



**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 7425

**Roadmap Umwelttechnologien 2020**  
**State-of-the-Art-Report (Kurzfassung)**





# **Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7425

## **Roadmap Umwelttechnologien 2020**

—  
State-of-the-Art-Report (Kurzfassung)

J. Jörissen, J. Schippl, C. Dieckhoff, N. Gronwald, A. Grunwald,  
N. Hartlieb, U. Mielicke, O. Parodi, T. Reinhardt, V. Stelzer

Institut für Technikfolgenabschätzung und  
Systemanalyse

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
2008**

Das Projekt *Roadmap Umwelttechnologien 2020* wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen: 01RI0718A und am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Forschungszentrum Karlsruhe unter Mitarbeit des Fraunhofer Instituts für Chemische Technologie (J. Woidasky, R. Bolduan, A. Franck, G. Gräbe) bearbeitet.

Dieser Bericht ist online erhältlich unter:  
<http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7425.pdf>  
<http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2008/scua08a.pdf>

Die Langfassung ist verfügbar unter:  
<http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2008/scua08a.pdf>

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-074256

## **Roadmap Environmental Technologies 2020**

### ***State-of-the-Art-Report (condensed version)***

#### **Abstract**

Global environmental problems such as climate change, limited access to clean water, decline in biodiversity or growing demand for raw materials put increasing pressure on the socioeconomic and political systems. Albeit many of nowadays environmental problems are caused directly or indirectly by the application of technologies, at the same time, technologies have the potential to reduce these problems. Against this background, the project "Roadmap Environmental Technologies 2020" (funded by the German Ministry of Education and Research) explores to which extent research and development activities will be able to foster future environmental innovations. It will support the process of identifying strategic policy options for promoting developments and commercial applications in the field of environmental technologies. In a comprehensive State-of-the-Art-Report relevant environmental problems are being presented along with corresponding technologies contributing to solving or mitigating these problems. This is being done for seven environmental fields of action: Climate protection, air pollution control, water management, soil protection, increase of resource productivity, waste management and preservation of nature and biodiversity. The State-of-the-Art-Report offers a wide-ranging overview on mature technologies and their markets, on new technologies and their potentials as well as on obstacles and bottlenecks for the development and implementation of new technologies. The paper at hand summarises key-findings from the seven environmental areas. For each of these areas a so-called "technology compass" illustrates the mutual relationship between problems, strategies and technologies.

#### **Zusammenfassung**

Globale Umweltprobleme wie der Klimawandel, die Verknappung des Süßwasserdargebots, der Verlust an Biodiversität oder der rasant steigende Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe werden den Handlungsdruck im Umweltbereich in den nächsten Jahrzehnten deutlich erhöhen. Obwohl viele der heutigen Umweltprobleme direkt oder indirekt durch Technik verursacht sind, beinhalten moderne Umwelttechnologien gleichzeitig das Potential zu ihrer Bewältigung. Vor diesem Hintergrund untersucht das BMBF-Projekt „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ welche Beiträge Forschung und Technik für künftige Umweltinnovationen leisten können. Ziel des Projekts ist es, strategische Handlungsoptionen für die Forschungsförderung und die Unterstützung des Wissenstransfers in die Praxis aufzuzeigen. Als erstes Ergebnis des Projekts wurden in einem umfassenden State-of-the-Art-Report, Umweltprobleme und zugehörige technische Lösungsansätze entlang von sieben Umweltsachfeldern dargestellt. Diese sind: Klimaschutz, Luftreinhaltung, Wasserschutz, Bodenschutz, Schonung endlicher Ressourcen, Abfallwirtschaft, Erhalt von Natur und Biodiversität. Der Report gibt einen umfassenden Überblick über reife Technologien und ihr Marktumfeld, neue Technologien und ihre Potentiale sowie mögliche Hemmnisse, die der Weiterentwicklung und Marktdurchdringung im Weg stehen. In der hier vorgelegten Kurzfassung des State-of-the-Art-Reports sind wesentliche Ergebnisse aus den sieben Sachfeldern zusammengefasst. Jedem Sachfeld ist ein so genannter „Kompass“ zugeordnet, der das Beziehungsgeflecht von Problemen, Lösungsansätzen und Technologien grafisch darstellt.



# Inhalt

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG</b> .....	<b>1</b>
	1.1 Neue Leitbilder für Produktion und Konsumtion .....	1
	1.2 Zum Begriff der Umwelttechnik.....	3
	1.3 Aufbau und Funktion des Berichts .....	5
<b>2</b>	<b>KLIMASCHUTZ</b> .....	<b>7</b>
	2.1 Energiewandlung, Effizienztechnologien und „Carbon-Capture and Storage“ als zentrale Technikfelder .....	7
	2.2 Industrielle Branchen entwickeln prozessspezifische Hightech-Lösungen .....	8
	2.3 Einsparpotentiale in Land-, Forst- und Abfallwirtschaft.....	8
	2.4 Maßnahmen zur Adaption sind äußerst vielfältig .....	9
	2.5 Zahlreiche klimarelevante Forschungsaktivitäten in Deutschland .....	10
	2.6 Fazit.....	11
<b>3</b>	<b>LUFTREINHALTUNG</b> .....	<b>13</b>
	3.1 Luftverunreinigung, ein weltweit ungelöstes Problem .....	13
	3.2 Minderungsstrategien.....	14
	3.3 Querschnittstechnologien.....	15
	3.4 Fazit.....	16
<b>4</b>	<b>WASSERSCHUTZ</b> .....	<b>19</b>
	4.1 Wassergewinnung.....	19
	4.2 Wasseraufbereitung .....	20
	4.3 Senkung des Wasserverbrauchs und der Abwasserproduktion .....	21
	4.4 Gewässer- und Meeresschutz .....	23
	4.5 Fazit.....	25
<b>5</b>	<b>BODENSCHUTZ</b> .....	<b>29</b>
	5.1 Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke, Bodenversiegelung ....	30
	5.2 Altlasten .....	31
	5.3 Eintrag von Schad- und Nährstoffen.....	32
	5.4 Bodenerosion, Desertifikation und Versalzung .....	32
	5.5 Fazit .....	33
<b>6</b>	<b>SCHONUNG ENDLICHER RESSOURCEN</b> .....	<b>37</b>
	6.1 Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung .....	38
	6.2 Erhöhung der produktbezogenen Materialeffizienz.....	39
	6.3 Verlängerung der Lebensdauer von Produkten .....	41
	6.4 Förderung der Kreislaufwirtschaft, Design for Recycling .....	41
	6.5 Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsverfahren .....	42
	6.6 Fazit .....	44

<b>7</b>	<b>ABFALLWIRTSCHAFT</b> .....	<b>47</b>
	7.1 Abfallerfassung.....	48
	7.2 Abfallbehandlung und Abfallaufbereitung zur Verwertung .....	48
	7.3 Abfallbeseitigung, Deponierung .....	50
	7.4 Dienstleistungen.....	50
	7.5 Fazit.....	51
<b>8</b>	<b>ERHALT VON NATUR UND BIODIVERSITÄT</b> .....	<b>55</b>
	8.1 Ausgangslage: Probleme, Ziele, Lösungsansätze .....	55
	8.2 Genuine Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität .....	56
	8.3 Techniken anderer Handlungsfelder mit hoher Relevanz für den Erhalt von Natur und Biodiversität.....	59
	8.4 Fazit.....	59
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>63</b>
	<b>LITERATUR</b> .....	<b>67</b>

# Abkürzungsverzeichnis

€	Euro (Währung der europäischen Währungsunion)
t	Tonnen
Mrd.	Milliarde = $10^9$
ADI	Austempered Ductile Iron
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CCS	Carbon-Capture-and-Storage
DRB	Dezentrale Regenwasser-Bewirtschaftung
ELV	End of Life Vehicles
EU	Europäische Union
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISCO	Chemische in Situ-Oxidation
MED	Multiple Effect Distillation
MSF	Multistage Flash Evaporation
MSR	Mess-, Steuer- und Regeltechnik
NEC	National Emission Ceilings
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLED	Organic Light Emitting Diode
PIUS	Produktionsintegrierter Umweltschutz
RFID	Radio Frequency Identification
RoHS	Restriction of certain Hazardous Substances
SCNR	Selective Non Catalytic Reduction
SCR	Selective Catalytic Reduction
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
THG	Treibhausgase
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation
UV	Ultraviolette Strahlung
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderung
WEEE	Waste Electrical and Electric Equipment



# 1 Einführung

Umweltkrisen sind kein neues Phänomen. Der Mensch als kulturschaffendes Wesen hat die natürliche Umwelt seit Jahrhunderten gestalterisch geprägt und seinen Bedürfnissen angepasst. Dies hat im Verlauf der Geschichte immer wieder zu unbeabsichtigten Umweltveränderungen (Verkarstung, Bodenerosion, Artenverlust) geführt, die sich negativ auf die Lebensbedingungen der betroffenen Bevölkerung ausgewirkt haben. In der Vergangenheit handelte es sich jedoch um regional begrenzte Krisen, die der Mensch durch ein entsprechend angepasstes Verhalten meist bewältigen konnte. Das Neuartige im Verhältnis Mensch-Natur, das mit dem Begriff des „globalen Wandels“ bezeichnet wird, liegt darin, dass sich menschliches Handeln eindeutig auf die Erde als Gesamtsystem auswirkt.

Bevölkerungswachstum, Industrialisierung, Urbanisierung und steigender Wohlstand als gesellschaftliche Treiber des globalen Wandels haben zu globalen Umweltveränderungen wie Klimawandel, Bodendegradation, Abnahme der biologischen Vielfalt, Verknappung des Süßwasserdargebots, Übernutzung und Verschmutzung der Weltmeere, Zunahme anthropogener Naturkatastrophen sowie zu einem steigenden Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe geführt (WBGU 1999). Die ökologischen Folgen des globalen Wandels sind in allen Regionen dieser Welt spürbar, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß, was wachsende Verteilungskonflikte zur Folge haben wird. Von der Verschlechterung der Lebensbedingungen sind die armen Länder des Südens am stärksten betroffen, in denen Armut, Dürre, Trinkwassermangel, Krankheiten und kriegerische Auseinandersetzungen Millionen von Menschen zur Flucht treiben werden (BMU 2007a).

## 1.1 Neue Leitbilder für Produktion und Konsumtion

Obwohl ein Großteil der heutigen Umweltprobleme direkt oder indirekt durch Technik verursacht wird, beinhalten moderne Technologien gleichzeitig das Potential zu ihrer Bewältigung. In den vergangenen Jahrzehnten sind bereits große Fortschritte erzielt worden, etwa auf dem Gebiet der Luftreinhaltung, der Abwasserbehandlung und der Abfallbeseitigung. Die klassische Umwelttechnik gerät jedoch angesichts des Industrialisierungsschubs in den Schwellenländern, der rasant steigenden Nachfrage nach Energie und Rohstoffen sowie wachsender Konsumbedürfnisse an ihre Grenzen. Es geht nicht mehr nur um die Vermeidung unmittelbarer Belastungen (Luftverunreinigung, Bodenversauerung, Eutrophierung etc.), sondern um einen grundsätzlichen Wandel der Perspektive. Erforderlich ist eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltverbrauch durch die Abkehr von der Wegwerfgesellschaft und die Hinwendung zu einer Kreislaufwirtschaft. Der Verbrauch natürlicher Rohstoffe soll durch eine Erhöhung der Material- und Energieeffizienz verringert, der Bestand an knappen, nicht erneuerbaren Ressourcen durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Ressourcen geschont und die Rückstände des industriellen Metabolismus sollen reduziert oder möglichst ganz vermieden werden. Dieses Ziel ist nur mit Hilfe weitreichender technologischer Entwicklungen sowie produktbezogener, verfahrensbezogener und organisatorischer Innovationen zu erreichen, wie sie in dem hier vorgelegten Zwischenbericht entlang verschiedener Handlungsfelder beschrieben sind.

Die Notwendigkeit einer Trendumkehr ist inzwischen allgemein akzeptiert. Auch in den Schwellenländern hat man erkannt, dass eine weitere Subventionierung ihres raschen Wirtschaftswachstums auf Kosten der Umwelt nicht dauerhaft möglich ist (Töpfer 2007). Weltweit lässt sich daher ein wachsender Bedarf an ressourceneffizienten, umweltfreundlichen Produkten und Produktionsverfahren konstatieren. Wie die Bundesregierung in ihrer „Hightech-Strategie“ für Deutschland betont, lassen sich weder die Millenniumsziele der Vereinten Nationen noch die Ziele der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ohne den Einsatz effizienter, „sauberer“ Technik realisieren (BMBF 2006). Umwelttechnologien stellen somit einen wichtigen Wachstumsmarkt der Zukunft dar.

Verschiedene aktuelle Studien belegen die wirtschaftliche Bedeutung der Umweltschutzwirtschaft (BMU 2007a; UBA/BMU 2007; BMU/UBA 2007; NIW/ZEW/ISI 2007; McKinsey 2007). Nach Angaben der Europäischen Kommission ist der Markt für Umwelttechnologien zwischen 1999 und 2004 in Europa jährlich um 7% gewachsen (BMU 2007a). Deutschland hat in vielen Segmenten dieses Marktes bereits heute eine hervorragende Stellung und nimmt auf einigen Gebieten sogar eine weltweite Führungsrolle ein. Die deutsche Industrie hat im Jahr 2004 potentielle Umweltschutzgüter im Wert von 42 Mrd. Euro ausgeführt; dies entspricht 6,2% des gesamten Industriewarenexports. Insgesamt war Deutschland im Jahre 2004 mit einem Welthandelsanteil von 16,4% größter Exporteur von potentiellen Umweltschutzgütern vor den USA (16,1%) und Japan (10,8%) (NIW/ZEW/ISI 2007).

Wie die Entwicklung seit den 1970er Jahren zeigt, verdankt die deutsche Umweltschutzindustrie ihre international anerkannte Stellung nicht zuletzt den regulativen Rahmenbedingungen in Deutschland. Das ausgeprägte Umweltbewusstsein der Bürger in Verbindung mit politischen Weichenstellungen und einer konsequenten Umweltgesetzgebung haben dazu geführt, dass sich Umwelttechnologien schon frühzeitig auf einem anspruchsvollen Binnenmarkt bewähren mussten. Dank dieser Konstellation können deutsche Unternehmen heute in einigen Sparten internationale Maßstäbe setzen, dazu gehören z.B. die Bereiche erneuerbare Energien (Windkraft-, Solar- und Biogasanlagen), Luftreinhaltung, Lärmschutz und Recycling (BMBF 2006).

Angesichts globaler Herausforderungen (Klimawandel, zunehmende Wasser- und Rohstoffknappheit u.a.) geht es jedoch weniger um nationale Regulierungen, als vielmehr um die Entwicklung internationaler Standards. Wie die Geschichte der europäischen Umweltschutzgesetzgebung zeigt, sind oftmals Regulierungen, die in einem Land zuerst angewandt wurden, später von anderen Ländern übernommen worden und haben dadurch den Unternehmen des „Vorreiter-Landes“ Exportvorteile verschafft. Ein Beispiel ist das Anfang der 1990er Jahre durch den deutschen Gesetzgeber verhängte Verbot der Ozonschichtschädigenden Fluorchlorkohlenwasserstoffe, das international als Vorbild diente. Umweltregulierung kann dadurch einen Leitmarkt für Umweltinnovation stimulieren (NIW/ZEW/ISI 2007). Eine solche Leitmarkt-Funktion vermag ein Land vor allem dann zu übernehmen, wenn es der nationalen Gesetzgebung gelingt, globale Trends frühzeitig zu erkennen und Umweltregulierungen so auszugestalten, dass sie für die Übernahme durch andere Länder geeignet sind.

Vor dem Hintergrund der Verantwortung der Industrieländer für eine global nachhaltige Entwicklung ebenso wie aufgrund der weltweit steigenden Nachfrage nach Umwelttechnologien gewinnt

die Aufgabe, Technologien explizit auch für den Export zu entwickeln, zunehmend an Bedeutung. Damit verändert sich jedoch auch das Anforderungsprofil. Viele Hightech-Produkte, die für den europäischen Markt entwickelt wurden, sind für Entwicklungs- und Schwellenländer kaum bezahlbar und zudem unter den dort gegebenen institutionellen und organisatorischen Rahmenbedingungen häufig auch nicht einsetzbar. Es geht also darum, angepasste Technologien für den außereuropäischen Markt zu entwickeln.

Der massive Energie- und Stoffdurchsatz der heutigen Industrieländer kann kein Leitmodell für eine nachhaltige Weltwirtschaft sein. Um eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltverbrauch zu erreichen, sind eine Optimierung der Produkte hinsichtlich Materialeffizienz, Wiederverwertbarkeit und Nutzungsdauer sowie eine Minimierung des Energieverbrauchs und der Emission von Schadstoffen im Produktionsprozess erforderlich. Besonderes Gewicht sollte dabei auf die Möglichkeiten des „ökologischen Leapfrogging“ gelegt, d.h. eine Entwicklung angeschoben werden, welche die nicht nachhaltigen Produktionstechnologien der Industrieländer überspringt (WBGU 2005).

## 1.2 Zum Begriff der Umwelttechnik

In dieser Studie wird von einem weit gefassten Begriff der Umwelttechnik ausgegangen:

*Gegenstand des Projekts sind Technologien, Güter und Dienstleistungen, die der Vermeidung, Verminderung und Beseitigung von Umweltbeeinträchtigungen sowie der Wiederherstellung bereits geschädigter Umweltfunktionen dienen und somit einen Beitrag zu einem nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Ressourcen leisten.*

Die Gründe für diese weite Begriffsdefinition sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Umwelttechnologien lassen sich weder einem technologischen Kernbereich noch bestimmten Branchen (wie etwa Energiewandlung, Transport, Landwirtschaft) zuordnen, sondern betreffen das gesamte Spektrum von Produktion und Konsumtion. Jedes Produkt steht in Wechselwirkungen mit der Umwelt, von der Bereitstellung der zu seiner Herstellung benötigten Rohstoffe und Energie, über den eigentlichen Herstellungsprozess und die Nutzung bis hin zu seiner Entsorgung als Abfall. Auf jeder Stufe des Produktlebenszyklus kann Umwelttechnik zur Anwendung kommen. Umwelttechnologien haben somit Querschnittscharakter. Sie stellen bestimmte Eigenschaften oder Bestandteile von Technologien dar, durch deren gezielten Einsatz den Anforderungen an Schutz und Entlastung der natürlichen Umwelt entsprochen werden soll. Ein Großteil der Umweltschutzgüter konzentriert sich auf forschungs- und wissensintensive Industrie- und Dienstleistungsbereiche, wie Maschinen- und Fahrzeugbau, Mess-, Steuer- und Regeltechnik, Metallverarbeitung, Elektrotechnik, Chemie- und Kunststoffindustrie sowie hochwertige Forschungs-, Planungs- und Beratungsleistungen (NIW/ZEW/ISI 2007).

Üblicherweise wird in der Umweltdebatte zwischen nachsorgenden, additiven, integrierten und kompensatorischen Techniken unterschieden. In den letzten Jahren hat sich das politische Interesse und damit auch die Innovationstätigkeit zunehmend in Richtung auf die Technologien des produkt- und produktionsintegrierten Umweltschutzes verschoben. Dies beinhaltet eine Abwen-

derung von einem primär emissions- bzw. rückstandsorientierten Ansatz (*end of the pipe*) zu einem quellenorientierten Ansatz, bei dem der Material- und Energieinput optimiert und damit das Emissions- und Rückstandsaufkommen von vornherein verringert werden soll (Coenen et al. 1996). Ein wesentlicher Grund für diesen Paradigmenwechsel liegt in dem stark wachsenden Rohstoff- und Energiebedarf der Schwellenländer, der die Grenzen der Verfügbarkeit materieller und energetischer Einsatzstoffe sowie die Abhängigkeit der europäischen Volkswirtschaften von diesen in aller Schärfe hervortreten lässt (Glos 2006). Eine global nachhaltige Entwicklung, die auch künftigen Generationen die Grundlagen der Bedürfnisbefriedigung sichert, verlangt innovative Lösungen, die den Rohstoff- und Energieinput trotz steigender Wertschöpfung reduzieren und den Stoffwechsel zwischen industrieller Produktion und natürlicher Umwelt in einer globalen Balance halten.

Die Priorisierung des produkt- und produktionsintegrierten Umweltschutzes bedeutet jedoch keineswegs, dass künftig die technologische Weiterentwicklung additiver, nachsorgender und kompensatorischer Umweltschutzmaßnahmen keine Bedeutung mehr haben wird. Die ökologische Optimierung von Produktionsprozessen erfordert häufig den simultanen Einsatz additiver und integrierter Techniken. So kann z.B. bei der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen auch bei Kraftwerken, die nach dem neuesten Stand der Technik ausgelegt sind, auf additive Techniken (Rauchgasreinigung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung) nicht verzichtet werden. Außerdem werden additive Umwelttechniken im Hinblick auf die unmittelbare Abwehr von Gefahren für Umwelt und Gesundheit weiterhin unentbehrlich bleiben. Ebenso wenig kann auf den Einsatz nachsorgender Umweltschutzmaßnahmen verzichtet werden, um bereits eingetretene Schäden zu beseitigen und die Funktionsfähigkeit ökologischer Systeme so weit wie möglich wieder herzustellen.

Bezüglich der kompensatorischen Umweltschutztechnologien ist davon auszugehen, dass sie künftig sogar noch an Bedeutung gewinnen werden. Überall dort, wo es bisher nicht gelungen ist, die Ursachen von Umweltproblemen wirksam zu bekämpfen, sind kompensatorische Maßnahmen zum Schutz der menschlichen Gesundheit und anderer wichtiger Schutzgüter in der Regel der einzige Ausweg. So lassen sich z.B. die Folgeprobleme des Klimawandels selbst durch eine drastische, weltweite Reduktion der Treibhausgasemissionen nicht kurzfristig beseitigen. Notwendig sind daher kompensatorische Maßnahmen etwa im Bereich des Hochwasserschutzes (Deichbau, Umsiedlungen) oder zur Sicherung der Welternährung (biotechnologische Anpassung von Kulturpflanzen an veränderte Umweltbedingungen).

Technologische Entwicklungen und Innovationen reichen oft alleine nicht aus, um den drängenden Umweltproblemen entgegenzuwirken und sich auf den entsprechenden Märkten durchzusetzen. Vielfach gilt es, organisatorisches Wissen und Know-how ebenfalls zu vermitteln. Wachsende Bedeutung kommt daher hochwertigen, wissensbasierten Dienstleistungen zu. Dazu gehören unter anderem Verbraucher- und Umweltberatung, Wissenstransfer und Capacity Building, Durchführung von Umweltverträglichkeits- und Nachhaltigkeitsprüfungen, Durchführung von betrieblichen Umweltprüfungen (Öko-Audit), Erstellung von Ökobilanzen, Produktlinien- und Stoffstromanalysen, Entwicklung kommunaler Energie-, Abfall- und Flächenmanagementkonzepte. Die in dieser Studie verwendete Definition von Umwelttechnik bezieht daher Dienstleistungen explizit mit ein.

### 1.3 Aufbau und Funktion des Berichts

Mit dem State-of-the-Art-Report wurde der Zwischenbericht des Projekts „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ vorgelegt (online verfügbar unter <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2008/scua08a.pdf>). Er gibt einen Überblick über reife Technologien und ihr Marktumfeld, neue Technologien und ihre Potentiale sowie mögliche Hemmnisse, die der Weiterentwicklung und Marktdurchdringung im Weg stehen. Der Schwerpunkt liegt in dieser Phase des Projekts auf den Technologien selbst, wobei auf eine umfassende Darstellung in großer Breite Wert gelegt wurde.

In enger Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden für dieses Projekt sieben Handlungsfelder der Umweltpolitik ausgewählt, denen in der aktuellen Debatte besondere Bedeutung beigemessen wird:

- Klimaschutz
- Luftreinhaltung
- Wasserschutz
- Bodenschutz
- Schonung endlicher Ressourcen
- Abfallwirtschaft
- Erhalt von Natur und Biodiversität

In der vorliegenden Kurzfassung des State-of-the-Art-Reports werden wesentliche Ergebnisse aus den sieben Handlungsfeldern zusammengefasst. Jedem Handlungsfeld ist ein so genannter „Kompass“ zugeordnet, der das Beziehungsgeflecht von Problemen, Lösungsansätzen und Technologien grafisch darstellt.







## 2 Klimaschutz

Es besteht weitgehend wissenschaftlicher Konsens darüber, dass durch den zunehmenden Ausstoß von Treibhausgasen (THG) der natürliche Treibhauseffekt anthropogen verstärkt wird. In den letzten Jahren ist das Thema Klimawandel stark in das öffentliche Bewusstsein gerückt, was sowohl auf die Veröffentlichung wissenschaftlicher Berichte, wie z.B. des IPCC-Reports (IPCC 2007) oder des Stern-Reports (Stern 2006) zurückzuführen ist, als auch auf das verstärkte Auftreten von klimatischen Extremereignissen wie Hitzewellen, Dürren, Starkregen, Überschwemmungen und andere. Auch die Politik hat sich des Themas angenommen. Vor allem in europäischen Ländern wurden Regelungen getroffen und Maßnahmen ergriffen, um den Klimawandel zu bekämpfen. Die EU, und hier insbesondere Deutschland, gelten als Vorreiter, wenn es um die Gestaltung von Klimapolitik geht.

Wenn Klimaschutz mit wirtschaftlichem Fortschritt und global steigendem Lebensstandard einhergehen soll, geht das nicht ohne die Entwicklung und den Einsatz klimaschonender Technologien. Gleichzeitig bietet die Entwicklung solcher Technologien auch vielversprechende Chancen für die Wirtschaft, da sich ein breites Feld neuer Märkte eröffnet. Das gilt besonders für einen modernen Industriestandort wie Deutschland, mit hohem Exportanteil. Neben einer breiten gesellschaftlichen Unterstützung für Klimaschutzaktivitäten wird der Klimawandel daher – aus ökonomischer Perspektive – durchaus auch als Chance begriffen. Grundsätzlich lassen sich Technologien, die dem Klimaschutz dienen in zwei, von ihrer Zielsetzung her gänzlich unterschiedliche Gruppen, einteilen:

1. Mitigation: Technologien, die der globalen Erwärmung entgegen wirken, also vor allem den Ausstoß von Treibhausgasen reduzieren.
2. Adaptation: Technologien, die zur besseren Bewältigung oder Abmilderung der Folgen des Klimawandels beitragen.

### 2.1 Energiewandlung, Effizienztechnologien und „Carbon-Capture and Storage“ als zentrale Technikfelder

Insgesamt kann im Handlungsfeld „Klimaschutz“ eine große Zahl von Technologien aus teilweise sehr unterschiedlichen Bereichen genannt werden. Nahezu die ganze Breite menschlichen Wirtschaftens ist betroffen. Eine zentrale Position kommt dabei dem Energiesektor zu, besonders vor dem Hintergrund des prognostizierten Anstieges des globalen Energieverbrauchs (IEA 2006; BMWi/BMU 2006). Technologien zur Energiewandlung sollten im Rahmen des Projekts allerdings nur kurz gestreift werden. Die teilweise sehr kontrovers diskutierte CCS (*Carbon-Capture and Storage*)-Technologie wurde wegen ihrer denkbaren Schlüsselrolle bei der globalen Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-armen Energieversorgung und der damit verbundenen Exportpotentiale ausführlicher beleuchtet (BMU/UBA 2007). Bei CCS sind die Hemmnisse zur Einführung nicht nur technischer sondern auch sehr stark politischer Art: Nur auf Basis hinreichender politischer Regelsysteme ist es vorstellbar, dass CCS nicht nur in Europa, sondern auch in kohleintensiven Schwellenländern wie China und Indien mit ihrem stark wachsenden Energieverbrauch eingesetzt wird. Technisch ist bisher vor allem die Einlagerung von CO<sub>2</sub> ungelöst. Diesbezüglich

gibt es bisher auch zu Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz wenig Wissen. Mit eher langfristiger Perspektive wird die Möglichkeit diskutiert, dass die Kohleverstromung durch nachhaltigere Technologien abgelöst wird.

Während CCS ausschließlich in Reaktion auf bzw. in Antizipation von entsprechenden politischen Regelsystemen entwickelt wird, steht in anderen Bereichen Klimaschutz nicht immer als primärer Treiber für die Einführung von klimaschonenden Technologien im Vordergrund. So ist für die Einführung alternativer Antriebstechnologien die Substitution erdölbasierter Kraftstoffe zur Stabilisierung der Energiesicherheit eine wichtige Motivation. Daneben geht es bei der rationalen Energiewandlung immer auch um die Realisierung von Einsparpotentialen. Besonders bei Effizienztechnologien zeigt sich eine große Breite möglicher Ansatzpunkte, die sich in ganz unterschiedlichen Bereichen finden lassen. Unter den aufgeführten technologischen Entwicklungslinien können heraus gehoben werden: optische Technologien, insbesondere OLED (BMBF 2007a); der gesamte Gebäudebereich mit seinen großen Einsparpotentialen (Kraus 2007); Effizienzsteigerung bei den in der industriellen Produktion verwendeten elektrischen Antrieben; Mess-, Steuer- und Regeltechnik.

## **2.2 Industrielle Branchen entwickeln prozessspezifische Hightech-Lösungen**

Neben den genannten Querschnittstechnologien finden sich in den Branchen Stahlproduktion, chemische Industrie und Zementherstellung zahlreiche, auf die spezifischen Prozesse zugeschnittene Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung, die teilweise bereits in Forschungs- und Entwicklungsprojekten optimiert, weiterentwickelt und erprobt werden. So lässt sich beispielsweise in der chemischen Industrie der Energieverbrauch bei der Chloralkali-Elektrolyse durch den Einsatz innovativer Gasdiffusionselektroden deutlich verringern. Die Lachgaszersetzung bei der Adipin- und Salpetersäureherstellung bietet ebenfalls vielversprechende Möglichkeiten. In der Zementindustrie wird mit der Verringerung des Klinkeranteils experimentiert. Zudem kann durch Verwendung von Ersatzbrennstoffen und die Nutzung der Abwärme der CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduziert werden. Es wird deutlich, dass in vielen genannten Bereichen schon durch eine stärkere Marktdurchdringung bereits vorhandener Technologien signifikante Effizienzsteigerungen möglich wären (McKinsey 2007). Innovationen sind in diesem Bereich oft eindeutig dem Hightech-Sektor zuzuordnen und benötigen einen relativ großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand. Viele Förderprogramme adressieren in Deutschland diesen Bedarf.

## **2.3 Einsparpotentiale in Land-, Forst- und Abfallwirtschaft**

Auch Land- und Forstwirtschaft tragen beträchtlich zum Ausstoß von Treibhausgasen bei (Smith et al. 2008), stehen aber selten so im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses wie die Technologien zur Energiewandlung und Effizienzsteigerung. Das mag auch daran liegen, dass vielfach keine Hightech-Lösungen angewendet werden, sondern „weiche“ Maßnahmen wie optimierte Nutzungskonzepte oder der Verzicht auf bestimmte Verfahrensschritte, Einsatzstoffe oder Produkte zielführend sind. Emissionen aus der Landwirtschaft finden vor allem in Form von Methan

und Lachgas statt. Für beide Gase werden deutliche Wachstumsraten prognostiziert. Hauptursachen sind die zunehmende Nutztierhaltung und der steigende Einsatz von synthetischer Stickstoffdüngung. Bei Kühen werden mittlerweile spezielle Futterzusatzmittel erprobt, welche die Freisetzung von Methan reduzieren sollen.

Die Reduktion der mit dem Einsatz von Düngemitteln in Verbindung stehenden Emissionen erfolgt im Herstellungsprozess (verbesserte Energieeffizienz bei der Ammoniaksynthese) oder über einen optimierten Düngemittleinsatz. Beide Ansätze zeigen große Einsparpotentiale. Der optimierte Düngemittleinsatz kann im Rahmen des so genannten „*Precision Farming*“ durch Hightech-Komponenten sinnvoll unterstützt werden (Sensoren, Bordcomputer, elektronisch gesteuerte Düngemittelausbringung). Diese Lösung ist allerdings aufgrund der damit verbundenen Investitionen nicht für alle Regionen geeignet. Auch der Methanausstoß durch den Reisanbau könnte durch Änderung der Anbautechnik reduziert werden. Die Realisierung der Potentiale lässt sich aber gerade in den besonders wichtigen Entwicklungs- und Schwellenländern nur schwer durchsetzen, da vielfach entweder geringere Erträge, ein höherer finanzieller Aufwand oder eine zusätzliche Arbeitsbelastung mit der Umsetzung einhergehen.

Grundsätzlich ist Ackerbau eine Landnutzungsform mit vergleichsweise geringer CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität. Durch Umwandlung von Ackerland in eine extensivere Nutzung (z.B. Grünland) kann deshalb sehr einfach und effektiv CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entzogen und gebunden werden. Wichtige Senken für CO<sub>2</sub>, Methan und Lachgas stellen auch Wälder dar. Durch den Verlust natürlicher Wälder entstehen global mehr Treibhausgas-Emissionen als durch den Verkehrssektor. Im Bereich Forstwirtschaft liegen analog zur Landwirtschaft die in Frage kommenden Handlungsoptionen weniger auf der technologischen als vielmehr auf der planerischen und regulativen Seite. Wiederaufforstungen bzw. der ausnahmslose Verzicht auf Entwaldung sind vom ökologischen Effekt her betrachtet vielen Hightech-Lösungen überlegen.

Im Bereich Abfallbehandlung steht die Reduktion von Methan-Emissionen aus der Deponiegasverwertung im Vordergrund. Dabei kann die Vermeidung der Deponierung von unbehandelten Abfällen, wie sie erst in einigen EU Staaten durchgesetzt wurde, einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten (Johnke/Butz 2005). Methanreduktionspotentiale können durch den Aufbau einer Deponiegaserfassung und -verbrennung erreicht werden. Das Projekt „Methakat“ untersucht Möglichkeiten den Methanausstoß aus Deponien und Kohlegruben durch einen langzeitstabilen Katalysatoreinsatz, basierend auf keramischen Werkstoffen, zu reduzieren. In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern sind Abfallsysteme allerdings nicht auf derartige Technologien ausgerichtet. Besser geeignet erscheint hier der Einsatz biologischer Methanoxidation, wie sie bereits in Brasilien getestet wurde. Des Weiteren bietet die energetische Verwertung von Abfällen Emissionseinsparpotentiale.

## **2.4 Maßnahmen zur Adaption sind äußerst vielfältig**

Die Folgen des Klimawandels können sehr unterschiedlich sein und divergieren stark zwischen einzelnen Regionen der Erde (WBGU 2007). Entsprechend vielfältig sind Maßnahmen zur Adaption, d.h. zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Generell werden Anpassungstechnologien selten mit direktem Klimabezug entwickelt. Es handelt sich deswegen in der Regel we-

niger um vollständig neue Methoden, sondern eher um bereits angewandte reife Technologien, die aber im Hinblick auf den Klimawandel und damit einhergehenden Marktpotentiale verändert wurden, wie z.B. „inkrementelle“ Verbesserungen von etablierten Maßnahmen aus dem Bereich Katastrophenschutz. Letztendlich geht es darum, den Faktor Klimawandel in herkömmlichen Kontexten und bei bereits etablierten Routinen mitzudenken. Besondere Beachtung verdient allerdings die mögliche Akkumulation von Gefährdungslagen. So könnten Hochwasserereignisse, welche in Verbindung mit extremen Stürmen auftreten, Notmaßnahmen erschweren, weil die Infrastruktur gewissermaßen von mehreren Seiten belastet wird. Daneben müssen die gesetzlichen Rahmenbedingungen mit den erhöhten Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt von Extremereignissen Schritt halten, z.B. Bauverbote in Überflutungsgebieten, Anpassung von Bauvorschriften in Bezug auf erhöhte Windlasten.

Technologien, die verlässliche Prognosen über regionale Auswirkungen des Klimawandels liefern, sind ebenfalls wichtig; das gilt besonders für die Landwirtschaft. EDV-gestützte Entscheidungsunterstützungssysteme helfen der Land- und Forstwirtschaft, sich besser auf den Klimawandel einzustellen. Darüber hinaus wird im Bereich Landwirtschaft an der Stresstoleranz von Pflanzen oder an Bewässerungsstrategien gearbeitet. Ganz unterschiedliche „Bodenhilfsstoffe“ zur Steigerung der Wasserspeicherkapazität sind bereits auf dem Markt. Angesichts global wachsenden Wohlstands, wachsender Weltbevölkerung und der zunehmenden stofflichen und energetischen Nutzung landwirtschaftlicher Produkte kann die große Bedeutung einer effizienten und stabilen Landwirtschaft gar nicht überschätzt werden. Andere Entwicklungslinien und Vorhaben beschäftigen sich direkt mit dem Schutz der menschlichen Gesundheit unter geänderten klimatischen Rahmenbedingungen (z.B. die Projekte SAFE und KLIMES der klimazwei-Initiative des BMBF). In Erwartung zunehmender Hochwasserereignisse und steigender Meeresspiegel kommt dem Bereich Hochwasser- und Küstenmanagement große Bedeutung zu.

## **2.5 Zahlreiche klimarelevante Forschungsaktivitäten in Deutschland**

Ebenso vielfältig wie die im Handlungsfeld Klimaschutz eingesetzten und in Entwicklung befindlichen Technologien sind auch die in diesem Feld aktiven Akteure und ihre Motivationen. Umweltverbände nehmen sich des Themas an, aber auch die Industrie hat die Bedeutung von Klimaschutz und Effizienzsteigerungen erkannt. Im Bereich Klimapolitik gelten Deutschland und auch die EU als globale Vorreiter. In der EU und in Deutschland finden sich dementsprechend inzwischen zahlreiche politische Anreizsysteme sowie ein breites Portfolio an Förderprogrammen und -initiativen: Exemplarisch seien an dieser Stelle das inhaltlich sehr breit angelegte BMBF-Programm „klimazwei“, das sowohl den Bereich Mitigation als auch die Adaption umfasst; die Vorhaben COORETEC und GEOTECHNOLOGIEN, die sich mit einer effizienten Energieumwandlung bzw. der Abspaltung und Einlagerung von CO<sub>2</sub> beschäftigen; sowie die im Rahmen der „Hightech-Strategie“ gegründeten Innovationsallianzen mit Wirtschaft und Wissenschaft genannt (BMBF 2007b). Äußerst vielfältig sind auch die zahlreichen Forschungs- und Anreizprogramme in den Bundesländern, dazu finden sich oft auch auf kommunaler Ebene nochmals eigene Initiativen und Ansätze.

## 2.6 Fazit

Im Bereich Klimaschutz geht ein hoher Problemdruck mit einem hohen Forschungsbedarf einher. Innovationen und technische Durchbrüche sind in vielen Bereichen entscheidend, aber auch regulativen und konzeptionellen Ansätzen kommt generell eine große Bedeutung zu. Gleichzeitig sind breit angelegte und vielfältige Forschungs- und Demonstrationsaktivitäten zu beobachten. Deutschland ist im Bereich Klimaschutz in vielfacher Hinsicht sehr aktiv. Klimawandel kann und wird dabei durchaus auch als wirtschaftliche Chance wahrgenommen. Verschiedene Bereiche zeigen große Exportpotentiale.

Entscheidend für den Erfolg beim Klimaschutz sind mittelfristig Innovationen im Bereich Energieeffizienz (bei der Energiewandlung, im industriellen sowie im Gebäudebereich), die Erforschung der CCS-Technologie sowie eventuelle Erfolge bei der Reduktion von Methan- und Lachgasemissionen. Die globalen Potentiale der Forstwirtschaft erscheinen im Hinblick auf eine Abschwächung des Klimawandels und seiner Folgen nicht gänzlich ausgeleuchtet. Gerade die Wechselwirkungen zwischen einer Klima-, Boden- und Wasserhaushaltstabilisierenden Forstwirtschaft und der klimasensiblen Landwirtschaft verdienen weitere Beachtung – auch wenn in diesem Sektor Hightech-Anwendungen auf den ersten Blick keine Schlüsselrolle zuzukommen scheint. Zudem bedarf die Aufbereitung von Möglichkeiten einer effektiven Anpassung an den Klimawandel größerer Beachtung.

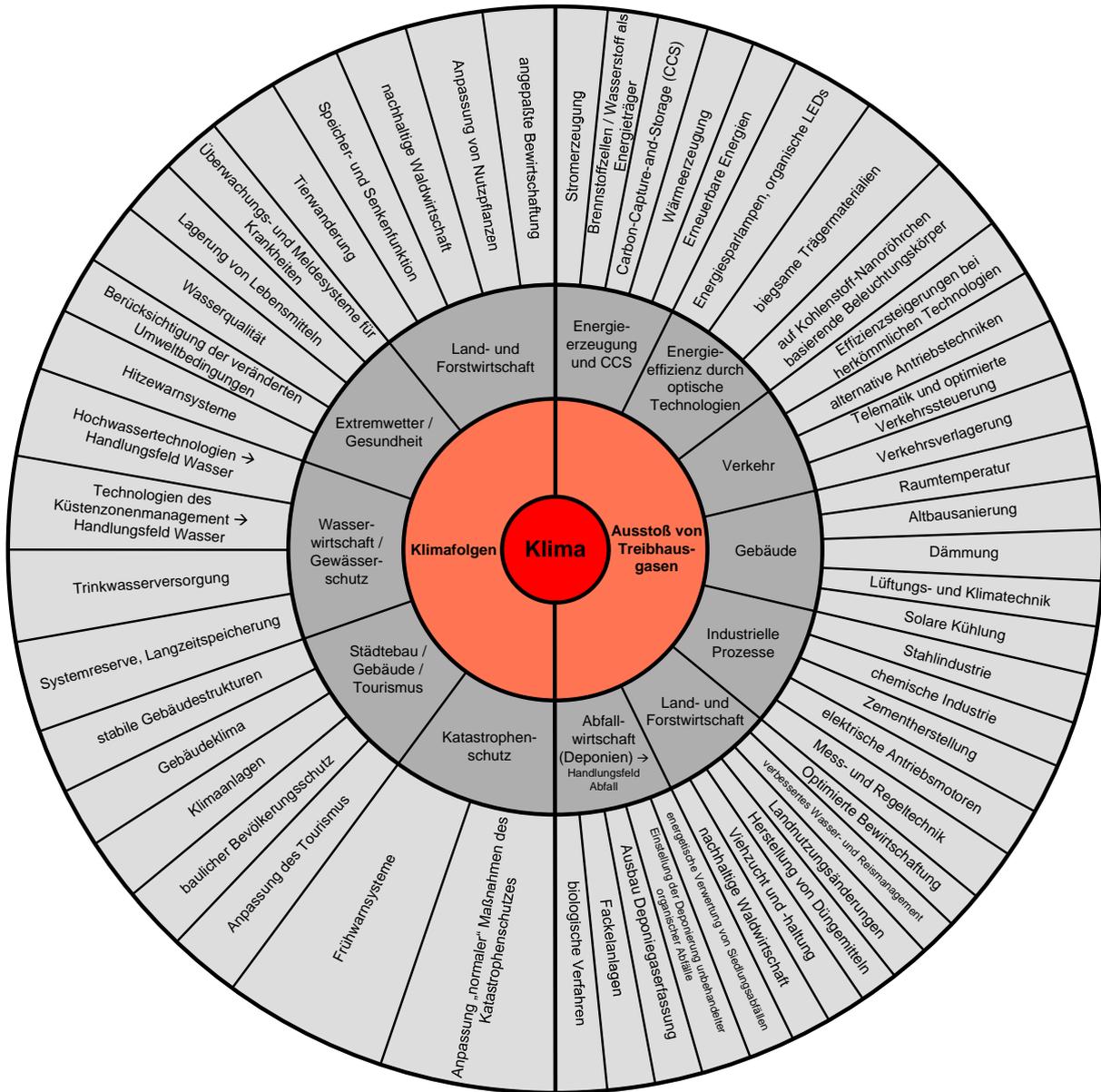


Abbildung 1: Technologiekompass zum Handlungsfeld Klimaschutz

# 3 Luftreinhaltung

## 3.1 Luftverunreinigung, ein weltweit ungelöstes Problem

Schwerpunkte der anthropogenen Luftschadstoff-Emissionen sind, wie bei Klimagasemissionen, die Energieerzeugung und -umwandlung. Die Minderungsmöglichkeiten in diesem Bereich auszuloten ist bereits ein Schwerpunkt von Forschung und Entwicklung, aber nicht Gegenstand dieser Studie. Im Mittelpunkt stehen die nichtenergetischen Emissionsschwerpunkte: Industrieproduktion, einschließlich des Umschlags staubender Güter, die Nutzung lösemittelhaltiger Produkte und die Landwirtschaft.

In West- und Mitteleuropa konnten in den letzten Jahrzehnten die Luftverunreinigungen erheblich gesenkt werden. Dennoch lassen die Prognosen bis 2010 vermuten, dass die Mehrzahl der EU-Länder die Vorgaben der NEC (National Emission Ceilings)-Richtlinie 2010 für Stickstoffoxid( $\text{NO}_x$ )-Emissionen nicht einhalten werden. Deutschland wird ebenso die festgesetzten Ammoniak( $\text{NH}_3$ )-Emissionen überschreiten und das Emissionslimit der flüchtigen Kohlenwasserstoffe ohne Methan (NMVOC) nur dann einhalten, wenn alle geplanten Maßnahmen ihre volle Wirkung entfalten und durch wirtschaftliches Wachstum keine zusätzlichen Emissionen entstehen.

Demnach werden auch in Europa weiterhin die Ökosysteme durch Versauerung und Eutrophierung insbesondere durch Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) geschädigt. Der Mensch leidet unter Partikelemissionen und Ozon, das über Vorläufersubstanzen wie Stickstoffoxide und flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC) gebildet wird. Eine Verkürzung der Lebenszeit, die Bedrohung der gesunden Entwicklung von Kindern (EEA 2007) und bis 2020 geschätzte jährliche Krankheitskosten zwischen 189 und 609 Mrd. € sind die Folge (EU 2005). Insbesondere im Hinblick auf die Definition von Grenzwerten ist die Rolle der Aerosole nicht ausreichend bekannt. Ihre Bildungsmechanismen, die biologische Wirksamkeit, die Dosis-Wirkungsbeziehungen, die Kombinationswirkungen mit anderen Luftschadstoffen, deren Akut- und Langzeitauswirkungen sowie Rahmenbedingungen für eine besondere Gefährdung bedürfen weiterer intensiver Forschung.

Infolge des wirtschaftlichen Aufschwungs und der Zunahme des Verkehrsvolumens – bei geringen Maßnahmen zur Emissionsminderung – nahmen die Emissionen beispielsweise in Osteuropa, im Kaukasus und in Zentralasien seit 2000 um etwa 10% zu (OECD 2007). In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern ist die Situation häufig noch dramatischer. Offene, teilweise nicht gefasste Feuerstellen mit traditionellen Brennstoffen führen zu hoher Innenraumbelastung im häuslichen Bereich und offene bzw. undichte Produktionsstellen zu hohen Arbeitsplatzbelastungen. Der Trend zur Konzentration der Bevölkerung in Millionenstädten mit mangelhafter Infrastruktur potenziert die Probleme in allen Umweltbereichen. Hohe  $\text{SO}_2$ -,  $\text{NO}_x$ - und Partikel-Emissionen werden in solchen Ballungsgebieten vor allem durch den Einsatz schwefelhaltiger Kohle oder Heizöle in Heizungen und Kraftwerken verursacht. Die Belastungssituation verschärft sich in Städten bzw. Regionen mit großem Anteil an emissionsintensiver Industrie (z.B. Eisen- und Stahlproduktion, Zementherstellung) ohne oder mit unzureichender Emissionsminderung.

Wesentliche Voraussetzung für die Einführung wirksamer Technologien zur Luftreinhaltung ist eine angemessen strenge Gesetzgebung sowie die Kontrolle ihres Vollzugs und die Sanktionierung von Verstößen. In vielen Ländern ist die Gesetzgebung noch unsystematisch und in sich nicht konsistent. Für die osteuropäischen Länder, den Kaukasus und Zentralasien (EECCA-Länder) weist die OECD darauf hin, dass zwar die Gesetzgebung zunehmend auf eine breitere Basis gestellt wird, vielfach jedoch eine eindeutige Zielsetzung, ein Finanzplan und Vereinbarungen zur Kontrolle fehlen und damit die Einführung von Minderungsmaßnahmen nur langsam vorankommt. Des Weiteren fordert die OECD eine intensive internationale Zusammenarbeit ein (OECD 2007).

### 3.2 Minderungsstrategien

In Schwellen- und Entwicklungsländern lassen sich häufig mit relativ einfachen Mitteln und vorhandenen Techniken große Minderungspotentiale erschließen. Entscheidend ist eine umfassende Analyse vor Ort und eine an die Situation, die Möglichkeiten und die Bedürfnisse angepasste Beratung zur Optimierung von Produktionsprozessen bis hin zum Einsatz von *End-of-pipe*-Technologien. In Deutschland, bzw. Europa, haben ausgebildete Einheimische einen hohen Stellenwert in der Vermittlung der Denkweise und Philosophie, die hinter den technologischen Prozessen und deren Optimierung stehen, der Umsetzung der Handlungsempfehlungen und der Motivation der Landsleute zu einer anhaltend optimierten Betriebsweise der Anlagen.

Zunehmend werden in besonders belasteten Gebieten die gewachsenen, häufig ineffizienten industriellen Anlagen durch größere modernere Anlagen ersetzt. „Ökologisches *Leapfrogging*“ dürfte hierbei eher die Regel sein, zumal oft der Wunsch besteht, das „Neueste und Modernste“ einzusetzen. Dies eröffnet Marktchancen für Beratung und für weitere angepasste, aufeinander abgestimmte technische Komplettangebote von Produktionsanlagen einschließlich sinnvoller Emissionsminderungstechniken, wie sie auch heute schon vielfach üblich sind.

Grundsätzliche Ansatzpunkte zur Emissionsminderung sind die Modifizierung, Minderung oder Substitution der Produkte, Hilfsmittel und Einsatzstoffe, die für die Emissionen verantwortlich sind. Meist ist die Emissionsminderung jedoch ein Nebeneffekt der Ressourcenschonung, des Bedarfs an neuen Produkten mit veränderten Eigenschaften oder der Kostenreduktion. Sinnvoll erscheint es, Kundenwünsche und Verkaufsstrategien hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Emissionen zu prüfen und die Ergebnisse ins Bewusstsein des Käufers zu rücken. So sind z.B. für die optische „Tiefenwirkung“ des Lacks mancher Pkws Mehrfachlackierungen oder für „standfeste“ Frisuren Haarsprays mit NMVOC-Anteilen bis 98% und mehr erforderlich.

Eine Verminderung des Lösemittleinsatzes und damit der NMVOC-Emission in den vielfältigen Anwendungsbereichen ist das Ziel von Forschung und Entwicklung. Der Ersatz dieser Lösemittel ist derzeit in vielen Einsatzbereichen nur zum Teil oder gar nicht möglich. Zur Vermeidung sind teilweise völlig neue Produkte zu entwickeln (z.B. Lacke für Kfz, Haarspray). Veränderte Produkte erfordern meist neue Produktionsverfahren, ggf. auch neue Recyclingverfahren (z.B. Deinkingprozess für wasserlösliche Farben). Ebenso ist der Produktionsablauf anzupassen und eine entsprechende Schulung des Personals erforderlich (Ökopol 2008).

Umweltschutz mittels technischer Veränderungen bereits in den Produktionsablauf zu integrieren erfordert eine enge Zusammenarbeit von Grundlagenforschung, Angewandter Forschung und Praxis, die in Deutschland ein hohes Niveau erreicht hat. Daher werden auf diesem Gebiet deutschen Unternehmen auch sehr gute internationale Marktchancen eingeräumt (NIW/ZEW/ISI 2007). Der Umweltschutz ist auch hier häufig ein Nebeneffekt der Optimierung des Produktionsprozesses und des Ressourceneinsatzes. So mindert beispielsweise die Weiterverwendung heißer Abgase den Energieverbrauch aber auch die zu reinigende Abgasmenge und ggf. die Emissionen. Eine Heißgasfiltration ist die – in vielerlei Hinsicht noch ungelöste – Voraussetzung, um heiße Gase z.B. in einem anderen Prozess mit möglichst geringem Temperaturverlust einsetzen oder direkt auf eine Turbine zur Stromerzeugung leiten zu können.

Neben technischen Maßnahmen wird insbesondere in kleinen Betrieben, und besonders hinsichtlich der NMVOC-Emissionen, den organisatorischen Maßnahmen und einfachen Techniken ein hohes Minderungspotential zugeschrieben. Neben Schulungsmaßnahmen ist eine anhaltende Motivation der Beteiligten hierzu wichtig.

Große Probleme bereitet die Minderung der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft. Änderungen in der Betriebsführung der Tierhaltung, sowie durch Einsatz von Mess-, Regel- und Steuerungstechnik in der Bodenbearbeitung sind Ansatzpunkte, die Emissionen der Landwirtschaft zu mindern. Bisher sind massive Minderungen nicht erreicht worden. Weltweit verschärft sich die Situation durch Veränderung der Essgewohnheiten mit steigendem Wohlstand, z.B. durch zunehmenden Fleischkonsum mit dem hieraus folgenden erhöhten Einsatz an Wirtschaftsdünger und durch Veränderung der Landnutzung zur Viehfuttererzeugung.

In den Industrieländern hat die additive Abluftreinigungstechnik im industriellen Bereich meist einen sehr hohen Standard erreicht. Für einen möglichst effizienten Einsatz sind auch die Möglichkeiten integrierter Maßnahmen (z.B. Abgasrückführung, Wärmerückgewinnung, Aufkonzentrieren der Schadstoffe) zu berücksichtigen. Dies wird in der Praxis nicht immer ausreichend beachtet. Andererseits überlässt ein hohes Maß an integrierten Maßnahmen den additiven Techniken verstärkt Problemfälle, die mit den vorhandenen Technologien nur schwer zu lösen sind. Die Entwicklung grundlegend neuer Techniken wird trotzdem nicht erwartet. Die Übertragung neuer Entwicklungen im Bereich der Querschnittstechnologien könnte allerdings Problemlösungen bereithalten (z.B. neue Katalysatoren). Darüber hinaus fordert der Markt einfachere, kostengünstigere und ggf. auch vielseitigere Techniken zur Luftreinhaltung.

### 3.3 Querschnittstechnologien

Querschnitts- bzw. Schlüsseltechnologien tragen in zunehmendem Maße zur Vermeidung, Verminderung und Beseitigung von Luftschadstoffen bei:

- Entwicklungen in der Biotechnologie und Bionik mindern die Luftschadstoffemissionen durch Verminderung des Bedarfs an emissionsrelevanten Produkten, Einsatz- oder Hilfsstoffen (z.B. Antifoulingbeschichtung von Schiffsrümpfen nach dem Vorbild der Haifischhaut, mikrobielle Oberflächenentfettung in der Feuerverzinkung) und durch

neue Technologien, die eine geringere oder leichter zu mindernde Luftschadstoffbelastung bewirken.

Biofilter bieten sich in der additiven Abluftreinigung bei geringen Konzentrationen organischer Substanzen an. Die Messung und Regelung einer gleichmäßigen Feuchte sowie in einer geeigneten, feuchtigkeitstoleranten und preisgünstigen Abgasmessung könnte die Betriebssicherheit und den Wirkungsgrad erhöhen.

- Nanotechnologien mindern Emissionen über den Effekt der Ressourcenschonung, durch Veränderungen von Produktionsprozessen (z.B. ökoeffiziente Nanolacke), durch additive Luftreinigungsmaßnahmen (z.B. als Katalysatorbeschichtung) sowie durch vielfältige Anwendungen in der Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Für nanotechnologische Anwendungen im Umweltbereich werden sehr hohe Wachstumsraten prognostiziert. Ihnen wird zudem das Potential eingeräumt, herkömmliche Verfahren zu verdrängen.
- Mess-, Steuer- und Regeltechniken werden stark durch die Entwicklung der Mikro- und Nanotechnologie, und diese wiederum durch die optischen Produktions- und Messverfahren, beeinflusst. Die Massenproduktion preiswerter Sensoren (z.B. durch die Drucktechnik) könnte Messaufgaben realisieren, die heute (aus Kostengründen) noch nicht lösbar sind. Sehr vielfältige Anwendungsmöglichkeiten lassen hohe Wachstumsraten erwarten.

Für den sinnvollen Einsatz neuer Techniken zur Emissionsminderung ist es wesentlich, den gesamten Produktzyklus vom Anbau, bzw. von der Herstellung, über die Nutzung (z.B. Abrieb von Nanopartikeln) bis hin zur Entsorgung oder zum Recycling hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Natur und den Menschen zu bewerten.

### 3.4 Fazit

Luftschadstoffemissionen standen in den vergangenen Jahren in Deutschland bzw. Europa stark im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit von Politik und Öffentlichkeit. Forschung und zahlreiche Entwicklungen tragen zum heute hohen technischen Standard insbesondere der Abluft- und Abgasreinigung bei. In zunehmendem Maße verlagern sich Maßnahmen zur Emissionsminderung in die Produktionsprozesse, häufig im Zuge einer ökonomischen und ökologischen Gesamtoptimierung der Prozesse. Für diesen integrierten Ansatz bietet in Deutschland die intensive Zusammenarbeit zwischen Grundlagenforschung, angewandter Forschung und Praxis eine gute Ausgangsposition.

Die optimale Auswahl und Umsetzung der vorhandenen Techniken und des Wissens erfordert eine gute fachspezifische Beratung, Auslegung und Einbindung in den Betrieb. Vorwiegend Klein- und Mittelbetriebe bedürfen der Unterstützung, dies auch im Hinblick auf die Realisierung von Möglichkeiten der Emissionsminderung durch einfache Techniken und organisatorische Maßnahmen.

Additive Technologien werden vorwiegend in kleinen oder mittelständischen, meist auf eine Technik spezialisierten, Betrieben (weiter)entwickelt. Innovative Betriebe in diesem Bereich verfügen über erhebliches Know-how, sind jedoch für umfassende Neu- oder Weiterentwicklungen – wie sie z.B. zum Thema Heißgasfiltration erforderlich wären – weder personell noch finanziell ausgestattet. Eine längerfristige Förderung zu einzelnen Fragestellungen einschließlich der ersten Umsetzung erscheint sinnvoll.

Über die gezielte Entwicklung emissionsmindernder Techniken hinaus werden weitere Fortschritte durch die Umsetzungen neuer Entwicklungen im Bereich der Querschnittstechnologien erwartet. Eine Modifizierung, Minderung oder Substitution von Produkten, Hilfsstoffen und Einsatzstoffen erfolgt häufig unter dem Aspekt der Rohstoffeinsparung. Zur Beurteilung der Wirksamkeit dieser Maßnahmen sollte in weitaus stärkerem Maße eine Gesamtbilanz der Emissionen berücksichtigt werden.

Wesentliche Grundlage für den Export luftschadstoffmindernder Technologien ist eine entsprechende Gesetzgebung im Zielland, verbunden mit systematischen Kontrollen und Sanktionen. In Schwellen- und Entwicklungsländern können im Bereich der vorhandenen Produktionstechniken häufig einfache technische Lösungen oder organisatorische Maßnahmen zur Minderung der Emissionen führen, welche jedoch ein hohes Maß an Überzeugungsarbeit und Beratung vor Ort erfordern. Im Zuge der Erneuerung technischer Anlagen in Schwellen- und Entwicklungsländern, die meist mit dem Wunsch nach neuestem technischem Standard verbunden ist, können Systemlösungen den Emissionsminderungsaspekt integrieren. Eine wichtige Rolle für die erfolgreiche Implementation solcher Lösungen spielen in Deutschland bzw. in der EU ausgebildete einheimische Fachleute, die sowohl die Technik beherrschen als auch die Randbedingungen in ihrem Heimatland berücksichtigen können.



## 4 Wasserschutz

Weltweit tragen Verschmutzung, übermäßiger Verbrauch oder schlechtes Management zum Rückgang der Qualität und Verfügbarkeit von Wasser bei. Auf den ersten Blick wirkt es paradox: Über eine Milliarde Menschen haben zu wenig oder kein sauberes Trinkwasser, obwohl drei Viertel der Oberfläche unseres Planeten mit Wasser bedeckt sind. Allerdings bestehen nur 2,6% dieser Menge aus nutzbarem Süßwasser. Etwa ein Fünftel der Menschheit ist heute ohne Zugang zu sauberem Trinkwasser. 2,5 Milliarden Menschen sind nicht an ausreichende Sanitärsysteme angeschlossen. So verfügt beispielsweise ein Großteil der chinesischen Städte nicht über Kläranlagen; in den ländlichen Regionen findet praktisch keine Abwasserbehandlung statt. Die Versorgung aller Menschen mit sauberem Trinkwasser und die Entsorgung von Abwässern weltweit gehören zu den zentralen Herausforderungen internationaler Umwelt- und Entwicklungspolitik. Die Herausforderung ist umso größer, als sich infolge des Klimawandels Extremsituationen wie Überflutungen und Dürren häufen werden.

Darüber hinaus sind ausreichende und saubere Wasservorkommen lebenswichtig für die Erhaltung der Ökosysteme, der Arten und der genetischen Vielfalt. Um diese Probleme anzugehen, ist eine nachhaltige Wasserwirtschaft dringend erforderlich. Nachhaltige Wasserwirtschaft bezeichnet die integrierte Bewirtschaftung aller künstlichen und natürlichen Wasserkreisläufe unter Beachtung eines langfristigen Schutzes von Wasser als Lebensraum bzw. als zentrales Element von Lebensräumen. Zudem geht es um eine Sicherung von Wasser in seinen verschiedenen Facetten als Ressource für jetzige wie für nachfolgende Generationen, wie auch um die Erschließung von Optionen für eine dauerhafte, naturverträgliche, wirtschaftliche und soziale Entwicklung.

### 4.1 Wassergewinnung

Der Bereich der Wassergewinnung steht weltweit vor enormen Herausforderungen: Veraltete Infrastrukturen machen die Wassergewinnung anfällig für Schadstoffe und Krankheitserreger, weltweit gesehen sinkt die Verfügbarkeit von hochwertigen, leicht aufzubereitenden Wasserressourcen. Die Gewinnung von Wasser zur Nutzung als Trinkwasser, Brauch- und Prozesswasser erfolgt i.d.R. durch die Entnahme von Grundwasser und von Oberflächenwasser aus Flüssen, Seen und Talsperren. Eine zunehmende Nachfrage wird es nach innovativen Technologien zur Wasserfindung, Brunnenbohr- und -ausbautechniken geben. Im Rahmen der Wassergewinnung spielen zudem Technologien zur Anreicherung von Grundwasser wie Versickerungsbrunnen, -gräben oder -becken eine bedeutende Rolle. Die Nutzung von Regenwasser und damit das Regenwassermanagement (Dezentrale Regenwasser-Bewirtschaftungs-Systeme (DRB-Systeme)) sind vorwiegend im Zusammenhang mit der später beschriebenen dezentralen Wasserversorgung aktuell und werden durch die zunehmende Anzahl von Starkregenereignissen durch den Klimawandel immer interessanter (fbr 2007). Die Idee, Regenwasser in Reservoirs zu sammeln und in Trockenperioden zu verwenden, ist so alt wie die menschliche Kultur. Die Regenwassernutzung spart Oberflächen- und Grundwasser und trägt gleichzeitig zur Verringerung des schnellen Oberflächenabflusses bei, was bei flächendeckender Anwendung die Hochwasserge-

fahr deutlich reduzieren würde. Die moderne Gewinnung von Regenwasser erfolgt mittels Regenwassernutzungsanlagen. Dabei wird in erster Linie der Abfluss von Dachflächen genutzt. Relevante Technikteile sind Sammel-/Speicherbehälter, Filter (Nanofilter, Verbesserung der mechanischen Filtration durch technologische Innovationen), Pumpen, Leitungen und Mess-, Regel- und Steuertechnologien. Hinzu kommen mannigfache Funktionskombinationen zur Versickerung von Regenwasser, welches von versiegelten Flächen (z.B. Parkplätze) abfließt. Je nach den verfügbaren Flächen, der Durchlässigkeit des Untergrundes und der Grundwasserverhältnisse ist die jeweilige optimale Versickerungsmethode auszuwählen. Zur Auswahl stehen Flächenversickerung, Muldenversickerung, Schachtversickerung, Mulden-Rigolen-Systeme und die Rohrversickerung. Bei Technologien zur Nutzung und Versickerung von Regenwasser ist Deutschland führend. Aufgrund der immer weiter zunehmenden Bedeutung der Verfügbarkeit von hochwertigen, leicht aufzubereitenden Wasserressourcen ist das Wachstumspotential in den oben genannten Bereichen der Wassergewinnung als sehr hoch einzustufen. Technologien im Bereich der Wassergewinnung werden zudem in Verbindung mit modernen Technologien zur Wasseraufbereitung nachgefragt werden.

## 4.2 Wasseraufbereitung

Die Technologien der Wasseraufbereitung dienen der Anpassung von Rohwasser an die Anforderungen der Trinkwasser- oder Nutzwassernutzung. Das Rohwasser aus Quell-, Grund-, Tal-sperren- oder Oberflächenwasser wird mittels mechanischer, physikalischer, chemischer und/oder biologischer Verfahrensweisen behandelt und so dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst. Die Wasseraufbereitung umfasst im Wesentlichen zwei Gruppen der Behandlung:

1. Entfernung von Stoffen aus dem Wasser, z.B. Entfernung von Arsen durch Adsorptionsverfahren, Entfernung von Partikeln bspw. durch Sedimentation, Filtration oder Flockung/Fällung, Desinfektion durch z.B. UV-Bestrahlung, Elektrolyse, Ozonierung, mikrobiozide Kontakt-Desinfektion oder solare Wasserdesinfektion, Enteisenung, Entmanganung, Entsäuerung mittels Belüftung, Verdüsung, Verrieselung usw., Enthärtung z.B. durch Ionenaustauscher, Umkehrosmose oder als chemische Lösung der Einsatz von Kalkmilch und Kalkwasser aus Branntkalk und Entsalzung
2. Ergänzung von Stoffen sowie das Einstellen von Wasserparametern, z.B. Einstellen von pH-Wert, gelösten Ionen und der Leitfähigkeit.

Der Trend, insbesondere in der industriellen Wasseraufbereitung, geht weg von der chemischen hin zur physikalischen/mechanischen Aufbereitung (ChemIng 2007). Chemikalienunabhängige Verfahren wie die Membranfiltration gewinnen daher an Bedeutung. Infolge von Naturkatastrophen und Unfällen kommt es häufig zur Verseuchung von Trinkwasser. Daher müssen ebenso für den Katastrophenschutz entsprechende Aufbereitungstechnologien wie mobile Membranmodule zur Aufbereitung und Entkeimung zur Verfügung stehen. Eine weltweit einzigartige Anlage zur mobilen Desinfektion nutzt als verfahrenstechnischen Kern die Nano-Membranfiltration in Verbindung mit einer vorgeschalteten Grobstoffabtrennung (InnoRep 2006b). Die mobile Aufbereitungstechnologie wird im Blick auf zunehmende Extremwetterereignisse durch den Klimawandel gefragt sein; es wird möglicherweise zu einer progressiven Marktentwicklung in diesem

Sektor kommen. In Entwicklungsländern ist eine zentrale Aufbereitung in ländlichen Regionen oft nicht durchführbar und es sind zuverlässige Kleinsysteme erforderlich. Ferner steht für die Reinigung von Grundwässern ein breites Portfolio an Aufbereitungstechnologien wie das Pump&Treat-Verfahren, In-Situ-Flushing, In-Situ chemische Oxidation, thermisch unterstützte Verfahren und permeable reaktive Barrieren (u.a. in Kopinke et al. 2003) zur Verfügung, um nur einige wenige Beispiele zu nennen.

### 4.3 Senkung des Wasserverbrauchs und der Abwasserproduktion

Eine Möglichkeit, das vorhandene Wasserdargebot zu schonen, besteht in der Senkung des Frischwasserverbrauchs. Neben wassersparenden Geräten und Technologien (wasserarme Haushaltsgeräte und Sanitäreinrichtungen mit z.B. Spartasten, Perlatoren, Sparstopps bei Duschen) sind aktuell und künftig vor allem effizientere Techniken in der Bewässerungswirtschaft, die sich durch einen möglichst hohen Wassernutzungsgrad auszeichnen, und die Wiederverwendung von Wasser als Brauch-/Prozesswasser oder Kreislaufführung in der Industrie, wesentlich. Innovativ für den Haushaltsbereich sind z.B. wasserlose Urinale, die dank einer speziellen Oberflächentechnik und eines Geruchsverschlusses ohne Spülwasser auskommen (Hiesl 2005). Ein geringerer Wasserverbrauch auf Haushaltsebene muss jedoch, zumindest in zentralen Leitungssystemen, gegen dadurch entstehende längere Verweilzeiten des Wassers in den Zuleitungen abgewogen werden, die wiederum eine erhöhte Zugabe von (umweltschädlichen) Desinfektionsmitteln erfordern könnten. Hohes Einsparpotential bietet primär die „Effiziente Wassernutzung“ in der Landwirtschaft, weil sich weltweit rund 70% der Wassernutzung dem Sektor Landwirtschaft zuordnen lassen. Da künftig mit einem steigenden Lebensmittel- und damit steigendem Wasserbedarf zu rechnen ist, müssen die Möglichkeiten innovativer Bewässerungstechniken viel stärker genutzt werden. Immer wieder taucht in den Medien lediglich Israel als *der* Hersteller bzw. Exporteur von Bewässerungstechnologien auf. In diesen Sektor sollte die deutsche Industrie durch neue, innovative Entwicklungen vorstoßen, z.B. in den Querschnittsbereich der Steuerelektronik, und die „auf der Straße liegenden“, vorhandenen Potentiale nutzen.

Da indirekt durch den schlechten Zustand der Wasserver- und Abwasserentsorgungsnetze rund 50% des gefassten Wassers verloren gehen, sind Technologien zur Detektion von Rohrschäden, zur Zustandsbewertung, Instandhaltung und Sanierung von Wassernetzen, insbesondere in der Abwasserkanalisation und von Wasserreservoirs, wesentlich. In der Rohrnetzüberwachung und Früherkennung von Leckagen kommen spezielle Softwareentwicklungen (InnoRep 2006a), Durchfluss- und Druckmesser/-sonden/-sensoren, sensorbasierte Rohrinspektions- und Geräuschloggersysteme zum Einsatz. Im Leckagemanagement wird ebenfalls die elektronische Fernablesung getestet. Bei der Rohrreparatur ist die gängige Methode die Rohr-in-Rohr-Technik. Die grabenlose Sanierung im laufenden Betrieb und spätere In-Situ-Überwachung sind zukunftsweisend. Neue Methoden sind daneben z.B. das Aufsprühen einer Spezialbeschichtung (Bayer 2007) und das so genannte Flutungsverfahren. Erwartet werden im Bereich „Rohre und Leitungen“ Innovationen bei den eingesetzten Materialien und der Lebensdauer. Aufgrund der weltweit hohen Verluste in öffentlichen Versorgungsnetzen besteht eine hohe Nachfrage nach Beratungs- und Planungsdienstleistungen in Verbindung mit Produktlieferungen von Technologien zur Inspektion, Überwachung und Sanierung.

Um ausreichend Wasser zu Trink-, Brauch- und Prozesswasserzwecken verfügbar zu machen, sind ebenfalls so genannte Entsalzungstechnologien wichtig. Hauptsächlich in Regionen mit Süßwassermangel sind oft große Salzwasservorräte vorhanden. Die konventionellen Verfahren zur Meerwasserentsalzung mit der weitesten Verbreitung sind die Destillation, insbesondere die Mehrstufenverdampfung (MSF – *multistage flash evaporation*) und Multi-Effekt-Destillation (MED – *multiple effect distillation*), und die Umkehrosmose. Beide Verfahren sind aber energieintensiv, teuer und können aufgrund ihres hohen Energiebedarfs nicht in jedem Fall als nachhaltig bezeichnet werden. Deswegen bestehen künftig Herausforderungen in innovativen Lösungen zur Senkung des Energiebedarfs und der Erhöhung von Betriebssicherheit und Anlagenverfügbarkeit. Den Energiebedarf und den Energieträger betreffend, richtet sich die derzeitige Entwicklung stark auf Systeme, die mit erneuerbaren Energien wie Sonnen- („*solar stills*“) und Windenergie betrieben werden können. Eine auf der Insel Rügen getestete windkraftbetriebe Anlage zur Entsalzung von Meerwasser steht vor ihrer Markteinführung (ad hoc-news 2007). Die zurzeit im Test befindlichen Anlagen sind aber strategisch noch nicht dazu geeignet, die Kosten der Meerwasserentsalzung maßgeblich zu senken. In diesem Bereich sind zeitnah Forschungsvorhaben voranzutreiben und zu initiieren. Eine zusätzliche Herausforderung bei der Entsalzungstechnik stellt die Entwicklung von dezentralen, wartungsarmen, leistungsfähigen, aber preisgünstigen Kleinanlagen dar (DME 2007). Wichtig sind ebenfalls mobile Brackwasser-, bzw. Meerwasserentsalzungsanlagen, die in Katastrophenfällen zur Notwasserversorgung eingesetzt werden können (Elga 2007).

Um als Trinkwasserressource die bisher nahezu ungenutzte Quelle „Luftfeuchtigkeit der Atmosphäre“ zu nutzen, wurden und werden Technologien entwickelt, die die in der Erdatmosphäre gebundene Luftfeuchtigkeit mittels Kondensation erschließen (InnoRep 2005; UniBremen 2007). Diese Technik ist überwiegend für Trockenregionen geeignet, die nicht in erreichbarer Nähe einer Küste liegen und wo es sich deshalb nicht lohnt entsalztes Meerwasser heranzutransportieren. Zu bedenken und zu erforschen sind aber die Auswirkungen der Entnahme der Luftfeuchtigkeit auf die hinter dieser Entnahmezone liegenden Ökosysteme. Als „no-tech“-Variante kann ebenfalls aufsteigender Nebel genutzt werden.

Neuartige Konzepte einer ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltigen Abwasserwirtschaft beruhen auf einer ganzheitlichen Betrachtung der gekoppelten Stoffströme. Bei den modernen Konzepten einer stoffstrom- und kreislauforientierten Abwasserwirtschaft wird nicht eine bestimmte Technologie favorisiert, sondern die Konzepte repräsentieren eine neue Philosophie im Umgang mit Stoffen, die in der Vergangenheit als zu beseitigende Abwässer betrachtet wurden. Die neuen Vorstellungen betrachten Abwasser als Rohstoff. Sie zielen somit auf die systematische Schließung lokaler Stoffkreisläufe und ermöglichen letztlich Kreislaufwirtschaftssysteme, wie sie im Bereich der festen Abfälle bereits weit verbreitet sind (siehe Kapitel 7). Im Idealfall ermöglichen derartige Systeme eine nahezu vollständige Rückgewinnung aller in häuslichen, gewerblichen und industriellen Abwässern enthaltenen Nährstoffe, organischen Stoffe und Spurenelemente sowie deren Nutzbarmachung z.B. in der Landwirtschaft oder direkt im Produktionsprozess. Dies wird im Haushalt und Gewerbe bspw. durch getrennte Sammlung und Behandlung von Grauwasser, Gelb-/Braunwasser bzw. Schwarzwasser realisiert. Im Rahmen einer dezentralen Abwasserbehandlung und -aufbereitung werden in erster Linie Kleinkläranlagen,

wie z.B. Pflanzenkläranlagen, an Bedeutung gewinnen. In der Industrie wird derzeit vor allem das Ziel der Null-Abwasser-Produktion verfolgt. In industriellen Prozessen gibt es verschiedenste Möglichkeiten produktionsintegrierter Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserverbrauchs, zum Recycling von Prozesswässern und zur Kreislaufführung, vor allem von Wasch- und Spülwässern, zum Beispiel mittels geeigneter Verfahren wie Kaskadenspülung und Kreislaufspültechnik mittels Ionenaustauscher. Bei der Behandlung und dem Recycling von Prozesswässern kommen die Verfahren der Membrantechnologie, Umkehrosmose, Nano-, Ultra- und Mikrofiltration zum Einsatz. In der deutschen und europäischen Wasserwirtschaft haben dezentrale, stoffstromtrennungs- und kreislaufwirtschaftsorientierte Konzepte allerdings bislang nur eine untergeordnete Bedeutung. Dies stellt eines der größten Hemmnisse für die Wirtschaft bei der Entwicklung und Vermarktung neuer Konzepte und Technologien dar, da im heimischen Markt nur geringe Anreize für Innovationen entstehen und für die Vermarktung in andere Länder entsprechende Referenzprojekte fehlen.

Darüber hinaus werden über Abwässer große Mengen ungenutzter Wärmeenergie in die Kanalisation oder einen Vorfluter abgeleitet. Während die Wärmerückgewinnung bei Abwasser im industriellen Bereich bereits zum Einsatz kommt, ist das Abwasser der öffentlichen Kanalisation gegenwärtig eine bisher ungenutzte Energiequelle (InnoRep 2004). Mittels Wärmeaustauschern kann Energie aus Abwasser gewonnen werden (auch aus Kühlwasser). Wärmepumpen ermöglichen es, die Energie aus Abwasser für die Raumheizung und Wasserbereitung nutzbar zu machen und sie können zur Leistungssteigerung mit Heizkesseln oder Blockheizkraftwerken gekoppelt werden. Ein aktuelles und innovatives Forschungsprojekt im Bereich der Energierückgewinnung aus Abwasser ist die Entwicklung einer Wärmetauscherplatte (*Heatliner*) zum Einbau in Abwasserkanäle im Zuge einer Nachrüstung oder Innenrohrsanierung. Im Bereich der Wärmerückgewinnung aus Abwässern der öffentlichen Kanalisation besteht durchaus noch Forschungsbedarf sowie die Notwendigkeit, Technologien weiter zu entwickeln.

#### 4.4 Gewässer- und Meeresschutz

Ein weiteres Zukunftsthema dürften Aquakulturen sein. Es besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass die Fangmenge aus den Weltmeeren sich trotz der größten Anstrengungen nicht mehr weiter steigern lässt und in Zukunft mit rückläufigen Ernteerträgen gerechnet werden muss. Daneben hat sich die qualitative Zusammensetzung des Fanggutes beträchtlich verändert. Angesichts dieser Entwicklung überrascht es kaum, dass Aquakulturen einen regelrechten Boom erleben. Allerdings ist die herkömmliche Aquakultur in offenen Käfigen („*offshore farming*“) vor den Küsten oder in Becken bereits an ökologische Grenzen gestoßen. Die bislang eingesetzten marinen Aquakulturen werden aufgrund der Umweltbelastung sehr negativ beurteilt. Eine mögliche Lösung wäre, sie im offenen Ozean weiter entfernt von den Küstenbereichen zu betreiben, eine so genannte „*Open Ocean Aquaculture*“. Durch die Verlegung in küstenferne Gewässer können aber andere, neue Probleme entstehen. Deswegen bieten landgestützte Aquakultur-Anlagen nachhaltige Lösungen, die unter Verwendung von Kreislauftechniken für die Aufbereitung und Wiederverwendung des Wassers eine Verschmutzung der Küstengewässer weitgehend ausschließen und den Landschaftsverbrauch verringern. Die in Deutschland verwendete Technik ist bisher jedoch nur bedingt für den Einsatz in anderen Klimazonen geeignet.

Für den Export sind jedoch meist keine neuartigen Funktionsprinzipien, sondern vielmehr einfache, robuste Anlagen statt hochkomplexe und im Betrieb anfällige Technik gefordert. Konkrete Lösungswege führen über die Fortentwicklung und Anpassung von Kreislauftechnologien, die es in Deutschland in Grundzügen durchaus schon gibt. Weltweit erfahren Aquakulturen derzeit einen langfristigen Wachstumstrend. Sie sind ein schnellwachsendes Segment der Lebensmittelindustrie. Der derzeitige Umsatz in Deutschland bietet noch einiges an ausbaufähigem Entwicklungspotential, welches konsequenter von deutschen Unternehmen auszuschöpfen sein wird.

Einfluss auf die Qualität des Meerwassers sowie Flora und Fauna nimmt außerdem das Ablassen von Ballastwasser von Schiffen. Seeschiffe nutzen zur Stabilisierung der Fahrt Meerwasser, welches je nach Bedarf in dafür vorgesehenen Ballasttanks be- bzw. entladen wird. Mit dem Ballastwasser werden regelmäßig Organismen aufgenommen, die freigesetzt werden, wenn das Ballastwasser abgelassen wird. Mittlerweile haben sich auf diese Weise zahlreiche fremde Arten etwa in der Nord- und Ostsee angesiedelt. Während die Verbreitung nicht heimischer Arten über Ballastwasser seit langem bekannt ist, wurde die globale Verbreitung von Viren und Bakterien auf demselben Weg bislang wenig untersucht. Eine Chance, die Zahl der Organismen im Ballastwasser zu minimieren, wäre der Wasserwechsel auf hoher See. Darüber hinaus werden so genannte Hydrozyklonmechanismen erforscht, die das eingesogene Wasser in Rotation versetzen, so dass sämtliche Teilchen an den Rand geschleudert werden und in der Mitte ein sauberer Wasserstrahl entsteht. Bei Öltankern ist das Ballastwasser außerdem stark ölhaltig und erfordert deshalb notwendigerweise eine Aufbereitung. Parallel werden weltweit eine Vielzahl von Versuchen unternommen, die Organismen gezielt abzutöten: Man arbeitet mit UV-Licht, Ultraschall und Ozonierung des Wassers und erzielt damit bereits recht zufrieden stellende Ergebnisse. Da das 2004 verabschiedete Ballastwasserübereinkommen vorsieht, dass bis 2016 alle großen Schiffe über ein Onboard-Wasseraufbereitungs-System verfügen müssen, tut sich ein neuer Markt für derartige Aufbereitungsanlagen, zumindest bis 2016, auf.

Ein weltweit zunehmend in der Diskussion stehendes Umweltproblem ist die Erwärmung und Versauerung der Meere. Um die schädlichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Weltmeere und damit auf den Menschen und die Meeresumwelt zu verringern und damit die Resilienz des Meeresökosystems zu stärken, sind keine speziellen wassertechnologischen Entwicklungen zielführend und auch nicht zu erwarten. Maßnahmen wie beispielsweise eine großflächige Kalkung der Meere gegen Versauerung sind jedoch sehr kritisch zu sehen. Die Lösungsansätze müssen vor allem aus den anderen Handlungsfeldern als „Vorsorgemaßnahmen“ (z.B. massive Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen) kommen und es werden eher regulatorische Elemente, wie die Einrichtung eines globalen Netzwerkes von Schutzgebieten oder die Bewirtschaftung der Meeresressourcen nach ökosystemaren Ansätzen, elementare Faktoren sein. In diesem Kontext sollte auch die Einbringung von CO<sub>2</sub> in das Meerwasser als CO<sub>2</sub>-Speicherung (Tiefseespeicher) angesichts des Risikos eines langsamen Entweichens des eingelagerten CO<sub>2</sub> und der unbekanntenen ökologischen Folgen kritisch und differenziert durchleuchtet werden. Die interdisziplinäre Forschung ist gefragt, das Verständnis der Zusammenhänge zwischen anthropogenen Störungen, biologischer Vielfalt und Resilienz mariner Ökosysteme zu verbessern, denn die Weltmeere sind in dieser Hinsicht immer noch ein unbekanntes „Wesen“. Ein intensi-

ves Monitoring ist dabei die unbedingte Voraussetzung für die Entwicklung aussagekräftiger Ökosystem-Klima-Modelle.

Im Zeichen des Klimawandels und der in den letzten Jahren gestiegenen Anzahl von Hochwasserereignissen gewinnt ein vorsorgender und sich an die zukünftigen klimatischen Veränderungen dynamisch anpassender Hochwasserschutz immer mehr an Bedeutung. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft sind zwar aller Wahrscheinlichkeit nach räumlich begrenzt, müssen aber in Langfristplanungen berücksichtigt werden. Beim Hochwasserschutz kann es sich um technische Maßnahmen wie Rückhaltebecken, Dämme, Deiche, Schutzmauern, den natürlichen Rückhalt oder Maßnahmen der weitergehenden Vorsorge handeln. Wesentlich aber ist vor allem eine sinnvolle Kombination dieser Maßnahmen (Drei-Säulen-Strategie). Weitergehend kommen im Bereich Hochwasserschutz die Einrichtung von Hochwasserwarnzentralen, die Aufstellung von Notfall- und Katastrophenplänen und ozeanische Frühwarn- und Messsysteme zum Tragen.

#### **4.5 Fazit**

Deutsche Technik ist in allen Branchen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung international präsent. Doch ungeachtet der positiven Umsatzzahlen, des hohen Qualitäts- und Technikstandards und der beachtlichen Exportleistungen ist die deutsche Wasserwirtschaft überwiegend auf den Binnenmarkt konzentriert. Abgesehen von dem ständigen Sanierungsbedarf der Rohrnetze ist der Binnenmarkt aber weitgehend gesättigt.

Gründe der schlechten internationalen Marktöffnung sind das hohe Preisniveau und die ineffizienten Strukturen. Nur wenige Importeure kaufen Technologie „made in Germany“. „Sie sind zwar erstaunt von den hohen Standards, doch importiert werden Produkte der billigeren Konkurrenz aus z.B. Frankreich, Amerika oder Japan (fairs&more 2005). Hinzu kommt u.a. die traditionell eher regionale Ausrichtung der Unternehmen sowie die mittelständische Struktur der Hersteller – im Gegensatz zu Frankreich mit seinen wenigen großen Unternehmen, die erfolgreich vor allem konventionelle, zentralistische Wasser- und Abwasserinfrastrukturen weltweit in die Regionen wirtschaftlicher Entwicklung exportieren. Diese Technologien sind an die dortigen Gegebenheiten häufig jedoch schlecht adaptierbar. In diese Lücke sollte die deutsche Wirtschaft vorstoßen.

Ein weiterer Grund liegt in der immer schlechteren globalen Vermarktbarkeit von Spitzentechnologien ohne Dienstleistungen. Durch Bündelung des technologischen und organisatorischen Know-hows deutscher Anbieter gibt es eine große Chance für die deutsche Wasserwirtschaft, nachhaltige und an die spezifischen Anforderungen angepasste Systemlösungen zu entwickeln und zu vermarkten (Export von Technologien im Verbund mit Dienstleistungen). Anlagenbauer und Fertigungsunternehmen müssen eine Dienstleistungsumgebung liefern, die die Produkte zum einen attraktiver und zum anderen – aufgrund des fehlendes Know-hows und Fachpersonals vor Ort – überhaupt erst einen Verkauf möglich macht. Zukünftig wird demnach der Markt für „Rundum-Sorglos“-Pakete, Konzeptlösungen und integrierte Leistungen, die individuell für jeden Einzelfall zugeschnitten sind, stark ansteigen. Besonders in den schnell wachsenden Stadträumen der so genannten Megacities werden ganzheitliche Lösungen gefragt sein. Für den

Exportserfolg in Entwicklungsländern sind einfache, robuste, wartungsarme und sehr kostengünstige Technologien zu entwickeln.

Generell sind künftig Wasser-Umwelttechnologien essentiell und förderungswürdig, die es erlauben, die Verwendung von umwelt- und gesundheitsschädlichen Zusatzstoffen/Chemikalien zu verringern oder ganz darauf zu verzichten. Des Weiteren sind Verfahren von Bedeutung, bei denen keine Zwischen- oder Nebenprodukte entstehen, die wiederum entsorgt werden müssen. Es sind Ansätze, die mit weniger Ressourcen (Energie etc.) mehr Nutzen schaffen – „*creating more value with less impact*“. Die Schwerpunkte werden global in der Wassergewinnung, der nachhaltigen effizienten Wassernutzung (z.B. Bewässerungstechnologien) sowie der sanitären „Entsorgung“ und der Wasserversorgung der Städte liegen, wobei Strukturen wie Flexibilität, Dezentralität und Adaption für spezifische Randbedingungen gefragt sein werden (z.B. dezentrale stoffstrom- und kreislaforientierte Konzepte). Dabei werden in der Instandhaltung und dem Ausbau des Wasser- und Abwassernetzes die größten Marktpotentiale gesehen.

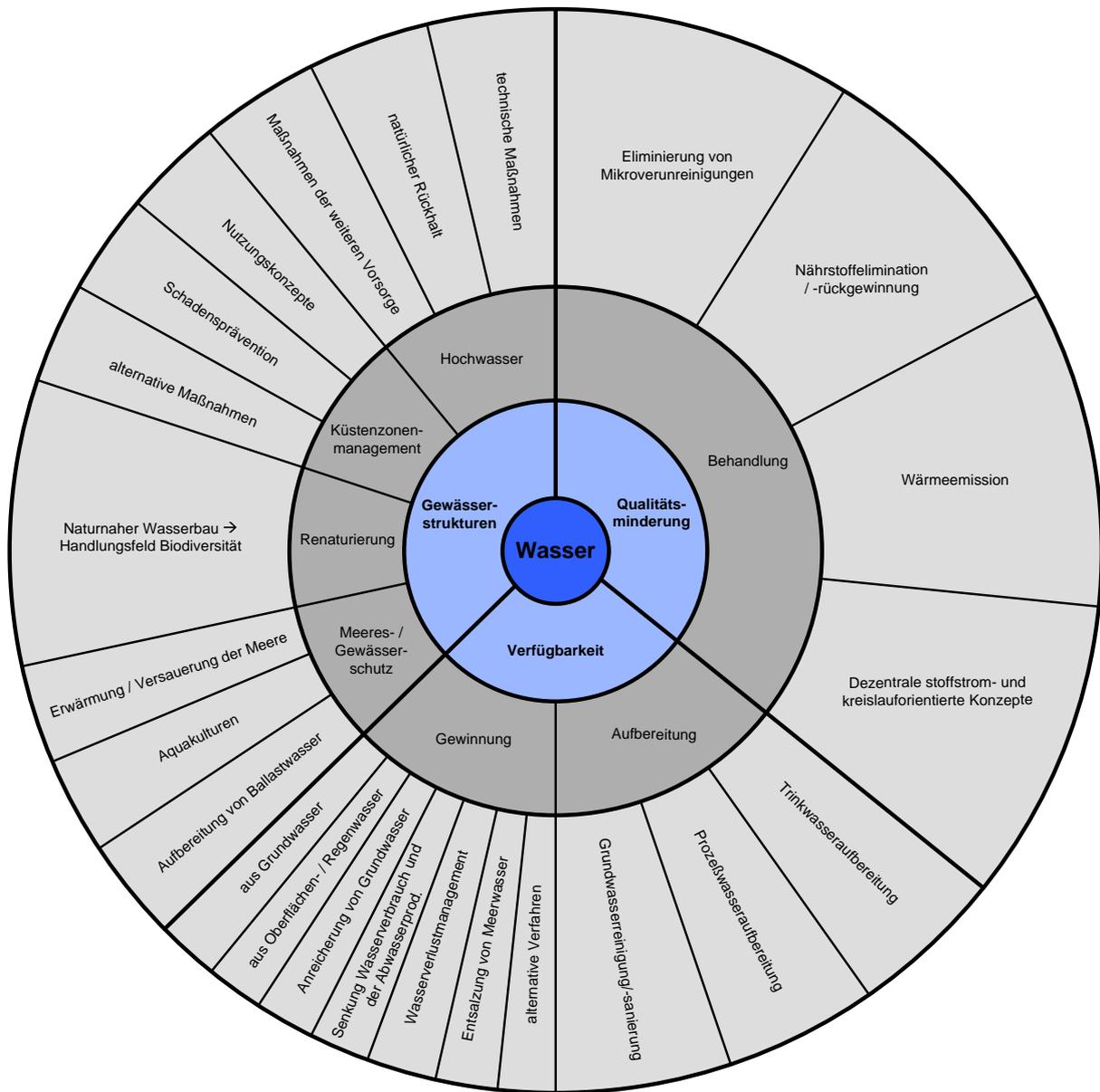


Abbildung 3: Technologiekompas zum Handlungsfeld Wasserschutz



## 5 Bodenschutz

Der Boden ist ein Multitalent; er ist Lebensraum für Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen. Er nimmt Speicher-, Filter-, Puffer- und Umwandlungsfunktionen wahr, spielt eine zentrale Rolle beim Wasserschutz und dem Austausch von Gasen mit der Atmosphäre und ist eine Regelgröße im Stoffhaushalt. Boden stellt aber zugleich einen Produktionsfaktor für Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe dar. Er ist daneben ein Archiv der Natur- und Kulturgeschichte. Wegen seiner vielfältigen lebenswichtigen Funktionen und besonders wegen seiner Unvermehrbarkeit muss der Boden genau wie Luft und Wasser mit höchster Priorität geschützt werden. Dies ist nicht zuletzt auch ein volkswirtschaftliches Anliegen, vor allem aber ein bedeutendes umweltpolitisches Ziel.

Der Boden wird in seinen wesentlichen Funktionen durch die Folgen aktueller und zurückliegender menschlicher Aktivitäten gefährdet und ist zum Teil bereits zerstört. Schadstoffeinträge in Böden, Untergrund und Grundwasser aus Altablagerungen, Altstandorten, der Luft und anderen Quellen stehen längst nicht mehr im Gleichgewicht mit den Filter-, Puffer- und Regelungsfunktionen des Umweltmediums. In Betrieb befindliche Anlagen tragen auch weiterhin zum Problem der Bodenkontaminationen bei, da die Kette von Produktion und Konsum nicht hermetisch abgeriegelt ist. Abfälle und Emissionen werden weiterhin unvermeidbar sein.

Das Ausmaß der globalen Bodendegradation ist alarmierend. Tagtäglich gehen große Flächen durch Erosion verloren, werden versiegelt und überbaut oder verdichtet. Schätzungsweise sind aktuell mehr als 25% der Landoberfläche und über 900 Millionen Menschen auf der Erde mehr oder weniger stark von der global fortschreitenden Wüstenbildung und ihren Folgen betroffen (WBGU 1994).

Trotz seiner enormen Bedeutung wurde der Boden lange Zeit nicht als eigenständiges Handlungsfeld der Umweltpolitik wahrgenommen, er ist eines der „Stiefkinder“ der Umweltpolitik. Man ging lange Zeit davon aus, dass Gewässerschutz, Luftreinhaltung und Naturschutz ausreichende Instrumente seien, um den Schutz des Bodens zu gewährleisten. Die Folge war, dass der Schutz des Bodens nicht in einer „lex specialis Bodenschutz“ geregelt wurde, sondern zunächst in andere Gesetze integriert war. Erst mit der Verabschiedung des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) im Jahr 1998 wurde der Boden neben den Medien Wasser und Luft in einem eigenständigen Gesetz geschützt. Ebenso bedeutete der Erlass der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999) für den Bodenschutz einen großen Sprung nach vorne.

Aus den oben aufgezeigten Gefährdungen für die essentiellen Bodenfunktionen ergeben sich die Problembereiche des Handlungsfelds Bodenschutz: Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr, bzw. Versiegelung; Eintrag von Schad- und Nährstoffen; Altlasten; Bodenerosion, Desertifikation, Versalzung; Bodenschadverdichtung. Diese stellen global betrachtet keine marginalen Umweltprobleme mehr dar, sondern haben eine Tragweite erreicht, die ebenso bedrohlich ist wie der globale Klimawandel oder der fortschreitende Verlust an Biodiversität (WBGU 1994).

Zur Lösung dieser Herausforderungen im Handlungsfeld „Bodenschutz“ stehen Technologien aus sehr unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung.

Obwohl in Deutschland und in einigen europäischen Ländern in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten – zum Großteil durch rechtliche Regulierungen angetrieben – gute Fortschritte im Bereich des Bodenschutzes erzielt wurden, dürfen sich die Industrieländer nicht mit kleinen Erfolgen zufrieden geben. Die heutige Bevölkerung und zukünftige Generationen werden die Fehler der Vergangenheit auch weiter beschäftigen und diese zu bewältigen haben. Unter den im Handlungsfeld Bodenschutz identifizierten Problemfeldern, werden künftig in den Industrieländern primär der „Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Versiegelung“, die „Altlasten“ und „der Eintrag von Schad- und Nährstoffen“ relevant sein. Marktgängige Technologien, Strategien und Konzepte gibt es für alle Bereiche, aber sie werden noch viel zu wenig umgesetzt, da es noch zu oft ökonomische Hemmnisse (Verfahren, Maschinen und Geräte sind zu kostenintensiv) gibt.

## **5.1 Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke, Bodenversiegelung**

Der aktuelle Stand im Problemfeld „Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Versiegelung“ kann mit „Die Konzepte sind da, der Weg ist klar, aber...“ beschrieben werden. In Deutschland hat das Thema Flächenverbrauch insbesondere durch die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung an Bedeutung gewonnen. Potential zur Reduzierung des Flächenverbrauchs bietet die Nutzung des Untergrundes in Städten als Wirtschafts- und Verkehrsraum (bspw. untertägige Kaufhäuser, unterirdische Straßen, Gleisanlagen). Doch nicht nur der Untergrund lässt sich nutzen, die „Erschließung des Himmels“ durch die Vision einer „Vertikalen Stadt“ schafft zusätzliches Bauland (Maak 2001). Eine Reduktion der Flächeninanspruchnahme bedarf aber in erster Linie des Einsatzes effizienter politischer, planerischer und ökonomischer Instrumente. Es kommen unterschiedliche strategische Ansätze wie z.B. Vorrang der Innenentwicklung vor der Außenentwicklung, Mobilisierung verfügbarer Baulandreserven, Ausschöpfen vorhandener Nutzungspotentiale im Bestand und die Erhöhung der Flächenproduktivität in Betracht. Technologische Lösungen kommen lediglich in Beziehung mit Flächenrecycling und Entsiegelung ins Spiel.

Beim Flächenrecycling finden Altlastensanierungstechnologien in Kombination mit Technologien aus der Bauwirtschaft und Verfahren der Rekultivierung Anwendung. Anlagen und Gebäude müssen dekontaminiert, komplett rückgebaut und der Boden ggf. saniert werden. Im Rahmen der Entsiegelung von Flächen geht es vor allem um den Einsatz geeigneter Materialien, zum Beispiel um durchlässige Oberflächenbefestigungen. Folge der Versiegelung ist neben einer Verringerung der Grundwasserneubildung und einer Verschlechterung des lokalen Klimas das verstärkte Auftreten von Hochwasserereignissen. Konzepten „Dezentraler Regenwasserbewirtschaftung“ kommen daher eine maßgebliche Rolle zu. Doch trotz aller bisherigen Bemühungen bleibt festzustellen, dass die Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr anhält und weit überproportional zu Lasten der leistungsfähigsten Böden erfolgt. Eine Trendumkehr ist bislang noch nicht erkennbar. Der Flächenverbrauch bleibt ein deutsches und weltweites „Sorgenkind“. Es bleibt demnach festzuhalten, dass eine sachgerechte Dämpfung der weiteren Siedlungsflächenexpansion und die sukzessive Umsetzung des Ziels einer nachhaltigen Raum-

und Siedlungsentwicklung auch künftig eine Schwerpunktaufgabe der Raumordnung und aller anderen politischen Handlungsebenen bleibt.

## 5.2 Altlasten

Auch die Lösung des Altlastenproblems ist und bleibt eine der großen, kostspieligen Aufgaben der nächsten Jahrzehnte. In den west- und zentraleuropäischen und einigen südeuropäischen Ländern sind die Böden durch zahlreiche lokale und diffuse Kontaminationen beeinflusst. Für die Umwelttechnik ergibt sich hieraus ein Auftrag, dessen Bearbeitung viele Jahrzehnte dauern wird. Für die Erkundung, Gefährdungsabschätzung, Sanierung und Nachsorge von Altlasten wurden in den zurückliegenden Jahren vielfältige Methoden und Verfahren entwickelt, die zu einem hohen technologischen Standard in diesem Bereich geführt haben. Der Altlastensanierungsbedarf, durch das BBodSchG und die BBodSchV vorangetrieben, hat in technischer Sicht zu erheblichen Forschungsanstrengungen geführt. Seitdem gehören Verfahren zur Verhinderung der Schadstoffausbreitung durch Maßnahmen wie Oberflächenabdichtung und -abdeckung, Dichtwände sowie passive hydraulische und pneumatische Verfahren zum Stand der Technik. Ferner stehen Dekontaminationsverfahren durch Wasserhebung und -aufbereitung, durch Bodenluftentnahme und -aufbereitung sowie thermische, chemisch-physikalische und biologische Reinigung zur Verfügung. Diese Verfahren wurden bereits in großem Umfang angewendet und sind nun seit Jahren in Deutschland marktgängig.

Besonders das Portfolio der biologischen Verfahren ist in den letzten Jahren stark gewachsen, da sie zum einen kostengünstiger sind, zum anderen sich die behandelten Böden einfacher wieder einsetzen und einbauen lassen. Darüber hinaus werden unerwünschte stoffliche Nebeneffekte vermieden, der Einsatz von Chemikalien obsolet, gleichzeitig die Kosten zur Sanierung reduziert und der Energieeinsatz effizienter bzw. überflüssig. Verstärkt werden Verfahren wie z.B. „*Natural Attenuation*“ und „*Enhanced Natural Attenuation*“ zum Einsatz kommen, die die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse im Untergrund bei der Sanierung von Altlasten berücksichtigen. Darüber hinaus werden innovative In-Situ-Verfahren wie bspw. unterirdische Enteisung, chemische In-Situ-Oxidation (ISCO), Radiofrequenzerwärmung, „Nanolron“ und „Kolloidale Aktivkohle“ an Bedeutung gewinnen (UFZ 2007). Im Altlastensektor werden die so genannten „Megasites“ ein Schwerpunkt bleiben und künftig sogar noch stärker ins Blickfeld rücken müssen. Megasites sind stofflich äußerst komplex und so großräumig kontaminiert, dass sie durch den Einsatz herkömmlicher Sanierungsmethoden meist nicht zu bewältigen sind. In diesem Kontext gibt es durchaus noch Forschungsbedarf. Entscheidend wird es sein, eine kosteneffektive Reduktion von Umweltgefährdungen und nachhaltige Revitalisierung zu integrieren und zu kombinieren. Diese Aussagen sind nicht „Deutschland-spezifisch“. In den Neuen Unabhängigen Staaten (Russland, Ukraine, Kasachstan, Usbekistan und Belarus) zum Beispiel ist eine schwere Bodendegradation festzustellen, verursacht durch Schwermetallkontaminationen, schwer abbaubare organische Schadstoffe und Dioxine im Umkreis von Industriestandorten und städtischen Ballungsräumen, sowie durch Ölleckagen und Kontaminationen durch Radionuklide (EEA 2002). Europa und besonders Osteuropa werden sich allein aufgrund der Vielzahl von kontaminierten Flächen künftig mit Altlasten „beschäftigen“ müssen und sich dadurch als poten-

tielle Märkte für die breit aufgestellten deutschen Sanierungstechnologien und beratenden Dienstleistungen aufzutun (EEA 2007).

### 5.3 Eintrag von Schad- und Nährstoffen

Hauptziel eines nachhaltigen Bodenschutzes wird es sein, die ökologische und landwirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Böden zur Sicherung eines ausreichenden Nahrungsangebots für eine stetig wachsende Bevölkerung zu erhalten. Generell ist in diesem Kontext zu konstatieren, dass stets eine vorhersehende und rechtzeitige Reaktion auf Bewegungen in der Bevölkerungsentwicklung in die Planungen und Lösungsstrategien einzubeziehen ist. Das bedeutet im Einzelnen, dass trotz steigender Nachfrage Schadstoff- und übermäßige Nährstoffeinträge (UFZ 2007), z.B. durch effizienteren Düngemittleinsatz mit dem Verfahren des „*precision farming*“, weiter verringert werden müssen, um negative Effekte wie Versauerung, Eutrophierung und Schadstoffakkumulation der Böden zu vermeiden. Im Rahmen des in diesem Bereich sehr wichtigen Monitoring, d.h. Erfassung und Bewertung des stofflichen Ist-Zustandes und der langfristigen Entwicklung von Stoffinventaren und -konzentrationen, stehen in Deutschland eine große Anzahl von Technologien zur Verfügung, z.B. Methoden der aktiven und passiven Fernerkundung, Geräte bzw. Sonden zur Messung von meteorologischen, chemischen, physikalischen und chemischen Parameter, Geoelektrik und Geomagnetik. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht zu flächenrepräsentativen Bodenzustandsbewertungen und Schadstofftransferbeziehungen. Zusätzlich sind Technologien aus den Bereichen Luftreinhaltung, Abfallwirtschaft und Altlastensanierung so anzuwenden und weiterzuentwickeln, dass die Immissionen noch weiter und damit die Beeinflussung des Umweltkompartiments Boden reduziert werden kann.

### 5.4 Bodenerosion, Desertifikation und Versalzung

Auch die Bodenerosion sollte auf ein vertretbares Maß zurückgeschraubt werden, um schlechende Bodenverluste oder Schäden bei angrenzenden Objekten (so genannte „*Off Site*“-Schäden), wie z.B. die Verlandung und Eutrophierung von Gewässern, zu vermeiden. Bodenerosion ist ein weit reichendes, global gesehen eines der bedeutendsten Umweltprobleme. Es gibt außer der „guten fachlichen Praxis“ (BBodSchG) keine konkreten gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Erosionsvorsorge. Minderungsmaßnahmen oder Lösungsansätze lassen sich in der konservierenden Bodenbewirtschaftung (Bundesregierung 2002) und aufgrund der Wechselwirkung zur Schadverdichtung in angepassten Technologien (leichte Maschinen und Transportfahrzeuge) finden. Die konservierende Bodenbearbeitung umfasst im Allgemeinen jedes Verfahren, welches die Eingriffsintensität verringert oder nahezu vollständig auf sie verzichtet. Das geht von der intensitätsreduzierten Bearbeitung bis hin zur Umstellung der Fruchtfolgen mit dem Anbau von Zwischenfrüchten. Windschutzpflanzungen, Filterstreifen und Änderungen von Wegführungen können in Ergänzung zu Bodenschutzmaßnahmen auf Ackerflächen einen Beitrag zur Minderung oder Vermeidung von Schäden an anderen Schutzgütern leisten. Die Möglichkeit vertraglicher Regelungen zum Erosionsschutz sollte verstärkt Anwendung finden. Auch in Entwicklungs- und Schwellenländern gibt es Beispiele für erfolgreiche Gegenmaßnahmen wie z.B. den Anbau landwirtschaftlicher Produkte auf ebenen Terrassen und Agroforstpraktiken.

Als eine der Erosion gleichwertige Gefährdung des Bodens ist die Bodenschadverdichtung zu nennen. Sie entsteht meist durch das Zusammenwirken von mehreren Faktoren wie bspw. durch häufiges Befahren zu feuchter Böden mit schweren Maschinen. Durch verdichtungsarme Bewirtschaftungsverfahren mit neuen Maschinen (veränderte Bereifung, Begrenzung der Radlast etc.) unter Berücksichtigung der Witterung (Wahl des optimalen Bewirtschaftungszeitpunktes) soll die landwirtschaftliche Nutzbarkeit verbessert bzw. erhalten und der Bodenschadverdichtung entgegengewirkt werden.

Im Grunde kann hinter keines der im Bodenschutz identifizierten Problemfelder im Hinblick auf die Schwellen- und Entwicklungsländer ein Häkchen im Sinne von „gelöst“ und teilweise noch nicht mal im Sinne von „überhaupt im Blickfeld“ gemacht werden. Im Gegenteil, die Situation verschärft sich in einigen Regionen tagtäglich. Die Probleme können in den betroffenen Ländern aber zum Teil aufgrund wirtschaftlicher, sozialer und kultureller Gegebenheiten nicht angegangen werden. Dies birgt zum Teil ein großes Potential für den Export von Wissen, Dienstleistungen und Technologien, zeigt aber daneben, dass sich die notwendigen Prioritäten im globalen Umweltschutz ändern müssen.

Das Problemfeld „Bodenerosion, Desertifikation und Versalzung“ ist gesondert zu betrachten und zu behandeln, da es weltweit eine Herausforderung des Bodenschutzes ist und ebenso weltweit als ein potentieller Zukunftsmarkt für die entsprechenden Technologien einzustufen ist. Die verschiedenen Formen der Bodengefährdung in diesem Spannungsfeld sind aber nicht alle überall gleich ausgeprägt und gravierend. Wenn man an Desertifikation (Trockengebiete) und Versalzung (aride und semiaride Gebiete) denkt, haben die Symptome teilweise einen stark regionalen bzw. sogar nur lokalen Bezug. Dennoch besteht in diesen Bereichen starker Handlungsbedarf, besonders vor dem Hintergrund eines progressiven Bedarfs an Nahrungsmitteln.

## 5.5 Fazit

Die Technologien und das Wissen zur Bewältigung der dringendsten Bodenprobleme sind in den Industrieländern im Prinzip vorhanden. Im Technologiebereich besteht in Entwicklungsländern aber eher Bedarf an „No-tech“- bzw. Lowtech-Lösungsstrategien und angepassten reifen Technologien. Derartige technologische Lösungen bergen damit auch ein hohes Exportpotential. Generell ist bei der technologischen Weiterentwicklung von Ländern und Regionen zu beachten, dass eine im klassischen Sinne nachholende Entwicklung im Technologiesektor nicht immer positiv zu bewerten ist. Vielmehr empfiehlt sich in vielen Fällen ein Überspringen technologischer Entwicklungsstufen (*leapfrogging*), bei dem z.B. ein Entwicklungsland die Zwischenstufen einer nicht nachhaltigen, Ressourcen verschwendenden Wirtschaftsweise überspringt, um gleich zu einer möglichst nachhaltigen Technologie überzugehen: Unsere Fehler der Vergangenheit müssen nicht blind nachgemacht werden. Investitionen in Technologien, die in Kürze überholt sein werden, sind darüber hinaus ökonomisch nicht zweckmäßig und verbauen zudem die Chance, technologisch zumindest in einigen Bereichen Positionen in der Führungsgruppe auf dem globalen Markt zu erreichen. In den Schwellen- und besonders in den Entwicklungsländern kommt einer Adaption an die regionalen und lokalen wirtschaftlichen, sozialen und kulturellen Rahmenbedingungen eine viel größere Bedeutung zu. Solange in den Ländern keine günstigen

Rahmenbedingungen für die Anwendung von Technologien zum Schutz der Böden geschaffen werden, wird es schwer bzw. unmöglich sein, deutsche Technologien zu exportieren. Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen in den meisten Entwicklungsländern kann es sich nur um Wissenstransfer, den Export von Dienstleistungen oder von Hybridlösungen handeln, bei denen Technik in Kombination mit entsprechenden Dienstleistungen angeboten werden. Diese können in Kombination einer nachhaltigen Armutsbekämpfung und Entwicklungshilfepolitik den Weg für deutsche Technologien ebnen und dementsprechend die Chancen im internationalen Wettbewerb in diesen Ländern verbessern. Darüber hinaus müssen für den Erfolgsfall im Export optimale Rahmenbedingungen angeschoben und geschaffen werden. Hinzu kommt, dass letztendlich immer genau zu bedenken ist, ob eine No-tech oder Lowtech-Lösung nicht das passendere Verkaufsprodukt ist als eine Hightech-Technologie. No-tech oder Lowtech kann besonders in Entwicklungsländern aus der Perspektive der Menschen schnell zu *ihrer* Hightech werden.

Technologien, in welcher Entwicklungsstufe auch immer, werden aber nie die alleinige Lösung für derartige Bodengefährdungen sein, da sich z.B. Desertifikation und Versalzung auf naturräumliche und sozioökonomische Bedingungen und Veränderungen zurückführen lassen. Entscheidend in diesem Problemfeld ist das Zusammenwirken von technologischer Lösung und optimalen inneren und äußeren, institutionellen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Für eine Lösung der komplexen Probleme müssen die sozioökonomischen Ursachen, vor allem aber auch die Handlungsrationalität der dortigen Menschen, stärker berücksichtigt und deren Handlungsspielräume durch eine organisatorische und budgetäre Dezentralisierung erweitert werden.

Abschließend soll auf das zurzeit sehr prominente Thema „Boden und Klimawandel“ eingegangen werden, obwohl sich für diese globale Herausforderung keine „echten“ Bodenschutz-Technologien identifizieren lassen. Die Wechselwirkung zwischen Klimaänderung und Veränderungen der Bodenqualität ist komplexer Natur und wird noch nicht in ihrem vollen Ausmaß erkannt. Weltweit befindet sich so viel Kohlenstoff in den Böden, dass sich bei seiner plötzlichen Freisetzung der Gehalt an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre sofort verdrei- oder sogar vervierfachen würde. Auch wenn ein solch abruptes Szenario extrem unwahrscheinlich ist, würde schon eine sich graduell beschleunigende Zersetzung in Folge der globalen Klimaerwärmung zusätzliche Mengen an CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre entlassen und das Klima weiter anheizen. Welche Auswirkungen der Klimawandel auf die Böden weltweit haben wird und in welchem Ausmaß diese zum Tragen kommen werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht gesichert abzuschätzen. Da der Boden auch als CO<sub>2</sub>-Senke (C-Sequestration) in der Diskussion steht, muss man sich die Frage stellen, was diese Nutzung für Folgen haben wird und welche Konflikte durch die konkurrierenden Nutzungsansprüche entstehen werden.

Das Potential von Böden als Senken für CO<sub>2</sub> ist begrenzt, weil langfristig nur wenig neuer Humus entsteht (Humus speichert das CO<sub>2</sub>). Die elementare Frage, ob die Bindung von Kohlenstoff als Schlüssel zur Umkehrung der Bodendegradation angesehen werden kann, muss zeitnah beantwortet werden, wenn man sie überhaupt beantworten kann. Eine der größten globalen Quellen für klimaschädliche Treibhausgase ist die Landwirtschaft, deswegen ist die Landwirtschaft klimafreundlich umzugestalten. Dabei ist aber zu beachten, dass die landwirtschaftliche Praxis großen Einfluss darauf hat, wie viel Kohlenstoff im Laufe der Zeit gespeichert wird. Eine

Änderung – ganz besonders bei den angebauten Pflanzensorten, beim Einsatz von Düngemitteln und Naturdung, den Fruchtfolgen und der Bodenbearbeitung – bestimmt mit, wie viel gespeichert bzw. aus dem Boden freigesetzt wird und wie rasch dies geschieht. Die beschleunigte Erwärmung beeinflusst daneben die Tau- und Wiedergefriervorgänge von Permafrostböden. Beim Tauen vormals dauerhaft gefrorener Böden können enorme Mengen an Treibhausgasen frei werden und zur globalen Erwärmung beitragen. In Folge des tauenden Permafrostes und der damit verbundenen verstärkten Bodenwassermobilität kommt es außerdem zu einer erhöhten Erosionsrate. In diesem Bereich wird überdies eine verstärkte Zusammenarbeit im Bereich der Bau- und Foundationstechnik aufgrund von z.B. Permafrost-Dolinen (*sink-hole*) entscheidend sein.

Augenscheinlich sind im Brennpunkt „Böden im Klimawandel“ noch viele Fragen offen. Deswegen gehört die Erforschung dieser Zusammenhänge neben der Reduktion des Flächenverbrauchs für Siedlung und Verkehr/Versiegelung, der Bodendegradation und dem Fragenkomplex „Boden und Landnutzung(sänderung)“ zu den künftigen Themen des Bodenschutzes.

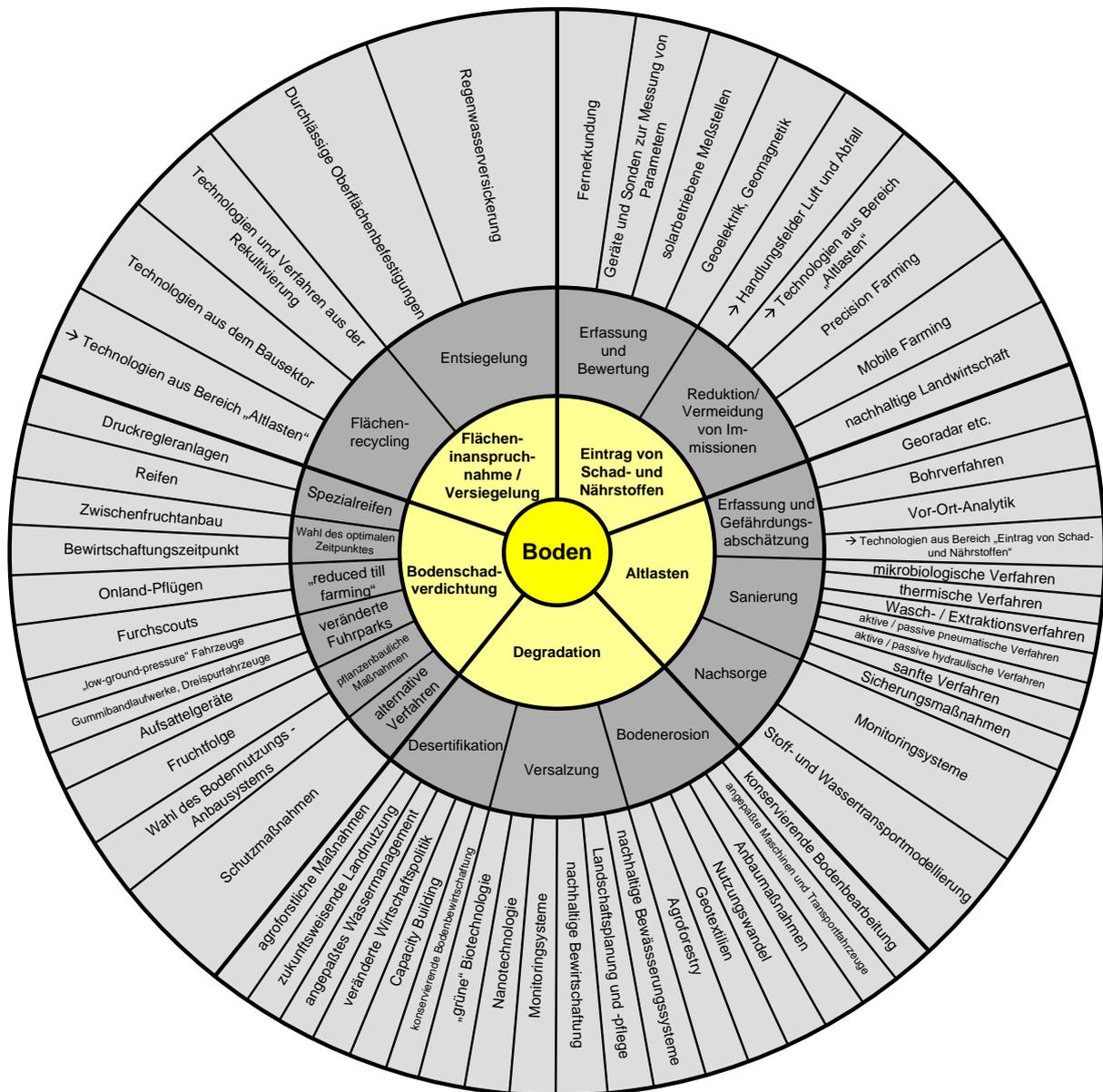


Abbildung 4: Technologiekompas zum Handlungsfeld Bodenschutz

## 6 Schonung endlicher Ressourcen

Der effiziente Umgang mit Rohstoffen ist ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige Weltwirtschaft. Er könnte dazu beitragen, die Reichweite der Rohstoffreserven im Interesse kommender Generationen zu verlängern, die Kosten der Produktion zu senken und die Umwelt zu entlasten. Die Steigerung der Rohstoffproduktivität wurde daher von der Bundesregierung als zentrale Zukunftsaufgabe erkannt und von den Ministerien (BMBF, BMU, BMWi u.a.) als Förderschwerpunkt in ihre Förderprogramme aufgenommen. Ziel der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie ist es, die Rohstoffproduktivität in Deutschland bis zum Jahr 2020 gegenüber 1994 zu verdoppeln.

Bei der Rohstoffnutzung lassen sich drei Probleme identifizieren, die durch eine Erhöhung der Rohstoffproduktivität gelöst oder zumindest gemildert werden könnten:

- **Rohstoffverknappung:** Bevölkerungszunahme, globales Wirtschaftswachstum und steigender Wohlstand – vor allem in den Schwellenländern – haben die Nachfrage und damit die Preise für Rohstoffe sprunghaft ansteigen lassen. Dies ist für ein rohstoffarmes Land wie Deutschland, das den Großteil seines Bedarfs über Importe decken muss, besonders spürbar. Kritisch ist die Situation vor allem bei einigen strategischen Metallen, die als Einsatzstoffe für bestimmte Schlüsseltechnologien auf absehbare Zeit unverzichtbar sind.
- **Schädlichkeit:** Bestimmte Rohstoffe (z.B. Blei, Cadmium, Chlor) können Belastungen von Mensch und Umwelt verursachen. Der Abbau von Rohstoffen ist zudem mit schwerwiegenden Eingriffen in den Naturhaushalt verbunden, verursacht in der Regel einen hohen Verbrauch an Wasser und Energie und kann überdies zur Mobilisierung und Dissipation von Schadstoffen führen, die vorher im Gestein gebunden waren.
- **Hohe Sekundärbelastungen durch hohen Stoffdurchsatz:** Dies trifft für Rohstoffe zu, die im Prinzip weder knapp sind, noch unmittelbare Schäden für Mensch und Umwelt verursachen, aber infolge ihres hohen Stoffdurchsatzes zu Belastungen von Mensch und Umwelt führen, etwa durch z.B. Energieverbrauch, Transport, Staubemissionen.

Zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität steht ein breites Spektrum von Einzeltechnologien zur Verfügung, das am Ende dieses Kapitels in einem Technologiekompass dargestellt ist. Diese Einzeltechnologien lassen sich vier verschiedenen Basisstrategien zuordnen: Substitution, Steigerung der Materialeffizienz, Kreislaufführung und Verlängerung der Nutzungsdauer. Strategische Ansätze zur Erhöhung der Ressourceneffizienz können im Prinzip in allen Phasen des Produktlebenszyklus zum Tragen kommen. Besondere Bedeutung kommt jedoch der Produktgestaltung und dem Herstellungsprozess zu, da diese beiden Phasen das größte Potential für umwelttechnologische Innovationen bieten; auf sie wurde daher in diesem Kapitel der Schwerpunkt gelegt. Dabei wurde der Herstellungsprozess als ein in sich abgeschlossener Schritt im Lebenszyklus betrachtet und als ein eigenständiger Pfad zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität behandelt, obwohl bei ihm zum Teil die gleichen Basisstrategien Anwendung finden wie in der Produktgestaltung. Es ergaben sich somit fünf strategische Pfade (s. Tab.1), deren wesentliche Ergebnisse im Folgenden kurz zusammengefasst werden sollen.

**Tab.1:** Strategische Pfade zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität

<b>Strategische Pfade</b>
<b>Pfad 1:</b> Substitution knapper nicht erneuerbarer Rohstoffe durch Biomasse oder Rohstoffe mit größerer Reichweite
<b>Pfad 2:</b> Steigerung der produktbezogenen Materialeffizienz
<b>Pfad 3:</b> Verlängerung der Produktlebensdauer
<b>Pfad 4:</b> Förderung der Kreislaufwirtschaft: Design for Recycling
<b>Pfad 5:</b> Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsprozesse

## 6.1 Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung

Im Hinblick auf das Ziel einer Steigerung der Rohstoffproduktivität kommt einerseits die Substitution eines nicht erneuerbaren Rohstoffs durch Biomasse, und andererseits die Substitution knapper nicht erneuerbarer Rohstoffe durch solche mit längerer Reichweite in Betracht.

Die stoffliche Nutzung von Biomasse, an der vor allem die chemische Industrie großes Interesse zeigt, gewinnt in jüngster Zeit zunehmend an Bedeutung. Chemische Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe bieten ein hohes Innovationspotential, sowohl im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren (weiße Biotechnologie, Bioraffinerie) als auch im Hinblick auf die spezifischen Eigenschaften der Produkte (z.B. biologische Abbaubarkeit). Derzeit stammen ca. 12% der in Deutschland produzierten Chemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen (SusChem 2006). Das erklärte Ziel der EU ist eine Erhöhung des Anteils auf 20-25% bis 2020. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich zahlreiche Konversionsstrategien, die mittel- bis langfristig die Voraussetzung für eine breitere Verwendung von Biomasse als Chemierohstoff bilden, noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden (FNR 2006).

Große Erwartungen werden in diesem Zusammenhang in die weiße Biotechnologie gesetzt. Biotechnische Verfahren zeichnen sich häufig durch weniger Produktionsschritte, geringeren Rohstoffverbrauch, höhere Energieeffizienz, verminderte Schadstoffemissionen sowie niedrigere Produktionskosten aus und sind dadurch attraktiv (Gartoff 2006). Die mit Hilfe biotechnischer Verfahren erzeugten Produkte haben heute erst einen Marktanteil von ca. 5% weltweit, was einem Umsatz von 55 Mrd. Euro entspricht. Es wird aber damit gerechnet, dass der Markt für Produkte der weißen Biotechnologie schneller wachsen wird als der für konventionelle Produkte, nicht zuletzt wegen der zunehmenden Nachfrage nach biobasierten Erzeugnissen (Balkenkohl 2006). Um der weißen Biotechnologie weitere Impulse zu verleihen, müssten aus Sicht der chemischen Industrie bestehende Hemmnisse abgebaut und die Forschung intensiviert werden. Zu den wichtigsten Herausforderungen wird die Bereitstellung geeigneter Enzymsysteme für den

Aufschluss Lignincellulose-haltiger Biomasse gezählt. Auf diesem Weg könnten pflanzliche Abfälle (Gras, Stroh und Waldrestholz) als preiswerte Rohstoffquellen für die industrielle Biotechnologie erschlossen und hochwertige Kohlehydrate wie Zucker und Stärke für die Ernährung von Mensch und Tier geschont werden.

Zu den Produkten, die heute schon in nennenswertem Umfang auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden, gehören z.B. oleochemische Tenside, Bioschmierstoffe, Biokunststoffe, naturfaserverstärkte Kunststoffe, Naturdämmstoffe und Textilfasern. Hohe Wachstumschancen werden vor allem jungen Technologien wie den Biokunststoffen eingeräumt. Bei der Produktion von stärkebasierten Kunststoffen, die mit 85% derzeit den größten Anteil am Biokunststoffmarkt haben, hat Europa die Marktführerschaft. Der Anteil deutscher Unternehmen liegt Schätzungen zu Folge bei 6-10% der Weltproduktion. Während heute Europa und die USA die wichtigsten Absatzmärkte bilden, erwarten Experten künftig einen überproportionalen Anstieg der Nachfrage in Asien, vor allem in China (BMU/UBA 2007). Eine weitere attraktive Option für die Zukunft könnte die Herstellung von Bulkchemikalien in biotechnisch optimierten Pflanzen sein, bei der der Umweg über die Glucose und die mikrobielle Gewinnung von Zwischenprodukten eingespart werden könnte (Oertel 2007).

Die vermehrte stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe bietet prinzipiell Vorteile (Schonung nicht erneuerbarer Rohstoffe, größere Unabhängigkeit von Erdölimporten, Klimaschutz), dennoch ist sie keineswegs eine per se nachhaltige Option, sondern kann gravierende, ökologische Probleme zur Folge haben (Flächennutzungskonkurrenz, verstärkter Dünger und Pestizideinsatz, Verringerung der natürlichen Artenvielfalt, Zielkonflikte mit dem Naturschutz, Verlust schützenswerter Tropenwälder etc.). Um mögliche negative Auswirkungen zu verhindern, werden die Erstellung ganzheitlicher Ökobilanzen für biogene Produkte, die Etablierung global akzeptierter Umwelt- und Sozialstandards sowie die Einführung von Zertifizierungssystemen gefordert (SRU 2007).

Eine andere Möglichkeit die Verfügbarkeit von Rohstoffen zu verbessern, ist der Ersatz knapper, nicht erneuerbarer Rohstoffe durch solche mit größerer Reichweite. Diese Option spielt sowohl für Rohstoffe eine Rolle, die eine breite und seit Jahren etablierte Anwendung finden (z.B. Kupfer), als auch für Rohstoffe, die erst seit kurzem vornehmlich in Spurenkonzentrationen in der Elektronikbranche eingesetzt werden (z.B. Indium). Beispiele für solche Substitutionsprozesse sind Netztechnologien auf Glaserfaserbasis oder der Austausch von Kupfer durch Aluminium in der Energieübertragung. Aufgrund der Knappheit, insbesondere der strategischen Metalle, werden große Anstrengungen unternommen, diese mittels innovativer technischer Lösungen zu substituieren (z.B. Ersatz von Indium durch Zinkoxid), oder aber ihre Rückgewinnung zu forcieren.

## **6.2 Erhöhung der produktbezogenen Materialeffizienz**

Strategische Ansatzpunkte zur Verbesserung der produktbezogenen Materialeffizienz sind etwa die Miniaturisierung von Bauteilen (z.B. Speicherchips) und Produkten (z.B. Mobiltelefonen) oder die multifunktionale Ausgestaltung von Produkten (z.B. Integration von Drucken, Scannen, Kopieren und Faxen in einem Gerät). Die ressourcensparenden Effekte von Miniaturisierung und

Multifunktionalität können allerdings durch sog. „Rebound-Effekte“ wieder zunichte gemacht werden. Das bedeutet, dass es als Folge von Preisreduzierungen, steigender Attraktivität der Produkte und Beschleunigung der Innovationszyklen zu einer Verringerung der Nutzungsdauer und damit in der Summe zu einer Erhöhung des Rohstoffverbrauchs kommt.

Eine zentrale Strategie zur Einsparung von Rohstoffen sind Leichtbautechniken vor allem im Automobil- und Maschinenbau sowie im Bausektor. Eine wichtige Rolle im Rahmen des Leichtbaus spielen innovative Verfahren und neue Werkstoffe, die sich häufig neben höherer Materialeffizienz auch durch bessere technische Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit und leichte Verarbeitbarkeit auszeichnen. Die Entwicklung neuer Materialien reicht von innovativen Aluminium- und Magnesiumlegierungen über neue hoch- und höherfeste Stahlsorten, Stahl-Sandwichbleche und Metallschäumen bis hin zu Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen, Aerogelen und Nanokompositen. Unter dem Aspekt der Rohstoffeinsparung kommt der kraftflussgesteuerten Optimierung von Bauteilen, also der gezielten Herstellung von Werkstoffen nach den in der Praxis auftretenden Belastungen mit Hilfe neuer Fertigungsverfahren, große Relevanz zu. Angesichts der gravierenden Umweltprobleme bei der Zementherstellung und der weltweiten Bedeutung, die Zement als Baustoff hat, gilt Technologien, die den Zementverbrauch senken, besonderes Interesse. Zu nennen sind hier etwa die Verwendung von Glasfaser anstelle des herkömmlichen Stahls als Bewehrung, die Nutzung nanotechnologischer Entwicklungen im Betonbau sowie die Sandwichbauweise.

Neue Impulse für die Erhöhung der Materialeffizienz sind auch aus dem Bereich der Bionik zu erwarten. Bekannte Beispiele für biologisch inspirierte Produkte sind selbstreinigende Oberflächen nach dem Vorbild des Lotus-Blatts, klebefreie Haftsyste me, Faserverbundwerkstoffe, die nach dem Modell von Pflanzenhalmen aufgebaut sind und sich durch geringes Gewicht und hohe mechanische Belastbarkeit auszeichnen oder gewichtsreduzierte Autoreifen, deren Materialverteilung sich an der Kraftübertragung von Katzenpfoten orientiert. Große Bedeutung kommt vor allem der Entwicklung sog. „intelligenter Werkstoffe“ (*smart materials*) zu, welche die Eigenschaft haben, sich selbstständig an veränderliche Umweltbedingungen anzupassen. Beispiele sind selbstreparierende Autoreifen und multifunktionale Verbundwerkstoffe.

Deutschland ist auf dem Gebiet des Leichtbaus und der Entwicklung neuer Werkstoffe im internationalen Vergleich gut aufgestellt und gehört sowohl in Forschung und Entwicklung als auch unternehmensseitig zur Spitzengruppe (Brand et al. 2007). Dies gilt auch für den Bereich der Bionik, da die bearbeiteten Anwendungsfelder weitgehend auf attraktive Märkte im In- und Ausland treffen. Experten gehen aber davon aus, dass der Anteil bionischer Produkte, gemessen an Stoffströmen und Marktvolumina der jeweiligen Anwendungsfelder, heute noch eher marginal ist. Gleichwohl handelt es sich um ein dynamisches Feld mit hohem Innovationspotential und großen Wachstumschancen. Hemmnisse für eine maßgeblichere Rolle der Bionik im Innovationsprozess werden in der vergleichsweise langen Entwicklungszeit bionischer Produkte bis zur Marktreife gesehen, sowie in den Vorbehalten der Industrie, in umfassende Bionikprojekte zu investieren. Als hemmend erweisen sich auch Konflikte zwischen Wissenschaft und Industrie hinsichtlich der wirtschaftlichen Verwertung von Ergebnissen, eine im Vergleich zur traditionellen Technik marginale Förderung der Bionik, sowie ihre unzureichende Verankerung in der universitären und schulischen Ausbildung (Oertel/Grunwald 2006).

### 6.3 Verlängerung der Lebensdauer von Produkten

Als technische Ansatzpunkte zur Verlängerung der Lebensdauer eines Produkts (mit der hier die „technische Lebensdauer“ oder Nutzungsdauer gemeint ist) kommen der Aufbau entsprechender Strategien und Servicenetze zur Instandhaltung, die Verbesserung der Materialeigenschaften und der Reparaturfreundlichkeit sowie, insbesondere bei langlebigen Produkten, die Anpassung an sich wandelnde Nutzerbedürfnisse in Betracht.

Die Instandsetzung gebrauchter Produkte setzt neben entsprechenden Serviceunternehmen und Dienstleistungsnetzen die Bereitstellung geeigneter Techniken voraus. Relativ neue Verfahren sind beispielsweise spezielle Klebetechniken zur Reparatur von Windschutzscheiben, die Technik zur Neu-Emaillierung von Badewannen vor Ort und die Natursteinrestaurierung durch Lasertechnik. Vor allem mit Blick auf Industrieunternehmen eröffnet ein professionelles Instandhaltungsmanagement Vorteile, die die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in hart umkämpften Märkten entscheidend mitbestimmen (EFA 2006).

Bessere Materialeigenschaften (z.B. selbstreinigende Oberflächen, Carbidbeschichtungen im Automobilbau, kathodischer Korrosionsschutz im Stahlbetonbau) können die Haltbarkeit eines Produkts erheblich steigern. Große Relevanz kommt außerdem der Verbesserung der Reparaturfreundlichkeit zu. Ansätze dazu sind ein modularer Aufbau von Produkten oder die Möglichkeit zum Austausch von Elementen mit dem Ziel der Effizienzverbesserung (Upgrading). Die Wiederaufarbeitung von Produkten, die heute bereits bei Autoersatzteilen, Werkzeugmaschinen, Verkaufsautomaten oder Kopiergeräten in nennenswertem Umfang praktiziert wird, verlängert zwar nicht die Nutzungsdauer des Gesamtprodukts, wohl aber die seiner Elemente und trägt dadurch erheblich zur Rohstoffeinsparung bei. Auch das Modell des Nutzenverkaufs, bei dem die Unternehmen Eigentümer der Produkte bleiben und nicht das Produkt selbst, sondern den Nießbrauch daran verkaufen, kann zur Verlängerung der Nutzungsdauer führen.

Herausragende Bedeutung im Hinblick auf die Verlängerung der Nutzungsdauer kommt dem Bausektor zu, der aufgrund seines hohen Stoffdurchsatzes die größten Ressourceneinsparpotentiale bietet. Durch eine konsequente Nutzung des Gebäudebestandes anstelle von Neubau könnten ca. zwei Drittel der Rohstoffe (Bau- und Nutzungsphase zusammen) eingespart werden (Kaiser et al. 2007). Eine Umlenkung der Investitionen vom Neubau in den Bestand würde außerdem zusätzliche Arbeitsplätze schaffen sowie den Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke reduzieren und damit den Konkurrenzdruck in der Flächennutzung mildern. Eine besondere Herausforderung für die Zukunft ist die Entwicklung baulicher Konzepte, die flexibel an sich wandelnde Nutzerbedürfnisse angepasst werden können. Beispiele sind funktionsneutrale, modulare Gebäude (z.B. „Flexhaus“) oder die in bestehende Gebäude integrierbaren „Wohnboxen“.

### 6.4 Förderung der Kreislaufwirtschaft, Design for Recycling

Eine Steigerung der Ressourceneffizienz lässt sich auch durch die Berücksichtigung des Kreislaufgedankens bereits im Produktgestaltungsprozess erzielen. „*Design for Recycling*“ stellt im Produktentstehungsprozess die Weichen für die Verwertung und Entsorgung von Abfällen in

Richtung Effizienz und Umweltverträglichkeit und ist Teil des Konzepts der integrierten Produktpolitik (IPP), bei der der gesamte Lebensweg eines Erzeugnisses – von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung – betrachtet wird. Die Integration von Umweltaspekten in das Produktdesign spielt eine wichtige Rolle, nicht zuletzt aufgrund der Verabschiedung zentraler EU-Richtlinien, die den Ansatz einer integrierten Produktpolitik unterstützen (WEEE, ELV, RoHS). Hauptansatzpunkte für *Design for Recycling* sind die Werkstoffauswahl, die Wahl der Verbindungstechnik und die Produktkonzeption (z.B. Modulbildung). Handlungsbedarf und Innovationspotential besteht im Bereich der Substitution und Ausschleusung von Schadstoffen (z.B. Einsatz halogenfreier Wirkstoffe in Löschmitteln), der Recyclingfähigkeit neuer Materialien und Bauteile, der Entwicklung lösbarer Verbindungen oder trennbarer Verbundwerkstoffe, etwa durch lösbare Klebstoffe (Steinhilper 1993). Insbesondere vor dem Hintergrund, dass für die Entwicklung innovativer Technologien (beispielsweise in der Elektronikbranche) vermehrt auf „exotischere“ Elemente, wie z.B. Germanium, Gallium, Indium, Niob und Yttrium, zurückgegriffen wird (Johnson et al. 2007) und immer komplexere Bauteile Verwendung finden, ist der Bereich *Design for Recycling* ein relevantes Aktionsfeld im Ressourcenschutz.

## 6.5 Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsverfahren

Während es bei den bisher dargestellten strategischen Pfaden darum ging, Produkte so zu gestalten, dass sie sich gegenüber Produkten mit gleicher Funktionalität durch eine höhere Rohstoffproduktivität auszeichnen (produktintegrierter Umweltschutz), geht es bei dem fünften Pfad darum, den Herstellungsprozess für ein gegebenes Produkt unter Ressourcenaspekten zu optimieren (produktionsintegrierter Umweltschutz). Solche Innovationen können in unterschiedlichen Phasen des Produktionsprozesses ansetzen oder sich auf den gesamten Produktionsprozess beziehen.

Im Rahmen der Rohstoffgewinnung bieten Analytik und Qualitätssicherung ein effizientes Instrument zur vollständigen Ausschöpfung der Lagerstätten und zur Überprüfung, ob in Abraumhalden noch abbauwürdige Wertstoffe enthalten sind. Auch für eine Wiedernutzung sekundärer Metallrohstoffe sind Technologien zur Identifikation und Qualitätssicherung unabdingbar. Die Aufbereitung und Sortierung mineralischer Rohstoffe lässt sich durch moderne optische Sortieranlagen sowohl kostengünstiger als auch ressourceneffizienter gestalten, da hierdurch das Sortieren von Hand oder der selektive Abbau von Lagerstätten unnötig wird (Dehler 2003). Im Bereich der Reduktions- und Schmelzprozesse von Metallrohstoffen sind solche Technologien relevant, die zu einer Minderung des Energiebedarfs oder der Substitution von Brennstoffen eingesetzt werden können. Aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich betreffen den Einsatz von Rohstoffen höherer Reinheit und Konzentration (z.B. Titandioxid enthaltende Minerale), die Substitution fossiler Energieträger z.B. durch Kunststoffabfälle und Altöle sowie die Optimierung der Elektrolyseverfahren (z.B. bei der Aluminiumraffination).

Mit Blick auf die Urformverfahren gewinnen so genannte *Near-net-shape*-Technologien (endkonturnahe Fertigung), durch die Verfahrensschritte eingespart und zugleich bessere Produkteigenschaften erzielt werden können, zunehmend an Bedeutung. Beispiele sind die Herstellung dünner Bleche mittels Stranggussverfahren oder Pressgießen von ADI (*Austempered Ductile Iron*)-

Werkstoffen sowie die Entwicklung von nano- und feinstdispersen Pulvern in der Keramikherstellung. Besonders in letzterem Bereich besteht Bedarf in der Neu- und Weiterentwicklung von Technologien zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung (z.B. Sprühtrocknungs- und Granulationsverfahren) (Hirth et al. 2007). Für den Prozessschritt der Umformverfahren sind der Einsatz herkömmlicher Zieh- und Umformöle problematisch, da sie schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben können. In diesem Bereich sind demnach Technologien relevant, die eine Reduzierung des Ölverbrauchs durch optimierte Verteilung der Ziehöle erzielen oder solche, bei denen Zieh- und Umformöle auf der Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt werden.

Entfettung als vorbereitender Schritt der Oberflächenveredlung von Metallen ist in vielen Zweigen des produzierenden Gewerbes unverzichtbar. Rohstoffschonende Verfahren sind etwa die Kreislaufführung und Wiederverwendung der Entfettungsmittel sowie ihre Substitution durch Heißdampf oder CO<sub>2</sub>. Durch den Ersatz halogenierter organischer Lösungsmittel durch Lösungsmittel auf wässriger Basis kann die Belastung der Umwelt und der Beschäftigten gesenkt werden. Technologische Entwicklungen auf dem Gebiet der Oberflächenveredlung zielen ebenfalls auf Rohstoffeinsparung einerseits sowie Reduktion der Umweltbelastung andererseits ab. Beispiele sind die Substitution gesundheitsschädlicher Beschichtungen aus sechswertigem Chrom durch weniger problematisches dreiwertiges Chrom, die Substitution lösungsmittelhaltiger Lacke durch Lacke auf Wasserbasis und UV-Härtung oder die Reduktion des Overspray-Anteils beim Lackieren durch verbesserte Spritztechnik (BMU 2007).

Für die Optimierung der Herstellungsverfahren spielt die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR) eine herausragende Rolle, deren Marktvolumen weltweit auf 100 Mrd. Euro geschätzt wird, an denen Deutschland einen Anteil von über 15% hat. Technologietrends bei der MSR sind Materialverbesserungen, der verstärkte Einsatz von Elektronik sowie die Optimierung der Prozessführung beim Zusammenspiel von Anlagenkomponenten. Mechanik und Elektronik werden weiter miniaturisiert und verschmelzen zunehmend (Mikromechatronik). Die deutschen MSR-Unternehmen sind stark exportorientiert. Noch gelten die Länder Westeuropas als der wichtigste Absatzmarkt. Osteuropa, Russland, China und Indien sowie der Nahe Osten gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung.

Neben der MSR gewinnen auch neue Technologien, wie etwa integrierte Membransysteme oder die weiße Biotechnologie zunehmende Relevanz für die ökologisch-ökonomische Prozessoptimierung. Außer zur Herstellung von Fein- und Grundchemikalien werden biotechnologische Verfahren in der Papier- und Zellstoffindustrie (z.B. Biobleaching, enzymatische Entfernung von Störstoffen), in der Lederindustrie (z.B. enzymatische Enthaarung, Globolin- und Fettentfernung) sowie in der Metallindustrie (z.B. mikrobielle Erzlaugung) eingesetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen chemischen Verfahren sind biotechnologische Verfahren häufig umweltfreundlicher und kostengünstiger. Der systematischen Einbindung der Biotechnologie (und auch der Nanotechnologie) in die Entwicklung effizienter Produktionsprozesse wird ein großes Potential hinsichtlich der Steigerung der Ressourcenproduktivität und der Erschließung neuer Märkte zugesprochen.

Eine wichtige Funktion für die Optimierung von Produktionsprozessen haben schließlich innovative Dienstleistungen, wie beispielsweise der in unterschiedlicher Form angewendete PIUS-Check, die Ressourcenkostenrechnung, die Material-Fluss-Analyse oder die betriebliche Ökobi-

lanz. Die Einsparpotentiale durch Inanspruchnahme solcher Dienstleistungen werden auf 5-30% der Herstellungskosten geschätzt (BMU 2007). Dienstleistungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Kombination mit entsprechenden Technologien spielen eine wichtige Rolle für den Export. Durch Bündelung des technologischen und organisatorischen Know-hows deutscher Anbieter ergeben sich große Chancen, nachhaltige und an die spezifischen Anforderungen des Importlandes angepasste Systemlösungen anzubieten. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Markt für KomplettDienstleistungen und integrierte Leistungen künftig stark ausweiten wird.

## 6.6 Fazit

Das politische Ziel, die Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 zu verdoppeln, deckt sich mit dem Bestreben der Wirtschaft nach Kostenentlastung. Wie Untersuchungen belegen, ist die Verfügbarkeit von Ressourcen zum wesentlichen Innovationstreiber in der industriellen Produktion geworden (Spath et al. 2008). Vor diesem Hintergrund gilt es, alle Möglichkeiten zur Einsparung von Rohstoffen und Energie zu nutzen, sowohl im Rahmen der Produktgestaltung als auch im Rahmen der Herstellungsprozesse. Die oben dargestellten fünf Pfade (s. S. 38) sind daher nicht alternativ, sondern komplementär zueinander zu sehen.

Das Spektrum an Technologien, die zur Steigerung der Rohstoffproduktivität beitragen, umfasst Spitzentechnologien wie die weiße Biotechnologie, hochwertige Technologien (Anlagenbau, Mess-, Steuer- und Regeltechnik) und innovative Dienstleistungen (z.B. PIUS-Check). Wie bei den Umwelttechnologien insgesamt ist das Feld forschungs- und wissensintensiv. Die Forschung wird durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen auf nationaler und internationaler Ebene vorangetrieben. Viele Schlüsselbereiche, wie etwa die weiße Biotechnologie oder die Bionik sind heute noch eher durch Partnerschaft und Kooperation als durch Konkurrenz und Wettbewerb geprägt. Für die kommenden Jahre ist jedoch davon auszugehen, dass die Anzahl der im Markt tätigen Unternehmen wächst und der Wettbewerb intensiver wird.

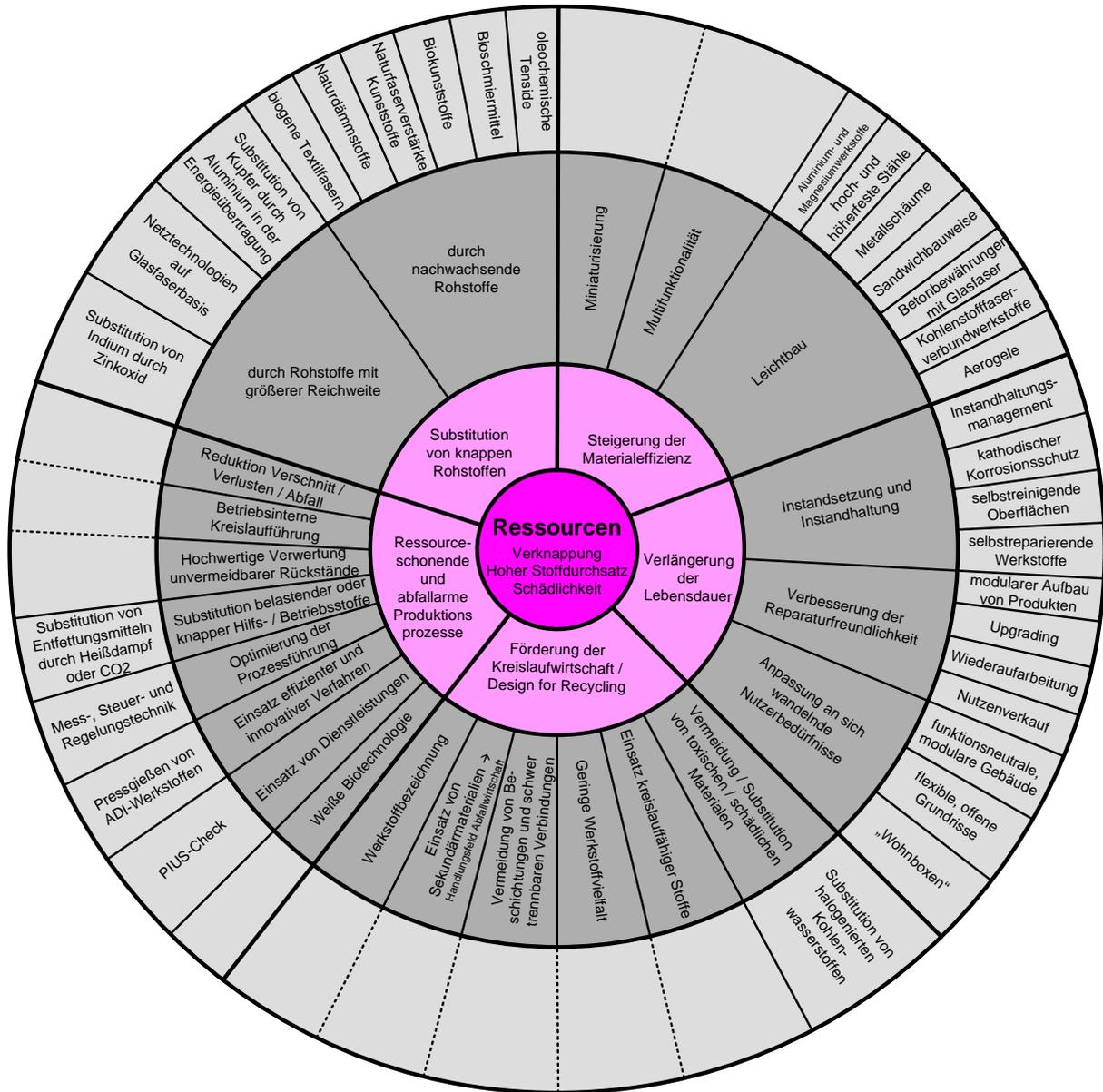


Abbildung 5: Technologiekompas zum Handlungsfeld Schonung endlicher Ressourcen



## 7 Abfallwirtschaft

Umwelttechnologie im Handlungsfeld „Abfallwirtschaft“ ist mit zwei zentralen Problembereichen konfrontiert: Dies ist zum einen die Hygieneproblematik und zum anderen die Mengen- und Ressourcenproblematik. Zur Bewältigung dieser Problembereiche stehen der Abfallwirtschaft drei strategische Optionen zur Verfügung: Die Erfassung der Abfälle, deren Behandlung bzw. Aufbereitung und die Beseitigung von Abfällen oder Behandlungsrückständen.

Der Mensch nimmt Abfälle in seinem direkten Umfeld als ein Problem der Stadthygiene wahr. Um Gefahren für das Allgemeinwohl abzuwenden, müssen Abfälle erfasst, d.h. sachgerecht zwischengelagert, gesammelt und abtransportiert werden. Die Behandlung und/oder Beseitigung der erfassten Abfälle stellt wiederum ein Problem der Umwelthygiene dar; die Abfälle bzw. die davon ausgehenden Emissionen im Zuge der Behandlung bzw. Beseitigung gefährden die Umwelt und belasten Boden, Wasser und Luft. Vor dem Hintergrund steigender Abfallmengen und knapper Rohstoffe werden Abfälle aber zunehmend auch als Ressource begriffen. Neben der Abfallvermeidung durch optimierte Produktgestaltung und Produktionsprozesse (siehe vorangehendes Kapitel) verspricht die Aufbereitung und Verwertung von Abfällen eine Minderung der Abfallmenge und eine Schonung natürlicher Ressourcen.

Die primäre Herausforderung an die Abfallwirtschaft besteht darin, die Stadthygiene zu gewährleisten, ohne dabei den Aspekt der Umwelthygiene zu vernachlässigen. Im Zuge der Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft tritt die Erschließung des in den Abfällen enthaltenen Rohstoffpotentials als ergänzender Aspekt hinzu. Um diesen Herausforderungen adäquat und erfolgreich begegnen zu können, sind neben einem geeigneten Umfeld (administrativer Rahmen, Infrastruktur, Fachkompetenz, ökonomische Potenz, u.a.) insbesondere technologische Lösungen notwendig. Darüber hinaus ist Abfallwirtschaft ein dienstleistungsintensives Handlungsfeld, in dem diese Leistungen insbesondere auf der operativen Ebene – daneben aber auch auf einer strategischen Ebene – nachgefragt und angeboten werden.

Deutschland gilt in Sachen Abfallentsorgung international als Vorreiter. Unter dem Einfluss ordnungspolitischer Rahmenvorgaben hat sich die Abfallwirtschaft seit Mitte der 1980er Jahre zu einer ressourcen- und klimaschonenden Kreislaufwirtschaft entwickelt. Nicht nur die methodischen Ansätze einer Stoffstrombewirtschaftung dienten anderen Ländern als Vorbild; die durch die Regulierungsdichte angetriebenen Innovationen führten auch zu einer rasanten und tiefen Entwicklung der Entsorgungstechnologien (Knappe/Blazejczak 2007). Deutsche Anlagenbauer sind heute in der Lage, ein breites Portfolio erprobter Technologien zur Abfallerfassung, zur mechanischen, biologischen, chemisch-physikalischen oder thermischen Behandlung bzw. Aufbereitung sowie zur Beseitigung von Abfällen und Behandlungsrückständen auf einem wachsenden Weltmarkt anzubieten.

## 7.1 Abfallerfassung

Für die Zwischenlagerung von Abfällen stehen Behältersysteme (Folienbeutel, feste Müllbehälter aus Kunststoff oder Metall, Mulden und Container, Tanks) oder Lagerbereiche (z.B. Bunker, Gruben) zur Verfügung. Voluminöse feste Abfälle werden gegebenenfalls zu Ballen gepresst, sperrige Abfälle eventuell zerkleinert. Größere Gegenstände aus dem privaten Bereich (Sperrmüll) werden zeitnah zum Sammlungstermin am Straßenrand abgestellt. Bei der Sammlung in Holsystemen werden die zwischengelagerten Abfälle zu festgelegten Terminen oder bei Bedarf mittels geeigneter Sammelfahrzeuge, meist Müllpressfahrzeuge, abgefahren. Flüssige Abfälle werden aus den Lagerbehältern in Tankfahrzeuge umgepumpt oder mitsamt ihren Lagerbehältern abgefahren. Bei den Bringsystemen werden die Abfälle an ausgewiesenen Plätzen, zu denen sie der Verbraucher bringt, gesammelt und dort ggf. in geeigneten Behältersystemen zwischengelagert. Der Transport zu den Entsorgungseinrichtungen kann grundsätzlich mittels der Sammelfahrzeuge erfolgen. Für den Transport zu entfernten Entsorgungsanlagen ist möglicherweise das Umladen auf geeignetere Transportmittel (Schienefahrzeuge, Fernlaster) sinnvoll.

## 7.2 Abfallbehandlung und Abfallaufbereitung zur Verwertung

Unter den Begriff Abfallbehandlung fallen alle Entsorgungstätigkeiten, bei denen Abfälle umgesetzt werden, um eine nachfolgende Verwertung oder eine umweltverträgliche Ablagerung der behandelten bzw. aufbereiteten Abfälle oder Abfallteifractionen zu ermöglichen. Verbreitet werden mechanische, chemisch-physikalische, biologische und thermische Verfahren eingesetzt. Eine direkte Verwertung von Abfällen ohne eine vorausgegangene Behandlung ist nur in Ausnahmen wie etwa unbelastetem Bodenaushub oder sortenreinen Produktionsresten z.B. aus der Lebensmittelindustrie (hier: Einsatz als Futtermittel) möglich.

Ziel der mechanischen Behandlung von Abfällen ist die Gewinnung getrennter sowie möglichst homogener Fraktionen, um ihre Verwertung, optimierte Weiterbehandlung oder Beseitigung zu ermöglichen. Häufig sind Anlagen zur mechanischen Behandlung von Abfällen solchen zur Verwertung, zur weitergehenden Behandlung oder zur Beseitigung vor- bzw. nachgeschaltet; sie sind dann nicht als Alternative, sondern als Ergänzung anzusehen.

Die mechanische Verfahrenstechnik umfasst Trennverfahren zwischen Feststoffen und/oder Fluiden sowie Zerkleinerungs- und Agglomerationsprozesse. Die Einzeltechniken sind Demontage (automatisiert oder manuell) zur gezielten Trennung komplexer Materialverbände, Zerkleinerung mittels Brecher, Mühlen, Schredder, Scheren oder Pulper zur Reduzierung der Korngrößen und Einengung der Korngrößenverteilung, Klassierung mittels Siebung zur Trennung von Materialgemischen in ihre verschiedenen Korngrößen und Sortierung zur Trennung von Materialgemischen nach stofflichen Eigenschaften. Die Sortierung erfolgt manuell oder mittels Magnetabscheidung, Wirbelstromabscheidung, Elektrosortierung, Dichtesortierung (ballistische Verfahren, Sichter, Zyklone, Schwimm-Sink-Verfahren, u.a.) und Flotation. Zunehmend werden sensorgestützte Sortierverfahren entwickelt und eingesetzt. Die Verdichtung von Materialien erfolgt durch Pressagglomeration oder Aufbauagglomeration und dient der Verbesserung der

Handhabbarkeit und Erhöhung der Energiedichte. Ergänzende verfahrenstechnische Aspekte sind der Transport bzw. die Förderung mittels diskontinuierlicher Förderer (z.B. Kräne, Aufzüge, Bahnen, Radlader) und Stetigförderer (z.B. Gurt-, Trogketten-, Kratzketten-, Schwing- oder Schneckenförderer und Schubböden) bei Feststoffen sowie Pumpen und Rohrleitungen bei Fluiden oder pastösen Stoffen.

Chemisch-physikalische Verfahren werden überwiegend zur Behandlung flüssiger und pastöser Abfälle aus Industrie- und Gewerbebetrieben eingesetzt. Ziel der Behandlung ist es, die Abfallstoffe (fest oder flüssig) in einem Teilstrom zu konzentrieren und das entstehende Abwasser zu reinigen. Die klassische chemisch-physikalische Abfallbehandlung kann grundsätzlich in zwei unterschiedliche Typen gegliedert werden: Anorganische Verfahren werden zur Behandlung von Säuren und Laugen sowie von schwermetallhaltigen Lösungen, Dünnschlämmen und Flüssigkeiten mit schadstoffhaltigen Inhaltsstoffen eingesetzt. Ziel der Behandlung ist die Entgiftung der toxischen Anionen, die Neutralisation von Säuren und Laugen, die Abtrennung von fällbaren Kationen (insbesondere der Schwermetalle) und die Entwässerung von Schlämmen. Organische Verfahren dienen zur Behandlung von Abfällen, die überwiegend aus Wasser mit Beimischungen aus Ölen und Fetten bestehen. Das vorrangige Behandlungsziel ist die Trennung der Ölphase von der Wasserphase. Bei ölhaltigen Schlämmen wird zusätzlich eine Schlammphase separiert. Weitere Verfahren der chemisch-physikalischen Abfallbehandlung sind die Destillation und die Elektrolyse.

Die biologische Behandlung umfasst die Verfahren der Kompostierung und Vergärung. Bei der Kompostierung werden biologisch abbaubare Substanzen unter Verbrauch von Sauerstoff umgesetzt. Verfahrensvarianten der Kompostierung sind die Mietenkompostierung und die Kompostierung in Reaktoren. Die Vergärung findet dagegen in Abwesenheit von Luftsauerstoff statt und erfolgt immer in geschlossenen Reaktoren. Varianten der Vergärung sind die Nass- und die Trockenvergärung. Sowohl bei der Kompostierung als auch bei der Vergärung wird das biologische Verfahren regelmäßig mit mechanischen Komponenten zur Konditionierung der Abfälle sowie zur Aufbereitung der „Produkte“ bzw. Rückstände kombiniert. Darüber hinaus kommen chemisch-physikalische (z.B. Wäscher, Absorber), biologische (z.B. Biofilter) sowie thermische Verfahren (z.B. Abluftverbrennung, thermo-katalytische Oxidation) zur Behandlung von gasförmigen Emissionen zum Einsatz. Die Kompostierung oder Vergärung von getrennt erfassten Grünabfällen und Bioabfällen verfolgt das Ziel, ein landbaulich verwertbares Bodenverbesserungsmittel zu erzeugen, dagegen zielt die Behandlung von Restabfällen auf die Abscheidung von Wertstoffen und Störstoffen sowie die Stabilisierung der Reststoffe durch biologischen Abbau organischer Inhaltsstoffe. Daneben werden Konzepte verfolgt, bei denen die mechanisch aufbereiteten Restabfälle durch Trocknung stabilisiert und als Ersatzbrennstoff verwertet werden.

Die Verbrennung von Abfällen ist eines der ältesten thermischen Verfahren zur Abfallbehandlung; organische Abfallanteile werden inertisiert und hygienisiert, gleichzeitig wird das Abfallvolumen vermindert. Für die Verbrennung von Haushaltsabfällen bzw. Restmüll ist insbesondere die Rostfeuererzeugung verbreitet. Die Wirbelschichtfeuererzeugung wird häufig zur Verbrennung von Klärschlämmen und anderen kleinteiligen homogenen Materialien eingesetzt; Varianten der Wirbelschichtfeuererzeugung sind die stationäre und die hochexpandierende (auch zirkulierende) Wirbel-

schicht. Gefährliche Abfälle aus Industrieunternehmen und Produktionsprozessen insbesondere der chemischen Industrie werden in Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt, in denen Drehrohröfen mit Nachbrennkammer arbeiten. Die Verbrennungsgase verlassen den Feuerraum und geben ihre Wärmeenergie im Kessel ab. Vor der Freisetzung der Rauchgase in die Atmosphäre müssen die Schadstoffe in der Rauchgasreinigungsanlage abgetrennt werden. Nach dem Stand der Technik werden bereits im Kessel Stickoxide mittels SNCR-Verfahren (*Selective Non Catalytic Reduction*) vermindert. Zur Abscheidung von sauren Schadstoffen werden quasi-trockene Verfahren eingesetzt, wobei Kalkmilch über einen Rotationszerstäuber in den Rauchgasstrom eingebracht und das entstehende Reaktionsprodukt im nachgeschalteten Gewebefilter gemeinsam mit dem Flugstaub aus dem Rauchgas abgetrennt wird. Zur Abscheidung von Quecksilber und organischen Schadstoffen wird außerdem Herdofenkoks in das Rauchgas eingeblasen, der ebenso mit dem Gewebefilter abgetrennt wird. Ein hinter das Wäschersystem geschalteter SCR-Reaktor (*Selective Catalytic Reduction*) erlaubt die Minderung der Stickoxidemissionen, ein Koks-Adsorber dient zur Abscheidung organischer Schadstoffe. Neben der klassischen Verbrennung existieren mit der Vergasung und der Pyrolyse zwei weitere thermische Verfahren, die ebenfalls für die Behandlung von Abfällen eingesetzt werden. Die beschriebenen thermischen Verfahren werden auch zur energetischen und stofflichen Abfallverwertung eingesetzt. Geeignete Abfälle oder speziell aufbereitete Ersatzbrennstoffe können darüber hinaus in einer Vielzahl thermischer Prozesse als Brennstoff eingesetzt und energetisch verwertet werden.

### 7.3 Abfallbeseitigung, Deponierung

Die geordnete Deponie stellt noch immer die Senke für die nicht verwertbaren Reststoffe der Abfallbehandlung dar. Sie ist als ein Reaktor zu verstehen, in dem eine Vielzahl von chemischen, biologischen und physikalischen Wechselwirkungen der eingebrachten Abfälle untereinander, mit der Atmosphäre und mit ggf. eintretendem Niederschlagswasser ablaufen. Die Aufgabe der Deponie als technischem Bauwerk besteht darin, eine Beeinträchtigung der Umwelt durch die abgelagerten Abfälle oder die Wechselwirkungsprodukte zu verhindern. Dazu werden durch die Wahl des Standortes, beim Bau und im Betrieb der Deponie voneinander unabhängige Barrieren, ein sog. Multibarrierensystem, realisiert. Zusätzlich wird durch die vorangegangene Behandlung der Abfälle deren Reaktionsvermögen und Emissionspotential vermindert. Die erfassten Emissionen (Sickerwasser, Deponiegas) werden einer Behandlung oder Verwertung zugeführt.

### 7.4 Dienstleistungen

Dienstleistungen im Bereich der Abfallwirtschaft werden in verschiedenen operativen und strategischen Ebenen erbracht. Die unterste operative Ebene umfasst insbesondere Leistungen im Rahmen der Abfalllogistik wie Sammlung, Transport und Lagerung von Abfällen, sowie den Betrieb von Entsorgungsanlagen und die chemische Analytik im Rahmen der behördlichen Überwachung bzw. der Emissionskontrolle des Anlagenbetriebs. Eine übergeordnete operative Ebene umfasst den Bereich des Abfallmanagements und die Entwicklung von Abfallwirtschaftsplä-

nen. Eine dritte operative Ebene stellen Beratungsleistungen dar, die den technischen Anlagenbetrieb betreffen. Auf einer strategischen Ebene werden Dienstleistungen im Bereich der wirtschaftlichen und politischen Interessensvertretung und Meinungsbildung sowie wissenschaftliche Dienstleistungen erbracht.

## 7.5 Fazit

Die Abfallentsorgung in Deutschland hat sich bereits sehr weit in Richtung einer Kreislaufwirtschaft entwickelt. Anhand der Daten des Statistischen Bundesamtes (Becker et al. 2007) wurden im Jahr 2005 rund 332 Mio. t Abfälle erfasst. Darin enthalten waren rund 185 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle, über 52 Mio. t Bergematerialien aus dem Bergbau, 48 Mio. t Abfälle aus Produktion und Gewerbe sowie 46,55 Mio. t Siedlungsabfälle. Rund 18,5 Mio. t waren gefährliche Abfälle. Den Abfallbehandlungsanlagen wurden 161 Mio. t Abfälle angedient, knapp 46 Mio. t wurden auf Deponien beseitigt. Weitere 52 Mio. t Bergematerial aus dem Bergbau wurde auf Halden abgelagert. Rund zwei Drittel der Abfälle wurden verwertet und ein Drittel beseitigt. Die volkswirtschaftliche Wertschöpfung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen im Jahr 2005 wird mit 3,7 Mrd. Euro veranschlagt. Sie geht mit einem direkten Beschäftigungseffekt von rund 60.000 Personen einher (Hüther 2006).

Die finanziellen Aufwendungen im Bereich der Abfallentsorgung im Jahr 2004 beliefen sich auf 13,6 Mrd. €. Der Jahresumsatz der Abfallwirtschaft wird auf rund 50 Mrd. € geschätzt (BMU 2007a). Der Binnenmarkt ist der wichtigste Absatzmarkt für die deutschen Unternehmen im Abfallentsorgungsbereich. Große Investitionsschübe sind zuletzt durch das Ablagerungsverbot für unbehandelte Siedlungsabfälle ab Mitte 2005 ausgelöst worden, in dessen Folge die Kapazitäten zur Behandlung (thermisch und mechanisch-biologisch) und zur mechanischen Aufbereitung von Siedlungsabfällen erweitert wurden. Weitere Impulse werden von der als „Ziele 2020“ bezeichneten Strategie für die Zukunft der Siedlungsabfallentsorgung erwartet (Verbücheln et al. 2003), die eine möglichst vollständige Nutzung der in den Siedlungsabfällen vorhandenen Wertstoffe und Energien und den weitgehenden Verzicht einer Beseitigung auf Deponien vorsieht. Während bzgl. der biologischen, chemisch-physikalischen und thermischen Abfallbehandlungsverfahren eine Konsolidierung auf einige erprobte Technologien stattgefunden hat, stellt sich vor diesem Hintergrund insbesondere der Bereich der mechanischen Abfallbehandlung als Innovationsschwerpunkt dar; die verbesserten Möglichkeiten sensorgestützter automatischer Stofftrennverfahren werden die weitere Entwicklung der Abfallentsorgung prägen. Teilaspekte dieser Entwicklung sind sowohl die effizientere Erfassung von Abfällen, die Optimierung der Materialeigenschaften der aus Abfällen gewonnenen Sekundärrohstoffe und -brennstoffe als auch der Rückstände sowie die Qualifizierung dieser Materialien für hochwertige und effiziente Verwertungswege.

Der inländische Investitionsbedarf für Neuinnovationen im Bereich der Abfallwirtschaft im Zeitraum bis 2020 wird auf rund 6,9 Mrd. € geschätzt. Über dieses Investitionsvolumen für zusätzliche Behandlungskapazitäten hinaus besteht im Bereich der deutschen Abfallwirtschaft ein jährlicher Ersatzbedarf in Höhe von knapp 1 Mrd. €, bzw. – kumuliert über den Zeitraum 2007 bis 2020 – über 13 Mrd. €. Unter Berücksichtigung von Sachausgaben (z.B. elektrische Energie)

ergibt sich damit eine inländische Nachfrage von über 24 Mrd. €, die zu zwei Drittel im Zusammenhang mit der Siedlungsabfallentsorgung steht. Der Binnenmarkt bleibt damit der wichtigste Markt für die deutschen Unternehmen im Abfallbereich (Knappe/Blazejczak 2007).

Zwar wird Deutschland absehbar der wichtigste Absatzmarkt für Unternehmen im Handlungsfeld Abfallwirtschaft bleiben, die EU-Osterweiterung und die Angleichung der Umweltvorschriften innerhalb der EU werden aber auch die Bedeutung des europäischen Marktes forcieren. Schließlich wird das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in Asien auch dort die Nachfrage nach deutschen Abfalltechnologien verstärken. Der weltweite Investitionsbedarf im Zeitraum bis 2020 soll bis zu 44 Mrd. € Invest auf internationaler Ebene (außerhalb Deutschlands) betragen (Knappe/Blazejczak 2007) – davon entfallen rund 55% (24 Mrd. €) auf Produkte bzw. Leistungen aus bzw. in den jeweiligen Ländern; der Rest – rund 20 Mrd. € werden von diesen Ländern importiert. Der größte Teil des Investitionsbedarfs entfällt auf thermische und biologische Behandlungsanlagen. Nur rund 4 Mrd. € betreffen Aufbereitungsanlagen – allerdings wird für dieses besonders innovative Marktsegment in den nächsten Jahren ein überproportional starkes Wachstum vorausgesagt. Deutsche Unternehmen haben hier einen Weltmarktanteil von über 60% (BMU 2007a). Am gesamten Weltmarkt für Anlagen in der Abfall- und Recyclingwirtschaft haben deutsche Unternehmen einen Anteil von rund 24%. Der Umfang der deutschen Exporte aufgrund der zuvor dargestellten Verhältnisse im Zeitraum bis 2020 wird auf fast 6 Mrd. € geschätzt.

Im Bereich Abfallwirtschaft ist erneut die große Diskrepanz zwischen den Industrieländern und den Schwellen- und Entwicklungsländern auffällig. Während die Industrieländer den Paradigmenwechsel von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft bereits teilweise vollzogen haben, sind in den Schwellen- und Entwicklungsländern Abfälle noch immer und in erster Linie ein Problem der Stadt- und Umwelthygiene. Die Organisation der Abfallerfassung und die Einrichtung geordneter Deponien erscheinen vielerorts als die dringlichsten Herausforderungen. Erst im Zuge einer fortgesetzten Wirtschaftsentwicklung und eines gesteigerten Lebensstandards können die in den Industrienationen etablierten Behandlungs- und Beseitigungstechnologien einen Zugang zu diesen Märkten erhalten.





## 8 Erhalt von Natur und Biodiversität

Der rasant ansteigende Verlust an Naturlandschaft und Biodiversität wird mit großer Übereinstimmung als eines der gravierendsten globalen Umweltprobleme erachtet. Jährlich sterben – überwiegend verursacht durch die Lebens- und Wirtschaftsweisen der Menschen – ungefähr 27.000 Tier- und Pflanzenarten aus. Weltweit liegen die derzeitigen Artenverluste damit etwa einhundert bis tausend Mal höher als die vermutete natürliche Aussterberate (Naturallianz 2008). Neben den ökologischen Problemen, die dieser Diversitätsrückgang befürchten lässt, wirkt sich der Artenverlust letztlich auch erheblich auf die ökonomische, kulturelle und soziale Sphäre menschlicher Existenz aus.

### 8.1 Ausgangslage: Probleme, Ziele, Lösungsansätze

Problematische Beeinträchtigungen und Zerstörungen von Natur und Biodiversität erfolgen in räumlicher, stofflicher, energetischer und informatorischer Hinsicht. Mit Blick auf räumliche Beeinträchtigungen sind vor allem die direkte Zerstörung und mechanische Schädigung von Lebens- und Naturräumen im Zuge von Bau-, Versiegelungs- oder Bewirtschaftungsmaßnahmen, sowie die Verinselung und Zerschneidung von Lebensräumen zu nennen (z.B. durch Verkehrsanlagen, Siedlungen, Tagebau, Ausbau von Fließgewässern). Wesentliche Beeinträchtigungen erfolgen auch durch die großflächige, intensive Landbewirtschaftung mit artenarmen Besatz (Monokulturen). Eine weitere räumliche Problematik stellt die Verdrängung endemischer Populationen durch invasive Arten dar. Hinsichtlich stofflicher Beeinträchtigungen spielt die Landwirtschaft über die flächige Immission ökotoxischer Schadstoffe und Nährstoffe eine große Rolle. Für die ozeanischen Ökosysteme stellt die zunehmende Versauerung des Meeres eine große und ubiquitäre Beeinträchtigung dar. Deutlich verbessert hat sich in Deutschland – im Gegensatz zur globalen Lage – die Situation bezüglich des Schadstoffausstoßes von Industrie, Haushalt und Verkehr.

Energetische Beeinträchtigungen erfolgen beispielsweise durch Lärmemissionen, etwa in dicht besiedelten Regionen; aber auch in den Ozeanen sind inzwischen viele Lebewesen vom Lärm beeinträchtigt. Lokal gerät Biodiversität außerdem über die Emission von Abwärme (von thermischen Kraftwerken oder Produktionsanlagen) in Gefahr. Eine indirekte energetische Beeinflussung von Natur und Biodiversität stellt die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur dar. Der Klimawandel bringt aller Voraussicht nach global starke Änderungen der bestehenden naturräumlichen Verhältnisse mit sich. Informatorische Beeinträchtigungen lassen sich auf Ebene der Gene und Erbinformationen vermuten und aufzeigen (beispielsweise bei der Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen). Hormonaktive Substanzen, Arzneimittelrückstände und eingeschleppte Krankheitserreger bedrohen endemische Arten. Der Verlust natürlicher Arten erfolgt mitunter auch sehr direkt. So ist im globalen Kontext die unkontrollierte Bejagung und Befischung auch heute noch ein wichtiger Faktor schwindender Biodiversität. Ökonomisch und sozial von hoher Relevanz ist der Verlust kultureller Biodiversität, d. h. der Schwund an Vielfalt bei Nutzpflanzen und -tieren. Eine industrialisierte und globalisierte Agrar-, Vieh-, Fischerei- und Forstwirtschaft führte in kurzer Zeit zu einem massiven Rückgang der im Laufe der Mensch-

heitsgeschichte durch Züchtung erzielten Vielfalt. So gingen beispielsweise seit Beginn des 20. Jahrhunderts in den USA 6.000 Apfelsorten verloren. Weltweit sind seit Beginn der Industrialisierung ca. 75% aller Kulturpflanzensorten unwiederbringlich ausgestorben. Die Verdrängung vieler traditioneller Kulturpflanzen geht dabei mit Privatisierung (von Kulturpflanzen und genetischen Ressourcen) Hand in Hand. Dies erweist sich heute und in Zukunft in vielerlei Hinsicht als problematisch.

Angesichts der Problemlagen (UNEP 2001) wurden und werden immer wieder Ziele und Zielkataloge für den Erhalt von Natur und Biodiversität formuliert. Auf Internationaler Ebene verpflichteten sich mit der „*Convention on Biological Diversity*“ 189 Staaten auf die generelle Zielsetzung, natürliche Biodiversität zu erhalten, einen nachhaltigen Umgang mit ihr zu leisten sowie Wert und Nutzen aus den genetischen Ressourcen der Erde in fairer Weise zu teilen (CBD 2008). Die Biodiversitätskonvention steht dabei stark im Kontext der Armutsbekämpfung. Auf nationaler Ebene sind übergeordnete Ziele im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) verankert, und mit der im November 2007 beschlossenen „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ liegt erstmals in Deutschland eine umfassende und anspruchsvolle Strategie zur Umsetzung der UN-Konvention vor, die rund 330 Ziele und 430 Maßnahmen zu allen biodiversitätsrelevanten Themen enthält (BfN 2008). Ziel der Bundesregierung ist, den Rückgang der Biodiversität in Deutschland bis 2010 aufzuhalten und eine positive Trendentwicklung einzuleiten (BMU 2007b).

Meilensteine wie auch Schwierigkeiten in der Umsetzung der Ziele werden im Zwischenbericht ebenso dargestellt, wie grundsätzliche Hemmnisse bei der Entwicklung von Technologien zum Erhalt von Natur und Biodiversität aufgezeigt (siehe dazu auch SRU 2002). So wirkt das weit verbreitete, kulturell verankerte Verständnis von Technik als Gegennatur grundlegend der Entwicklung von Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität entgegen. Im Ausgangspunkt stehen Naturschutz und Technik – belastet durch die kulturelle Hypothek der Moderne – in Sinn und Zweck diametral zueinander.

Möchte man Lösungen zum Erhalt von Natur und Biodiversität entwickeln, bedarf es vor allem geeigneter Instrumente, die Technik kontrollieren. Solche Kontroll- und Regelungsinstrumente sind üblicherweise in institutionalisierten Handlungsmustern, wie Gesetzen, Verordnungen, Governance-Konzepten, Planungsverfahren, Managementregeln oder Raumordnungsplänen gegeben und werden hier in einem weiten Technikverständnis als „Sozialtechniken“ bezeichnet. Der Begriff lässt pointiert deutlich werden, dass es in diesem Handlungsfeld weit weniger um die Kontrolle von Naturdingen und naturwissenschaftlichen Sachverhalten geht, als vielmehr um die Beherrschung gesellschaftlicher (und kultureller) Zusammenhänge.

## **8.2 Genuine Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität**

Im Folgenden seien nun zunächst Techniken dargestellt, deren vordringliches und explizites Ziel ist, Natur oder Biodiversität unmittelbar zu befördern. Anschließend werden Techniken anderer Handlungsfelder aufgeführt, die in ihrer breiten Anwendung mittelbar stark positiven Einfluss auf Natur und Biodiversität nehmen oder zukünftig nehmen könnten.

Zunächst wäre hier der Naturnahe Wasserbau zu nennen, der als eine der wenigen Sachtechniken direkt auf Erhalt und „Wiederherstellung“ von Natur und Biodiversität abzielt. Über Strukturvielfalt und Durchgängigkeit der Gewässerläufe, sowie über den Anschluss der umgebenden Landschaft an die Gewässer, wird die Artenvielfalt als auch die Vielfalt der Habitate erhöht. Neben dem direkten Artenschutz (über Fischtreppe, -unterstände, Rampen, Störsteine, Uferstrukturen etc.) werden im Naturnahen Wasserbau auch jene basalen Funktionen von Biodiversität unterstützt, die der Aufrechterhaltung grundlegender ökosystemarer Prozesse dienen. Naturnaher Wasserbau ist – als Spektrum ökonatürlicher Einzeltechniken – in Forschung und Entwicklung bereits weit gediehen. Es gilt jedoch, naturnahe Wasserbautechnik, dort wo sie installiert wird, immer der herrschenden naturräumlichen, ökosystemaren und zivilisatorischen Situation anzupassen.

Um räumliche Beeinträchtigungen gerade in dicht besiedelten Regionen wie Deutschland abzumildern, bedarf es der Änderung bestehender Verkehrskonzepte und Verkehrs(wege)-techniken. Es geht einerseits darum, Verkehr zu vermeiden und effizienter zu gestalten und andererseits darum, Verkehrs- und Wegetechnik natur-, bzw. lebensraumverträglicher auszubilden. Neben der bloßen Bündelung von Verkehrswegen (Straße, Schiene, Wasserstraße) könnte sich in fernerer Zukunft (jenseits 2020) für den Erhalt von Natur und Biodiversität auch die Entwicklung gänzlich neuer Verkehrssysteme hoch wirksam zeigen. Entlastungseffekte ließen sich zum einen durch Konvergenzen erzielen (z. B. Konvergenz von Schiene und Straße oder von Individual- und Kollektivverkehr), zum anderen durch die Verlagerung der Verkehrswege in weniger sensible Lebensräume, etwa in den Untergrund (s. Geotechniken) oder in den bodennahen Luftraum. So könnten die Flächeninanspruchnahme und die Zerschneidungseffekte von Verkehrsstrassen minimiert und die biodiversen Ökosysteme am Boden geschont werden. Beide Verlagerungsstrategien erweisen sich allerdings in anderer Hinsicht als problematisch. Letztlich positiv für den Erhalt von Natur und Biodiversität wirken sich all jene Strategien und Entwürfe aus, die zu einer Verkehrsvermeidung führen. Hierbei kann der Ausbau von Kommunikationstechniken zur virtuellen Präsenz beitragen oder – sehr viel weit reichender – umfassende Ansätze zur dezentralen Organisation von Arbeits- und Produktionsprozessen. Auch Lärmschutztechniken erweisen sich – gerade im Verkehrsbereich (z.B. leise Antriebsaggregate, Rad-Schiene-Unterbau-Systeme, Fahrzeugdesign, Flüsterasphalt, Schiffsantriebe) – als einschlägig.

Um eine direkte Ausrottung spezifischer Arten zu verhindern, kommen klassischer Weise Sozialtechniken wie Jagdverbote, das Ausweisen von Schonzeiten oder Schutzgebieten, Handelsabkommen, etc. zur Anwendung. Innovativ sind hier evolutionsbiologische oder ökosystemare Nutzungskonzepte. Sachtechniken können bei der Reduzierung von Nebenfolgen der gängigen Jagd-, Fischerei- und Pflanzensammelmethode eine Rolle spielen, um unnötige Schäden an (anderen) Lebewesen oder Ökosystemen zu minimieren. Auf Ebene der Landschaften und Lebensräume gilt es ganzheitliche Konzepte einer nachhaltigen Raumnutzung zu entwickeln. Als wegweisend seien hier beispielhaft die UNESCO-Biosphärenreservate genannt. Zumindest erwähnt sei, dass auch viele Sicherheitstechniken (doppelhäutige Tankschiffe oder Auffang- und Abscheideanlagen in Chemiebetrieben) einen Beitrag zum Erhalt lokaler Natur und Biodiversität leisten können.

Traditionelle und ökologische landwirtschaftliche Praktiken erhalten kulturelle Biodiversität „on farm“ und innerhalb einer direkten ökonomischen Wertschöpfung. Unter dem Bio-Label finden viele alte Kultursorten wieder Eingang in die gelebte Praxis; auch wurden durch eine extensivere und kleinräumigere Bewirtschaftung naturnähere, biodiverse Flächen erhalten oder geschaffen. Zur Erhöhung der Agrobiodiversität können auch der Anbau alternativer Kulturpflanzen und alternative Anbauverfahren beitragen. Im Zuge des Bestrebens einer naturräumlich, ökologischen Bewirtschaftung von Agrarflächen sind Rückzüchtungen und die Züchtung mehrjähriger Sorten der global häufigsten Nutzpflanzen („*Natural Systems Agriculture*“) aussichtsreich. Prinzipiell birgt auch *Precision Agriculture* über die Entlastung von Umweltmedien und Ökosystemen wie über die Möglichkeit der kleinteiligen Bewirtschaftung Potential für Naturschutz und Biodiversität.

Als letztmöglicher Bestandsschutz wird versucht, Arten (und Sorten) abseits lebender Naturzusammenhänge oder kultureller Nutzungen quasi „museal“ zu erhalten. Auf Ebene der Landschaften und Ökosysteme geschieht diese Konservierung in Situ, etwa durch das Ausweisen von Schutzgebieten unterschiedlicher Ausprägung; auf Ebene der Arten aber auch ex situ in kleinräumigen, künstlich angelegten „Konservatorien“ wie Archen, Zoos oder Botanischen Gärten. Aspekte von Natur und Biodiversität lassen sich auch auf Ebene der Gene konservieren. Weltweit existieren inzwischen ca. 1.400 Genbanken für Kulturpflanzen. Im Gegensatz zur Archivierung genetischen Materials von Kulturpflanzen erfolgt die Sammlung von Wildpflanzen und -tieren nur sporadisch, weithin unkoordiniert und meist mit geringem finanziellem Einsatz. Herausragend ist hier das „*Millenium Seed Bank Projekt*“ mit seinem Ziel, bis 2010 10% des weltweiten Bestandes zu sichern. Erbgut von Nutztieren wird hauptsächlich über Kryokonservierung erhalten. Zum gelingenden, dauerhaften Erhalt von Biodiversität über Genbanken besteht weiterhin Forschungsbedarf. In Gendatenbanken und Bioinformationssystemen werden die genetischen Informationen einzelner Arten oder Sorten möglichst umfassend elektronisch gespeichert, aufbereitet und gegebenenfalls zugänglich gemacht: Ein Beispiel ist das internationale Projekt „*Global Biodiversity Information Facility*“, dessen Ziel eine möglichst umfassende biologische Inventur der Erde ist. Darüber hinaus können gewisse Funktionen von Natur und Biodiversität auch gänzlich virtuell im Rechner („in silico“) als multimediale Dokumentation bewahrt und tradiert werden. Welcher Stellenwert dieser virtuellen Natur in einer sich bildenden Informationsgesellschaft zukünftig zukommt, ist allerdings ungewiss.

Die Datenerhebung zum Monitoring von Natur und Biodiversität ist teils hochgradig an Sachtechniken geknüpft. Auch bei den bislang stark manuell dominierten Arbeiten (Kartierung, Auszählen) findet sukzessiv eine Technisierung statt. Neue Möglichkeiten werden durch satelliten- und luftgestützte Beobachtungen eröffnet. Auch können Analyseverfahren der Molekularbiologie zur Anwendung kommen (etwa zur Bestimmung eines Art-spezifischen Stückes Erbgut im Zuge des Projekts „*Barcoding of Life*“). Bei der Fernüberwachung von Individuen mittels Sendeeinheiten oder Datenspeichern spielt die Miniaturisierung eine entscheidende Rolle. Es kommen zunehmend RFID (*Radio Frequency Identification*) und GPS (*Global Positioning System*) basierte Techniken zum Einsatz. Informations- und Kommunikationstechnologien entfalten gerade beim Monitoring einen Enabling-Charakter. Um ein Monitoring für Forschung, Technikentwicklung und politische Entscheidungen effektiv zu gestalten, sind neben der Datenerhebung ein konsistentes Daten- und Wissensmanagement von größter Bedeutung.

### 8.3 Techniken anderer Handlungsfelder mit hoher Relevanz für den Erhalt von Natur und Biodiversität

Natur und Biodiversität sind abhängig vom Zustand der Umweltmedien Boden, Wasser, Luft, deren Nutzung und Verschmutzung, vom Klima, wie auch vom Umgang mit Ressourcen und Abfall. Dementsprechend nehmen Umwelttechniken anderer Handlungsfelder erheblichen Einfluss auf den Erhalt von Natur und Biodiversität. Techniken, die zu einer Verlangsamung des Klimawandels beitragen, entschärfen auch die Dramatik der klimabedingten Änderungen in Natur und Lebensgemeinschaften (Klimaportal 2008). Einsetzenden Artenwanderungen sollen Fluchtkorridore und Rückzugsräume zur Verfügung gestellt werden. Neben dem Ausweisen solcher Korridore und Räume sind hierbei alle Techniken dienlich, die zu einer Rücknahme der räumlichen Beeinträchtigungen beitragen. Zur Luftreinhaltung erweisen sich in Deutschland besonders Filtertechniken zur Reduktion von  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$ , in Schwellenländern oft auch zur Vermeidung säurebildender Abgase als günstig. Im Wasserschutz zeigen sich besonders Techniken zur Grundwasseranreicherung, zur Senkung des Wasserverbrauchs und zur Abwasserbehandlung als wirksam. Aussichtsreich sind insbesondere Techniken, die Mikroverunreinigungen, wie Arzneimittelrückstände oder hormonaktive Substanzen eliminieren oder Nährstoffe rückgewinnen können. Auch die Wärmerückgewinnung von Abwässern oder Kühlwässern kann lokal eine deutliche Entlastung von Gewässerökosystemen bedeuten, die klimabedingt zunehmend unter Stress stehen.

Aus dem Handlungsfeld Bodenschutz erweist sich in Ergänzung der oben genannten Agrartechniken eine gute landwirtschaftliche Praxis als wirkungsvolle flächendeckende Basis. Lokal helfen neue, schonende Verfahren der Altlastensanierung, bestehende Ökosysteme zu erhalten und zu entlasten. Im Zusammenhang mit der Schonung endlicher Ressourcen muss beim Anbau nachwachsender Rohstoffe Augenmerk auf eine gute fachliche Praxis gelegt werden. Jede Reduktion des Ressourcenverbrauchs (etwa durch Kreislaufführung) und jedes umweltfreundlichere Extraktionsverfahren, wie auch jede Substitution umweltschädlicher Stoffe, leistet direkt einen Beitrag zum Erhalt von Natur und Biodiversität. Von zukünftigen Verfahren der weißen und grauen Biotechnologie wird eine Entlastung natürlicher Ökosysteme erwartet. In der Abfallwirtschaft leisten Techniken des Recyclings (*Urban Mining*) und der Umwelthygiene einen Beitrag zum Erhalt von Biodiversität und Natur. Ihre Wirksamkeit hängt stark von den regional herrschenden Problemlagen ab.

### 8.4 Fazit

Das Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ erweist sich in seinen Problemen und (technischen) Lösungsansätzen nahezu ebenso vielfältig wie Natur und Leben selbst. Die nachfolgenden ersten Handlungsempfehlungen sind daher skizzen- und thesenhaft und müssen im weiteren Projektverlauf überprüft werden.

Hinsichtlich der Probleme und Ursachen ergibt sich weiterer Forschungsbedarf, vor allem bezüglich a) möglicher informatorischer Beeinträchtigungen, b) der Zusammenhänge zwischen (technisch) wirtschaftlichen Aktivitäten und Natur bzw. biologischer Vielfalt, c) Begleitforschung

zu Biodiversitätsforschungen. Eine höhere Präsenz von Naturschutz und Biodiversität in öffentlichen, politischen, forschungspolitischen aber auch ökonomischen und technischen Debatten wäre wünschenswert.

Zum jetzigen Stand des Projektes lassen sich noch keine Handlungsempfehlungen zur Priorisierung einzelner Umwelttechniken (hinsichtlich deren Umweltproblemlösungs- und/oder Marktpotentiale) geben. Der Schutz von Natur und Biodiversität wird in erster Linie nicht über Sachtechniken, sondern über Sozialtechniken realisiert. Umweltschutztechniken anderer Handlungsfelder, die einen stark positiven Einfluss auf Natur und Biodiversität haben, werden meist nicht mit den Zielen des Naturschutzes oder der Biodiversität in Verbindung gebracht, geschweige denn explizit an diesen ausgerichtet. Der Erhalt von Natur und Biodiversität sollte künftig nicht nur unbedachte aber erwünschte Nebenfolge, sondern vielmehr explizites Ziel bei der Förderung und Entwicklung von Umwelttechniken werden. Bei den Sachtechniken erweisen sich neben Hightech vor allem naturnahe Techniken und „Lowtech“ als wirksam, da diese in gewissem Umfang Kontrolle und Nutzung von Natur und Ökosystemen zurücknehmen und vermehrt Lebensraum bieten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass heutige „Lowtech“ meist das Produkt erheblicher wissenschaftlicher Anstrengungen – oft unter Einsatz von Hightech – ist. Ziel wäre künftig auch die Förderung und Etablierung von „high science“ (und „high arts“) für Lowtech. Geht es darum, Sozialtechniken oder umfassende öko-soziotechnische Systeme zu entwerfen bzw. deren Rahmen abzustecken, so gilt es naturwissenschaftliche und kulturwissenschaftliche Perspektiven und diesbezügliches Wissen zusammenzuführen. Forschungen in diese Richtung sollten vermehrt gefördert werden.

Allgemein lassen sich – bei allen Schwierigkeiten einer Operationalisierung dieser – für die Installation jedweder Technik in der Biosphäre zwei Meta-Strategien formulieren: Technische Sachsysteme sind naturnah und ökosystemverträglich auszubilden, oder aber derart gegen „Natur“ und Ökosysteme abzuschotten, dass Beeinträchtigungen weitgehend vermieden werden.

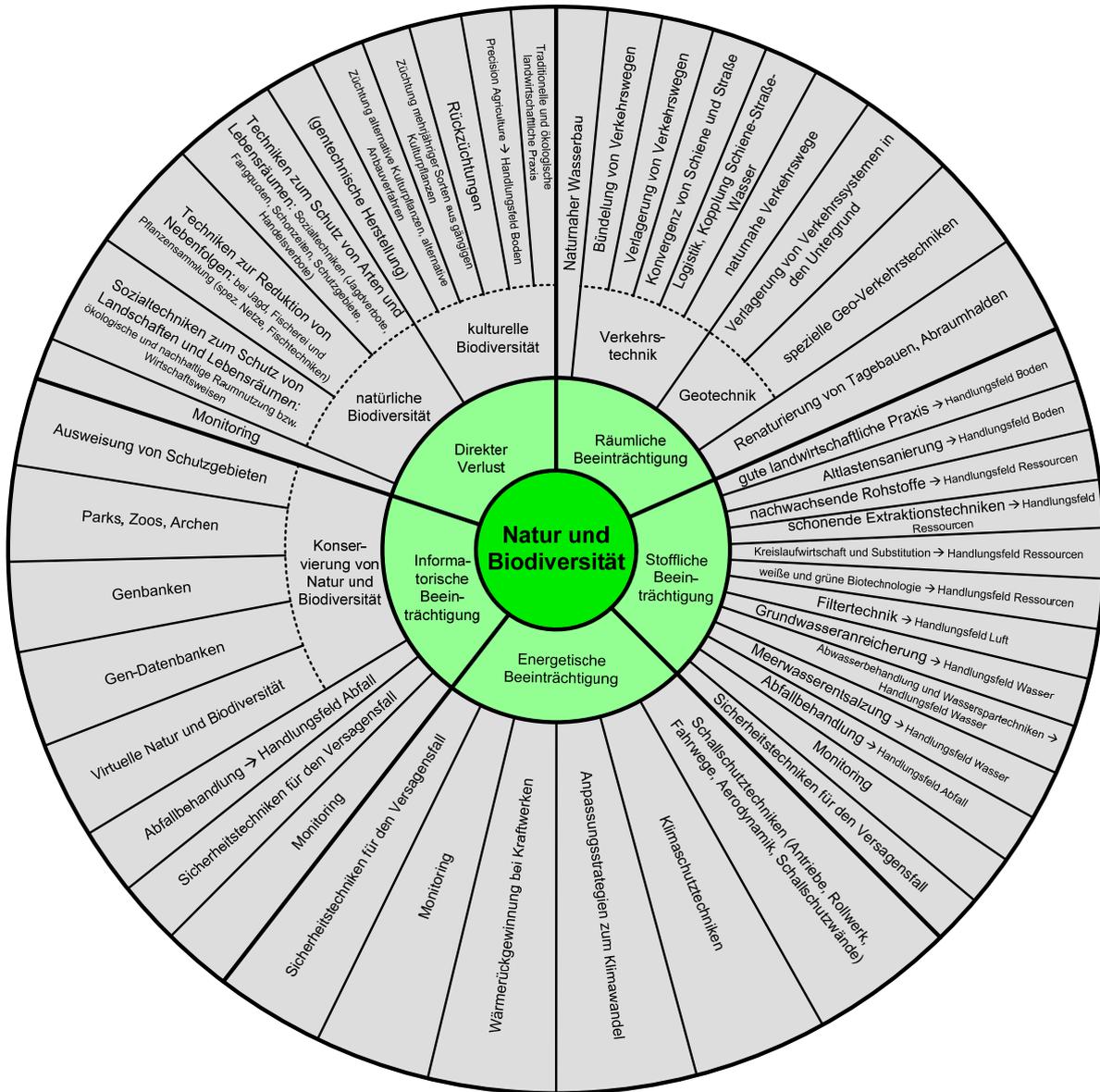


Abbildung 7: Technologiekompass zum Handlungsfeld Erhalt von Natur und Biodiversität



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgelegte State-of-the-Art-Report stellt das Gesamtspektrum der Umwelttechnologien entlang von sieben Umwelthandlungsfeldern (Klimaschutz, Luftreinhaltung, Wasser- und Bodenschutz, Schonung endlicher Ressourcen, Abfallwirtschaft, Erhalt von Natur und Biodiversität) dar. Dem im Projekt „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ bewusst gewählten problemorientierten Ansatz folgend, wurden zunächst zentrale Probleme und Herausforderungen in den jeweiligen Handlungsfeldern aufgezeigt. Dabei bestätigte sich die bereits in der Einleitung skizzierte Tendenz zu einer Verschärfung vieler globaler Problemlagen im Umweltbereich: Treibhausgase werden mit steigender Rate emittiert, die Ozonauddünnung über der Arktis und Antarktis weitet sich aus, Luftschadstoffe schädigen die Gesundheit oder führen zu Versauerung und Überdüngung von Böden und Gewässern, über eine Milliarde Menschen haben keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser, immer mehr Böden werden irreversibel degradiert, Primärwälder ohne Bedenken weiter abgeholzt, endliche Ressourcen ineffizient genutzt und die biologische Vielfalt erleidet unwiederbringliche Verluste.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen und eine lebenswerte Umwelt für nachfolgende Generationen zu hinterlassen, sind eine stringente Umweltpolitik, eine sehr gute Grundlagenforschung, eine zielgerichtete anwendungsbezogene und experimentelle Umweltforschung sowie im Ergebnis neue Technologien, Verfahren und Dienstleistungen notwendig. Auf letzteren liegt der Fokus des Berichts. In fast allen Handlungsfeldern wird ein Bedarf an technologischen Durchbrüchen in den nächsten Jahrzehnten deutlich, zumal sich der Handlungsdruck infolge von Klimawandel, Bevölkerungswachstum und steigender Ressourcennachfrage drastisch erhöhen wird.

In Deutschland zählt die Umweltforschung zu den bedeutsamsten und dynamischsten Erkenntnisbereichen. Angetrieben durch das ausgeprägte Umweltbewusstsein der Bürger und eine konsequente Umweltschutzgesetzgebung hat sich in Deutschland seit den siebziger Jahren eine schnelle, wissenschaftlich-technologische Entwicklung vollzogen, die Innovationen hervorgebracht und Umwelttechnologien zu einem wichtigen Wirtschaftszweig gemacht hat. Deutschland nimmt in vielen Gebieten der Umwelttechnologie zurzeit eine international hervorragende Stellung ein und ist in einigen Feldern Marktführer. Im Umweltbereich gehören deutsche Unternehmen zu den innovativsten in Europa.

Es lassen sich jedoch auch Defizite konstatieren. Trotz der nationalen und internationalen Stärken Deutschlands werden weiterhin gute Ideen zu wenig umgesetzt, neue Märkte für Produkte und Dienstleistungen nicht ausreichend erschlossen und bestehende Märkte in zu geringem Ausmaß zu Leitmärkten ausgebaut (BMBF 2006). So stehen etwa in den Bereichen Luftreinhaltung und Abfalltechnik zahlreiche erprobte Technologien zur Verfügung, die jedoch global gesehen nicht hinreichend vermarktet und verwendet werden, um die bestehenden Probleme zu lösen. Speziell im Dienstleistungssektor, der insbesondere eine Adaption von Wissen und Technologie an spezifische technische, wirtschaftliche, politische, kulturelle und religiöse Voraussetzungen in Schwellen- und Entwicklungsländern gewährleisten kann, sind noch viele unerschlossene Potentiale erkennbar.

Aufgrund dieser Schwächen und des ökonomischen und ökologischen Erfolgsdrucks ist ein „Paradigmenwechsel in der Forschungs- und Innovationspolitik“ im Umweltbereich (BMBF 2006) genauso unabdingbar wie politischer „Beistand“ im Hinblick auf den Transfer von wissenschaftlich-technologischen Umweltinnovationen in die Praxis und in neue Märkte. Diese Aufgaben durch strategische Handlungsempfehlungen zu erleichtern, ist ein wichtiges Anliegen des Projekts „Roadmap Umwelttechnologien 2020“.

Der vorgelegte State-of-the-Art-Report gibt einen umfassenden Überblick über reife Technologien und ihr Marktumfeld, trifft Aussagen zu neuen Technologien und deren Potentialen und gibt erste Hinweise auf mögliche Hemmnisse, die der Weiterentwicklung und Marktdurchdringung im Wege stehen. Dabei wird deutlich, dass in allen sieben Handlungsfeldern eine Vielzahl von Technologien, Gütern und Dienstleistungen entwickelt wurden, die in der Lage sind, den Problemdruck im Umweltbereich zu mildern. Dazu gehören: Technologien, welche die Umweltbelastungen von vorne herein vermeiden oder minimieren, Rohstoffe nachhaltiger nutzen, Abfälle und Produkte vermehrt einem Recycling zuführen sowie als nachgeschaltete Entsorgungs- und Reinigungstechnologien nicht vermeidbare Emissionen reduzieren. Grundsätzlich sind dabei nicht nur die einzelnen Verfahren oder Technologien, sondern Gesamtsysteme zu betrachten, die auch die verschiedenen Handlungsfelder verbinden. So können beispielsweise Ressourcenschonende Verfahren (z.B. lastgesteuerte Bauteiloptimierung, *Near-net-shape*-Technologien), Erzeugnisse (z.B. Stahl-Sandwich-Bleche, Schaumbeton) und Dienstleistungen (z.B. PIUS-Check, betriebliche Ökobilanz) sowie Instrumente einer effizienteren Ressourcenbewirtschaftung (z.B. Tropfbewässerung, Energiespartechiken) sowohl zu Entlastungen im Bereich der Klimagase, Luftschadstoffe, Wasser- oder Bodenbelastungen führen als auch erheblichen Einfluss auf die Biodiversität haben.

Ressourcenschonung, neue Werkstoffe, integrierte Prozesstechnik oder produktintegrierter Umweltschutz führen zudem in vielen Wirtschaftssektoren zu Kostensenkung und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit bei gleichzeitiger Verringerung der Umweltbelastung. Die Technologien sind unterschiedlich ausgereift, teilweise bereits als „Demonstratoren“ geeignet oder sogar schon in Betrieb, teilweise noch in Planung und Entwicklung und haben unterschiedlich große Einsatzbereiche. Einige z.B. die Mess-, Steuer- und Regeltechnik finden breiteste Anwendung, während andere, wie die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, auf ein spezifisches Problem fokussiert sind.

Die Fülle der zusammengetragenen Beispiele bestätigt die Aussage, dass Umwelttechnologien bereits heute einen wichtigen Wirtschaftsfaktor darstellen und demonstriert gleichzeitig den hohen technologischen Standard in Deutschland. Viele Umweltauswirkungen können zwar mit bestehender Technologie vermindert werden, dennoch werden stets neue Techniken im Hinblick auf ressourcen-, kosten- und energieeffizientere Lösungen benötigt. Diese Nachfrage führt auch weiterhin zu Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Handlungsfeldübergreifend kann man feststellen, dass sich in allen Umweltbereichen zahlreiche Überlappungen zu anderen Umweltmedien und -themen finden lassen. Beispiel für ein derartiges Zusammenspiel verschiedener Handlungsfelder sind Meerwasserentsalzungsanlagen, die nicht zuletzt auch unter dem Gesichtspunkt Energieeffizienz betrachtet werden sollten (Einsatz von solaren Entsalzungsanlagen). Es geht also immer darum, die Auswirkungen von Technologien auf andere Umweltbereiche bei der For-

schung und Entwicklung zu beachten und besonders Technologien mit geringen negativen Nebenfolgen zu fördern.

In allen Handlungsfeldern hat sich gezeigt, dass es unumgänglich ist bei der Abschätzung von Problemlösungskapazitäten und Marktpotentialen zwischen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern zu differenzieren. Oft sind in den OECD-Staaten hochwertige Hightech-Lösungen in der Diskussion, während es für den Exporterfolg in Schwellen- und Entwicklungsländern einfacher und robuster Technologien bedarf, die sich auf Basis einer bilateralen Zusammenarbeit in angepasste, bezahlbare und einfache „ganzheitliche“ Konzepte integrieren lassen. Vielfach wird es bei diesen Ländern vor allem um den Export von Dienstleistungen, den Wissenstransfer und strukturbildende Maßnahmen gehen.

Aus dem breiten Portfolio der State-of-the-Art-Technologien sind in allen Handlungsfeldern technologische Perspektiven und begründete Hinweise zur Prioritätensetzung für die Förderung der zukunftssträchigsten umwelttechnischen Entwicklungen herauskristallisierbar, sowohl im Hinblick auf die Umweltentlastung als auch mit Bezug auf das ökonomische Potential. Diese Hervorhebungen von Technologiefeldern und Einzeltechnologien als Ergebnis des State-of-the-Art-Reports sind allerdings vorläufig, im weiteren Verlauf des Projektes zu verifizieren und bei Bedarf zu ergänzen. Dies geschieht zunächst in den Kategorien der Handlungsfelder durch eine Befragung von Experten aus Wirtschaft und Forschung (erste Fragerunde). Die in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber vorgenommene Einteilung in Handlungsfelder hat sich bewährt. Im weiteren Projektverlauf wird jedoch zu überprüfen sein, inwieweit eine weniger sektorale, stärker integrative Betrachtungsweise im anschließenden Roadmapping-Prozess ergänzende Erkenntnisse liefern kann.

In der nun folgenden Projektphase wird aufbauend auf einer Erhebung von Expertenerwartungen und -einschätzungen durch Fragebögen (zweite Fragerunde) und Workshops der eigentliche Roadmapping-Prozess durchgeführt. Auf dieser Basis sollen Technologien, die ein hohes Problemlösungspotential bieten, genannt, Erkenntnisse zu bisher wenig geförderten Technologien geliefert, Forschungsbedarf identifiziert und als Ergebnis strategische Handlungsoptionen für eine langfristige Förderpolitik im Bereich Umwelttechnologien aufgezeigt werden.



# Literatur

- ad hoc-news (2007): Erster Auftrag für windkraftbetriebene Meerwasserentsalzungsanlage – Serienfertigung in Mecklenburg-Vorpommern geplant. <http://www.ad-hoc-news.de/Marktberichte-/de/14174520/>, Stand 14.11.2007
- Balkenkohl, F. (2006): Weiße Biotechnologie: Biotech meets Chemistry. In: Dokumentation der Fachtagung „Weiße Biotechnologie - Ökonomische und Ökologische Chancen“ am 18.10.2006 in Berlin. Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt); DIB (Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie), Berlin, S. 41-53
- Bayer (2007): Volles Rohr saniert, Bayer AG. <http://www.bayer.de/de/volles-rohr-saniert.aspx>, Stand 07.11.2007
- BBodSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz) (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17. März 1998. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 16, S. 502-510. Bonn
- BBodSchV (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) (1999): Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 12. Juli 1999. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 36, S. 1554-1582, Bonn
- Becker, B.; Knichel, H.; Thomas, J.; Hauschild, W. (2007): Nachhaltige Abfallwirtschaft in Deutschland. Ausgabe 2007, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2008): Übereinkommen über die biologische Vielfalt (CBD). <http://www.biodiv-chm.de/>, Stand 20.02.2008
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006): Die High-Tech-Strategie für Deutschland. Berlin
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2007a): Optische Technologien – Wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland. Eine Studie durchgeführt von Meyer, Arnold; Optech-Consulting. Berlin
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2007b): Die Hightech-Strategie zum Klimaschutz. Berlin
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hrsg.) (2007a): GreenTech made in Germany. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. München
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2007b): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit); UBA (Umweltbundesamt) (2007): Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen, Roland Berger Strategy Consultants im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg.). Dessau, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3337.pdf>, Stand 14.03.2008
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2006): Energieversorgung für Deutschland. Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006.
- Brand, L.; Eickenbusch, H.; Hoffknecht, A.; Krauß, O.; Zweck A. (VDI); Pohle, D. (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) (2007): Innovations- und Marktpotenzial neuer Werkstoffe. Monitoringbericht 2007. Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg.). Düsseldorf
- Bundesregierung (2002): Bodenschutzbericht der Bundesregierung für die 14. Legislaturperiode. Berlin

- CBD (Convention on Biological Diversity) (2008): <http://www.cbd.int/>, Stand 20.02.2008
- ChemIng (Chemie Ingenieur Technik) (2003): Wasseraufbereitungstechnologien: Technologie-Kombinationen im Kommen. *Chemie Ingenieur Technik* (75), 4/2003, S. 406-408. <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/104087055/PDFSTART>, Stand 05.11.2007
- Coenen, R.; Klein-Vielhauer, S.; Meyer, R. (1996): *Integrierte Umwelttechnik: Chancen erkennen und nutzen*. Berlin
- Dehler, M. (2003): Optische Sortierung von keramischen Rohstoffen. *Keramische Zeitschrift* 55 [8], S. 610-613
- DME (Deutsche Meerwasser Entsalzung e.V.) (2007): Solare Meerwasser-Entsalzungsanlage mit mehrstufiger Wärmerückgewinnung. [http://www.dme-ev.de/Forschung\\_und\\_Entwicklung.asp](http://www.dme-ev.de/Forschung_und_Entwicklung.asp), Stand 07.11.2007
- EEA (European Environment Agency) (2002): *Auf dem Boden der Tatsachen: Bodendegradation und nachhaltige Entwicklung in Europa – Eine Herausforderung für das 21. Jahrhundert*. Umweltthemen-Serie, No. 16, Kopenhagen, Denmark
- EEA (European Environment Agency) (2007): *Europe's environment – the fourth assessment*. Kopenhagen, Denmark, <http://www.eea.europa.eu/pan-european/fourth-assessment>
- EFA (Effizienz-Agentur NRW) (2006): *Ressourceneffizienz in der Praxis. Ressourcen schonen – Wirtschaft stärken*. Duisburg
- Elga (ELGA Berkefeld GmbH) (2007): *Mobile Brackwasser Entsalzungsanlage*. <http://www.elgaberkefeld.de/lib/elgaberkefeld/1/E543k881Ug3l93Lw0ukAMUE4.pdf>, Stand 07.11.2007
- EU (Europäische Union) (2005): *Thematische Strategie zur Bekämpfung der Luftverschmutzung – Fragen und Antworten*. Cafe-Programm. Memo/05/334. Brüssel, 21. September 2005. <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/05/334&format=HTML&aged=1&language=DE&guiLanguage=en>
- fbr (Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V.) (2007): *Einführung in die Regenwassernutzung*. <http://www.fbr.de/regenwassernutzung.html>, Stand 23.10.2007
- fairs & more (2005): *Netzwerk in Zusammenarbeit mit der Bundesagentur für Außenwirtschaft (bfai) (Hrsg.), Umwelt- und Wasserwirtschaft in Asien, fairs & more Business Magazin, Ausgabe 02/2005*
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Hrsg.) (2006): *Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe*. Gülzow
- Gartoff, B. (2006): *Weißer Biotechnologie – Die Perspektive der Industrie*. In: *Dokumentation der Fachtagung „Weißer Biotechnologie - Ökonomische und Ökologische Chancen“ am 18.10.2006 in Berlin*. Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt); DIB (Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie), Berlin, S. 15-24
- Glos, M. (2006): *Grußwort anlässlich der Verleihung des R.I.O AWARD 2006*. Online verfügbar unter: [http://www.aachener-stiftung.de/downloads/RIO\\_Award\\_2006.pdf](http://www.aachener-stiftung.de/downloads/RIO_Award_2006.pdf)
- Hiessl, H. (2005): *Wassertechnologien für eine nachhaltige Zukunft*. In: *Mappus, S. (Hrsg.): Erde 2.0 – Technologische Innovationen als Chance für eine nachhaltige Entwicklung*. Berlin/Heidelberg/New York, S. 140-172
- Hirth, T., Woidasky, J., Eyerer, P., *Nachhaltige rohstoffnahe Produktion*. 2007: Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal
- Hüther, M. (2006): *Von der Abfallentsorgung zum Urban Mining*. Institut der Deutschen Wirtschaft, Köln - Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt, Berlin, 13. Dezember 2006

- IEA (International Energy Agency) (2006): World Energy Outlook 2006. <http://www.worldenergyoutlook.org/2006.asp>, Stand 18.12.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2004): Abwasser der Kanalisation als Energiequelle. Forum Innovationsreport, Meldung vom 22.01.2004. [http://www.innovations-report.de/html/berichte/energie\\_elekrotechnik/bericht-25031.html](http://www.innovations-report.de/html/berichte/energie_elekrotechnik/bericht-25031.html), Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2005): Luftfeuchtigkeit lässt sich als Trinkwasserquelle nutzen, Meldung vom 21.10.2005, [http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt\\_naturschutz/bericht-50688.html](http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/bericht-50688.html), Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2006a): Software für Trinkwassernetze: Bauingenieure entwickeln Programm für Planung und Sanierung, Mitteilung vom 24.08.2006, <http://www.innovationsreport.de/html/berichte/informationstechnologie/bericht-69446.html>, Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2006b): Mobile Wasseraufbereitungsanlage für Not- und Katastrophenfälle, Meldung vom 15.11.2006, <http://www.innovations-report.de/html/berichte/verfahrenstechnologie/bericht-74120.html>, Stand 10.11.2007
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): 4. Sachstandsbericht (AR4) Klimaänderung 2007: Synthesis-Report. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)
- Johnke, B.; Butz, W. (2005): Klimarelevanz der Abfallwirtschaft, Umweltbundesamt. Berlin
- Johnson, J.; Harper, E. M.; Lifset, R.; Graedel, T. E. (2007): Dining at the periodic table: metals concentrations as they relate to recycling. Environ. Sci. Technol. 2007 (41), S. 1759-1765
- Kaiser, C.; Türk, V.; Hanke, T.; Schüle, R. (2007): Das Bedürfnisfeld „Bauen und Wohnen - Staus Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
- Klimaportal (2008): Auszüge zu "Klimaänderung und Biodiversität" – IPCC Bericht: Klimaänderung 2001. [http://www.proclim.ch/klima-portal/Tiere-Pflanzen/Biodiversitaet/Biodiversitaet\\_IPCC.html](http://www.proclim.ch/klima-portal/Tiere-Pflanzen/Biodiversitaet/Biodiversitaet_IPCC.html), Stand 20.02.2008
- Knappe, F.; Blazejczak, J. (2007): Potentialanalyse der deutschen Entsorgungswirtschaft. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungsbericht 206 31 303, Texte 44/07, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Kopinke, F.-D.; Mackenzie, K.; Köhler, R.; Georgi, A.; Weiß, H. und U. Roland (2003): Konzepte der Grundwasserreinigung. Chemie Ingenieur Technik (75), 4/2003, S. 329-339. <http://www.ufz.de/data/GW36618.pdf>
- Kraus, F. (2007): Energieeffizienzstrategien im Gebäudebereich. Welche Marktinstrumente brauchen wir? Berlin, [http://www.zukunft-haus.info/fileadmin/zukunft-haus-/Vortraege/Plenum\\_2/002\\_\\_Effizienzstrategie\\_fuer\\_Gebaeude\\_-\\_Kraus.pdf](http://www.zukunft-haus.info/fileadmin/zukunft-haus-/Vortraege/Plenum_2/002__Effizienzstrategie_fuer_Gebaeude_-_Kraus.pdf), Stand 14.03.2008
- Maak, N. (2001): Haushoch überlegen, Süddeutsche Zeitung, Artikel vom 12. März 2001
- McKinsey (2007): Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Studie der McKinsey&Company im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Industrie (BDI)
- Naturallianz (2008): Handel: Die Natur als Dienstleisterin. <http://www.naturallianz.de/handel.html>, Stand 20.02.2008
- NIW (Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung); ZEW (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH); ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2007): Zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Umweltschutzwirtschaft im internationalen Vergleich. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 20, 2007. BMBF (Hrsg.), Berlin

- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) (2007): Policies for a better environment – progress in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Summary for Policymakers. Vorge stellt während der Europaminister-Konferenz in Belgrad, 10. Oktober 2007. [http://www.oecd.org/document/17/0,3343,en\\_2649\\_34291\\_39305233\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/document/17/0,3343,en_2649_34291_39305233_1_1_1_1,00.html)
- Ökopol (Institut für Ökologie und Politik) (2008): Umweltbelastungen und Umweltqualität – Lösemittelmin derung in Farben und Lacken (Projekt-Nummer 487). <http://www.oekopol.de/de/aktuell/index.htm>, Stand 08.02.08
- Oertel, D. (2007): Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsende Rohstoffe: Sachstandsbereich zum Monitoring „Nachwachsende Rohstoffe. TAB-Arbeitsbericht 114, Berlin
- Oertel, D.; Grunwald A. (2006): Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik. TA-Arbeitsbericht Nr. 108, Berlin
- Smith, P.; Bellarby, J.; Foereid, B.; Hastings, A. (2008): Cool Farming: Climate Impacts of Agriculture and Mitigation Potential. Greenpeace-Report, Campaigning for Sustainable Agriculture, Amsterdam, [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_up-oad/themen/landwirtschaft/Cool\\_Farming\\_Report\\_Final.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_up-oad/themen/landwirtschaft/Cool_Farming_Report_Final.pdf), Stand 01.2008
- Spath, D.; Hirsch-Kreinsen, H.; Kinkel, S. (2008): Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen – Unternehmensefahrungen, Forschungs- und Transferbedarfe. Fraunhofer IAO (Hrsg.), Stuttgart 2008
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2002): Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes. Sondergutachten. BT-Drucksache 14/9852
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten, Juli 2007, Berlin
- Steinhilper, R. 1993: Recyclinggerechte Produktentwicklung: Aspekte, Strategien, Konstruktionspraxis. Düsseldorf: VDI-Berichte 1089, S. 221-245
- Stern, N. (2006): Stern Review on the Economics of Climate Change, Online-Quelle: [http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_econo-mics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_econo-mics_climate_change/stern_review_report.cfm), Stand 12.11.2006
- SusChem (Europäische Technologieplattform Sustainable Chemistry) (2006): F&E-Strategie Chemie und Biotechnologie für gesellschaftliche Bedürfnisfelder. Implementierungsplan für Deutschland.
- Töpfer, K (2007): Interview in GAIA 16/1 (2007), S. 8-9
- UBA (Umweltbundesamt); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz. Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation. Dessau, Berlin
- UFZ (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung) (2007): Weiterentwicklung der Wasserrahmenrichtlinie notwendig, Pressemitteilung vom 14. November, 2007, <http://www.ufz.de/index.php?-de=15562>, Stand 14.11.2007
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2001): Global Biodiversity Outlook. Montreal
- UniBremen (Universität Bremen) (2007): Wasser für die Wüste aus der Luft. Institut für Umweltverfahrenstechnik. <http://www.iuv.uni-bremen.de/presse/990320wk.htm>, Stand 15.09.2007
- Verbücheln, M.; Hansen, W.; Neubauer, A.; Kraemer, R.A.; Leipprand, A. (2003): Strategie für die Zukunft der Siedlungsabfallentsorgung (Ziel 2020) – Kurzfassung. FuE-Vorhaben 201 32 324 - für das Umweltbundesamt im Rahmen des UFOPLAN 2003. Ecologic - Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik, Berlin.

- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Hrsg.) (1994): Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden. Jahresgutachten 1994. Bonn, [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg1994.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg1994.pdf)
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (1999): Welt im Wandel: Strategien zur Bekämpfung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998, Berlin, Heidelberg, New York, [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg1998.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg1998.pdf)
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2005): Welt im Wandel – Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik. Berlin, Heidelberg, New York, [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2004.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2004.pdf)
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2007): Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel. Berlin, [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2007.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2007.pdf)