür verantwortlichen dunkelgefärbten Polymerverbindungen mit einer Eisen-III-chloridlösung ausgeflockt und die für eine optimale Bakterienentwicklung notwendigen Bedingungen durch Neutralisation und Nährstoffzugabe geschaffen wurden. In mit Plastikfolien abgetrennten Deponiesegmenten (Enclosures, z.B. 25m Tiefe, 30 m Durchmesser) wurden *in situ*-Versuche durchgeführt, die der Entwicklung der Flockungstechniken dienten und den Abbau der gelösten, nicht geflockten organischen Verbindungen verfolgen ließen (Stottmeister et al. 1997). Der erwartete mikrobielle Abbau einschließlich der Ammonium-Elimination setzte tatsächlich ein und wurde im Verlauf von drei Jahren zunehmend intensiver (Stottmeister und Weißbrodt 2000). Diese positiven Versuchsergebnisse waren die Grundlage der Behandlung der gesamten Deponie.

Der Wasserkörper der Deponie verhielt sich ebenso wie das Wasser bei den Enclosure-Experimenten. Im Verlauf weniger Jahre ist durch ein Zusammenspiel von sauerstoffabhängigen biotischen (Mikrobiologie und Plankton) und abiotischen Prozessen eine Abreicherung der organischen Verbindungen erfolgt, während weitaus langsamere anaerobe mikrobielle Prozesse (Methanogenese und Eisen(III)-reduktion) im Tiefenbereich aktiv werden und die dort „abgelagerten“ organischen Flockungssedimente degradieren. Als Vorbild dienten die Verhältnisse im Schwarzen Meer. Dort findet sich unter einer ökologisch „gesunden“ sauerstoffhaltigen Oberflächenschicht in einer stabilen Schichtung eine anaerobe Tiefenschicht mit eigenen Lebensformen.



Abb. 2  
Vergleich des Original-Deponiewassers mit dem jetzigen Zustand (August 2001)

Dieses Beispiel zeigt, daß es möglich ist, in einer Industrierwässerdeponie durch die gezielte Anwendung einfacher Technologien und genaue Systemkenntnis natürliche Abbauprozesse zu aktivieren. Dabei wird das biologische Gesamtsystem betrachtet, der Faktor „Zeit“ einbezogen und als Sanierungsziel ein Ökosystem mit geringem Gefahrenpotential angestrebt. Heute ist das Wasser der ehemaligen Deponie (Abb. 2) ungefährfärbt, in einer Tiefe von 3 m bis zu 6 m sauerstoffhaltig und wird bereits von Wasservögeln akzeptiert. Die Bewohner des anliegenden Dorfes Trebnitz-Siedlung wurden zu jeder Zeit über die laufenden Vorhaben informiert und in die Diskussionen einbezogen. Ihre Lebensbedingungen haben sich normalisiert. Die Sanierung selbst wurde von regionalen Firmen vorgenommen.

### Systemintegrierte Umweltbiotechnologie

Der prozeßintegrierte Umweltschutz ist heute bei der Neuentwicklung von Technologien und Verfahren durch staatliche Auflagen und Regulative notwendigerweise zum Standard geworden. Die Entwicklung ist häufig noch auf die Vermeidung von Abwasserbelastungen ausgerichtet, reicht aber in ihrer Bedeutung sehr viel weiter und bezieht präventive neue Technologien und Herangehensweisen mit ein. Es ist daher auch im internationalen Vergleich nicht immer einfach, den Stand der Entwicklung des neuen Gebietes „präventive Verfahren“ zu erfassen, da oftmals weder neue Verfahrensteilschritte als „Umwelttechnologie“ ausgewiesen werden noch durch das Patentwesen als solche erfaßt werden.

Es wird zunehmend erkannt, daß die Rohstoffnutzung für technische Prozesse, die Gestaltung der Prozesse selbst und die Produkte mit ihrer Nutzung und Nutzungsdauer nicht mehr getrennt betrachtet werden können. Ökonomie und Um-

weltentlastung hängen dabei eng zusammen, wenn die bisher übliche getrennte Betrachtungsweise überwunden wird. Die Biotechnologie hat Potenziale neue Gebiete weiterzuentwickeln, die alle direkt oder indirekt Umwelrelevanz besitzen. Die mikrobielle Citronensäuresynthese soll als ein Beispiel für aktuelle Entwicklungsarbeiten dienen.

### Mikrobielle Citronensäuresynthese

Citronensäure ist ein mikrobiologisch hergestelltes Massenprodukt, das seit 1924 weltweit mit 800.000 Jahrestonnen durch den Pilz *Aspergillus niger* aus Melassen hergestellt wird: Die Umweltbelastung durch Nebenprodukte und Abwasserfrachten läßt sich durch zeitgemäße Technologien nur unwesentlich verringern oder aber mit neuen Prozeßproblemen erkaufen. Aufgrund der Umweltbelastung und gesetzlichen Regulativen wird die Citronensäureherstellung aus Mitteleuropa zunehmend in Länder der dritten Welt verlagert.

Im klassischen *Aspergillus*-Prozeß werden Citronensäurekonzentrationen von 100-140 g/l bei Ausbeuten von 0,8-0,9 kg/kg in einer Kultivierungszeit von fünf bis sechs Tagen erzielt. An fünf Stellen des Prozesses entstehen Abfälle oder Nebenprodukte als Schlämme oder Abwasser (Stottmeister und Hoppe 1991).

In einem neuen Prozeß bringt die Nutzung der Hefe *Yarrowia lipolytica* Vorteile. Mit genetisch modifizierten Stämmen werden auf unterschiedlichen Kohlenstoffquellen Produktkonzentrationen von 180-200 g/l Citronensäure und Ausbeuten bis zu 1,6-1,9 kg/kg in 3-4 Tagen erreicht. Besonders vorteilhaft lassen sich auf Grund der Unempfindlichkeit und der Leistungsstabilität der Hefe technische Varianten umsetzen, die alle die Prozeßschritte vermeiden, die im klassischen

Tab. 1  
Analytische Charakterisierung der Deponie 1995 vor und 1999 nach den Sanierungsmaßnahmen (Hauptparameter, Zahlen in Klammern: Prozent Erniedrigung)

Tiefe (m)	Gesamt-Phenole mg/l	Ammonium-Stickstoff mg/l	Gesamt-Phenole mg/l	Ammonium-Stickstoff mg/l
0	7	79	0 (100%)	45 (40%)
5	23	85	2 (90%)	62 (27%)
10	86	134	12 (86%)	80 (40%)
15	202	221	15 (93%)	86 (61%)
20	228	239	17 (93%)	93 (39%)
25	219	250	27 (88%)	108 (57%)

1995 vor den Maßnahmen

1999 drei Jahre nach den Sanierungsschritten

Verfahren zu Belastungen im Wasser und zum Schlammanfall führt. So ergibt sich zusätzlich zum vorteilhaften Fermentationsschritt die günstige Möglichkeit der vereinfachten Aufarbeitung und Produktisolierung mit modernen Elektrodialyseverfahren mit Kreislaufführung.

Der größte Vorteil des neuen Hefeprozesses ist jedoch die große Flexibilität in der Substratnutzung (z.B. Fette, Öle, Kohlehydrate und Hydrolysate, aber auch Paraffine, Essigsäure, Alkohole u.a.). Damit können regionale Bedingungen berücksichtigt und Nebenprodukte anderer Industriezweige genutzt werden.

## Abschließende Bemerkungen

Die zukünftige Entwicklung der „Biotechnologie für die Entlastung der Umwelt“ läßt erwarten, daß einerseits für „neue“ Umweltschadstoffe das biotechnologische Potential zu deren Beseitigung genutzt, zum anderen in technischen Prozessen der Präventionsgedanke gefördert wird.

„Neue“ Schadstoffe sind z.B. hormonell wirkende Verbindungen aus Kosmetika und Medikamenten (endocrine disrupting chemicals), die sich in geringen Mengen unverändert oder als metabolische Umsetzungsprodukte in Böden und Abwässern nachweisen lassen. Neue Umweltbelastungen können aber auch von in breitem Maße eingesetzten Stoffen ausgehen, wie z.B. von dem als Treibstoffzusatz verwendeten Methyl-tertiärbuthylether MtBE. Dieses kann in das Grundwasser gelangen und dessen Nutzung einschränken. Wirksamkeit der „Bioprävention“ läßt sich anhand neuer Technologien aufzeigen. Bereits heute ist durch die Anwendung von Enzymen in der Textilindustrie und Galvanotechnik eine wesentliche Umweltentlastung mit einer zusätzlichen Verbesserung der Ökonomie nachzuweisen (Anonym 1998).

Das ist nur durch eine komplexe „systemintegrierte“ Betrachtung zusammen mit anderen Fachdisziplinen möglich. Dabei ist oftmals Überzeugungsarbeit derart zu leisten, daß die Berücksichtigung des „Umweltgedankens“ keineswegs Entwicklungshemmung und Belastung der Ökonomie bedeutet, sondern mit Innovation und ökonomischen Vorteilen verbunden ist.

### *Anschrift des Verfassers:*

Prof. Dr. habil. Ulrich Stottmeister  
UFZ Umweltforschungszentrum  
Leipzig-Halle GmbH  
Sektion Sanierungsforschung  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig

## Literatur

- Anonym 1998: Biotechnology for clean industrial products and processes. OECD Paris 1998, Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD Publications Paris Cedex 16, France.
- Becker, P.M.; Wand, H.; Weißbrodt, E.; Kusch, P.; Stottmeister, U.: 1997; Distribution of contaminants and the selfpurifying potential for aromatic compounds in a carbonization waste water deposit, *Chemosphere*, Vol. 34, No. 4, S. 731-748.
- Heinaru, E.; Truu, J.; Stottmeister, U.; Heinaru, A.: 2000; Three types of phenol and p-cresol catabolism in phenol- and p-cresol-degrading bacteria isolated from river water continuously polluted with phenolic compounds, *FEMS Microbiology Ecology* 31, 195-205
- Kopinke, F.D.; Pörschmann, J.; Stottmeister, U.: 1995; Sorption of organic pollutants on anthropogenic humic matter, *Environmental science and technology*, Vol. 29, 4, S. 941-950
- Peters, M.; Heinaru, E.; Talpsep, E.; Wand, H.; Stottmeister, U.; Heinaru, A.; Nurk, A.: 1997; Acquisition of a Deliberately Introduced Phenol Degradation Operon, *PheBA*, by Different Indigenous *Pseudomonas* Species, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 63, No. 12, p. 4899-4906
- Roland U.; Koch, M.; Kopinke, F.D.; Nüchter, U.; Mothes, J.; Schreiber, H.: 2001; Selektive Bodenerwärmung mittels Hochfrequenzenergie, *Umwelt Heft* 1-2,38-41
- Roland, U.; Remmler, M.; Kopinke F.D.; Becker, P.M.; Ondruschka, B.; Müller, S.: 1998; In situ Remediation Using Radio Frequency Heating. In „Contaminated Soil 98“ Vol.2, 599-607
- Proc. 6<sup>th</sup> international FZKTNO Conference on Contaminated Soil, Thomas Telford London
- Stottmeister, U.; Hoppe, K., 1991: Organische Genußsäuren in: Lebensmittelbiotechnologie, Entwicklungen und Aspekte, Herausgeber H. Ruttloff, Akademie-Verlag Berlin
- Stottmeister, U.; Kusch, P.; Wießner, A.; Weißbrodt, E.; Martius, G.; Becker, P.M.; Eismann, F.; Kotte, H.: 1997; Altlastenprobleme der Carbochemie in Nordwestsachsen: Entstehung, Ausmaß und erste Sanierungskonzepte, in: Christa Knorr und Thomas von Schell, Mikrobieller Schadstoffabbau, S. 357-375
- Stottmeister, U.; Gläßer, W.; Klapper, H.; Weißbrodt, E.; Eccarius, B.; Kennedy, Chr.; Schultze, M.; Wendt-Potthoff, K.; Frömmichen, R.; Schreck, P.; Strauch, G.: 1999; Strategies for Remediation of Former Opencast Mining Areas in Eastern Germany; in: Environmental Impacts of Mining Activities, José M. Azcue, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, S. 263-296
- Stottmeister, U.; Weißbrodt, E.: „Enhanced Bioattenuation“ 2000; Anwendung natürlicher Prozesse zur Sanierung carbochemischer Altlasten; TerraTech, Zeitschrift für Altlasten und Bodenschutz, Heft 1, 45-48
- Wießner, A.; Kusch, P.; Weißbrodt, E.; Stottmeister, U.; Pörschmann J.; Kopinke, F.D. 1993; Charakterisierung des Wassers und des Sedimentes einer Braunkohle – Schwelwasserdeponie. *Wasser-Abwasser-Praxis* 6, 375-379