

Roadmap Umwelttechnologien 2020

Förderkennzeichen: 01RI0718A

Zwischenbericht

Karlsruhe, den 07.04.2008

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung	
Auftragnehmer:	Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse	
Projektleitung:	Prof. Dr. Armin Grunwald Jens Schippl (Dipl.-Geograph)	
Projektbearbeitung:		
ITAS:	Christian Dieckhoff	(Dipl.-Ing. Maschinenbau)
	Nora Gronwald	(Dipl.-Ing. Umweltingenieurwesen und Verfahrenstechnik)
	Dr. Nicola Hartlieb	(Dipl.-Geoökologin)
	Juliane Jörissen	(Dipl.-Ing. Raumplanung)
	Ursula Mielicke	(Dipl.-Ing. Chemieingenieurwesen)
	Margaretha Möst	(Dipl.-Ing. Bauingenieurwesen)
	Dr. Oliver Parodi	(Dipl.-Ing. Bauingenieurwesen)
	Dr.-Ing. Tim Reinhardt	(Dipl. Biologe)
	Dr. Volker Stelzer	(Dipl.-Geograph)

Unter Mitwirkung des
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT):

Prof. Dr. Thomas Hirth
Dr.-Ing. Jörg Woidasky
Rainer Bolduan (Dipl.-Geoökologe)
Dipl.-Ing. (BA) Ansilla Franck
Dr. Gudrun Gräbe

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einführung	14
2 Klimaschutz	20
2.1 Charakterisierung und Abgrenzung des Handlungsfelds	20
2.2 Meilensteine	22
2.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen	25
2.3.1 Energiewandlung und CCS	27
2.3.2 Verkehr	31
2.3.3 Energieeffizienz durch optische Technologien	32
2.3.4 Gebäude	33
2.3.5 Industrielle Prozesse	40
2.3.6 Land- und Forstwirtschaft	48
2.3.7 Abfall (Deponien)	55
2.3.8 Adaptation – Technologien zum Schutz vor Klimawirkungen	58
2.4 Akteure und Netzwerke	64
2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	67
3 Luftreinhaltung	78
3.1 Charakterisierung des Handlungsfeldes	78
3.2 Meilensteine	84
3.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen	89
3.3.1 Modifizierung, Minderung oder Substitution der Produkte oder der Einsatzstoffe/Hilfsmittel	90
3.3.2 Modifizierung oder Substitution der eingesetzten Technik (integrierter Umweltschutz)	95
3.3.3 Abluft-, Abgasbehandlung (additiver Umweltschutz)	99
3.4 Akteure und Netzwerke	105
3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	109
4 Wasserschutz	121
4.1 Charakterisierung des Handlungsfeldes	121
4.2 Meilensteine	121
4.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen	124
4.3.1 Problemfeld „Verbesserung des Wasserdargebots“	124
4.3.2 Problemfeld „Schadstoffeinträge in Wasservorkommen“	140
4.3.3 Problemfeld „Eingriffe in die Gewässerstrukturen“	146

4.4	Potentielle Zukunftsmärkte	154
4.5	Akteure und Netzwerke	158
4.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	160
5	Bodenschutz.....	172
5.1	Charakterisierung des Handlungsfeldes	172
5.2	Meilensteine	173
5.3	Reife Technologien und technologische Entwicklungen	176
5.3.1	Problemfeld „Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Versiegelung“ ..	176
5.3.2	Problemfeld „Eintrag von Schad- und Nährstoffen“	179
5.3.3	Problemfeld „Altlasten“	182
5.3.4	Problemfeld „Bodenerosion, Desertifikation, Versalzung“	189
5.3.5	Problemfeld „Bodenschadverdichtung“	199
5.4	Potentielle Zukunftsmärkte oder Probleme ohne Märkte	201
5.5	Akteure und Netzwerke	209
5.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	213
6	Schonung endlicher Ressourcen	224
6.1	Charakterisierung des Handlungsfelds	224
6.2	Meilensteine	232
6.3	Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen	235
6.3.1	Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung (Pfad 1).....	235
6.3.2	Steigerung der produktbezogenen Materialeffizienz (Pfad 2).....	247
6.3.3	Verlängerung der Lebensdauer von Produkten (Pfad 3)	258
6.3.4	Design for Recycling: Am Anfang schon ans Ende denken (Pfad 4).....	263
6.3.5	Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsprozesse (Pfad 5).....	269
6.4	Akteure und Netzwerke	280
6.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	284
7	Abfallwirtschaft	298
7.1	Charakterisierung des Handlungsfeldes	298
7.2	Meilensteine	300
7.3	Reife Technologien und technologische Entwicklungen	303
7.3.1	Abfallerfassung	303
7.3.2	Abfallbehandlung und Abfallaufbereitung zur Verwertung.....	304
7.3.3	Abfallbeseitigung (Deponie).....	312
7.3.4	Dienstleistungen	313
7.4	Märkte	313
7.4.1	Deutschland	313
7.4.2	Europa	319

7.4.3	Die Situation außerhalb Europas	320
7.5	Wichtige Akteure und Netzwerke	323
7.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	326
8	Erhalt von Natur und Biodiversität	332
8.1	Charakterisierung des Handlungsfelds	332
8.1.1	Gründe für den Erhalt von Natur und Biodiversität	333
8.1.2	Probleme und Ursachen	335
8.1.3	Ziele des Naturschutzes und des Erhalts von Biodiversität	342
8.2	Meilensteine, wesentliche Entwicklungen und Hemmnisse	345
8.2.1	Meilensteine	345
8.2.2	Schwierigkeiten in der Umsetzung von Naturschutz und Biodiversität	346
8.2.3	Naturschutztechnologien und Biodiversitätstechnologien – Grundsätzliche Hemmnisse	347
8.2.4	Lösungswege	349
8.3	Lösungen – Techniken und neue technologische Entwicklungen	350
8.3.1	Genuine und unmittelbare Techniken zum Schutz von Natur und Biodiversität	351
8.3.2	Umwelttechnologien anderer Handlungsfelder mit starkem Einfluss auf Natur und Biodiversität	366
8.4	Akteure und Netzwerke	370
8.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	371
9	Erste Bewertung und Ausblick	382

Abkürzungsverzeichnis

\$	Dollar (Währung der Vereinigten Staaten von Amerika)
€	Euro (Währung der europäischen Währungsunion)
a	Jahr
cm	Zentimeter
Gew.-%	Gewichtsprozent
GJ	Giga-Joule = 1000 Mio. Joule
ha	Hektar
K	Kelvin
K	Kilo = 10^3
kA	Kilo-Ampere
kJ	Kilo-Joule
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer
kWh	Kilowattstunde
lm	Lumen
M	Mega = 10^6
m	Milli = 10^{-3} und Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mA	Milli-Ampere
Mio.	Million = 10^6
Mt	Megatonnen
Mrd.	Milliarde = 10^9
MWh	Megawattstunde
U	Wärmedurchgangskoeffizient
t	Tonne (metrisch)
V	Volt
W	Watt
AbfAbIV	Abfallablagerungs-Verordnung
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
AbwVO	Abwasserverordnung
ADI	Austempered Ductile Iron
ADNR	Arbeitsgemeinschaft für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Altlastenexpertensystem
AFFF	Aqueous Film Forming Foam
AGM	Advanced Glas Melter

A/O	Anaerob/aerob
ARÖW	Gesellschaft für Arbeits-, Reorganisations- und ökologische Wirtschaftsberatung
Bamtec	Bewehrungs-Abbund-Maschinen-Technologie
baulinks	Bauportal für Neubau, Modernisieren...
BAW	Biologisch Abbaubare Werkstoffe
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BCC	Business Communications Company Inc
BDI	Bundesverband der deutschen Industrie
BdZ	Bundesverband der Deutschen Zementindustrie
BF	Blast Furnace
bfai	Bundesagentur für Außenwirtschaft
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BIOLOG	Biodiversität und Global Change (Programm des BMBF)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BOF	Blast Oxygen Furnace
BREF	Beste verfügbare Technik
BTEX	aromatische Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole
BRIC-Staaten	Schwellenländer Brasilien, Russland, Indien und China
BTL	Biomass-to-Liquid
CaCO ₃	Calciumcarbonat (Kalk)
CaO	Calciumoxid (Branntkalk)
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid (Kalkhydrat)
CAF	Computer Aided Farming
CAIO	Computer Aided Internal Optimization
CAO	Computer Aided Optimization
CAFE	Clean Air for Europe
CBD	Convention on Biological Diversity
CCS	Carbon-Capture-and-Storage
CDM	Clean Development Mechanism
CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
CH ₄	Methan

CHC	Kohlenwasserstoff-Converter
CITES	Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora
CKW	Chlorkohlenwasserstoffe
CLRTAP	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution
CMT	Continuous Multichannel Tubing
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
COP	Conference of the Parties (der CBD)
CPT	Cone Penetration Testing
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLI	Deutsche Lackindustrie GmbH
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DP	Direct-Push
DSL	Digital Subscriber Line
EAF	Electric Arc Furnace
EASC	Extended Anaerobic Sludge Contact
EG-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EE	Erneuerbare Energien
EEA	European Environment Agency
EECCA-Länder	Eastern Europe, Caucasus and Central Asia
EFA	Effizienz-Agentur NRW
EIA	Energy Information Agency
EIPPC	European integrated Pollution Prevention and Control Bureau
ELV	End of Life Vehicles
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EMIL	Erosionsmanagement in der Landwirtschaft
ENA	Enhanced Natural Attenuation
EpF	elektrophysikalische Fällung
ESSC	European Society for Soil Conservation
EU	Europäische Union
EU15-Staaten	Mitgliedstaaten der Europäischen Union (Stand bis 2004: 15 Mitgliedstaaten)
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem
EUV	Extremes Ultraviolettes Licht
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
FA-Gas	Fachausschuss Gasreinigung (in ProzessNet)

FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FAO	Food and Agriculture der UN
FAU	Food and Agriculture Organisation
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FFHR	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FONA	Forschung für Nachhaltigkeit (Forschungsprogramm des BMBF)
FWL	Feuerwärmeleistung
G3/G4	3. und 4. Generation von Kernkraftwerksreaktoren
GAP	gemeinsame Agrarpolitik der europäischen Union
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
GC	Gas Chromatography
GEMS	Global Environment Monitoring System
GEOMAR	Forschungszentrum für Geowissenschaften
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GrundwV	Grundwasserverordnung
GSF	Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in der Helmholtz-Gemeinschaft
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
GW	Grundwasser
GWA	Grundwasseranreicherung
GWP	German Water Partnership
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
HFC	Hydrofluorocarbons
HVLP	High Volume Low Pressure
HS Bremen	Hochschule Bremen
HS Mannheim	Hochschule Mannheim
HTS	Hightech-Strategie
HVLP	high volume, low pressure
IBU	Informationszentrum für betrieblichen Umweltschutz
ICT-WGT	Institut für technische Chemie – Bereich Wasser- und Geotechnologie
IEA	International Energy Agency
IFA	International Fertilizer Industry Association
IFEU	Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IFINIKOR	Institut für Instandhaltung und Korrosionsschutz
IFM	Institut für Meereskunde
IGB	(Fraunhofer) Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik
IKB	Deutsche Industriebank AG
IISI	International Iron and Steel Institute
IPP	Integrierte Produktpolitik
ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

ISO	International Organisation for Standardization
ISOC	International Soil Conservation Organisation
ISRIC-WDC	The World Data Center of the International Soil Reference and Information Centre
IT	Informationstechnik
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSWaT	International Post Graduate Studies in Water Technologies
ISCO	International Soil Conservation Organisation
ISCO	In-Situ Chemical Oxidation
IuK	Information und Kommunikation
IUSS	International Actions for Sustainable Use of Soil
IUSS-WG	International Actions for Sustainable Use of Soil – A World Soils Agenda
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
IVU	integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
IWRM	Integriertes Wasserressourcenmanagement
Kfz	Kraftfahrzeug
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KSA	Klärschlammaschen
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LBS	Landesbausparkassen
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
LCKW	Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe
LED	Light Emitting Diode
LF	Leitfähigkeit
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
LIFE+	L'Instrument Financier pour l'Environnement (das Finanzierungsinstrument für die Umwelt (der EU))
LfU Bayern	Bayrisches Landesanstalt für Umwelt
Lkw	Lastkraftwagen
LOPROX	Low Pressure Wet Oxidation
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung
MED	Multiple Effect Distillation
MIP	Membrane Interface Probe
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MS	Mass Spectrometry
MSF	Multistage Flash Evaporation
MSR	Messen-Steuern-Regeln
MTBE	Methyl-tert-butylether
MVA	Müllverbrennungsanlagen
NA	Natural Attenuation

Na ₂ CO ₃	Natriumcarbonat
NE	Nicht-Eisen
NEC	National Emission Ceilings
NESD	National Emissions Ceilings Directive
NH ₃	Ammoniak
NIR	Nahes Infrarot
NIR	Nationaler Inventarbericht
NIW	Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung
NM VOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds
N ₂ O	Distickstoffmonoxid, Lachgas
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
NTP	Niedertemperatur-Plasmaverfahren
NUS	Neue Unabhängige Staaten
O ₃	Ozon
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
Öko-Data	Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement
Ökopol	Institut für Ökologie und Politik GmbH
OLED	Organic Light Emitting Diode
PA	Precision Agriculture
PAK	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBT	Polybutylenterephthalat
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCM	Phase Change Material
PCT	Polychlorierte Terphenyle
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PIUS	Produktionsintegrierter Umweltschutz
Pkw	Personenkraftwagen
PLA	Poly lactid acid
PM	particulate matter
PM ₁₀	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser ≤10µm
PM _{2,5}	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser ≤2,5µm
POP	Persistent Organic Pollutants
PP	Polypropylen
PRB	Permeable Reactive Barriers
P-RoC	Phosphorus Recovery from Waste Water
PVC	Polyvinylchloride
RFID	Radio Frequency Identification

RIMAX	Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse
RO	Reverse Osmosis
ROST™	Rapid Optical Screening Tool
RTO	Regenerative Thermokatalytische Oxidation
RWE	Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SCR	Selective Catalytic Reduction
SF ₆	Schwefelhexfluorid
SKO	Soft Kill Option
SNCR	Selective Non Catalytic Reduction
SO ₂	Schwefeldioxid
SRSS	Schlicker-Reaktions-Schaum-Sinter-Verfahren
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
StaBa	Statistisches Bundesamt
stahl-online	Internetportal des Stahl-Zentrums
STFI	Sächsisches Textilforschungsinstitut
SusChem	Europäische Plattform Sustainable Chemistry
SVK	Sauerstoffverzehrkatode
TA	Technische Anleitung
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TDR	Time Domain Reflectometer
TEG	(Fraunhofer-)Technologie-Entwicklungsgruppe
THG	Treibhausgase
TiO ₂	Titandioxid
TNT	Trinitrotoluol
TOC	Total Organic Carbon
TS	Trockensubstanz
TSP	Total Suspended Particles
TU	Technische Universität
TVO	Trinkwasserverordnung
UAP	Umweltaktionsprogramm
UBA	Umweltbundesamt
UBAÖ	Umweltbundesamt GmbH Österreich
UCLA	University of California Los Angeles Health Science
UCT	University of Cape Town
UFO-Plan	Umwelt-Forschungsplan (Zusammenstellung der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des BMU)
ULCUS	Ultra Low CO ₂ Steelmaking
Umweltschutz-BW	Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (Plattform des Informationszentrum für betrieblichen Umweltschutz (IBU))

UN	United Nations
UNCCD	UN Conventions to Combat Desertification
UNCED	UN Conference on Environment and Development
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation
UNFCCC	UN Framework Convention on Climate Change
UNO	United Nations Organisation
UrschadG	Umweltschadensgesetz
USLAB-AVC	Ultra Light Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts
UV	Ultraviolette Strahlung
UV-Lacke	Lacke, die mit ultravioletter Strahlung trocknen und vernetzen
UWS	Umweltmanagement GmbH
UWT	Umwelttechnologien
VAE	Vereinigte Arabische Emirate
VerPackV	Verpackungsverordnung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinenbauanstalten
VDI-ZTC	Verein Deutscher Ingenieure/Technologiezentrum/Zukünftige Technologien Consulting
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VIK	Vakuum-Isolierglas
VIP	Vakuum-Isolationspaneel
VOC	Volatile Organic Compounds
VwVwS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe
WBB	Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderung
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WCED	World Commission on Environment and Development
WCP	World Climate Programme
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	World Health Organisation
WMO	World Meteorological Organisation
WRI	World Resource Institute
ZWE	Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH

1 Einführung

Umweltkrisen sind kein neues Phänomen. Der Mensch als kulturschaffendes Wesen hat die natürliche Umwelt seit Jahrhunderten gestalterisch geprägt und seinen Bedürfnissen angepasst, was im Verlauf der Geschichte immer wieder zu unbeabsichtigten Umweltveränderungen (Verkarstung, Bodenerosion, Artenverlust) geführt hat, die sich negativ auf die Lebensbedingungen der betroffenen Bevölkerung ausgewirkt haben. In der Vergangenheit handelte es sich jedoch meist um regional begrenzte Krisen, die der Mensch durch ein entsprechend angepasstes Verhalten bewältigen konnte. Das Neuartige im Verhältnis Mensch-Natur, das mit dem Begriff des „globalen Wandels“ bezeichnet wird, liegt darin, dass sich menschliches Handeln erstmals 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 einem steigenden Verbrauch natürlicher Rohstoffe geführt (WBGU 1999). Die ökologischen Kernprobleme des globalen Wandels sind in allen Regionen dieser Welt evident, 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 (NMU 2007, 6).

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 die Schwellenländer haben erkannt, dass eine weitere Subventionierung ihres raschen Wirtschaftswachstums über die Umwelt nicht länger 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 (Bundesregierung 2006). Umwelttechnologien stellen somit einen wichtigen Wachstumsmarkt der Zukunft dar.

Verschiedene aktuelle Studien belegen die wirtschaftliche Bedeutung der Umweltschutzwirtschaft (BMU 2007; UBA/BMU 2007; BMU/UBA 2007; NIW/ZEW/ISI 2007). Nach Angaben der Europäischen Kommission ist der Markt für Umwelttechnologien zwischen 1999 und 2004 in Europa jährlich um 7% gewachsen (BMU 2007, 13). 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, 109).

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 (Bundesregierung 2006).

Angesichts globaler Herausforderungen (Klimawandel, zunehmende Wasser- und Rohstoffknappheit) geht es jedoch weniger um nationale Regulierungen, als vielmehr um die Entwicklung internationaler Normen. 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, 85). 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, explizit Technologien 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 organisatori-

schen Rahmenbedingungen häufig auch nicht sinnvoll 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, also eine Entwicklung angeschoben werden, welche die nicht nachhaltigen Produktionstechnologien der Industrieländer überspringt (WBGU 2005, 208).

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 Anwendungen 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 Umweltschutzprodukte 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, 11).

Üblicherweise wird in der Umweltdebatte zwischen nachsorgenden, additiven, integrierten und kompensatorischen Techniken unterschieden. In den letzten Jahren haben sich das politische Interesse und damit auch die Innovationstätigkeit zunehmend in Richtung auf die Technologien des produkt- und produktionsintegrierten Umweltschutzes verschoben. Dies beinhaltet eine Abwendung 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 produktionsintegrierter 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, CO₂-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 System 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, z.B. Stresstoleranz).

Technologische Entwicklungen und Innovationen alleine reichen oft nicht aus, um den drängenden Umweltproblemen entgegen zu wirken 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 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 u.ä.

Aufbau und Funktion des Berichts

Mit diesem State-of-the-Art-Report wird der erste Zwischenbericht des Projekts „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ vorgelegt. Er soll einen Überblick über reife Technologien und ihr Marktumfeld, neue Technologien und ihre Potentiale sowie mögliche Hemmnisse, die der Weiterentwicklung und Marktdurchdringung im Weg stehen, aufzeigen. Der Schwerpunkt liegt in dieser Phase des Projekts jedoch auf den Technologien selbst, wobei auf eine umfassende Darstellung in großer Breite Wert gelegt wurde.

Wie oben ausgeführt sind das regulative Umfeld sowie die politischen Zielsysteme in vielen Bereichen der Umwelt von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung innovativer Technologien. Dieses wechselseitige Verhältnis wird im Rahmen des Roadmappings in Projektphase II im Hinblick auf den Zeithorizont 2020+ näher ausgeleuchtet. Hier erfolgt dann die anvisierte Integration der problemorientierten Perspektive (Wo besteht vor dem Hintergrund großer Umweltprobleme Handlungsbedarf? Welche Technologien werden benötigt?) mit der technikinduzierten Vorgehensweise (Welche Möglichkeiten bieten technische Innovationen?). Auf dieser Basis wird es möglich, Forschungsbedarf zu identifizieren und strategische Handlungsoptionen für eine zukünftige Förderpolitik im Bereich Umwelttechnologien aufzuzeigen.

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

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

Jedem dieser sieben Handlungsfelder ist ein Kapitel gewidmet. Soweit es aufgrund der Heterogenität der verschiedenen Umweltbereiche möglich war, wurde allen eine ähnliche Struktur zugrunde gelegt: Einem Aufriss der Problemlage folgt jeweils eine kurze Skizze der wesentlichen politischen Weichenstellungen und gesetzlichen Rahmenbedingungen. Anschließend werden reife Technologien und neue technologische Entwicklungen dargestellt sowie Marktpotentiale und mögliche Hemmnisse aufgezeigt. Die Detailgliederung bei der Darstellung der Technologien ist in allen Handlungsfeldern etwas unterschiedlich und orientiert sich entweder an den spezifischen Umweltproblemen des Handlungsfelds (Wasserschutz, Bodenschutz, Erhalt von Natur und Biodiversität), an relevanten Verursachern (Luftreinhaltung), an wesentlichen Technologielinien (Klimaschutz, Abfallwirtschaft) oder an strategischen Ansätzen zur Lösung der Probleme (Schonung endlicher Ressourcen). Der ausführlichen Darstellung der Technologien folgt jeweils ein Überblick über relevante Akteure und Netzwerke. Der letzte Abschnitt eines Kapitels fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und versucht eine erste vorsichtige Bewertung. Zwischen der Zusammenfassung und dem Literaturverzeichnis findet sich in jedem Handlungsfeld ein sog. „Kompass“, der das Beziehungsgeflecht von Problemen, Lösungsansätzen und Technologien grafisch darstellt.

Die Ausführungen beruhen im Wesentlichen auf eigenen Recherchen und Interviews mit Experten. Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal hat die Erstellung des Bericht durch inhaltliche Zuarbeit und konstruktive Kritik erheblich unterstützt.

Literatur

- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): GreenTech made in Germany. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. München
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit); UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (2007): Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. Berlin
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006): Die Hightech Strategie für Deutschland. Berlin
- Coenen, R., Klein-Vielhauer, S., Meyer, R (1996): Integrierte Umwelttechnik: Chancen erkennen und nutzen. Berlin
- 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
- NIW (Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung); ZEW (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH); ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung): (2006): Zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Umweltschutzwirtschaft im internationalen Vergleich. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 20-2007. BMBF (Hrsg.), Berlin
- Töpfer, K. (2007a): 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
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (1999): Welt im Wandel: Strategien zur Bekämpfung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998, Berlin, Heidelberg, New York
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2005): Welt im Wandel. Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik. Berlin, Heidelberg, New York

2 Klimaschutz

2.1 Charakterisierung und Abgrenzung des Handlungsfelds

Es besteht weitgehend wissenschaftlicher Konsens darüber, dass durch den zunehmenden Ausstoß von Treibhausgasen (THG) der natürliche Treibhauseffekt anthropogen verstärkt wird. Als direkt klimarelevante Gase werden Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Stickstoffdioxid (NO₂), Halogenierte Kohlenwasserstoffe sowie Schwefelhexafluorid (SF₆) bezeichnet. Auf eine globale Regulierung des Ausstoßes dieser Gase zielt das sogenannte Kyoto-Protokoll ab. Darüber hinaus sind indirekt klimawirksame Spurengase wie z.B. Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) oder flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC) als Vorläufersubstanz der Klimagase relevant (siehe Kapitel 3 „Luftreinhaltung“). Weiter tragen Rückkopplungseffekte zur Erwärmung bei, wie ein erhöhter Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Konsens besteht ebenfalls darüber, dass eine globale Temperaturerhöhung negative Auswirkungen und Risiken für Mensch und Umwelt in vielen Regionen der Erde nach sich zieht.

Veränderungen des Klimas haben sich im Lauf der Erdgeschichte immer wieder vollzogen und werden sich auch in Zukunft vollziehen. Die aktuelle Situation ist immer nur ein Übergangsstadium. Die anthropogen induzierte Veränderung des globalen Klimas, mit der wir zum ersten Mal in der Erdgeschichte konfrontiert werden, weist jedoch einige Besonderheiten auf. So gibt das Tempo mit dem sich der Wandel zu vollziehen droht, den Ökosystemen auf der Erde keine Möglichkeit sich langsam zu adaptieren. Das menschliche Leben hat sich im Laufe der Geschichte an die jeweils gegebenen klimatischen Verhältnisse angepasst: Städte sind an die Küsten gebaut, Dörfer unterhalb erosionsgefährdeter Hänge, Industriegebiete befinden sich in potentiellen Überschwemmungsgebieten, die Landwirtschaft ist mit den lokalen und regionalen klimatischen Gegebenheiten eng verzahnt. Ganze Erdteile sind in ihrer heutigen Wirtschaftsstruktur von spezifischen klimatischen Besonderheiten abhängig, so ist der Golfstrom von großer Bedeutung für West- und Nordeuropa, der Humboldtstrom für den Fischfang vor Südamerika oder der indische Monsun bestimmend für die Landwirtschaft in Südasien. Die Beispiele verdeutlichen aber auch, welche klimainduzierten Umweltveränderungen in welchem Ausmaß „schädlich“ für Mensch und Umwelt sind, ist immer eine Frage der menschlichen Wahrnehmung, letztlich also anthropogen definiert.

In den letzten Jahren ist das Thema Klimawandel stark in das öffentliche Bewusstsein gerückt, was sowohl auf die Veröffentlichung wissenschaftlicher Berichte (IPCC-Report, vgl. IPCC 2007), Stern-Report, vgl. Stern 2006 und v.a.) 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. Besonders in europäischen Ländern wurden Maßnahmen und Regelungen ergriffen, um den Klimawandel zu bekämpfen. Die EU, und hier insbesondere Deutschland, gelten als Vorreiter wenn es um die Gestaltung von Klimapolitik geht. Da es sich um ein globales Problem handelt, bedarf es aber auch globaler Lösungsansätze, wie sie mit dem Kyoto-Protokoll und dem mittlerweile diskutierten Folgeabkommen verfolgt werden. Dieser dringende Bedarf an internationaler Kooperation macht es schwer, die bisherigen Fortschritte in Bereiche internationa-

ler Klimaabkommen wie das Kyoto-Protokoll oder die Bali-Roadmap, einzuordnen: Haben wir Erfolge erzielt oder sind wir zu langsam?

Neu ist auch die Dynamik mit welcher derzeit die Wirtschaft bevölkerungsreicher Schwellenländer wächst. Industrialisierung, Motorisierung und Erhöhung des Lebensstandards gehen mit einem erhöhten Energieverbrauch und einem verstärkten Ausstoß von Treibhausgasen einher. Es gibt zahlreiche Ansätze über Verhaltensänderungen den Energieverbrauch zu reduzieren (Verzicht auf das Abholzen von Regenwäldern, Verzicht auf Fernreisen, Verzicht auf Fleischkonsum, Car-Sharing, Nicht-Nutzung von Stand-By, u.a.). Die globale Ausrichtung auf stabiles Wirtschaftswachstum und hohen Lebensstandard gemäß dem westlichen „Vorbild“, lässt es jedoch als unwahrscheinlich erscheinen, dass nur über derartige Verhaltensänderungen allein eine deutliche Reduktion des globalen THG-Ausstoßes möglich wird. So bleiben als wirksamste Gegenmittel die Entwicklung und der Einsatz klimaschonender Technologien, wenn Klimaschutz mit wirtschaftlichem Fortschritt und im globalen Durchschnitt steigendem Lebensstandard einhergehen soll. Gleichzeitig bietet die Entwicklung solcher Technologien auch vielversprechende Chancen für die Wirtschaft, da sich ein breites Feld neuer Märkte auftut. 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. Entwicklung und Einsatz derartiger Technologien sind zunächst oft mit zusätzlichen Kosten verbunden. Studien wie der Stern-Report (Stern 2006) oder die jüngst veröffentlichten McKinsey-Studien (McKinsey 2007a und 2007b) veranschaulichen, dass mit relativ geringem finanziellem Aufwand viel erreicht werden kann; „relativ“ deswegen, weil die Folgekosten des Klimawandels, die Kosten für Vermeidung oder Begrenzung des THG-Ausstoßes um ein Vielfaches übersteigen.

Folgt man den Ergebnissen des jüngsten IPCC-Berichts (IPCC 2007) und anderer Studien, so lässt sich durch den massiven Einsatz fortschrittlicher Technologien der anthropogene Treibhauseffekt nicht mehr vollständig vermeiden. Daher ist damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahrzehnten die negativen Folgen des Klimawandels, wie Hochwasser, Dürren oder extreme Wetterereignisse verstärkt zu spüren sein werden. Technologien, die dem Klimaschutz dienen, können deshalb in zwei, von ihrer Zielsetzung her gänzlich unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden:

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.

Bezüglich Punkt 1. sei auf folgende inhaltliche Einschränkung hingewiesen: Das wichtigste Treibhausgas ist Kohlendioxid. Aufgrund der global dominanten Rolle fossiler Energieträger ist der CO₂-Ausstoß in erheblichem Umfang direkt abhängig vom Energieverbrauch. In Abstimmung mit dem Auftraggeber BMBF soll in diesem Projekt der Bereich der Energiewandlung selbst aber nicht berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass Technologien, die der direkten Energiewandlung dienen – einschließlich ihrer Weiterentwicklungen – in der vorliegenden Studie nicht im Mittelpunkt stehen. Der großen Bedeutung für den Klimaschutz entsprechend, ist dieser Bereich dennoch kurz skizziert, auch um die Schwierigkeiten einer

stringenten Abgrenzung transparenter zu machen. Hingegen werden Umwelttechnologien, die auf Effizienzgewinne abzielen, aber nicht der direkten Energiewandlung dienen, breiter und detaillierter dargestellt. Technologien zur Erforschung und Modellierung des Klimasystems sind gegenwärtig nicht berücksichtigt, da sie nur sehr indirekt auf die Umwelt wirken.

Wenn man in dieser Art nicht die Energietechnologien in den Mittelpunkt stellt, wird schon bei einer nur groben Betrachtung des Handlungsfelds Klimaschutz deutlich, dass es sich um höchst mannigfache Technologien in sehr unterschiedlichen Branchen handelt. Die Abgrenzung ist keineswegs trivial und des Öfteren nicht sauber möglich. Zahlreiche Technologieentwicklungen, Güter und Dienstleistungen können zumindest indirekt in Beziehung zum Klimaschutz gesehen werden. Im Folgenden ist diese Breite skizziert, dabei kann nur in einigen Technologiefeldern mehr in die Tiefe gegangen werden.

2.2 Meilensteine

National wie international gewann der Klimaschutz in den letzten Jahrzehnten sukzessiv an Bedeutung. Zahlreiche Aktivitäten und Vereinbarungen kennzeichnen diesen Weg. Die folgende Aufstellung konzentriert sich auf die wichtigsten Ereignisse.

EU und Deutschland

1972 Einstieg in die Umweltpolitik. In diesem Jahr vereinbarten auf dem Pariser Gipfel die EU-Mitgliedsstaaten, dass eine gemeinsame Umweltpolitik unverzichtbar ist.

1987 Im Rahmen der einheitlichen Europäischen Akte wurde der Umweltschutz rechtsverbindlich. Schrittweise regelten Umweltaktionsprogramme (UAP) die Anforderungen an den Umweltschutz.

2001 Ehrgeizige Ziele verfolgte das 6. UAP aus dem Jahr 2002, das vier Aktionsbereiche bis 2010 priorisiert, die in die EU-Nachhaltigkeitsstrategien münden. Einer dieser vier Bereiche ist die Bekämpfung der Klimaänderung (EU-Nachhaltigkeitsstrategie zur Begrenzung des Klimawandels und gesteigerte Nutzung sauberer Energien). Mit dieser Vorgabe kommt die EU ihren Verpflichtungen von Kyoto nach.

2005 Start des EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS).

2007 Die Bundesrepublik hat sich, neben den europäischen Maßnahmen, das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2020 um 37% zu mindern. Als wichtigstes Instrument dienen hierfür die in Merseberg ausgearbeiteten acht Eckpunkte, welche die Bereiche Energieerzeugung (Stromerzeugung, Kraftwerke, erneuerbare Energiequellen), effizientere Energienutzung (Kraft-Wärme-Kopplung, Gebäudesanierung, Verkehr) und Minderung der Methangasemissionen umfassen.

Meilensteine des globalen Klimaschutzes

1968 „Club of Rome“ wird mit dem Ziel „der gemeinsamen Sorge und Verantwortung um bzw. für die Zukunft der Menschheit“ gegründet. 1972 wird der Bericht „Grenzen des Wachstums“ veröffentlicht. Er steht zusammen mit der UNO-Weltkonferenz für den Beginn eines gemeinsamen internationalen Vorgehens zum Schutz der Umwelt.

1972 UNO-Weltkonferenz über die menschliche Umwelt (Umweltschutzkonferenz) in Stockholm, dies ist die erste UNO-Konferenz zum Thema Umwelt. Ihr Beginn, der 5. Juni, ist bis heute der internationale Tag der Umwelt. Das UNEP (United Nations Environmental Programme) mit Sitz in Nairobi sowie das GEMS (Global Environment Monitoring System) und das Erdbeobachtungssystem „Earth-watch“ werden gegründet.

1979 Weltklimakonferenz in Genf (Sitz der WMO, World Meteorological Organisation). Der Zusammenhang von Klima-Anomalien und der Klimabeeinflussung durch die menschliche Gesellschaft, u.a. die globale Klimaveränderung durch steigende Kohlenstoff-Gehalte in der Atmosphäre, werden diskutiert. Als Konsequenz wird das Weltklimaprogramm, das WCP (World Climate Programme) bei der WMO ins Leben gerufen.

1980 „Global 2000“, der Bericht des „Council on Environment Quality“ im Auftrag der US-Regierung erscheint. Aus diesem Bericht resultiert ein Handlungsprogramm, das der damalige Präsident Jimmy Carter zum größten Teil umsetzt. Im selben Jahr stoppt sein Nachfolger Ronald Reagan das Programm.

1987 Brundtland-Report „Unsere gemeinsame Zukunft“ wird von der Weltkommission Umwelt und Entwicklung (WCED: World Commission on Environment and Development) veröffentlicht. Er war der Auslöser für den Umweltgipfel in Rio.

Ebenso findet **1987** die Internationale Konferenz zum Schutz der Ozonschicht in Montreal statt. Mit dem Montreal-Protokoll, in dem sich die Unterzeichner auf eine Reduktion der Ozonschicht abbauenden Stoffe verpflichten, tritt 1989 erstmals weltweit ein anwendbares Umweltschutzprotokoll in Kraft.

1988 Erste Weltklimakonferenz über Veränderungen der Atmosphäre in Toronto. Die WMO und das UNEP gründen das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), den „UN-Klimarat“. Als Ziel gilt, den aktuellen Wissensstand der gesamten Klima- und Klimafolgenforschung zu bündeln, zu bewerten und regelmäßig in Sachstandsberichten zu veröffentlichen.

1990 Zweite Weltklimakonferenz über Veränderungen der Atmosphäre in Genf. Erstmals wird über die Ozonschicht und die Ursachen ihrer Zerstörung diskutiert.

1992 UNO-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UNCED = UN Conference on Environment and Development) in Rio de Janeiro – Rio-Konferenz (Erdgipfel). Es werden die Klima-Rahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change/UNFCCC) und die Agenda 21 verabschiedet. Mit der Klima-Rahmenkonvention über Klimaveränderung sollen die Treibhausgaskonzentrationen der so genannten Annex-I-Staaten auf einem Niveau stabilisiert werden, das eine Störung des Weltklimas verhindert und zudem eine langsame Anpassung der Ökosysteme an die Klimaänderungen ermöglicht. Bisher sind 186 Staaten beigetreten, die sich jährlich treffen (Vertragsstaaten-Konferenz, COP).

1994 Klima-Rahmenkonvention (UNFCCC) tritt durch die Ratifizierung des 50. Vertragspartners in Kraft. Inzwischen haben mehr als 180 Staaten unterzeichnet.

1997 Dritte Vertragsstaaten-Konferenz (COP3, Conference of the Parties) in Kyoto. Mit dem Kyoto-Protokoll vereinbaren die Vertragsstaaten, ihre Emissionen an sechs Treibhausgasen bzw. Treibhausgasgruppen rechtsverbindlich bis zum Jahre 2012 um mindestens 5% unter das Niveau von 1990 zu senken; mit spezifischen Vorgaben für einzelne Länder (EU-Reduktion um 8%, BRD-Reduktion um 21%). Drei Kyoto-Maßnahmen sollen helfen, die Kosten bei möglichst großem Entlastungseffekt für das Klima in tragbaren Grenzen zu halten:

- Clean Development Mechanism (CDM): Mechanismus für umweltgerechte Entwicklung (emissionsmindernde Maßnahmen können in nicht notierten Ländern durchgeführt werden);
- Joint Implementation (JI): gemeinsame Umsetzung (Annex-B-Land kann in einem anderen Annex B-Land emissionsmindernde Maßnahmen durchführen);
- Handel mit Emissionsrechten.

2005 Kyoto-Protokoll tritt in Kraft; Weltklimakonferenz in Montreal (COP11). Gemäß den Vorgaben haben mindestens 55 Staaten, die zusammengerechnet mehr als 55% der CO₂-Emissionen des Jahres 1990 verursachten, unterzeichnet. Damit können die Regelwerke zum Protokoll von den 157 Unterzeichnerstaaten umgesetzt werden. Die USA als derzeit größter Emittent gehört nicht zu den Unterzeichnern.

2007 Friedensnobelpreis für Al Gore und den UNO-Klimarat (IPCC). Der Preis lenkte die Aufmerksamkeit auf den Schutz des Weltklimas und die Sicherung des Weltfriedens für das sich die Preisträger über Jahre einsetzten.

2007 Weltklimakonferenz in Bali (Indonesien); 13. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention und 3. Vertragsstaatenkonferenz des Kyoto-Protokolls. Das wesentliche Ziel ist, das weitere Vorgehen nach 2012 (Auslaufen der Vereinbarungen des Kyoto-Protokolls) auf den Weg zu bringen. Ein Weg zu einem Kyoto-Nachfolgeabkommen wurde in Form der Bali-Roadmap vereinbart. Im Prinzip handelt es sich dabei um das von den Teilnehmern gewünschte Verhandlungsmandat, auf dessen Grundlage eben das Nachfolgeabkommen zum Kyoto-Protokoll erstellt werden soll.

2008 EU legt Beiträge der Mitgliedsstaaten zur Erreichung der CO₂-Ziele fest.

Der Schutz des Klimas ist ein fach- und ressortübergreifendes Thema und so haben das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und das BMU (Bundesumweltministerium) das Thema „Klima“ als diverse **Förder- und Forschungsschwerpunkte** in ihre Förderprogramme aufgenommen. Eine Liste der Akteure und ihre Förderprogramme/-schwerpunkte sind in der unten aufgeführten Tabelle aufgezeigt.

Tabelle 1: Forschungspolitik – Akteure und ihre Förderschwerpunkte und -programme

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung	
	klimazwei - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen. Im Mittelpunkt der Fördermaßnahme steht die Entwicklung praxisorientierter Handlungsstrategien.
	Aktionsprogramm Forschung zum Klimawandel. Forschungsförderung zum Klimawandel weiter verstärken. Wird derzeit erarbeitet.
	Regionalwettbewerb KLIMZUG. Ziel der beabsichtigten Fördermaßnahme ist es, die zu erwartenden Änderungen im Klima und seiner extremen Wetterausprägungen in regionale Planungs- und Entwicklungsprozesse zu integrieren.
	Hightech-Strategie für Klimaschutz. Forschung für die Ziele: weniger Treibhausgasemissionen, höhere Energieeffizienz und ein größerer Anteil an erneuerbaren Energien.
	Meeresbezogene Klimaforschung: ozeanographische und geowissenschaftliche Untersuchungen für ein besseres Verständnis der Rolle der Ozeane im Klimasystem, für eine Beschreibung der Auswirkungen von klimatischen Schwankungen als Basis für Präventiv- und Schutzmaßnahmen, Modelle zur Prognose künftiger Entwicklungen usw.
	FONA: Forschung für Nachhaltigkeit.
	Polarforschung: Dem Klimageschehen auf der Spur. Für das Verständnis des Klimas ist die Forschung in Arktis und Antarktis von großer Bedeutung.
+DFG	Im Rahmen des GEOTECHNOLOGIEN-Programms werden seit 2005 zehn Forschungsverbünde aus Wissenschaft und Wirtschaft bei standortunabhängigen Forschungsarbeiten zur Speicherung des Treibhausgases CO ₂ im Untergrund gefördert.
BMW i – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	
	Im BMWi ist die Klimaforschung im 5. Energieforschungsprogramm "Innovation und neue Energietechnologien" abgedeckt.
BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
	Forschungsförderung im Bereich erneuerbarer Energien.
	100% Erneuerbare Energien Regionen.

BMU (Fortsetzung)	
	Investitionen in ein klimafreundliches Deutschland. Die Entwicklung der Kosten des Klimawandels für die deutsche Volkswirtschaft modelliert und Investitionsstrategien für klimafreundliche Technologien entwickeln.
	Begleitforschung zur Ausgestaltung des Post2012-Klimaregimes.
	Auswirkungen des Klimawandels – Entwicklung einer Nationalen Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels.
	Beitrag der Abfallwirtschaft und des Bodenschutzes zum Klimaschutz (national/international).
	Integriertes Gesamtkonzept für Klima- und Energiepolitik.
	Reduktionsprogramm zur Minderung der Emission fluorierter Treibhausgase (F-Gase) – Globalansatz.
	Energieeffizienz als Schlüssel für ein integriertes Klima- und Energiekonzept.
	Klimaschutz durch Begrenzung des Kühlbedarfs von Gebäuden.
	Weiterentwicklung der förderpolitischen Instrumente sowie der institutionellen/internationalen Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien.
	Verstärkte Biomassenutzung/CO ₂ -Effizienz; Flächeneffizienz.
	Wasser als erneuerbare Energie.
	Umsetzung und Fortentwicklung des europäischen Emissionshandelssystems sowie der flexiblen Mechanismen.
	Umweltforschungsplan mit verschiedenen Projekten zu klimarelevanten Themen.
	Untersuchungen zu den „Wirtschafts- und Arbeitsmarktpotentialen anspruchsvoller Klimaschutzmaßnahmen“.

2.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen

In diesem Kapitel werden verschiedene Technologiefelder beschrieben, die im Hinblick auf Reduzierung des Treibhausgasausstoßes und für die notwendige Adaptation an den Klimawandel relevant sind. Um dem Ausstoß von Klimagasen technologisch entgegen zu wirken, gilt es zunächst zu ermitteln, wo welche Klimagase verursacht werden. Es existieren unterschiedliche Ansätze und Vorgehensweisen bzgl. der Berechnung des Ausstoßes der Treibhausgasemissionen. Dementsprechend besteht auch keine hundertprozentige Übereinstimmung bei den unterschiedlichen Berechnungen (vgl. Abb. 1). Alle Aufstellungen machen jedoch deutlich, dass dem Energiesektor der größte Anteil am Treibhausgasausstoß zukommt. Aber auch aus anderen Bereichen kommen erhebliche Beiträge, besonders aus dem Agrarsektor und der Landnutzung.

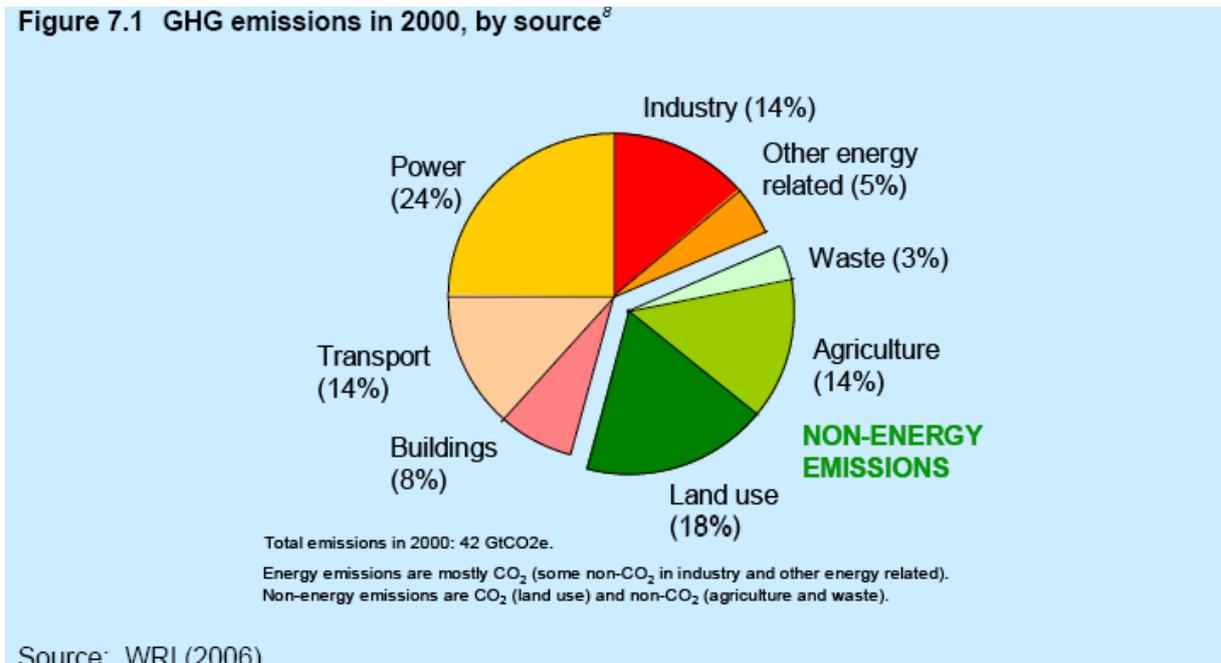
In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Technologien beleuchtet, die einen signifikanten Beitrag zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen leisten können bzw. von denen solch ein Beitrag erwartet wird. Soweit möglich wird dabei auf eine Einteilung nach Verursachergruppen oder Sektoren zurückgegriffen. Dargestellt werden im Rahmen des Projekts Technologien aus den Sektoren

- Energiewandlung und CCS
- Verkehr
- Energieeffizienz durch optische Technologien
- Gebäude

- Industrielle Prozesse
- Land- und Forstwirtschaft
- Abfall (Deponien)

Zudem werden in einem weiteren Abschnitt die technologischen Ansatzpunkte und Entwicklungspotentiale zur Anpassung an den Klimawandel (Adaptation) skizziert.

Figure 7.1 GHG emissions in 2000, by source⁸



Source: WRI (2006)

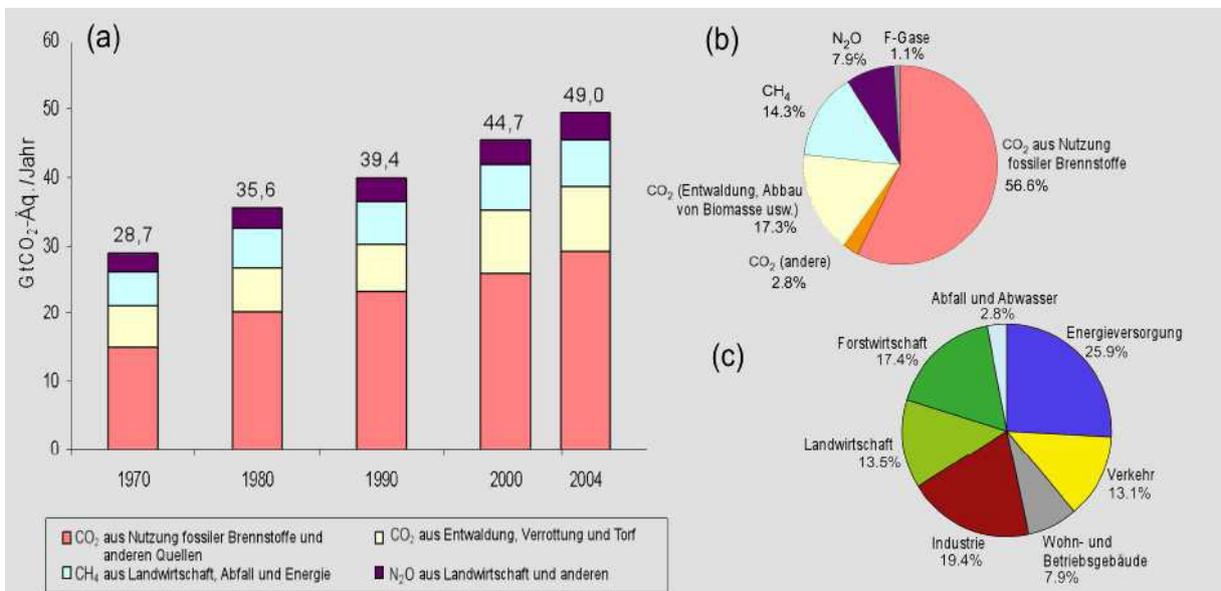


Abbildung 1: 1) Globale Treibhausgas-Emissionen aus dem Jahr 2002 gewichtet nach dem globalen Erwärmungspotential (GWP gemäß IPCC-Bericht 1996 (SAR)) unter Berücksichtigung aller Emissionsquellen, Quelle: Stern-Report (2006, 171) und 2) a) Globale jährliche anthropogene THG-Emissionen von 1970 bis 2004. b) Verschiedene anthropogene THG als Gesamtemission im Hinblick auf CO₂-Äquivalente (CO₂e). c) Anteile verschiedener Sektoren an den totalen anthropogenen THG-Emissionen in 2004 in Bezug auf CO₂e, Quelle: IPCC (2007, 36)

2.3.1 Energiewandlung und CCS

Wie bereits mehrfach erwähnt stehen Technologien zur Energieerzeugung und -wandlung nicht im Mittelpunkt dieses Projekts. Wegen des großen Beitrags des Energiesektors zum CO₂-Ausstoß sei hier aber kurz darauf eingegangen. Nicht nur die aktuellen Zahlen, sondern besonders auch die prognostizierten Entwicklungen sind von großer Bedeutung und müssen berücksichtigt werden. So weisen alle Daten darauf hin, dass der globale Energieverbrauch dramatisch zunehmen wird. Die Internationale Energieagentur (International Energy Agency, IEA) schätzt in einem Referenzszenario, dass der globale Primärenergieverbrauch zwischen 2004 und 2030 um 53% steigt. Über 70% dieser Steigerung lässt sich laut Internationaler Energieagentur auf die Schwellen- und Entwicklungsländer zurückführen. Dabei ist die Stromproduktion für knapp die Hälfte dieses Anstiegs verantwortlich (IEA 2006, 65). Die US-amerikanische Energy Information Agency (EIA 2006) geht sogar davon aus, dass der weltweite Energieverbrauch von 2003 bis zum Jahr 2030 um 75% zunimmt, wobei die jährlichen Wachstumsraten in Entwicklungs- und Schwellenländern höher als in OECD-Ländern angesetzt sind (EIA 2006). Allen voran tragen China und Indien zum Wachstum bei. In vielen Industrieländern – darunter Deutschland – ist hingegen die Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch weit fortgeschritten. Beispielsweise hat sich in Deutschland die Effizienz der Stromerzeugung im Zeitraum 1990 bis 2004 verbessert. Zu Beginn der 90er Jahre mussten noch 9.727 kJ für die Erzeugung 1 kWh in konventionellen Wärmekraftwerken eingesetzt werden; seither ist der durchschnittliche spezifische Brennstoffverbrauch um 9% auf 8.866 kJ zurückgegangen (BMW/BMU 2006, 52).

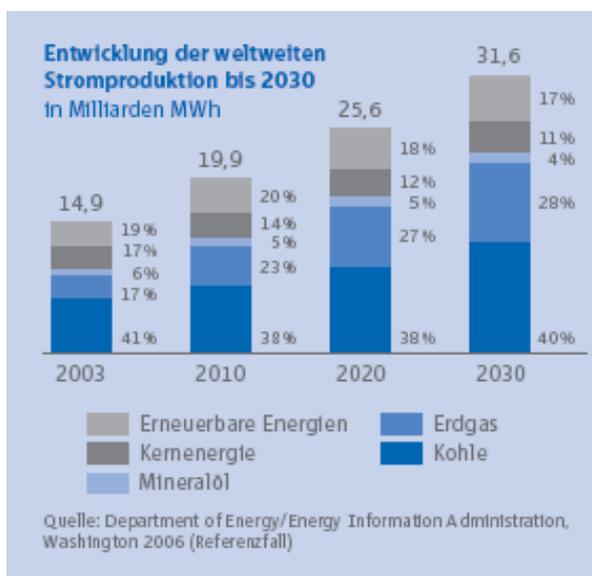


Abbildung 2: Entwicklung der weltweiten Stromproduktion bis 2030 in Milliarden MWh (Abbildung entnommen aus: www.rwe.com)

Die globale Primärenergieintensität, gemessen als Energieverbrauch pro Einheit Bruttonationalprodukt, wird zwischen 2004 und 2030 deutlich zurückgehen (laut IEA im Schnitt um 1,7% pro Jahr). Der Rückgang ist vor allem auf Entwicklungen in den Nicht-OECD-Regionen zurück zu führen, da diese in besonderem Maße von neuen Möglichkeiten zur **Erhöhung der Energieeffizienz** profitieren und weil die Abhängigkeit von energieintensiver Schwerindustrie nachlässt (IEA 2006, 68). Die globalen Potentiale zur Energieeinsparung und zur Erhöhung

der Energieintensität sind grundsätzlich sehr groß. Verbesserung der energetischen Qualität von Gebäuden und Heizanlagen; Kraft-Wärme-Kopplung, Effizientere Kraftwerke und Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen seien als Beispiele genannt. Hier ist ein großes Potential für Innovationen vorhanden. Ebenfalls als relativ klimaverträgliche Technologie wird die Kernkraft diskutiert. Die neuen Generationen von Reaktoren (G3, G4) sollen neben größerer Leistung vor allem sicherheitstechnische Fortschritte bringen. Die globale Nachfrage nach Kernkraftwerken wächst derzeit sehr stark an, auch hier sind die Boomländer China und Indien sowie andere Schwellenländer treibende Kräfte (Feldhoff 2006). Im Zusammenhang mit einer effizienten Energiewandlung wird vielfach auch der mobile und stationäre Einsatz von Brennstoffzellen diskutiert. In Nischen wurde dabei inzwischen Marktreife erlangt. Als langfristige Option wird auch die Fusionstechnologie betrachtet.

In vielen Ländern steht die **Förderung erneuerbarer Energien** (EE) im Vordergrund. Da sich hierdurch die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern reduzieren lässt, geht der Klimaschutz mit dem Streben nach Energiesicherheit einher. Windkraft, Photovoltaik, Solarthermie, Biomasse, Wasserkraft, Geothermie und auch Gezeiten- oder Wellenkraftwerke sind bisher unterschiedlich stark entwickelt und teilweise schon am Markt etabliert. Bei all diesen Technologien besteht aber nach wie vor großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Gleichzeitig besteht vor dem Hintergrund oben skizzierter Entwicklung des Energieverbrauchs ein immenses Marktpotential. Das betrifft nicht nur die Technologien zur Energiebereitstellung selbst, sondern auch die dazugehörige Infrastruktur: Ein wachsender Anteil fluktuierender Energiequellen stellt große Herausforderungen an die Netze; sollte sich Wasserstoff als Energieträger durchsetzen würde vermutlich eine komplett neue Infrastruktur benötigt.

Das globale Potential erneuerbarer Energien ist sehr schwer abzuschätzen, gerade auch weil mittelfristig mit technologischen Durchbrüchen in ganz unterschiedlichen Bereichen - z.B. Nanotechnologie in der Solarbranche, Biogene Kraftstoffe der zweiten Generation (BTL, Biomass-to-Liquid), Durchbrüche in der Batterietechnologie und anderen - zu rechnen ist. Dabei stellt sich immer auch die Frage, wie sich solche Neuerungen tatsächlich am Markt etablieren können bzw. inwiefern diese von Gesellschaft und/oder Konsumenten angenommen werden. Schon allein für Deutschland kommen unterschiedliche Studien zu ungleichen Ergebnissen bezüglich des Potentials erneuerbarer Energien. Die so genannte „Leitstudie 2007“ (Nitsch 2007) geht auf das Ziel der Bundesregierung ein, bis 2020 20% des Primärenergieverbrauchs über erneuerbare Energien zu decken. Die Studie zeigt, dass es erheblicher Anstrengungen bedarf, um das von der Politik vorgegebene Ziel eines 20%-Anteils der EE am Energieverbrauch bis 2020 zu erreichen. Das vom Kölner Energiewirtschaftlichen Institut (EWI) erstellte „Energiewirtschaftliche Gesamtkonzept 2030“ schätzt die Entwicklung und die Ausbaupotentiale der EE insgesamt pessimistischer ein als z.B. die Studie „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) (EWI 2007).

Relativ sicher ist dagegen, dass die Verstromung von Kohle bis Mitte des Jahrhunderts unverzichtbar sein wird, vermutlich auch darüber hinaus. Kohle ist der fossile Energieträger mit dem größten Vorkommen; diese Vorkommen sind weltweit relativ gleichmäßig. Gemessen an dem gegenwärtigen Jahresverbrauch (statische Reichweite) werden die Reserven auf 95 Jahre und die Ressourcen auf zusätzliche 470 Jahre geschätzt (BMWi/BMU 2006). Ein

Rückgang an Erdöl und Erdgas könnte zumindest theoretisch für eine gewisse Zeitspanne durch Kohle ausgeglichen werden. Gerade die Verstromung von Kohle, aber auch die Verstromung von Gas, geht bei herkömmlichen Kraftwerken mit einem erheblichen Ausstoß an CO₂ einher. Unter klimatischen Gesichtspunkten muss eine Ausweitung der Kohlenutzung ohne CO₂-Rückhaltung als nicht verantwortbar eingestuft werden. Auf Technologien zur **CO₂-Rückhaltung und Speicherung (CCS - Carbon-Capture-and-Storage)** ruhen deshalb große Hoffnungen.

Die prognostizierte Bedeutung der Kohleverstromung verdient wegen ihrer sehr hohen Klimarelevanz einen genaueren Blick: Die meisten Länder, die zukünftig mit einem großen Anteil am globalen Primärenergieverbrauch rechnen, verfügen über erhebliche Kohlereserven. Zu dieser Gruppe zählen die USA, China, Indien, Russland wie auch die EU (vgl. IEA 2006). Nach dem World Energy Outlook 2006 (IEA 2006, 80) liegt der Anteil der Kohle an den globalen CO₂-Emissionen bei 41%. Ein starker Anstieg der Kohleverstromung gilt als sicher. Im Jahre 2005 verbrannte China über 2.000 Megatonnen Steinkohle, gefolgt von den USA mit knapp über 1.000 Megatonnen – dies sind zusammen immerhin fast zwei Drittel des weltweiten Verbrauchs¹. Die zukünftige Deckung des rasant wachsenden Energiebedarfs ist (zunächst) ohne einen Ausbau der Kohleverstromung kaum vorstellbar. Obwohl noch große Potentiale zur Effizienzsteigerungen besonders in den Schwellenländern realisierbar sind, kann die Kohleverstromung aus heutiger Sicht ohne CCS kaum klimaverträglich gestaltet werden. CCS wird häufig sehr kontrovers diskutiert. Doch trotz vieler Fragezeichen hinter der großtechnischen Machbarkeit und der öffentlichen Akzeptanz von CCS ruhen große Hoffnungen auf dieser Technologie.

CCS bezeichnet eine Kombination von Technologien die folgende drei Schritte umfasst: Die Abspaltung, den Transport und die Speicherung von CO₂. Drei unterschiedliche Verfahren zur CO₂-Abtrennung werden heute unterschieden (vgl. BMWi 2007; BMU 2007a; UBA 2007a; REW Power 2007; Vattenfall 2006). Allen ist gemeinsam, dass ihr Einsatz die Effizienz der Kraftwerke im Vergleich zur Kohleverstromung ohne CCS um ca. 8-15% herabsetzt. Allerdings wird hier von weiteren Optimierungspotentialen ausgegangen. Die CO₂-Abscheideraten liegen zwischen 70% und über 90% (vgl. BMWi/BMU/ BMBF 2007). CCS ist nicht Stand der Technik sondern noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Grundsätzlich ist CCS an zentrale Großtechnologien (Kohle- oder Gaskraftwerke) gebunden und nicht für eine dezentrale Energieversorgungsstruktur geeignet.

Generell wird in Deutschland viel zu CCS geforscht und mittlerweile auch erprobt. Die deutschen Energieversorger und Anlagebauer investieren in mehrere Pilotanlagen, bei denen verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen (UBA 2007a; REW Power 2007; Vattenfall 2006; und EON²). In Kezin/Brandenburg wird derzeit die Speicherung von CO₂ in tief liegenden salinaren Aquiferen im Rahmen eines Pilotprojekts erforscht (EU-Projekt „CO₂-Sink“ unter Leitung des GeoForschungsZentrums Potsdam). Das Forschungsprogramm COORETEC des BMWi zielt darauf, die Effizienz der Kraftwerkskomponente zu erhöhen. Im Rahmen des GEOTECHNOLOGIEN-Programms fördert das BMBF wissenschaftliche Projekte zur CO₂-Speicherung in geologischen Formationen.

¹ Weitere Daten und Informationen unter www.bgr.de

² Details zu finden bei www.eon.de

Die Abtrennung von CO₂ scheint grundsätzlich auch großtechnisch möglich, besonders im Bereich Effizienz liegt aber noch Optimierungspotential. Technisch ist sicherlich der größte Schwachpunkt, dass die Speicherung des CO₂ bisher nicht ausreichend erprobt wurde. Es fehlt an Erkenntnissen über die tatsächliche Eignung der in Frage kommenden Optionen. Damit hängt zusammen, dass die (in Deutschland) vorhandenen Speicherkapazitäten nur schwer abgeschätzt werden können. Eine breite und damit stabile Erfahrungsbasis kann lediglich durch intensiven und gut koordinierten internationalen Austausch erreicht werden. Für „On-shore“ Speicher können auch Protestaktivitäten hemmend wirken (Leben auf dem CO₂-Speicher). Hier sollten Einstellungen und Akzeptanzbereiche der Bevölkerung untersucht und einbezogen werden (z.B. über Fokusgruppen, Online-Diskurse). Eine in Großbritannien durchgeführte Delphi-Studie zur CCS-Technologie kam zu dem Ergebnis, dass der Mangel an stabilen politischen Rahmenbedingungen sowie die Kosten die entscheidenden Barrieren bei der Implementierung der CCS-Technologie darstellen (Gough 2007). Als größtes technisches Handicap haben die befragten Experten die Möglichkeit des Entweichens von CO₂ aus Lagerstätten benannt.

Teilweise werden sehr große Marktpotentiale vorhergesagt. Folgende Zahlen werden in einer BMU-Studie (BMU/UBA 2007) genannt: 2005 global ca. 500 Millionen, 2010 global ca. 2,8 Milliarden Euro (vor allem für Demonstrationsanlagen), 2020 global ca. 20 Mrd. € (bei Einsatz in 100 bis 200 Kraftwerken). Die entscheidende Diffusionsphase würde wohl erst in den 2020'er und 2030'er Jahren zu erwarten sein. Bezieht man sich auf die für das Jahr 2020 geschätzte Zahl an betroffenen Kraftwerken, ist die Steigerung um den Faktor 10 in den beiden Dekaden nach 2020 sicher nicht unrealistisch, wobei 200 Mrd. € Marktvolumen schnell erreicht wären. Abgesehen von den ungelösten technischen Problemen, insbesondere bei der CO₂-Speicherung, ist die Einführung der Technologie von entsprechenden politischen Rahmenbedingungen abhängig. Sollte die Einführung solcher Anreizsysteme nicht gelingen, ist das Marktpotential gleich null, da es sich um einen rein „politischen Markt“ handelt.

CCS-Technologie ist nicht an den Einsatz in Kohle- oder Gaskraftwerken gebunden, sondern lässt sich auch in anderen Bereichen anwenden. Diskutiert werden vor allem die Stahlproduktion und die Ammoniaksynthese in der chemischen Industrie (s. 2.3.5). In der Stahlproduktion kann CCS bei Hochöfen langfristig realisierbar sein (McKinsey 2007b, 67). Mit dem Einsatz von CCS in diesen Bereichen ist jedoch erst zu rechnen, wenn die Technologie im Energiebereich eingeführt ist. Ähnlich verhält es sich mit dem Einsatz von CCS in der Zementindustrie, wo langfristig größere Mengen CO₂ abgefangen und eingelagert werden könnten (McKinsey 2007b, 71). Ferner gibt es inzwischen auch Ansätze die darauf abzielen CO₂ direkt aus der Luft abzuspalten, also z.B. direkt über dem CO₂-Speicher. Technisch scheint das vorstellbar, Effizienz und Kosten stellen aber sehr hohe Hürden dar (Stolaroff et al. 2006). Die Marktaussichten für eine kommerzielle Nutzung des CO₂ werden bisher als schwierig eingeschätzt, da der Bedarf sehr gering ist (Stroink 2007, 14). Verstärkt diskutiert wird inzwischen die Verwertung des CO₂ über Algen in einem Photobioreaktor. Die Algen nutzen dabei das eingebrachte CO₂ für Wachstum und Vermehrung. Perspektivisch sollen sich in einem weiteren Schritt die Algen energetisch oder stofflich weiterverwerten lassen (vgl. Universität Duisburg 2008).

2.3.2 Verkehr

Es wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, dass unter anderem wegen seines engen Bezugs zur Energiewandlung der Verkehrssektor in diesem Projekt nicht näher behandelt sondern nur kurz gestreift werden soll. Der Anteil des Verkehrs an den globalen Treibhausgasemissionen liegt nach dem IPCC-Bericht (IPCC 2007) zwischen 13% und 14%. Für Europa gibt die Europäische Umweltagentur einen Anteil von 21% an (EEA 2007). McKinsey (2007a, 13) nennt für Deutschland 18%. Wichtig sind dabei die immensen Wachstumsraten der meisten Verkehrsträger. Verschiedene Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs und damit des Ausstoßes von Treibhausgasen bieten sich an:

- Effizienzsteigerungen bei herkömmlichen Technologien wie z.B.: Effizientere Antriebe für verschiedene Verkehrsträger, verbesserte Motorsteuerung, Diesotto-Motor, Aerodynamik, Reifen bei PKWs; Leichtbau durch Einsatz entsprechender Materialien wie z.B. Hochleistungspolymere (BMBF 2007b; McKinsey 2007a, 53).
- Alternative Antriebstechnologien: Hybridantriebe, Biogene Kraftstoffe der ersten und der zweiten Generation, Batteriebetriebene Fahrzeuge, Wasserstoff und Erdgas sind aus heutiger Sicht die wichtigsten Technologiepfade (vgl. JRC 2006; Schippl et al. 2007). Besonders eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Batterietechnologie könnte das Verkehrs- und das Energiesystem drastisch verändern. Hoffnungen ruhen auch auf Wasserstoff, insbesondere in Kombination mit Brennstoffzellen. Biogene Kraftstoffe sind bereits auf dem Markt. Eine erfolgreiche Substitution von Öl wird dazu führen, dass das Verkehrssystem stärker als bisher als integraler Bestandteil des gesamten Energiesystems betrachtet werden muss. Für den stark wachsenden Schiffsverkehr wurde die so genannte Skysails-Technologie entwickelt, die inzwischen auf dem Markt ist. Dabei handelt es sich um ein Wind-Antriebssystem auf Basis großer, voll-automatischer Zugdrachen mit aufwändigem Steuersystem. Laut Hersteller lassen sich damit die Treibstoffkosten eines Schiffes im Jahresdurchschnitt zwischen 10 und 35% senken (skysails 2008).
- Verbesserte Verkehrssteuerung und Logistik: Bei diesem Ansatzpunkt geht es im Wesentlichen um Effizienzsteigerungen durch Routenoptimierung und die Vermeidung von Wartezeiten. Oft wird auch eine verbesserte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur als Möglichkeit gesehen, den Kraftstoffverbrauch zu senken (BMBF 2006). Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie spielt dabei eine zentrale Rolle und wird in der Regel unter dem Schlagwort „Telematik“ zusammengefasst. Im Logistikbereich kann sie für die Reduzierung von Leerfahrten eingesetzt werden. Diskutiert werden auch Verkehrsvermeidungspotentiale durch Videokonferenzen oder Online-Shopping, wobei sich entsprechende Effekte bisher schwer nachweisen lassen.

- Technologien, die eine Verkehrsverlagerung auf weniger CO₂-intensive Verkehrsmittel ermöglichen: In der Regel wird dabei versucht, im Personenverkehr den öffentlichen Verkehr attraktiver zu machen. Viele Maßnahmen bauen auf Informations- und Kommunikationstechnologie auf, wie z.B. bessere Fahrgastinformation im öffentlichen Verkehr, Handytickets oder bargeldlose Bezahlung. Auch im Güterverkehr wird die Bahn ebenso wie die Binnenschifffahrt als klimafreundliche Alternative zum Straßengüterverkehr gesehen (European Commission 2001 und 2006).

Im Rahmen der Hightech-Strategie sind verschiedene Innovationsallianzen gegründet worden, die Technologien zur klimafreundlicheren Verkehrsgestaltung zum Durchbruch verhelfen sollen (Innovationsallianzen „Elektrische Energiespeicher“; „Automobilelektronik“, „Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland“; BMBF 2006, 27). Perspektivisch ergeben sich hier große Marktpotentiale. Mehrere Faktoren wirken dabei zusammen. So werden fossile Energieträger zunehmend knapper und damit teurer, was den Anreiz zu Effizienzsteigerung erhöht. Weiter sind die fortschreitende Motorisierung in den Schwellenländern und der damit einhergehende Ölverbrauch von großer Bedeutung. Die Bekämpfung von Luftverschmutzung und Feinstaubbelastung kann ebenfalls mit einem verringerten Ausstoß an Treibhausgasen einhergehen (siehe Kapitel 3).

2.3.3 Energieeffizienz durch optische Technologien

Der Anteil der Energie für Beleuchtungszwecke am Gesamtenergieverbrauch in Deutschland wird mit ca. 10% angegeben (BMBF 2007a, 40). Es handelt sich demnach um einen signifikanten Beitrag zum Ausstoß von Treibhausgasen. Lampen und Leuchten ist gemeinsam, dass sie elektrische Energie in Licht wandeln, wobei ein Teil der Energie als Wärme verloren geht. Mit verschiedenen technischen Ansätzen wird versucht Effizienzsteigerungen zu erreichen. Gleichzeitig gilt es, die Lebensdauer zu verlängern. Inzwischen sind zahlreiche Alternativen zu den klassischen Glühlampen entwickelt worden, darunter **LEDs (Light Emitting Diode, auch Lumineszenz-Diode)**, **Halogenlampen**, **(Hochdruck)-Entladungslampen** oder **Kompaktentladungslampen**. Letztere sind oft gemeint, wenn von „Energiesparlampen“ die Rede ist. Die Unterschiede der Lampentypen im Hinblick auf die Lichtausbeute sind groß: So liegt eine herkömmliche Glühlampe bei 5 bis 20 lm/W (Lumen/Watt), Halogenlampen bei 10 lm/W bis 25 lm/W, wogegen eine Hochdruckentladungslampe keramischer Bauart bis zu 150 lm/W erreicht, anders ausgedrückt werden bei herkömmlichen Glühlampen gerade mal 5%, bei Kompaktentladungslampen hingegen ca. 25% der aufgetragenen elektrischen Energie in Licht umgewandelt.

Für den Bereich der Energiesparlampen wird eine Zunahme am Markt von 20% pro Jahr erwartet. Allerdings ist dieser Markt stark preisgetrieben, mit entsprechenden Vorteilen für asiatische Niedrigpreisländer. Auch die Weiterentwicklung wird sich eher in diese Länder verlagern (NanoMarkets 2007).

LEDs sind eine effiziente Alternative zu herkömmlicher Beleuchtung in Kraftfahrzeugen und Gebäuden. Der Durchbruch der LEDs z.B. im Frontbereich des Automobils wird mit der Einführung des Tagfahrlichts für alle EU-Neuwagen ab 2009 erwartet. Audi verwendet wie auch BMW bereits LEDs als Tagfahrlicht. Eine weitergehende Steigerung der Lichtausbeute bis zu 1000 lm/W und mehr kann von **Hochleistungs-LEDs** (baulinks 2007), die aus einer großen

Anzahl von Leuchtdioden bestehen und mit Strömen größer 200 mA betrieben werden, erreicht werden. Besonders vielversprechend sind **organische LEDs** (OLED, organic light emitting diode). Dies ist im Gegensatz zu LEDs, die schon sehr etabliert sind, aber eine noch sehr junge Technologie. OLEDs sind dünn, mechanisch flexibel und großflächig herstellbar. Da OLEDs auf fast jedes Material gedruckt werden können, bieten sie theoretisch eine signifikante Kostenersparnis. Durch die Verwendung von **biegsamen Trägermaterialien** (flexible Substrate, Folien) eröffnen sie die Möglichkeit, **aufrollbare Bildschirme** herzustellen und **Displays in Kleidungsstücke** zu integrieren. Displays aus organischen Leuchtdioden benötigen keine Hintergrundbeleuchtung und ermöglichen damit eine Energieeffizienzsteigerung. Bis zum Jahr 2014 soll allein das Marktvolumen für OLED-Hintergrundbeleuchtung bei 1,9 Mrd. Dollar liegen. Geforscht wird in Zukunft z.B. daran, die Entsorgung von elektronischen Displays genauso umweltfreundlich gestaltet werden kann wie das Recycling von Papier. Weiterhin wird eine stark wachsende Nachfrage nach neuen Anwendungsgebieten wie z.B. ansteuerbare Lichtfolien erwartet (NanoMarkets 2007). Organische Leuchtdioden befinden sich noch in der Markteinführung. Sie erreichen etwa die hundertfache Lebenszeit einer normalen Glühbirne und sind vielseitiger einsetzbar. Es muss aber darauf hingewiesen werden, „dass weder LEDs noch OLEDs Lampen in allen Anwendungsbereichen ersetzen können“ (BMBF 2007a, 40). Dennoch sind die Potentiale groß. Der Umsatz in den Optischen Technologien betrug im Jahr 2005 am Standort Deutschland 16,3 Milliarden Euro und die Exportquote lag bei 65%. Für organische Leuchtdioden und insbesondere aufdruckbare Beleuchtungen (für Spezialeffekte) wird ein Marktvolumen bis 2014 bis zu 2,7 Mrd. \$ erwartet (BMBF 2008).

Außerdem befinden sich auf **Kohlenstoff-Nanoröhrchen basierende Beleuchtungskörper** in der Entwicklung, mit denen sich z.B. transparente Schilder fertigen lassen (NanoMarkets 2007). Der Markt für Kohlenstoff-Nanoröhrchen-basierte Beleuchtung wird für denselben Zeitraum bis 2014 auf 520 Mio. \$ geschätzt (NanoMarkets 2007).

2.3.4 Gebäude

„Etwa 40% des Energieverbrauchs und 20% der CO₂-Emissionen in Deutschland sind auf Gebäude zurückzuführen“ (BMBF 2006, 31). Entsprechende Anteile finden sich auch in den anderen Ländern der EU. Weltweit wächst der Energieverbrauch durch Gebäude vor allem durch die Bevölkerungszunahme, die zunehmende Verstädterung und den wachsenden Wohlstand. Nach dem World Business Council for Sustainable Development (WBCSD 2007) ist der Energieverbrauch durch Gebäude bis 2025 weltweit der Hauptenergieverbraucher. Neben der Umstellung der Energieerzeugung auf kohlenstoffarme oder -freie Energieträger sind Gebäude der größte Einzelposten für einen wirkungsvollen Klimaschutz.

Während im Wohnungsbau die Beheizung den größten Posten des Energieverbrauchs ausmacht, steht bei Büro- und Gewerbenutzung eher der Stromverbrauch im Vordergrund. Durch einen **hohen Dämmstandard**, eine **luftdichte Gebäudehülle**, **innovative Gebäudetechnik**, **effektive Tageslichtnutzung** (FIZ 2008a) und den **Einsatz von Speichertechnologien** lassen sich erhebliche Energieeinsparungen erzielen.

Raumwärme

Der wesentliche Anteil der insgesamt in Deutschland in Gebäuden eingesetzten Energie fließt in die Raumheizung. In privaten Hausbauten ist dies gut drei Viertel des gesamten Endenergieverbrauchs. Der Rest verteilt sich auf die Warmwasserbereitung, die weitere 11% ausmacht, und den Stromverbrauch für mechanische Energie, sonstige Prozesswärme und Beleuchtung (VDEW 2005).

Der energetische Standard von Neubauten hat sich infolge der sukzessiv erhöhten gesetzlichen Anforderungen durch die Wärmeschutz- und die Energieeinsparverordnung deutlich verbessert. So lag der spezifische Jahresheizenergiebedarf des Gebäudebestandes 1977 bei etwa 300 kWh/m² (Heinloth 1997) und ist bis 2001 auf ca. 190 kWh/m² gesunken.

Die Ursachen für die energetische Verbesserung liegen zum einen darin, dass seit Anfang der 1970er Jahre die Vorschriften zum Wärmeschutz von Gebäuden und die Anforderungen an Heizungsanlagen schrittweise deutlich verschärft wurden und zum anderen, dass infolge der Ölkrisen, zumindest zeitweise deutliche Preissteigerungen bei Brennstoffen eintraten (s. Abb. 3). Diese haben eine höhere Bereitschaft zu Investitionen in energiesparende Technologien bewirkt.

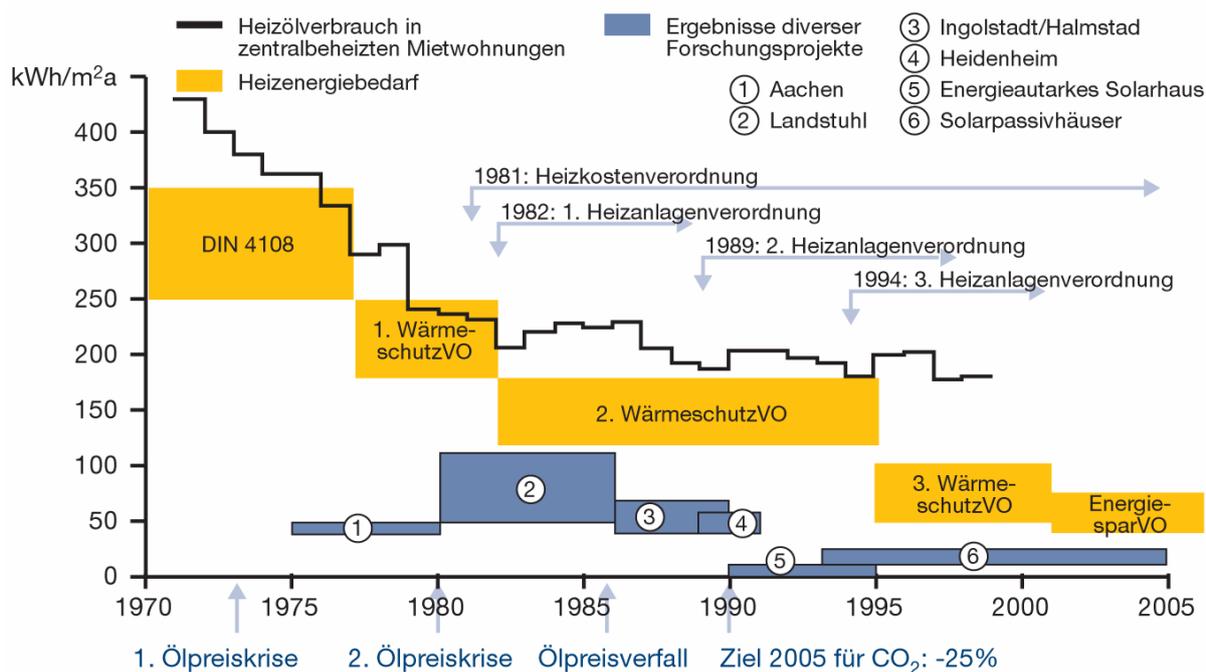


Abbildung 3: Heizölverbrauch in zentral beheizten Mietwohnungen 1970 bis 2005. Die Rechtecke geben den gesetzlichen Standard für Neubauten wider. Die Zahlen verweisen auf Forschungsprojekte (Quelle: Milles 2001, 3)

Parallel zu der Verschärfung der gesetzlichen Anforderungen wurden in Demonstrationsprojekten Gebäude mit einem immer niedrigeren Bedarf an Heizenergie entwickelt (**Niedrigenergiehäuser, Solarhäuser, Passivhäuser**, s. Abb. 4) bis hin zu Gebäuden, deren Energiegewinn über das Jahr gesehen größer ist als der Energieverbrauch (z.B. Plus-Energiehäuser vom Architekturbüro Rolf Disch (Disch 2008). Mittlerweile gibt es in Deutschland mehrere tausend Gebäude, die im Jahresmittel keinen zusätzlichen Energiebedarf haben.

Eine weitere Reduzierung des Energiebedarfs der Neubauten hängt ebenso davon ab, wie hoch in den nächsten Jahren die Ziele für die Reduktion des Energieverbrauchs gesteckt werden. Seit 2002 muss die Niedrigenergiebauweise eingehalten werden, was bedeutet, dass der Heizwärmebedarf von 40-79 kWh/m²a eingehalten werden muss. Bei der anstehenden Überarbeitung der Energieeinsparverordnung ist eine Reduktion dieses Wertes um 30% geplant. In Zukunft könnten auch Passivhäuser (Passivhausinstitut 2008a) mit einem Primärenergieverbrauch von weniger als 15 kWh/m²a eine neue Zielmarke darstellen (Europäisches Parlament 2008).

Zentrale technologische Entwicklungen zur Verbesserung der Klimaeffizienz von Gebäuden setzen in folgenden Bereichen an:

- Dämmung
- Lüftungs- und Klimatechnik
- Solare Wärme und Kühlung
- Altbausanierung
- Energetische Gebäudekonzepte

Dämmung

Durch die Außenwände gehen, je nach Gebäudetyp, bis zu 40% des jährlichen Heizenergieverbrauchs verloren (Energie-Enquete 2002, 304). Die **Dämmung der Gebäudehülle** ist daher der Kernpunkt jedes klimaeffizienten Gebäudes und in der Regel auch die wichtigste klimawirksame Maßnahme bei einer Altbausanierung (neben dem Auswechseln der Heizungsanlage). Abbildung 4 gibt Anhaltspunkte, welche Energieeinsparungen mit verschiedenen Maßnahmen bei einem freistehenden Einfamilienhaus zu erwarten sind. Am effektivsten und kostengünstigsten ist in der Regel eine Außendämmung. Wenn aus Denkmalschutz- oder anderen Gründen eine verbesserte Außendämmung nicht angebracht werden kann, ist es auch möglich, die Dämmung von innen her anzubringen.

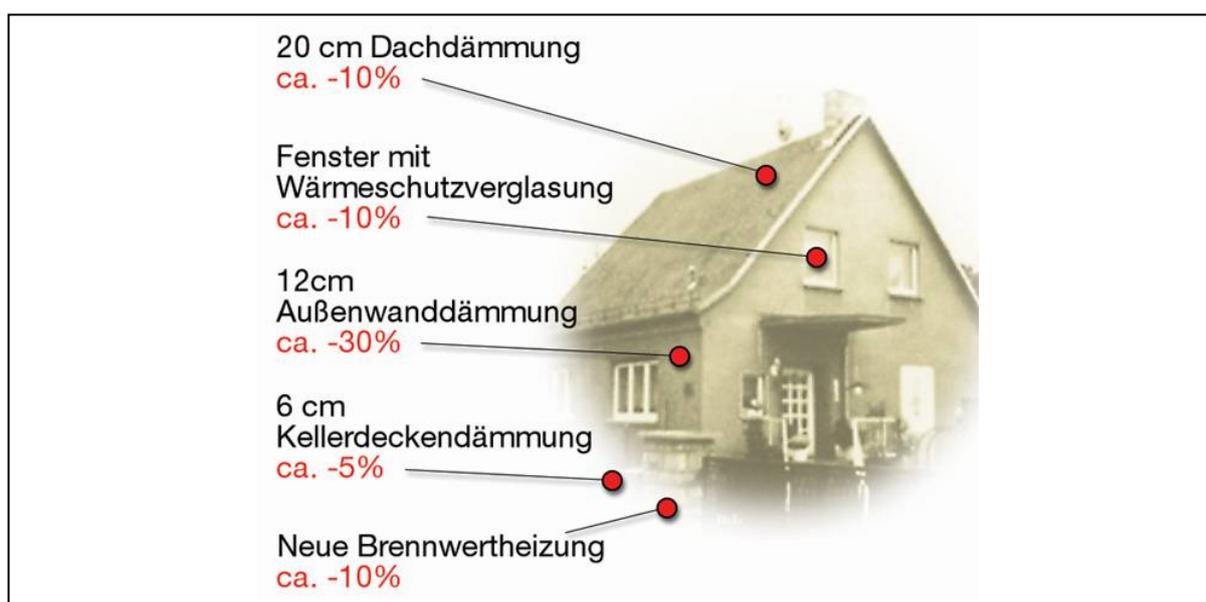


Abbildung 4: Spareffekte verschiedener baulicher Sanierungsmaßnahmen in Altbauten. Die Werte sind als Richtwerte zu verstehen (Quelle: Milles 2001, 3)

Es gibt drei wesentliche Herausforderungen, denen sich die zukünftigen Entwicklungen der Dämmmaterialien gegenübersehen. Zum einen zeichnen sich die gängigen Dämmmaterialien für den Neubau und die Altbausanierung durch Wandstärken von 30 cm und mehr aus (FIZ 2008b). Eine **Reduzierung der Wandstärken** würde zum einen die Akzeptanz erhöhen, da bei einer gegebenen Gebäudehülle mehr Wohn- und Nutzfläche vorhanden sind. Zum anderen würden geringere Wandstärken als positiver Nebeneffekt auch zu Materialeinsparungen führen. Eine zweite Herausforderung ist die Reduzierung der Kosten, da immer noch eine gewisse Hemmschwelle besteht in energiesparende Maßnahmen zu investieren, auch wenn sie sich über die Zeit rechnen würden, da die hohen Anfangsinvestitionen gescheut werden. Die dritte Herausforderung ist die Reduzierung des „klimawirksamen Rucksacks“, den die Dämmmaterialien mit sich führen. Es ist darauf zu achten, dass der Energieaufwand für die Herstellung der Dämmmaterialien nicht mehr treibhauswirksame Emissionen erzeugt, als durch die Dämmung eingespart werden.

Es gibt einige neuere Entwicklungen, um mit geringeren Wandstärken auszukommen. Techniken die hierbei zum Teil schon eingesetzt werden, sind unterschiedliche **Phasenwechselmaterialien** (Phase Change Material - PCM). Die Wärmeaufnahmefähigkeit von im Bauwesen üblichen Putzen, Gipskartonplatten, Paneelen, Estrichen und Spachtelmassen kann enorm erhöht werden, indem diesen Baustoffen mikroskopisch kleine, gekapselte PCM beigemischt werden. Die Aktivierung kann über Wasserführende Systeme erfolgen, die in der Regel **Kapillarrohrratten oder Rohrregister** nutzen. Auf diese Weise können Gebäude mit deutlich geringerem Energieeinsatz temperiert werden (enob 2008a). BASF produziert einen PCM-Rohstoff in mikroverkapselter Form für die Baustoffindustrie (BASF 2008). Durch Weiterentwicklungen könnten evtl. die Speicherfähigkeit und der Einsatz-Temperaturbereich erhöht werden.

Ein weiterer Ansatz ist der Einsatz von Vakuumisolation in Sandwich-Bauelementen oder Betonfertigteilen. In **Vakuum-Isolationspaneelen** (VIP) ist die Wärmeleitfähigkeit gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien um den Faktor 10 reduziert. Hierdurch ist der Passivhausstandard mit 4cm starken VIP möglich (Kratz 2007; enob 2008b).

Neben der festen Gebäudehülle sind die Fenster für die höchsten Wärmeverluste verantwortlich. Ist das **Zwei-Scheiben-Isolierglas** in Deutschland Standard, gibt es in den klimaefizienten Gebäuden auch **dreifach verglaste Fenster**, in denen zur besseren Dämmung seltene Edelgase eingesetzt werden, mit U-Werten (Wärmedurchgangskoeffizient U, auch Wärmedämmwert genannt) für die Verglasung im Bereich von 0,5 bis 0,7 W/m²K. Allerdings sind die Verglasungen mehrere Zentimeter stark und recht schwer. Wenn anstatt der Edelgase ein Vakuum zur Isolierung genutzt würde, wäre das Fenster deutlich schlanker und leichter, bei denkbaren Wärmedurchgangskoeffizienten von bis zu 0,4 W/m²K (enob 2008c). In einem BMWi-Projekt sind bisher U-Werte von Vakuum-Isolierglas (VIK) von 0,5 W/m²K erreicht worden und es scheint absehbar, dass die Kosten der VIK in den Bereich heutiger Dreifachverglasung liegen werden. Mit einer Markteinführung derartiger hocheffizienter VIK wird 2009 gerechnet (Grenzbech 2008). Weitere Entwicklungen liegen z.B. in der Entwicklung durchsichtiger Dämmstoffe.

Der Dämmstoffmarkt ist auf Grund der hohen Transportkosten derzeit stark regional geprägt und preisgetrieben. Tendenziell wird eine Internationalisierung der Herstellung und eine

Konzentration auf wenige Firmen mit dezentraler Fertigung erwartet. Das derzeitige Marktvolumen in Deutschland liegt bei geschätzten 4 Mrd. Euro, und weist ein geringes jährliches Wachstum von unter 5% auf (UBA/BMU 2007, 85). Das Wachstum des weltweiten Marktes für neu zu installierende Wärmedämmung wird mit 3% pro Jahr etwas geringer eingeschätzt (BMU/UBA 2007). Deutsche Unternehmen konstatieren derzeit einen Nachfrageschub der Dämmstoffe Steinwolle, Polystyrol und Kork- oder Kokosplatten (BMU 2007b). Der Marktanteil der Dämmstoffe auf natürlicher Basis beträgt derzeit 5%. Ein Wachstum des Marktanteils auf 15% wird bis 2020 erwartet (UBA/BMU 2007, 89).

Lüftungs- und Klimatechnik

Um unkontrollierte Wärmeverluste zu vermeiden, ist es bei energieeffizienten Gebäuden notwendig, das Gebäude luftdicht zu errichten und den Luftaustausch mittels einer Lüftungsanlage zu kontrollieren. Am besten sollte diese mit einer **Wärmerückgewinnung** ausgestattet sein.

Bei größeren Lüftungsanlagen mit vielen Ecken und Krümmern können hygienische Probleme auftreten. Häufig trifft dies auch auf Wärmerückgewinnungssysteme zu. Diese erlauben Rückgewinnungsgrade von bis zu 90%, um den Preis eines erhöhten Luftdruckes und entsprechend erhöhter Motorleistung. MSR(Mess-Steuer-Regel)-Techniken werden in zunehmendem Maße eingesetzt und weiterentwickelt, um die Anlagen bedarfsgerecht zu steuern und zu optimieren. Als zukunftsweisend gilt eine **Nutzung der Nachtkälte** zur freien Kühlung durch Speicherung (s.u.). Neben Wohn- und Arbeitsbereichen könnte diese z.B. in Serverräumen und Rechenzentren eingesetzt werden. **Haltbarere Materialien, neuartige Kühlflüssigkeiten, effizientere Motoren** sind zusätzliche Ansatzpunkte der Weiterentwicklung.

Energieeffiziente Klimatechniken werden bei steigenden Energiepreisen und gefördert/gefördert durch die Energieeinsparverordnungen zunehmend alte Anlagen ersetzen. Harte Konkurrenz auf dem internationalen Markt führt tendenziell zu einer Konzentration auf wenige globale Hersteller im Niedrigkostenbereich und wenige Hightech-Hersteller.

Solare Wärme und Kühlung

Selbst wenn bei sehr gut gedämmten Gebäuden kaum Energie zur Wohnungsheizung mehr aufgewendet werden muss, so ist doch Energie zur Warmwasserbereitung notwendig. Diese Energie kann, je nach klimatischen und lokalen Voraussetzungen, zum Teil solar erzeugt werden. Die Wärmegewinnung mittels **Solarkollektoren** wird seit Jahren in Deutschland und anderen Ländern angewendet. In Entwicklungs- und Schwellenländern sind besonders einfache und widerstandsfähige Anlagen im Einsatz.

Bisher war in Deutschland, im Vergleich zu vielen andern Ländern, der Einsatz von Klimaanlage zur Raumkühlung im Sommer sehr gering verbreitet. Seit einigen Jahren holt Deutschland in diesem Bereich auf. Es ist abzusehen, dass mit steigenden Sommertemperaturen in Folge des Klimawandels diese Entwicklung weiter anhalten wird. Eine Vervierfachung der sommerlichen Strombelastung von 1996 wird bis 2020 in Ländern der europäischen Union u.a. durch den zunehmend notwendigen Einsatz von Kühlanlagen prognostiziert. 40% bis 70% dieser Energieverbrauchszunahme könnte durch solare Kühlanlagen eingespart werden. In wärmeren Ländern liegt das Potential noch wesentlich höher (BMU/UBA 2007, 66).

Die Kühlung/Erwärmung mittels **Thermoaktiver Bauteilsysteme** könnte dieser Entwicklung entgegenwirken. In ihr dienen in Decken und Fußböden integrierte wasserführende Rohrsysteme für eine ganzjährige Temperierung von Gebäuden. Die gebäudeeigene Speicherkapazität wird zum Energieausgleich genutzt und über natürliche Wärme-/Kältesenken wie das Erdreich, das Grundwasser oder die kühlende Nachtluft aktiviert (Pffaffenrott/Katz 2007).

Ein anderer Weg der Energieeinsparung ist die **solarthermische Kühlung**. Die in einem Kollektor eingefangene Wärme wird dazu genutzt in einem thermisch angetriebenen Kühlprozess Kaltwasser und/oder klimatisierte Luft zu erzeugen (Henning 2006). Der große Vorteil der Technologie liegt darin, dass die benötigte Wärmeenergie genau dann verfügbar ist, wenn sie auch gebraucht wird, nämlich zu Zeiten eines hohen Sonnenstandes. Die durch elektrische Klimaanlage hervorgerufenen Nachfragespitzen lassen sich so abschwächen. Es sind Einsparungen bei den Betriebskosten für Heizung und Kühlung von 20 bis 70% und von Primärenergie von 30% bis 70% möglich (ebd.). Dieses Verfahren wird seit einiger Zeit erfolgreich in Pilotprojekten getestet und befindet sich auf dem Weg zur Kommerzialisierung. Erste Anbieter haben bereits Produkte auf dem Markt. Europäische Unternehmen, darunter einige deutsche Firmen, sind hier Marktführer. Komplettsysteme bieten derzeit nur wenige kleine und mittelständische Firmen an, die sich intensiv austauschen. Im Bereich der Kollektoren und Kältemaschinen konkurrieren internationale Hersteller. Ob sich hier kleinere Unternehmen zusammenschließen werden oder Teilkomponentenhersteller eher kleinere Komplettsystemanbieter übernehmen, ist derzeit nicht einschätzbar (BMU/UBA 2007).

Solare Kälteerzeugung wird in Großanlagen (> 50 kW) eingesetzt, in kleineren Anlagen (30-50 kW) stehen sie an der Grenze zur Markteinführung, in Kleinanlagen (bis 15 kW) befinden sie sich zwischen Entwicklungs- und Demonstrationsphase (UBA/BMU 2007). Weiterentwicklungen sind insbesondere bezüglich der Leistung der Kollektorfelder, bei kleinerer Leistung hinsichtlich Größe und Gewicht der Anlagen und bei der Mess- und Regeltechnik erforderlich. Besonderes Augenmerk ist auf einen Ersatz nasser Rückkühlverfahren zu legen, da sich diese in Ländern mit Wassermangel verbieten bzw. auch verboten sind.

Das globale Potential ist beträchtlich: Die geschätzte Anzahl konventioneller Kühlsysteme lag 2006 bei etwa 65,7 Mio. Einheiten. Schwerpunkte liegen in den USA (16 Mio. Einheiten) und im asiatischen Raum, allen voran China mit etwa 20 Mio. Einheiten (Jakob 2007). Der Weltmarktanteil wird für 2005 auf 15 Mio. € geschätzt, sein Wachstumspotential bis 2010 auf etwa 140 Mio. €, bis 2020 auf 4.5 Mrd €. Märkte für diese Technologie zeichnen sich in den europäischen Ländern, gefördert durch die politischen Rahmenbedingungen (z.B. Richtlinien) und in Nordamerika, Asien und Australien ab (BMU/UBA 2007).

Altbausanierung

Trotz der teilweise rasanten technologischen Entwicklung auf den Gebieten der Gebäudedämmung, der Raumwärmeerzeugung und der Gebäudeklimatisierung hat sich kaum eine Verringerung des Gesamtenergieverbrauchs der privaten Haushalte ergeben.

Ein Grund dafür ist, dass Energiesparende Maßnahmen vornehmlich im Neubau eingesetzt werden und in Deutschland die Neubauquote relativ gering ist. Von dem deutschen Gebäudebestand von 17,3 Mio. Wohngebäuden mit etwa 39 Mio. Wohneinheiten stammen ca. drei Viertel aus der Zeit vor 1979. Dies führt dazu, dass 77% der Gebäude 95% der im Gebäude-

bereich eingesetzten Energie verbrauchen. Ein Blick auf den Ölverbrauch von Gebäuden unterschiedlichen Baujahrs zeigt, dass ein erhebliches Energieeinsparpotential erschlossen werden könnte, wenn die älteren Gebäude im Bestand energetisch saniert würden. Diese **Altbausanierung** erfolgt bisher nur sehr langsam (RNE 2004, 8). Die kumulierte Sanierungsquote (1989 bis 2006) weist darauf hin, dass bisher weniger als 30% der möglichen energetischen Sanierungsmaßnahmen realisiert wurden (co2online 2007). Die Sanierungsrate beläuft sich auf 0,9 bis 1,3% pro Jahr, müsste sich jedoch auf 2,5 bis 3% des Gebäudebestandes erhöhen, um die gesetzten Einsparziele an CO₂ zu erreichen (Kraus 2007).

Dass energiesparende Innovationen im Mietwohnungsbau nur sehr zögerlich Anwendung finden, liegt zu einem großen Teil im so genannten „Vermieter-Mieter-Dilemma“. Dies besagt, dass für Vermieter nur geringe Anreize bestehen, energetische Sanierungsmaßnahmen durchzuführen, da er die entstehenden Kosten nur in begrenztem Umfang über Mieterhöhungen auf den Mieter abwälzen kann. Aber auch die Besitzer selbst genutzter Immobilien sehen u.a. wegen mangelnder Liquidität häufig von kostenintensiven energiesparenden Maßnahmen ab, obwohl sich diese mittelfristig rentieren würden.

Ein großer Prozentsatz der Bevölkerung unterschätzt jedoch die Einsparpotentiale und überschätzt die Kosten, lange Amortisationszeiten werden kaum akzeptiert. Letzteres gilt umso mehr für Vermieter, die nicht selber Nutzer der Einsparungen sind. So beträgt z.B. in Deutschland der Erneuerungszyklus von Heizungsanlagen etwa 24 Jahre, etwa ab 18 Jahren entsprechen sie nicht mehr dem Stand der Technik. Rund 33% der Ölfeuerungen und 25% der Gasfeuerungen sind älter als 18 Jahre. Die Potentialausnutzung bei Sanierungen wird mit 32% angegeben (Kleemann 2007). Das wirtschaftliche Einsparpotential von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebestand wird von der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages (2002) in den alten Bundesländern auf 38 bis 53% und in den neuen Bundesländern auf 53 bis 63% geschätzt (Energie-Enquete 2002).

Energetische Gebäudekonzepte

Je stärker die Energieverbrauchswerte der Gebäude gesenkt werden sollen, desto wichtiger ist es, dass der gesamte Energieverbrauch eines Gebäudes integrativ betrachtet wird und das Gebäude ein energetisches Gesamtkonzept aufweist. So können einzelne Punkte, die nicht bedacht werden, Energie sparende Maßnahmen aushebeln oder negative Effekte haben. Zum Beispiel kann auch eine sehr gute Dämmung der Gebäudehülle dadurch neutralisiert werden, dass nicht auf die Dichtigkeit der Gebäudehülle geachtet wird. Darüber hinaus erhöht eine gute Abdichtung der Gebäudehülle ohne den Einbau einer Lüftungsanlage das Risiko, dass die Feuchtigkeit aus einem Gebäude nicht in ausreichendem Maße abgeführt wird. Dies kann im Extremfall zu Schimmelbildung und damit verbunden zu allergischen Erkrankungen führen.

In Deutschland wurde in den letzten Jahren viel Erfahrung mit ganzheitlichen, Energiesparenden Gebäudekonzepten gesammelt und eine hohe Kompetenz in der Durchführung sowohl im Neubau, als auch in der Altbausanierung aufgebaut. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung des **Passivhausstandards** durch das Passivhausinstitut. Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in dem eine behagliche Temperatur sowohl im Winter als auch im Sommer ohne separates Heiz- bzw. Klimatisierungssystem zu erreichen ist. Es bietet erhöhten Wohnkom-

fort bei einem Heizwärmebedarf von weniger als 15 kWh/m²a und einem Primärenergiebedarf einschließlich Warmwasser und Haushaltstrom von unter 120 kWh/m²a. Das Passivhaus nutzt im Winter in seinem Inneren vorhandene Energiequellen wie die Körperwärme von Personen und Elektrogeräten sowie die einfallende Sonnenwärme (Passivhausinstitut 2008a).

Effiziente Heizsysteme, Isolierglas und effiziente Gebäudetechnik weisen in Deutschland eine überdurchschnittliche Patentdynamik auf. Besondere Stärken liegen auf der Entwicklung von Niedrigenergie- und Passivhaustechniken (UBA/BMU 2007, 68). Der Exportanteil der Unternehmen beträgt derzeit etwa 30%. Exportländer sind hauptsächlich West- und Osteuropa sowie Russland. Dem chinesischen Markt wird in etwa 10 Jahren eine größere Bedeutung zugemessen als dem europäischen (UBA 2007a, 87).

Neben den technologischen Entwicklungen weisen auch organisatorische Innovationen (z. B. **integrierte energetische Gebäudesanierung als Dienstleistung, Energie-Contracting, energetische Beratung beim Neubau und der Stadtplanung**) eine hohe Dynamik auf (UBA/BMU 2007, 68).

Um eine Verbreitung dieser technologischen und organisatorischen Innovationen zu fördern, gibt es auf staatlicher Ebene Möglichkeiten der Schaffung von günstigen Rahmenbedingungen. Hierzu gehören spezifische Instrumente, durch die eine Erhöhung der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes erfolgen würde. Teilweise sind solche Instrumente in Deutschland bereits in der Anwendung (z.B. Förderung Energieeinsparender Investitionen durch Zuschüsse oder verbilligte Kredite, die Energieeinsparverordnung, die den Austausch veralteter Heizanlagen vorschreibt und der Gebäudeenergiepass). Ergänzend böte es sich an, z. B. Maßnahmen, mit denen das Vermieter-Mieter-Dilemma angegangen werden könnte (z. B. Energie-Contracting, Sanierungsfonds, verbesserte Möglichkeiten der Umlegung von energetischen Sanierungsmaßnahmen auf die Miete, Vereinbarung von Warmmieten) einzuführen³. Letzendlich gibt es breitenwirksame Instrumente, die den fossilen Energieverbrauch allgemein betreffen, die aber auch Impulse zur energetischen Sanierung des Altbaubestandes auslösen könnten, wie z. B. eine moderate schrittweise Erhöhung der Ökosteuer (Jörissen et al. 2005, 142f.). „Copy and Paste“ derartiger Zielsysteme, also ein „Export“ dieser staatlichen Instrumente in andere Staaten könnte die Implementierung energetischer Innovationen deutlich beschleunigen.

2.3.5 Industrielle Prozesse

In verschiedenen Industriebereichen lassen sich spezifische Optionen, Prozesse im Hinblick auf Energie- und/oder Ressourceneffizienz zu optimieren. Der folgende Abschnitt gibt dazu einen Überblick.

In Deutschland stammten 2004 240 Mt CO₂e (CO₂-Äquivalent) aus direkten Emissionen der Industrie, das entspricht einem Anteil an der Gesamtemission von Treibhausgasen von 23%. Bei der Erzeugung von Strom und Fremdwärme entstehen 14% (136 Mt CO₂e) zusätzliche indirekte Emissionen (McKinsey 2007b). Die Hauptverursacher im Industriesektor sind die

³ Im Falle der Vereinbarung von Warmmieten käme die Verringerung von Heizkosten durch eine energetische Sanierung unmittelbar dem Vermieter zugute (RNE 2004).

Chemische Industrie und die Stahlindustrie. Zu weiteren Emissionen von Treibhausgasen kommt es in den Produktionsprozessen der Industriezweige Zement, Mineralöl, Nahrungsmittel, Papier, NE(Nicht Eisen)-Metalle, Fahrzeug- und Kohlebergbau. Im Folgenden werden die industriellen Einzelemittenten mit den größten Einsparpotentialen herausgegriffen und näher beleuchtet. Hierzu gehören die Stahl-, die Chemische und die Zementindustrie. Allgemein ist für alle Sektoren anzumerken, dass der zunehmende Einsatz effizienterer Antriebssysteme inklusive mechanischer Systemoptimierung bis 2020 den größten Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen leisten wird. Darüber hinaus hängen die Einsparpotentiale stark von den individuellen Gegebenheiten des jeweiligen Industriesektors ab.

Stahlindustrie

Die Stahlerzeugung ist vor allem als Folge der im Herstellungsprozess notwendigen hohen Temperaturen energie- und umweltintensiv. Dementsprechend steht die Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz durch die verbesserte Ressourcennutzung im Mittelpunkt der industriellen Entwicklung (Hirth et al, 89). Etwas mehr als 85% der Emissionen gehen auf direkte Emissionen durch Eisenreduktion (Prozessemissionen) und Unterfeuerungsenergie zurück. Der Verbrauch fossiler Brennstoffe hat sich in der deutschen Eisenschaffenden Industrie von 1990 bis 2004 um 17,7% vermindert. Die Selbstverpflichtung der deutschen Eisenschaffenden Industrie die CO₂-Emissionen von 1990 bis 2005 um 17% zu senken, ist damit erfüllt worden (Hirth et al., 2007, 96). Über Optimierungen und Anpassungen bei der Stahlproduktion können Energie, Rohstoffe oder direkte Emissionen eingespart werden (McKinsey 2007b, 54). Damit gehen bestimmte Anforderungen an die Stahlqualität einher (Erhöhung der Temperatur und Druckfestigkeit, Anhebung der Dauer und Zeitstandsfestigkeit, Anforderungen an die Korrosions- und Verschleißtätigkeit). Entsprechende Innovationen vorausgesetzt, lassen sich hier noch erhebliche Potentiale realisieren.

Trotz der gemachten Fortschritte besteht im Hinblick auf den Energieverbrauch (indirekte Emissionen) nach wie vor ein erhebliches Verbesserungspotential. „Da eine Absenkung der hohen Prozesstemperaturen nicht praktikabel ist, sind Einsparungen vor allem durch die Koppelung von wärmeintensiven Prozessschritten, die Substitution von Brennstoffen und Reduktionsmitteln durch ökonomisch und ökologisch vorteilhaftere Einsatzstoffe und Maßnahmen zur Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung möglich“ (Hirth et al. 2007, 113).

Während der Einsatz von alternativen Stoff- und Energieträgern an Stelle der Koks- und Kohle grundsätzlich dem Stand der Technik entspricht, besteht hinsichtlich der **Optimierung des Verhältnisses von Koks und Zusatzreduktionsmitteln** unter Effizienzgesichtspunkten großer Forschungs- und Handlungsbedarf. Eine Alternative stellt die **Verwendung von Sekundärbrennstoffen** wie Hütten- oder Biogas als Ersatz für Primärenergieträger dar. Das gilt insbesondere zur Beheizung von Pfannen oder Verteilern. Weiter ist der Einsatz **multivarianter Feuerungen**, die einen flexiblen Gasmix ermöglichen, grundsätzlich denkbar. In beschränktem Umfang besteht die Chance der Nutzung von Entfallstoffen. Hochofengas, das verfahrenstechnisch bedingt nur teilweise für den Reduktionsprozess genutzt werden kann und anschließend der Heißwind- und Elektroenergieerzeugung dient, wäre nach dem Durchlaufen einer geeigneten Gasbehandlung als Reduktionsgas einsetzbar. Auch die Verwendung von kohlestoffhaltigen Abfallstoffen als Sekundärreduktionsmittel spart Koks und verbessert die CO₂-Bilanz.

Die Stahlerzeugung in Deutschland wird von zwei Verfahren bestimmt. Die integrierte Route (auch Blast Furnace/Blast Oxygen Furnace – BF/BOF) und das **Elektrolichtbogenverfahren** (Electric Arc Furnace – EAF), das an kleineren Standorten dominiert. Beim BF-/BOF-Verfahren erfordert die Erzeugung des Rohstahls den Einsatz von Primärenergie und von Strom und ist dadurch mit entsprechenden CO₂-Emissionen verbunden. Auch beim EAF-Verfahren, das in Deutschland überwiegend aus dem Einschmelzen von Schrott mittels Strom über Graphitelektroden besteht, wird Primärenergie eingesetzt. Da aber im Gegensatz zum BF/BOF-Verfahren kein Erz reduziert wird und wie beschrieben lediglich Schrott eingeschmolzen wird, betragen die Emissionen insgesamt nur rund ein Drittel der Emissionen des BF/BOF-Verfahrens. Aus diesem Grund wird in Deutschland immer mehr ein Wandel vom BF/BOF-Verfahren zum EAF-Verfahren vollzogen. Die Ausdehnung der Produktion durch Aufbau weiterer Elektrolichtbogen-Anlagen sowie eine **Verkürzung der Tap-to-Tap-Zeiten** im Elektrolichtbogen-Verfahren, aber auch der **Ersatz kleinerer Hochöfen** durch EAF-Anlagen bergen ein Potential von 2 Mt CO₂e. Effizienzsteigerung im Bereich der EAF kann zusätzlich durch eine **Vorwärmung des eingesetzten Schrottes** durch vorhandene Abgaswärme oder Primärenergieeinsatz erreicht werden. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es in Deutschland aber noch keine genehmigungsfähige Einrichtung zur Schrottvorwärmung an einem EAF. Es muss darauf hingewiesen werden, dass sich durch das EAF-Verfahren nicht die gleichen Produktqualitäten erstellen lassen wie durch das BF/BOF-Verfahren. Dies ist heute auch immer noch ein Grund dafür, dass die BF/BOF-Route weiterhin einen hohen Anteil am Erzeugungsmix hat. Beim neueren **TGRBF(Top Gas Recycling Blast Furnace)-Verfahren** wird das entstehende Hochofengas nicht wie beim konventionellen BF-Verfahren nur für die sekundäre Energieerzeugung verwendet, sondern der Großteil des Gases wird behandelt und über einen Heater in den Produktionsprozess rückgeführt. Durch dieses Verfahren kommt es zu 50 bis 60% niedrigeren CO₂-Emissionen.

In der Elektroband(Stahlband)-Produktion werden die konventionellen Verfahren des Dünnbrammgießens und des Stranggießens langsam durch das Bandgießen ergänzt bzw. abgelöst. Durch diese Industrialisierung der Bandgießtechnologie ist es in der Stahlindustrie zum einen zur CO₂-Einsparung und zum anderen zu einer Verkürzung des Produktionsprozesses bei der Herstellung von Stahlbändern gekommen. **Bandgießen** ist eine neue Technologie für die Stahlbandherstellung, bei der die Prozessstufen Gießen und Warmwalzen in einer Linie direkt gekoppelt sind. Die im Vergleich zur konventionellen Fertigungstechnologie verkürzte Prozessroute führt zu einer Reduzierung des Energieeinsatzes von 2,11 GJ/t auf 0,20 GJ/t und in folge dessen zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen von 221 kg/t auf 37 kg/t. Bisher gibt es nur eine semi-industrielle Anlage, die im Vergleich zur konventionellen Technik eine geringe Ausbringungsrate hat. Zur Steigerung des Ausbringens der Bandgießroute auf das Niveau der konventionellen Erzeugung, ist eine Erhöhung der maximalen Gießlänge erforderlich. Ein aktuelles BMBF-gefördertes Projekt (ThyssenKrupp Nirosta, MetallVeredlung GmbH & Co KG und RWTH Aachen, Institut für Bildsamer Formgebung) verfolgt das Ziel, die Standzeit der Gießrollenbeschichtung und der Arbeitswalzen durch **Entwicklung einer Gießrollenbeschichtung höherer Härte** und durch Entwicklung einer **verschleißminimierten Warmwalzstrategie** zu erhöhen. Durch die Nutzung der beschriebenen „Strip-Casting“-Technologie entstehen in der Stahlproduktion Einsparpotentiale bis über 85%. Darüber hinaus können durch das Verfahren des „**Abmessungsnahen Gießens**“ rund 1,2 Mt CO₂e vermieden werden, da es durch Vermeidung von Abkühlen und Wiedererhitzen zu ei-

ner Prozessverkürzung kommt (McKinsey 2007b, 67). Auf die Prozesse und Verfahren in der Stahlbandproduktion wird im Abschnitt 6.3.5 (Kapitel „Schonung endlicher Ressourcen“) nochmals eingegangen, dort aber aus Sicht der Ressourceneffizienz im Produktionsprozeß.

In der aktuellen Entwicklung sind überdies neue innovative Technologien zur schnellen und kontrollierten Erwärmung und Abkühlung von Stahlbändern. Parallel dazu wird intensiv an Möglichkeiten zu veränderten Thermischen Kreisläufen beim Design von neuen Produkten, speziell für Autos, geforscht. Weitere Hintergründe für einen Rückgang der Emissionen der Stahlindustrie trotz leicht gestiegener Gesamtstahlproduktion, sind die kontinuierliche Modernisierung der Anlagen, es gibt **erste Anlagen mit CCS** (Vermeidungspotential von 1,4 Mt CO₂e), und die Konzentration von Standorten.

Die Verringerung der Kohlendioxid- und anderer Treibhausgasemissionen bei der Stahlerzeugung ist Ziel der von der EU-geförderten Forschungsinitiative ULCUS (Ultra Low CO₂ Steelmaking). Ein Konsortium aus 48 europäischen Unternehmen und Organisationen untersucht dabei neue Konzepte, die das Potential haben, die spezifischen CO₂-Emissionen bei der Stahlerzeugung auf Eisenerz-Basis um mehr als 30 Prozent zu verringern. Ganz aktuell (02/08) hat die Europäische Plattform für Stahltechnologie (ESTEP) beschlossen, eine zweite Phase des Forschungsprogramms anzuschließen, das ULCOS-II-Programm.

Chemische Industrie

Von den sechs im Kyoto-Protokoll genannten Treibhausgasen sind für die chemische Industrie in ihrem Produktionsbereich CO₂, N₂O, HFC (fluorierte Kohlenwasserstoffe) und SF₆ relevant. Dabei nehmen aber nur die energiebedingten Emissionen von CO₂ und N₂O bei der Produktion einen größeren und damit gewichtigen Umfang ein. Im Sektor der chemischen Industrie zeigen sich erhebliche Einsparungspotentiale. So wurden allein in Deutschland 2004 ca. 62 Mt CO₂e emittiert; davon 41 Mt CO₂e über Energienutzung und 21 Mt CO₂e als Prozessemissionen (McKinsey 2007b, 57).

Die **energieintensivsten** Prozesse der chemischen Industrie sind die Herstellung von Ammoniak (vor allem zur Herstellung von Düngemitteln), das Cracken von Naptha zu Ethylen und Propylen (als wichtiger Baustein der petrochemischen Industrie) sowie die Chlorherstellung.

Zur Rückgewinnung von Energie ist eine klassische Methode das optimale Design von **Wärmetauscher-Netzwerken**. In den meisten chemischen Produktionsanlagen gibt es eine Vielzahl von Wärmequellen und Wärmesenken auf verschiedenen Temperaturniveaus, so dass ein großes Einsparpotential leicht zu identifizieren ist. Weitere Ansätze zur Reduzierung des Energiebedarfs sind die **Nutzung der Reaktionswärme** einer chemischen Reaktion und der **Einsatz von neuen, energieeffizienteren Verfahren**. Als Beispiel zur energetischen Optimierung von Prozessen soll ein neues Verfahren zur Herstellung von Isocyanaten kurz dargestellt werden. Isocyanate sind Vorprodukte für viele Substanzen wie Klebstoffe, Lacke oder Schäume. Im Allgemeinen werden Isocyanate durch die Reaktion eines Amins mit Phosgen hergestellt. Dieser Prozess ist sehr energieintensiv. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, in dem die Reaktion in größeren Konzentrationen in der Gasphase stattfindet. Der neue Prozess kann mit der Hälfte der bisher erforderlichen Energiemenge

betrieben werden. Entsprechend verringert sich der Ausstoß an CO₂ den diese Anlagen verursachen.

Ein weiteres Beispiel ist die Chlor-Herstellung. Chlor ist eine essentielle Grundchemikalie der Chemischen Industrie. Das wichtigste Herstellungsverfahren ist nach aktuellem Stand der Technik die Chlor-Alkali-Elektrolyse. Das übliche Verfahren für die Chlor-Alkali-Elektrolyse war lange Zeit das so genannte Amalgam-Verfahren. Dazu werden ca. 10 Mio. MWh pro Jahr an elektrischer Energie benötigt, die zum größten Teil auf Basis von fossilen Brennstoffen bereitgestellt werden. Dies entspricht einer CO₂-Emission von ca. 10 Mio. t pro Jahr. Seit einigen Jahren wurde das Amalgam-Verfahren bei deutlicher Reduzierung des Energieverbrauchs um 30% durch das **Membranverfahren** abgelöst.

Eine deutliche Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie und damit der CO₂-Emission kann durch Einsatz von **Gasdiffusionselektroden**, speziell durch die so genannte **Sauerstoffverzehrkatode** (SVK), bei der modernen Membranelektrolyse erzielt werden. Die SVK-Kathode ist eine nanoporöse, mit Katalysatorpartikeln durchsetzte Kathode, die an der Rückseite von Sauerstoff umströmt wird. Das Energie-Einsparpotential liegt bei 30%, was ca. 2,3 Mio. t CO₂ pro Jahr (bereinigt um die Sauerstoffproduktion für SVK und Wegfall Wassernutzung) in Deutschland entspricht. Es wird geschätzt, dass sich dieses Potential bei weltweiter Marktdurchdringung der neuen Methode der Chloralkali-Elektrolyse mehr als zehnfachen lässt. Ein ökonomischer Betrieb der neuen Elektrolysetechnologie ist aber nur möglich, wenn es gelingt, die Elektrolysespannung von derzeit 2,2 V auf 2,0 V (bei einer Stromdichte von 4 kA/m²) zu erniedrigen und die Investitionskosten für die Elektrolysezellen zu senken. Es wird mit einer industriellen Realisierung ab 2010 gerechnet. Die Arbeiten sind in einem BMBF-geförderten Projekt organisiert (zusätzliche Informationen unter www.klimazwei.de). Die Fachkompetenz zur Lösung der anstehenden Aufgabe sollte in Deutschland vorhanden sein. Zukünftig soll die neue Elektrolysetechnik der SVK weiterentwickelt werden, die Optimierung der Teilschritte Mischen, Auftrag und Kompaktierung und eine Maßstabsvergrößerung des SVK-Herstellverfahrens stehen an. Zum „Reifeprozess“ der neuen Technik gehören auch Konzepte für die Reduktion der Kathodenkosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Performance sowie alternative Katalysatoren. Das Endziel wird sein, viele Betriebsanlagen mit der neuen Technik auszurüsten. Ein erster Schritt dahin ist der Aufbau eines Demonstrations-Elektrolyseurs, bei dem zwei verschiedene Zellkonstruktionen entwickelt wurden:

- **Gas Pocket Technologie**
- **Percolator (Falling Film Technology)**

Neu ist aber nicht nur die SVK, sondern auch die rein **metallische Elektrolysezelle mit einer Ionenaustauschmembran**.

Weiterer Ansatzpunkt zur Vermeidung von THG-Emissionen in der Chemischen Industrie ist die direkte Minimierung von Emissionen aus dem Produktions- oder Herstellungsprozess. 39% der Prozessemissionen der chemischen Industrie wurden als Lachgas emittiert, das aus der Adipin- und Salpetersäureproduktion stammt. Weitere 15% der Prozessemissionen wurden als CO₂ über die Ammoniaksynthese freigesetzt. Bei den Prozessemissionen stellt die Lachgaszersetzung in der Adipin- und Salpetersäureproduktion das größte Reduktionspotential in der chemischen Industrie dar (McKinsey 2007b, 60).

Die Adipinsäurehersteller haben sich über eine Selbsthilfeverpflichtung zur weiteren Reduzierung der Lachgasemissionen verpflichtet (ebd., 59). Bei der Adipinsäureherstellung lässt es sich nicht vermeiden, dass aus der Reaktion eine große Menge Lachgas als Nebenprodukt entsteht. Dieses Lachgas wird bereits größtenteils in einem nachgelagerten Reaktionsschritt zersetzt. Der Zersetzungsgrad lässt sich in der Adipinsäureproduktion durch eine zweite, parallel geschaltete **Zersetzungseinheit** auf ca. 98% erhöhen. Die Technik ist vorhanden, die Kosten liegen nach McKinsey (2007b, 60) bei lediglich 2 €/t CO₂e. Bei der Salpetersäureherstellung erfolgt die Lachgaszersetzung in der Regel zunächst durch den Einbau einer zweiten Zersetzungseinheit (**Katalysatorschichtbett**). Durch eine **tertiäre Zersetzungseinheit** lassen sich die Lachgasemissionen auf 6,8% des Ausgangswertes reduzieren. Die Kosten werden auf 14 €/t CO₂ geschätzt. Durch Verminderung von Lachgasemissionen (N₂O) bei der Adipin- und Salpetersäureproduktion kann eine erhebliche Reduktion von Klimagasen bei relativ günstigen Vermeidungskosten realisiert werden. Doch während bei der Adipinsäureproduktion bereits erhebliche Minderungen der N₂O-Emissionen realisiert wurden, sind im Bereich der Salpetersäureproduktion intensive Forschungsaktivitäten und Pilotprojekte erst angelaufen. Emissionsminderungsmöglichkeiten, die sich hieraus ergeben, werden nur bei Neuanlagen Berücksichtigung finden können. Das bedeutet, dass sie erst nach 2012 voraussichtlich zum Tragen kommen werden.

Bei der Salpetersäureproduktion kann zur Beseitigung der entstehende Lachgase und NO_x auch das Uhde-**EnviNOx®-Verfahren** angewendet werden. Das Verfahren wandelt entstehende Stickoxide mit Hilfe eines speziellen Katalysators in die unschädlichen Luftbestandteile Stickstoff, Sauerstoff und Wasser um. Die innovative Technologie ist auch bereits im Ausland, Ägypten, in einer der weltweit größten Salpetersäure-Anlagen, zum Einsatz gekommen. Die Lachgasbeseitigung durch das Verfahren entspricht einer jährlichen äquivalenten CO₂-Reduktion von über 1,4 Mio. Tonnen.

Durch die weitere Optimierung und Weiterentwicklung von Katalysatoren sowie durch Intensivierung der Prozesse ein signifikantes CO₂-Reduktionspotential erschlossen werden. Beide Ansatzpunkte, Katalysatoroptimierung und Prozessintensivierung, können gleichzeitig zu einer Reduktion der Produktionskosten führen (McKinsey 2007b, 61).

Darüber hinaus könnten weitere Reduzierungspotentiale aus der **CCS in der Ammoniakherstellung**, die aber erst realisierbar werden, wenn die notwendige Infrastruktur für CCS geschaffen wurde und aus der **Brennstoffsubstitution** kommen. Die Chemische Industrie setzt heute bereits überwiegend auf die Nutzung von Erdgas, es ergäbe sich insgesamt bis 2020 eine Einsparung von 0,6 Mt CO₂e, wenn der verbliebene Verbrauch von Kohle und Öl noch durch Erdgas ersetzt würde.

Zementindustrie

Die derzeitige weltweite Zementproduktion beläuft sich auf über 2,3 Mrd. t mit erheblichem Wachstumspotential in den Schwellen- und Entwicklungsländern. Schätzungen der weltweiten Produktion nennen für 2010 Produktionsmengen von 2,8 Mrd. t bis 2020 von 4 Mrd. t (Taylor et al. 2006). Im Jahr 2004 verursachte die Zementindustrie in Deutschland bei einer Produktionsmenge von 32 Mt Zement etwa 23 Mt CO₂-Emissionen.

Zement besteht im weltweiten Mittel derzeit zu rd. 85% aus feingemahlenem Portlandzementklinker und Calciumsulfat, bei dessen Herstellung je nach verwendeter Technologie zwischen 0,7 t und 1,3 t CO₂ pro Tonne Klinker emittiert werden. Rund 0,53 t CO₂ (60% der CO₂-Gesamtemissionen) fallen im Mittel bei der Calcinierung des eingesetzten Kalksteins (CaCO₃) zur Entsäuerung des Zementrohstoffs an. Die restlichen 40% entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz elektrischer Energie.

Durch den **erhöhten Einsatz von anderen Hauptbestandteilen** neben Klinker wie z.B. Hüttsande, Flugaschen, Puzzolane und inerte Füller (z.B. Kalkstein) zur Herstellung von Komposit-Zementen, soll die spezifische CO₂-Emission pro Tonne Zement erniedrigt werden. Problematisch bei der Verminderung des Klinkeranteils ist es aber, dass sie durch die Verfügbarkeit der Ersatzstoffe (z.B. Hüttsand) begrenzt ist. Hinzu kommt, dass die alternativen Zusatzstoffe die unterschiedlichen Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit des Zements beeinflussen. Bislang führten die Maßnahmen nicht dazu, dass die absoluten gesamten CO₂-Emissionen der Zementindustrie weltweit verringert werden konnten. Des Weiteren ist eine zunehmende Schwermetallbelastung des Zements durch den weltweit verstärkten Einsatz von Flugaschen nicht ausgeschlossen. Über das Freisetzungverhalten von Schwermetallen aus zementgebundenen Bauwerken nach deren Nutzungsphase liegen nach heutigem Wissensstand keine gesicherten Erkenntnisse vor (Achterbosch et al. 2005). Zur Entwicklung alternativer calciumarmer bzw. -freier Bindemittel besteht Forschungsbedarf. Im Rahmen der klimazwei-Initiative des BMBF beschäftigt sich das Projekt ÖKOTOP damit, ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen zu entwickeln. Bei Erfolg könnten erhebliche Mengen CO₂ eingespart werden; jährlich etwa 1 Mio. Tonnen.

In der Zementindustrie besteht ebenfalls die Möglichkeit die THG-Emissionen durch eine Erhöhung der Energieeffizienz des Produktionsprozesses zu vermindern. Dies kann zum einen durch die **Substitution fossiler Regelbrennstoffe durch Sekundärbrennstoffe** (Abfälle, Klärschlamm) erreicht werden. Eine Substitution der traditionellen fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohle durch andere Brennstoffe wie z.B. Erdgas ist aus Kostengründen (Wettbewerb) nicht möglich. Bei einer Steigerung des Anteils der Sekundärbrennstoffe von heute ca. 50% auf 60% im Jahr 2030, kann mit einer einhergehenden Reduzierung der Emissionen in Höhe von 0,2 Mt CO₂e bis 2020 gerechnet werden.

Um den Energieeinsatz dennoch weiter zu optimieren, können in den Zementwerken im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses die unterschiedlichsten Maßnahmen durchgeführt werden. Drei Beispiele sind nachfolgend kurz skizziert: Eine erste Möglichkeit besteht in der Nutzung der Abwärme. Für die Stromerzeugung stehen bei der Klinkerproduktion grundsätzlich drei potentielle **Abwärmequellen** zur Verfügung: das **Vorwärmeabgas, das Bypassgas und die Kühlerabluft**. Ein spezielles Verfahren zur thermischen Nutzung der Kühlerabluft ist das ORC(Organic Rankine Cycle)-Verfahren. Beim **ORC-Verfahren** handelt es sich um eine Technologie zur Verstromung der Niedertemperaturwärme unter 250°C. Dieses Verfahren kommt ursprünglich aus Verstromung von geothermischen Heißwasserquellen. Da diese Nutzung allerdings einen sehr geringen Wirkungsgrad in der Stromerzeugung mit sich bringt, verbleibt nur ein Vermeidungspotential von 0,04 Mt CO₂ pro Jahr. Die zweite Variante kann die Installation eines **Expertensystems** sein. Ziel des

Systems ist es, den Klinkerbrennprozess zu automatisieren und zu vergleichmäßigen und durch den gleichförmigen Ofenbetrieb den Energieverbrauch zu senken. Zusätzlich kann mit Hilfe des Expertensystems desgleichen eine maximale Ofenleistung vorgegeben werden. Des Weiteren sind auch die im Herstellungsprozess notwendigen **Vorwärmer kontinuierlich verfahrenstechnisch optimiert** worden. Die neuen Vorwärmstufen verfügen über eine optimierte Geometrie und erzielen damit eine Einsparung an elektrischer Energie.

Wie auch schon in den anderen Industriesektoren gezeigt, birgt die CCS-Technologie auf lange Sicht das größte technisch mögliche aber auch unsicherste Einsparungspotential in Höhe von knapp 7 Mt CO₂e im Jahr 2030. Im Jahr 2020 könnte lediglich durch Pilotprojekte ein Potential von unter 1 Mt CO₂e erzielt werden (McKinsey 2007b, 71).

Elektrische Antriebssysteme

Elektrische Antriebssysteme finden sich insbesondere in Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren, aber z.B. auch in Förderbändern und Fertigungsrobotern sowie diversen weiteren industriellen Anlagen. Ca. 60% des industriell genutzten Stroms werden durch Antriebssysteme verbraucht. Schon allein durch den Einsatz aktuell auf dem Markt vorhandener Technologien ließe sich ein erhebliches Einsparpotential realisieren (McKinsey 2007a, 39). In den letzten Jahren wurde die Effizienz von Elektromotoren um etwa 20% gesteigert (optimierte Auslegung, Abschaltung in Leerphasen, automatische Drehzahlregelung). Allerdings konnten sich effizientere Elektromotoren bisher nur in etwa einem Fünftel des Marktes durchsetzen. Sie bilden einen Markt von gegenwärtig 20 Mrd. € (UBA/BMU 2007, 88). Eine indirekte Nachfragesteigerung wird aber durch zunehmenden Bedarf an energieeffizienten Geräten erwartet.

Da in vielen Fertigungsprozessen variable Motorleistungen nachgefragt werden, welche z.B. durch Drosselung eines konstant laufenden Motors erreicht werden, kommen verstärkt **Drehzahlregler** zum Einsatz. Über Drehzahlregler kann Strom gespart werden, da sie die Leistung des Motors an die aktuelle Nachfrage flexibel anpassen. Weitere Einsparmöglichkeiten resultieren aus dem Einsatz von **Energiesparmotoren mit verbessertem Wirkungsgrad**. Eine Energieeinsparung um weitere 50% wird durch die Anwendung von **Frequenzumwandlern** (88% der heute eingesetzten Motoren sind ungeregelt) erreichbar (McKinsey 2007a).

Darüber hinaus ergeben sich durch mechanische Systemoptimierungen, die **integrative Anpassungen** beinhalten, Chancen zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Insbesondere in der Kraftübertragung, in Leitungen und Rohren, bei der Wartung und Reparatur, der Abstimmung der getriebenen Anwendungen bei Motoren und Antrieb sind Optimierungen denkbar. Durch die Umrüstung und Systemoptimierung können allein in Deutschland CO₂-Einsparungen von 40 Mio. t p.a. (~4% der CO₂-Gesamtemissionen) erzielt werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass ein **mechanische Systemoptimierung** (insbesondere der kostenintensive Austausch von Rohren, Infrastruktur etc.) nur beim kompletten Austausch einer Anlage vorgenommen wird, also im Durchschnitt alle 40 Jahre (McKinsey 2007a, 40).

Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR)

Etwa alle 18 Monate verdoppelt sich die Anzahl elektronischer Bauelemente pro Speicherchip (FORNEL 2007). Neue Nanostrukturen, Nanobauelemente und -schaltungen erlauben

entsprechende Weiterentwicklungen und damit ein immer breiteres Feld der MSR auf kleinstem Raum, die in immer stärkerem Maße verschiedene Funktionen miteinander verbindet. Eine Vernetzung über Funk erlaubt in vielen Fällen eine problemlose Nachrüstung, aber auch eine zentrale Steuerung über größere Entfernungen, welche insbesondere im industriellen Bereich gefordert wird. Zunehmend sind **selbstwartende Komponenten** im Einsatz.

In der Hightech-Strategie der Bundesregierung wird der Bereich Mess-, Steuer- und Regeltechnik als eine globale Stärke der deutschen Unternehmen genannt (BMBF 2006). In der Studie „Wirtschaftsfaktor Umweltschutz“ (UBA/BMU 2007, 69) wird die Mess-Steuer und Regeltechnik als eine Querschnittstechnologie, die zu den traditionellen Bereichen des Umweltschutzes gehört, bezeichnet. Die Entwicklungsdynamik wird allerdings trotz des großen Potentials als eher unterdurchschnittlich eingeschätzt. Der weltweite Markt für Mess-Steuer- und Regeltechnik wird auf ca. 100 Mrd. € geschätzt, das Wachstum liegt bei 5%. International wächst die Nachfrage vor allem in den Schwellenländern, da gegenwärtig und auch in Zukunft große Investitionen in neue Anlagen und Fabriken getätigt werden (ebd., 84). Die deutsche MSR-Industrie ist stark exportorientiert, Wachstumsmärkte liegen vor allem in Asien. Die stärksten Zuwächse werden in Indien und China erwartet, das bedeutet, das diese auch in Zukunft die wichtigsten Absatzmärkte sein werden (ebd., 85).

2.3.6 Land- und Forstwirtschaft

Ein Bereich, der bisher kaum Beachtung findet und dabei doch deutlich die Erderwärmung beeinflusst, ist die Landwirtschaft mit ihren Bewirtschaftungsmethoden und ihrem Stoffeinsatz. Bis zu einem Drittel der Treibhausgase (10-12%, vgl. Abb. 5) weltweit stammen aus der Landwirtschaft (Smith et al. 2008). Unmittelbar trägt die Landwirtschaft zwischen 5,1 und 6,1 Gt CO₂e zu den globalen THG bei. Es handelt sich hierbei größtenteils um Emissionen in Form von Methan (CH₄, 3,3 Gt CO₂e/Jahr) und Lachgas (N₂O, 2,8 Gt CO₂e/Jahr). Beide Gase verfügen über ein deutlich größeres Treibhauspotential als CO₂; Methan ist etwa 21-mal, Lachgas sogar etwa 300-mal klimaschädlicher als CO₂. Pro Jahr gehen 2,1 Mrd. Tonnen CO₂e allein auf das Konto der Stickstoffdüngemittel.

Weltweit ist der Anteil der CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Landwirtschaft zwischen 1990 und 2005 um 17% gestiegen (IPCC 2007, 499). Hochrechnungen zufolge sollen sie bis 2030 um weitere 35 bis 60% steigen (ebd.). Die zunehmende Nutztierhaltung und der steigende Einsatz von synthetischen Stickstoffdüngern sind die Hauptursachen.

Methan entsteht vor allem in den Mägen von Wiederkäuern wie Rindern und Schafen sowie aus dem Nassreisanbau. Nach Foster et al. (2006) liegt das Treibhauspotential bei 17kg CO₂e pro Kilo britischem Rindfleisch und bei 13kg CO₂e pro Kilo Schaffleisch – die Zahlen können je nach Ausgangsbedingungen deutlich variieren. Schweine- und Geflügelfleisch verursacht etwa die Hälfte an Emissionen.

Lachgas wird vor allem bei der Düngung freigesetzt. Dabei ist die globale Verteilung des Düngemittleinsatzes höchst unterschiedlich (Smith et al. 2008, 17). In den westlichen Industrieländern geht der Düngemittleinsatz aufgrund gesetzlicher Beschränkungen teilweise sogar zurück. Besonders in asiatischen Ländern, allen voran Indien und China, wird dagegen sehr stark gedüngt (40% der globalen mineralischen Dünger). Einen extrem geringen Dün-

gemittleinsatz zeigt dagegen Afrika (2% der globalen mineralischen Dünger). Es gibt Berechnungen die bereits der energieintensiven Herstellung von Düngemitteln einen Anteil von 1,2% an den globalen THG zuschreiben (Woods/Cowie 2004 und Smith et al. 2008). Allerdings variiert der Energieeinsatz stark nach Düngerart und oft sind veraltete, wenig energieeffiziente Anlagen im Spiel. Der Einsatz von Düngemitteln geht dann mit Energieverbrauch der verwendeten Maschinen einher. Die Lachgasemissionen entstehen im Wesentlichen durch Freisetzung auf dem Feld (Eickhout et al. 2006).

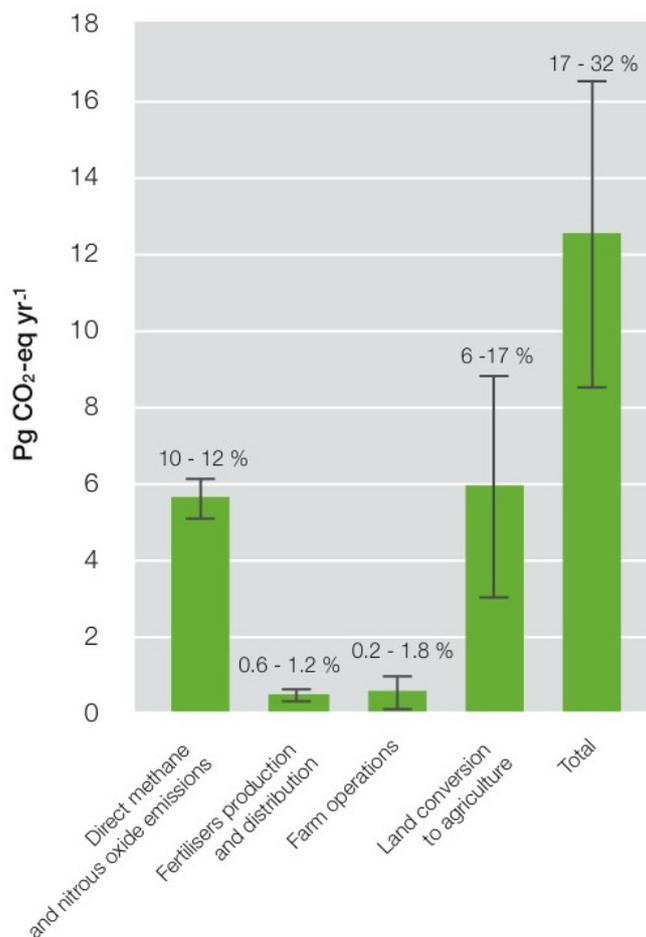


Abbildung 5: Gesamter Beitrag der Landwirtschaft zu Treibhausgasemissionen, inkl. Emissionen aus der Landnutzungsänderung. Die Gesamtemissionen schließen direkte (Methan und Lachgas durch landwirtschaftliche Arbeiten) und indirekte (CO₂ durch den Verbrauch von fossiler Energie und Landnutzungsänderung) Treibhausgase ein. Die Prozentangaben sind relativ zu den globalen THG-Emissionen (Smith et al. 2008, 5).

Infolge wachsenden Lebensstandards vor allem in den Schwellenländern ist mit einem deutlichen Anstieg der Nachfrage nach Agrarprodukten, dies gilt insbesondere für den Fleischkonsum, und damit mit einem Anstieg der THG-Emissionen zu rechnen. Schätzungsweise werden bis zum Jahr 2100 doppelt so viele landwirtschaftliche Nutztiere und eine doppelt so große Fläche für den Reisanbau nötig sein, um die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren.

Das Kapitel "Land" des IPCC beginnt mit dem Hinweis, dass agrarisch genutzte Flächen ca. 40 bis 50% der globalen Landmasse bedecken: "Agricultural lands (lands used for agricultural production, consisting of cropland, managed grassland and permanent crops including agro-forestry and bioenergy crops) occupy about 40-50% of the Earth's land surface" (IPCC 2007, 499). Die Zahl verdeutlicht, dass es sich hier weniger um punktförmige Emissionsquellen handelt, sondern um sehr breit verteilte (diffuse) Emissionsflächen unterschiedlicher Art. Handlungsoptionen zur Reduktion von Treibhausgasen müssen folglich vor allem in der Fläche ansetzen und sind somit vor allem auf Landnutzungstechnologien beschränkt.

Verglichen mit den technologischen Potentialen in den Bereichen Energie, Gebäude und industrielle Prozesse sind die Einsatzmöglichkeiten für „echte“ Technologien im Bereich Landwirtschaft eher gering. Dessen ungeachtet finden sich relevant erscheinende Ansatzpunkte, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Optimierte Bewirtschaftungsstrategien

Eine optimierte Landbewirtschaftung lässt viel Spielraum, den Humus- und Kohlenstoffgehalt zu erhöhen, weil auf intensiv genutzten Anbauflächen niedrige Kohlenstoffkonzentrationen zu finden sind. Dies bietet im Bereich der Landwirtschaft das größte Potential zur Schadensminderung.

Nacktbrachflächen und unbepflanzte Böden sind anfällig für Erosion und das Auslaugen von Nährstoffen. Sie enthalten weniger Humus als ein Acker mit durchgängigem Pflanzenbewuchs (Smith et al. 2008), d.h. ein erhöhter Humusanteil geht mit einer höheren CO₂-Speicherfähigkeit einher. Infolgedessen sind wichtige Maßnahmen der **Zwischenfruchtanbau** (Vermeidung von offenen Flächen) und die **Schutzbepflanzung**, bei denen der Boden zwischen den Nutzpflanzen und während der Brache bedeckt wird, und die zur verminderten Applikation von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln beitragen können. **Fruchtfolgen** mit einem Anteil an Leguminosen (Hülsenfrüchte, die Stickstoff aus der Luft binden und im Boden speichern können) verringert die Abhängigkeit von energieintensiv erzeugten Düngemitteln. Darüber hinaus sollte der Dünger zum **richtigen Zeitpunkt** (z.B. Düngung im Herbst), nicht bei feuchtwarmer Witterung und auch **gezielter ausgebracht** werden. Relevant sind demnach Technologien, die eine Verringerung bzw. Optimierung des Düngemiteleinsatzes nach sich ziehen. Eine wesentliche technische Komponente dafür ist „**Precision Farming**“ (vgl. Kapitel 5.3.2). Unter dem Sammelbegriff „Precision Farming“ werden alle neuen Produktions- und Managementtechniken im Pflanzenbau zusammengefasst. Mit diesen verfügbaren Techniken wie **Sensoren**, **Bordcomputern** und **elektronisch gesteuerten Universaldüngergestreuern** kann eine teilflächenspezifische, standortangepasste Bewirtschaftung durchgeführt werden. Darüber hinaus kann die Optimierung durch den **Einsatz standortangepasster gentechnisch veränderter Pflanzen** (Lebensmittel) angesprochen werden. Es ist durchaus vorstellbar für bestimmte Anwendungen Pflanzen zu entwickeln, die niedrigere Emissionen bei höheren Ernten mit sich bringen (Stern 2006, 358).

Zu einer weiteren Zunahme des Humusanteils in der Ackerkrume, ergo einer erhöhten Kohlenstoff-Anreicherung, kann eine **pfluglose Bewirtschaftung** führen. Bei der Verringerung des Pflügens ist allerdings zu beachten, dass die positive Auswirkung auf die Humusbildung

durch eine weitergeführte industrielle Landwirtschaft (Monokulturanbau, „falsche“ Fruchtfolgen) wieder aufgehoben werden kann. Es ist ein folglich ein Standortabgestimmtes Zusammenspiel einer pfluglosen und „ökologischen“ Bewirtschaftung für eine spürbare Reduktion der THG-Emissionen von entscheidender Bedeutung.

Ein weiterer signifikanter Einflussfaktor ist ein nachhaltiges **Feuermanagement** von Grasland. Dies erfolgt sehr simpel durch die Erneuerung des Grasbestandes. Die Feuer selbst emittieren THG genauso wie reaktive Kohlenwasserstoffe und Stickstoffe. Der Effekt der Feuer kann aber sowohl positiver als auch negativer Natur sein, das hängt vom Auftreten als spontane Feuer oder Feuer als Zweck zur „Vernichtung“ von holzhaltiger Biomasse ab. Infolgedessen kann die Mitigation zum einen a) die **Reduktion der Feuerfrequenzen oder der flächenhaften Ausdehnung der Feuer** hin zu einer effektiven **nachhaltigen Feuervermeidung** beinhalten und zum anderen b) die Reduzierung des Verbrauchs als Heizmaterial nach sich ziehen. Darüber hinaus sollten die „Verfeuerungen“ zu einer Zeit des Jahres durchgeführt werden, in der weniger CH₄ und N₂O emittiert werden (Smith et al. 2008, 33).

Darüber hinaus spielt die Bewirtschaftung von Weideflächen eine große Rolle (Minderungspotential von bis zu 1,35 Gt CO₂e/Jahr) (Smith et al. 2008). Gegenwärtig kann bereits mit einer simplen „no-tech“-Strategie viel erreicht werden, der **Verringerung der Beweidungsintensität**. Die Veränderung der Beweidungsintensität führt in der Folge zu einer höheren Baum- und Strauchbedeckung, welche eine CO₂-Senke sowohl im Boden als auch im Pflanzenbewuchs mit sich bringt.

Daneben können Maßnahmen, die der Wiederherstellung von humusreichen Böden dienen, die THG-Emissionen in signifikantem Ausmaß senken. Hierzu gehören die **Vermeidung der Entwässerung von Feuchtgebieten, Maßnahmen gegen Bodenerosion** (detailliert in Kapitel 5.3.4 behandelt), die **Wiederherstellung von Böden**, die für den landwirtschaftlichen Anbau entwässert wurden und die **Düngung mit organischer Masse**.

Verbessertes Wasser- und Reismanagement

Herkömmlicher Reisanbau belastet das Klima ähnlich stark wie das Verbrennen fossiler Brennstoffe. Keine Kulturpflanze sondert so viel Methan ab wie Reis, sagt Reiner Wassmann vom Internationalen Reiserforschungsinstitut auf den Philippinen (Netzzeitung 2007). Beim Reisanbau ergeben sich CH₄-Einsparungspotentiale in Höhe von ~0,3 Gt CO₂e/Jahr durch verbessertes Wassermanagement.

Eine Änderung der Anbaumethoden ist aber besonders in den Entwicklungsländern schwierig. Eine **Verkleinerung der Anbauflächen**, eine vorübergehende Trockenlegung (**periodische Bewässerung**) oder einen **Umzug in höhere Lagen**, wo weniger bewässert werden muss, lehnen die Mehrheit der Länder ab. Dies liegt mehrheitlich an der Tatsache, dass „man nicht über die Entschärfung beim Klima nachdenken kann, wenn man seine Familie ernähren muss“ (Netzzeitung 2007). In Entwicklungsländern kann daher eine Reduzierung der THG-Emissionen nur mit einer Verringerung der Armut einhergehen; **finanzielle Anreize** vor allem für Kleinbauern sind unablässig.

Thailand, weltgrößter Reis-Exporteur, zeigt sich z.B. um Verbesserungen bemüht. Zusätzlich zu veränderten Anbausystemen werden in Thailand, die beim Reisanbau übrig bleibenden

Spelzen verbrannt und daraus Energie gewonnen anstatt sie auf den Feldern verrotten zu lassen. In Madagaskar wurde ein System zur Verstärkung des Reisanbaus entwickelt, um den Farmern einen gesteigerten Reisertrag ohne zusätzlichen Input zu ermöglichen. Im Zuge dieses neuen Kultivierungssystems werden die Reispflanzen mit großem Abstand ohne Überflutung angepflanzt und nur mit organischen Hilfsmitteln gedüngt (Stoop/Kassam 2006).

Auch allgemein kann ein nachhaltiges Wassermanagement zur Reduzierung von Emissionen aus der Landwirtschaft beitragen. Die Effektivität der Bewässerung wird von der Energie abhängen, die zum einen für die Versorgung mit Wasser erforderlich ist und zum anderen mit seiner Verfügbarkeit einhergeht (Smith et al. 2008). Obendrein sind Böden mit höheren Wassergehalten auch größere Quellen von Stickstoffoxiden. Lösungen können **„precision irrigation“-Systeme** (standortangepasste (sensorgesteuerte) Bewässerung), der **Einsatz von Pflanzen mit höherer Wassernutzungseffizienz** und die **Gestaltung von Fruchtfolgen** sein. Z.B. können bewässerungsintensive Arten wie Mais durch andere **lokaladaptierte Arten**, die weniger Wasser bei gleichem Ernteertrag benötigen, ersetzt werden.

Bereits auf dem Markt verfügbar sind ebenfalls verschiedene **Bodenhilfsstoffe**, die die Biomasseproduktion auf Böden mit geringer Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit ermöglichen bzw. verbessern und die Notwendigkeit zur Bewässerung verringern sollen, wie zum Beispiel Humentos®, HumiComplete® oder Geohumus® (www.geohumus.de). Z.B. kann ein Prozent des Granulats der Fa. Geohumus bewirken, dass der Boden fünfmal so viel Wasser speichern kann wie gewöhnlich. Grundlage für diese Superabsorber sind Kunststoffe mit hoher Saugfähigkeit, die originär bei Babywindel eingesetzt wurden. In der Kombination verschiedener Bodenhilfsstoffe kann eine Chance bestehen, die Produktivität von Energiepflanzen und nachwachsenden Rohstoffe zu sichern, die Degradation brachfallender Grenzertragsstandorte zu vermeiden und „grüne Wüsten“ zu erschaffen.

Landnutzungsänderungen

Änderungen in der Landnutzung sind der älteste globale Einflussfaktor der Menschheit (Kates and Parris 2003). Die Rate der Landnutzungsänderungen hat dramatisch zugenommen, und seit 1945 wurde mehr Land in Ackerfläche umgewandelt als in den zwei Jahrhunderten davor (Cerri et al. 2007). Jede Umwandlung von Land in Ackerfläche bewirkt, dass Kohlendioxid freigesetzt wird. Die Emissionen durch veränderte Landnutzung betragen schätzungsweise 2,9 bis 5,9 Mrd. t CO₂-Äquivalente im Jahr.

Ackerland hat verglichen mit jeder anderen Landnutzung die geringste Konzentration von Kohlenstoff (abgesehen von Wüsten und Halbwüsten). Deswegen ist jede Wiederherstellung/Umkehr von Ackerland zu einer anderen Landbedeckung, typischerweise ähnlich zu der ursprünglichen natürlichen Vegetation, die effektivste Methode, um die THG-Emissionen zu verringern und die Anzahl an Kohlenstoff-Senken zu erhöhen.

Durch **Umwandlung von Ackerflächen in Grasland, Agroforstsysteme** („Agroforestry“) und **Flächenstilllegungen** lassen sich geringe, aber dennoch deutliche Emissionsminderungen erzielen. Agroforestry beschreibt ein Produktionssystem, das Elemente der Landwirtschaft mit denen der Forstwirtschaft kombiniert. Sowohl einjährige landwirtschaftliche Nutzpflanzen als auch mehrjährige Hölzer (zur Verwendung als Nutzholz, Palmen und Fruchtbäume) werden auf derselben Fläche angebaut; dies schließt Windschutzpflanzungen und

Uferstreifen/Pufferzonen mit Gehölzen ein. Agroforstwirtschaftliche Systeme erfüllen mehrere ökologische Chancen gleichzeitig, sie sind artenreich, stabilisieren den Wasserhaushalt und schützen den Boden vor Erosion. Auch in Europa hat sich ein Forschungsprogramm der EU in den letzten Jahren mit der Möglichkeit der Kombination einjähriger Ackerkulturen und Baumkulturen mit sehr langen Umtriebszeiten beschäftigt. Erfolgreich kommt inzwischen das kombinierte Agroforstsystem beim integrierenden Anbau von Stickstoff und Kohlenstoff bindenden Gehölzpflanzen und Ackerpflanzen zum Einsatz. Teilweise werden dabei die Bäume in Reihen gepflanzt und in die Zwischenräume beim so genannten „**alley cropping**“ die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Bei der Umwandlung von Flächen wird es aber aufgrund der zurzeit starken Prominenz von nachwachsenden Rohstoffen zu Konkurrenzen kommen. Diese führt zu der Frage, ob nachhaltige Landnutzungsänderungen wie Agroforestry künftig überhaupt „fair“ in Betracht gezogen werden und wenn ja, in welchem Ausmaß.

Düngemittelherstellung

Eine Steigerung der Effizienz bei der Herstellung von Düngemitteln lässt sich durch eine **höhere Energieeffizienz in der Ammoniakproduktion, die Einführung neuer Technologien zur Distickstoffmonoxidreduzierung** (N_2O) und durch andere allgemeine Energiesparmaßnahmen in der Herstellung erzielen, denn bei der Produktion der Grundchemikalien wie Salpetersäure wird Lachgas als Nebenprodukt freigesetzt (siehe Abschnitt 2.3.5). Bei der im Produktionsprozess notwendigen Ammoniakverbrennung entweichen pro Jahr aus den Anlagen rund 1,2 Mio. Tonnen N_2O . Die Fa. Heraeus hat mit der Einwicklung eines **neuartigen Katalysatorsystems** (FCTplus-System) ein Produkt parat, mit dem sich diese Lachgas-Emissionen um bis zu 90% verringern lassen. Diese Katalysatortechnik wurde Anfang 2007 erstmals in einer südafrikanischen Firma (SASOL Nitro) in zwei Anlagen eingesetzt (InnoRep 2007).

⇒ Zusammenfassend kann für den Sektor der Landwirtschaft geschlossen werden, dass es insgesamt um ein optimiertes Anbaumanagement in der Landwirtschaft geht. Dabei müssen lokale Gegebenheiten und Anbaubedingungen berücksichtigt werden: „Es gibt keine universell anwendbare Liste von Emissionsminderungsmaßnahmen; Maßnahmen müssen für die einzelnen landwirtschaftlichen Systeme und Gegebenheiten bewertet werden“ (IPCC 2007, 55). Grundsätzlich ist der CO_2 -Haushalt landwirtschaftlicher Nutzflächen nicht vollständig verstanden, es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf (Stern 2006, 358).

Viehzucht

Auch durch ein verbessertes Vieh- und Mistmanagement können CO_2 -Minderungen bis 0,25 Gt CO_2 realisiert werden (Smith et al. 2008). Treibende Kräfte für die beschriebenen Veränderungen der Landnutzung sind vor allem wirtschaftliche und gesetzgeberische Faktoren.

In der Viehzucht gibt es in verschiedenen Ländern Versuche, den Methanausstoß zu reduzieren. Unter anderem soll die Methanbildung über **spezielle Tabletten**, einer Spezialdiät und **veränderte Fütterungszeiten** gebremst werden. Da die Ernährung deutlichen Einfluss auf den Methangas-Ausstoß hat, sollen den Tieren z.B. unter anderem zuckerhaltigere Grassorten und auch mehr tanninhaltigen Hornklee zum Fressen gegeben werden. Noch gesünder ernähren könnte man Kühe, wenn man ihren Speisezettel durch **angekeimtes Getreide oder Extrakte** daraus ergänzen würde, da Keimlinge Stoffe enthalten, die die Me-

thanbildung reduzieren können. Weitere Einflussmöglichkeiten können mehr **Fette im Tierfutter** und eine **gleichmäßigere Fütterung** über den ganzen Tag verteilt darstellen. Die gleichmäßigere Fütterung verbessert durch das kontinuierliche Kauen und Verdauen den körpereigenen Stoffwechsel der Tiere.

Agrarwissenschaftler der Universität Hohenheim beschäftigen sich mit der Reduzierung der Methanbildung von Kühen durch den Einsatz von Tierarzneimitteln. Verabreicht wird ein so genannter **Bolus**. Er hat die Größe eines kleinen Seifenstückes und bleibt längere Zeit (bis zu mehreren Monaten) im Vormagen, bevor er selbst verdaut wird. Seine pflanzlichen Inhaltsstoffe beeinflussen die Fauna im Vormagen so, dass weniger Methan freigesetzt wird. Die Forscher rechnen allein durch den Bolus mit einer Methanreduktion um 15% (heise 2007).

Auch die Wahl von bestimmten Haltungsverfahren der Tiere ist klimawirksam. Unterschiedliche **Tierhaltungsverfahren** bedingen einen mannigfachen Umgang mit dem anfallenden Mist und der Gülle. Dies wiederum bedingt divergente Emissionspotentiale. Festmist oder Gülle, niedrige oder hohe Einstreuungen, die Art der Ställe, Stallhaltung oder Weidehaltung, die Art der Lagerung und die Art der Ausbringung von Festmist oder Gülle; all diese Faktoren haben einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Emissionen. Zum Beispiel verursacht eine Freilandhaltung (Weidehaltung) im Vergleich zur Stallhaltung die geringsten Emissionen. Die positiven Auswirkungen der Tierhaltung kann durch eine **geringere Viehbestandsdichte**, eine **reduzierte zusätzliche Stickstoffausbringung** und durch die **Vermeidung von bodenverdichtenden Maßnahmen** (weitere Ausführungen im Kapitel 5.3.5) potenziert werden. Zusätzlich können **bauliche Maßnahmen** in der konventionellen Masttierhaltung z.B. in der Geflügelproduktion, wie beispielsweise der Einbau einer In-Situ-Einstreubelüftung (Trampolin-System), die Ammoniakemissionen mindern.

Die Zerstörung großer Waldflächen verursacht seit Beginn der Industrialisierung durch die Emission von Treibhausgasen einen zusätzlichen Treibhauseffekt. Wälder sind Speicher für Kohlendioxid (CO₂-Senken), Methan und Lachgas und spielen in der globalen Bilanz eine gewichtige Rolle. Zwischen 20 und 30% der zusätzlichen CO₂-Belastung der Atmosphäre stammen aus großflächiger Waldzerstörung, hauptsächlich in den Tropen und Subtropen, aber auch im borealen Nadelwald. Tropische Regenwälder werden in großem Umfang gerodet: Jährlich etwa 15-20 Mio. ha, dadurch werden rund 1,6±1,0 Gt Kohlenstoff pro Jahr freigesetzt, doch auch die Holzeinschläge in den Wäldern Kanadas und Sibiriens (boreale Wälder) sind mit 2 bis 5 Mio. ha/Jahr nicht zu vernachlässigen.

Der Wald und seine Bewirtschaftung beeinflussen also die Belastung der Atmosphäre. Besonders bei Kahlschlägen und Brandrodung entweichen dabei nicht nur der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff (C), sondern auch die klimawirksamen Gase aus Humus und Böden.

Durch den Verlust natürlicher Wälder in der ganzen Welt entstehen jährlich mehr globalen Treibhausgas-Emissionen als durch den Verkehrssektor. In einigen Gegenden, z.B. in Brasilien ist die Umnutzung bzw. die Rodung von Wäldern eine größere Emissionsquelle von THG als fossile Brennstoffe. Brasilien alleine trug 1990 mit 5% zu den globalen Gesamtemissionen von Treibhausgasen durch Rodungen/Entwaldungen bei.

Nirgendwo schreitet die Regenwaldzerstörung so rasch voran wie in Indonesien – und nimmt damit erheblichen Einfluss auf die Veränderung des Weltklimas. Einer neuen WWF-Studie zufolge übertreffen die jährlichen Treibhausgasemissionen einer einzigen Provinz auf der indonesischen Insel Sumatra die der ganzen Niederlande – Tendenz steigend (scinexx 2008). Grund dafür sind vor allem die riesigen unterirdischen Kohlenstoffvorkommen in den Torfwäldern und Sümpfen Sumatras, die durch die Regenwaldvernichtung freigesetzt werden. Wie die Studie zeigt, wurden innerhalb der letzten 25 Jahre allein in einer Provinz rund 4,2 Mio. Hektar und somit 65% der ursprünglichen Wälder vernichtet. Die Lösung kann nur eine **nachhaltige Waldwirtschaft** sein (ebd.).

Im Bereich der Forstwirtschaft liegen die Handlungsoptionen generell weniger auf der technologischen als vielmehr auf der planerischen oder regulativen Seite. Umwelttechnologien wirken eher indirekt, indem z.B. höhere Erträge auf landwirtschaftlichen Flächen (s.o.) oder alternative Einkommensmöglichkeiten dem Druck in Richtung Entwaldung entgegen wirken. Das bedeutet, dass die oben dargestellten Lösungen aus dem Sektor Landwirtschaft positive „side-effects“ auf die Forstwirtschaft haben.

Nach dem IPCC Bericht umfassen Mitigationsoptionen durch den Sektor der Forstwirtschaft die **(Wieder-)Aufforstung**, eine **reduzierte Entwaldung**, eine generelle Regulierung von Holzprodukten und die Nutzung von Forstprodukten für Bioenergie als Ersatz für fossile Brennstoffe. Perspektivisch kann ebenso die **Weiterentwicklung von Baumarten zur Steigerung der Biomasseproduktivität** und Kohlenstoffspeicherung unerlässlich werden. **Verbesserte Fernerkundungstechnologien** zur Analyse des Potentials zur Kohlendioxidaufnahme durch Vegetation und Boden können die Kartierung von Landnutzungsänderungen präzisieren (IPCC 2007).

Prinzipiell ist es möglich, alle forstwirtschaftlichen Emissionsminderungsmaßnahmen so anzulegen, dass sie zu niedrigen Kosten die Emissionen beträchtlich reduzieren und die Aufnahme von CO₂ in Senken steigern. Darüber hinaus ist durchaus denkbar, Synergien mit Adaptationsmaßnahmen (siehe Abschnitt 2.3.8) und nachhaltiger Entwicklung zu erschaffen.

Für die Forstwirtschaft ist von großer Bedeutung, dass die Klimaforscher neben der weiteren Erwärmung auch eine Zunahme von extremen Wetterereignissen, wie Orkane, Hagelschläge, Starkregen und Dürreperioden erwarten. Bei allen Planungen im Bezug auf die angesprochenen Wetterereignisse ist aufgrund der langen Generationsdauer von Waldbäumen zu beachten, dass Anpassungen „für morgen“ schon heute durchgeführt werden müssen. Zudem ist zu beachten, dass eine standortgemäße Bewaldung entscheidend sein wird.

2.3.7 Abfall (Deponien)

Der Haushaltsmüll trägt mit etwa 3% der Gesamtemissionen, das sind nach dem Weltklimarat allein rund 347 Mio. t Methan (Abb. 6; FTD 2007), nur wenig zu den weltweiten THG-Emissionen bei, nichtsdestotrotz kann der Abfallsektor zu niedrigen Kosten sehr einfach zur THG-Minderung beitragen und somit nachhaltige Entwicklung fördern. Gerade bei Deponiegasen sind schnelle Klimaschutzenerfolge möglich, wie die Halbierung der Methanemissionen in Deutschland zwischen 1990 und 2004 zeigt (FTD 2007).

Die Abfallwirtschaft leistet durch die **schrittweise Einstellung der Deponierung unbehandelter organischer Abfallmengen**, eine **stark ausgeweitete energetische und stoffliche Verwertung von Siedlungsabfällen** und den **Ausbau der Deponiegaserfassung** einen erheblichen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Die Abnahme der deponierten Abfallmenge führte zu einer Verminderung der Methanemissionen aus Deponien. Initiierende regulative Grundlagen zur Verminderung der organischen Abfallmenge boten in Deutschland die Verpackungsverordnung (VerPackV; verstärktes Recycling von wiederverwertbaren Stoffen) und die Bioabfallverordnung (BioAbfV; Verwertung des Bioabfalls als Kompost) (UBA 2007b, 46). Im Nationalen Inventarbericht (NIR) werden dem Abfallbereich durch das Deponierungsverbot unbehandelter Abfälle Emissionsminderungen von 20 Mio. t CO₂-Äquivalenten für den Zeitraum von 1990 bis 2003 zugerechnet. Für die Jahre 2005 bis 2012 wird eine weitere Einsparung von 8,4 Mio. t CO₂e prognostiziert (Johnke/ Butz 2005).

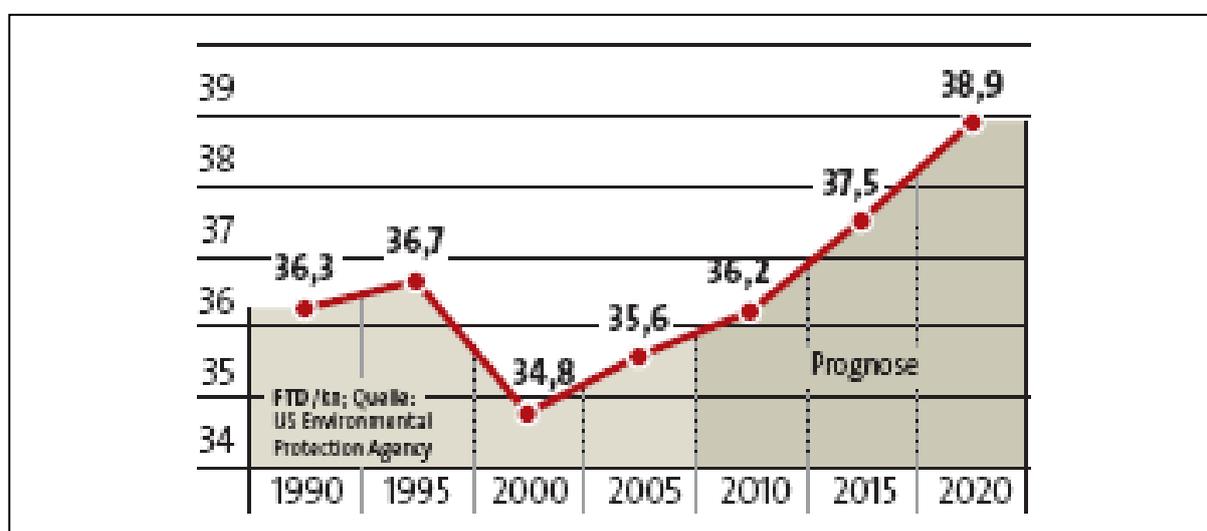


Abbildung 6: Methanemissionen aus Mülldeponien weltweit, in 1000 Tonnen (Quelle: FTD 2007).

Neben diesem direkten Beitrag der Abfallwirtschaft – Reduzierung der Methanemissionen – wurden zusätzlich durch die thermische Verwertung von Abfällen in Müllverbrennungs- und Feuerungsanlagen und durch die stoffliche Verwertung von Siedlungsabfällen THG indirekt vermieden. Zum Beispiel führt die Altpapierverwertung durch den Einsatz von Neufasern aus Industrieholz zu Energieeinsparungen. Dasselbe gilt für sortiertes und aufbereitetes Altglas, mit dem Rohstoffe für die Primärglaserstellung und die damit für die Rohstoffgewinnung erforderlichen Energiemengen ersetzt werden. Die „Gutschrift“ durch die indirekte Einsparung für die bereitgestellte Energie aus der stofflichen und energetischen Verwertung werden statistisch aber den Sektoren Industrie und Energieerzeugung und nicht dem Abfallsektor zugeordnet.

In den europäischen Staaten ist die Abfallentsorgung sehr unterschiedlich strukturiert. In einigen Staaten wird noch ein hoher Anteil der Abfälle ohne Vorbehandlung deponiert. Die **Beendigung der Deponierung** und die damit einhergehende Verringerung der Methanemissionen ist der wesentliche Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz. Somit ist in der EU noch ein erhebliches Minderungspotential vorhanden.

Da Methaneinsparungspotentiale auch durch den Ausbau der Deponiegaserfassung entstehen, können Deponiegasprojekte große Mengen an Zertifikaten generieren mit verhältnismäßig geringen Investitionskosten. Gegenwärtig können die Schwachgase (< 25% Methan) aus Deponien noch nicht beseitigt werden, weil es an einfachen, anlagentechnisch sicheren und wirtschaftlich tragbaren Technologien mangelt. Stand der Technik sind einfache Fackelanlagen, wie beispielsweise **Niedertemperaturfackeln ohne definierten Brennraum** oder **Hochtemperaturfackeln mit kontinuierlicher Stützfeuerung, Wirbelschichtfeuerungen oder RTO-Anlagen** (Regenerativ Thermische Oxidation). Zudem werden passive Biofiltersysteme, in Form von **Deponiegasfenstern**, in die Deponieoberfläche eingebaut oder **aktive Biofilteranlagen** in Containerbauweise zum Einsatz gebracht und bisweilen auch **Gas-Ottomotoren** zur Umwandlung des Methans in Energie betrieben. Bislang konnte sich aber keines der genannten Systeme als die „perfekte Lösung“ bei der Deponiegasbehandlung durchsetzen (Eschey und Haubrichs 2007, 4). Deswegen untersucht beispielsweise das Projekt „Methakat“ Möglichkeiten, den Methanausstoß aus Deponien und Kohlegruben durch einen langzeitstabilen **Katalysatoreinsatz, basierend auf keramischen Werkstoffen**, zu vermindern (klimazwei 2007). Studien im Rahmen dieses Projekts belegen, dass beim Einsatz von hochtemperaturstabilen sowie versinterungs- und vergiftungsresistenten Katalysatoren eine rückstandsfreie Verbrennung von Schwachgasen möglich ist. Perspektivisch sollen die entwickelten Katalysatoreinsätze in bereits vorhandene Fackelanlagen integrierbar sein. Mit der im Projekt entwickelten Technik könnten in Deutschland ab 2010 ca. 0,8 Mio. t CO₂e und längerfristig ca. 2,4 Mio. t CO₂e vermieden werden. Durch Technikexport kann die Wirkung vervielfältigt werden (klimazwei 2007).

Ein neueres Verfahren stellt auch der **Kohlenwasserstoff-Converter (CHC)** der LAMBDA GmbH dar. Bei diesem Verfahren wird ein Oberflächenbrenner auf Basis eines Metallgewebes in Verbindung mit einer Brenngasvormischung eingesetzt (Eschey und Haubrichs 2007, 8). Der grundlegende Unterschied zu herkömmlichen Hochtemperaturfackeln liegt in der nahezu vollständigen Verbrennung der im Gas enthaltenen Kohlenwasserstoffe.

Insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern ist eine zu Deutschland vergleichbare Abfallsortierung nicht festzustellen; es unterscheidet sich desgleichen das Abfallaufkommen. Insbesondere in den so genannten „Megacities“ fallen enorme Abfallmengen an, deren mehrstufige Entsorgung vielfach noch in den Anfängen steckt. Durch die rasante wirtschaftliche Entwicklung wie beispielsweise in China und Indien wird zukünftig mit noch größeren Abfallmengen zu rechnen sein. Auch die Deponien entsprechen noch nicht einem umwelt- und klimaschonenden Aufbau, wie er im Kapitel 7 „Abfallwirtschaft“ beschrieben ist. Ebenso wenig werden gegenwärtig entstehende Deponiegase weder erfasst noch zur Energieerzeugung genutzt. So konnte z.B. im Rahmen des „Megacity“-Projektes⁴ beobachtet werden, dass die Deponie in Rio de Janeiro das Methan lediglich bzw. je nach Betrachtungsweise, immerhin mit einer **Notfackel** abfackelt und damit zwar die Klimawirksamkeit reduziert, eine energetische Nutzung derzeit aber noch nicht angedacht ist.

Generell erweist sich in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern eine Gasfassung und -behandlung als zu kostspielig, der Mangel an lokalem Kapital stellt das Haupthemmnis für die Abfallwirtschaft in diesen Ländern dar. Deswegen kommt als Alternative für Ent-

wicklungs- und Schwellenländer, aber auch für Deutschland, der Einsatz einer so genannten **biologischen Methanoxidation** in Frage. Mit Hilfe von **Methanoxidationsschichten** soll durch mikrobiellen Methanumsatz eine Freisetzung von Methan weitestgehend verhindert werden. Im Rahmen eines Pilotprojektes der Technischen Universität Braunschweig in Novo Hamburgo, Brasilien, wurde 2004 eine mechanisch-biologische Recycling-Restabfallbehandlungsanlage errichtet und seitdem schwerpunktmäßig die Eignung von MBA(Mechanisch-Biologisches-Abfall)-Material als Methanoxidationsschicht in humiden Klimaten untersucht (LWI 2004). Aktuell gibt es im Rahmen der klimazwei-Initiative ein vom BMBF-gefördertes Projekt „MiMethox“, dessen Ziel es ist, ein Instrument zur nachhaltigen Verringerung von Methanemissionen durch mikrobielle Methanoxidation in Deponieabdeckschichten zu entwickeln (FTD 2007). Enormes Potential bescheinigt Kai Münnich, Experte für Abfallwirtschaft am Leichtweiß-Institut an der Braunschweiger Universität, den Methan fressenden Bakterien in den Schwellen- und Entwicklungsländern (ebd.).

2.3.8 Adaptation – Technologien zum Schutz vor Klimawirkungen

„Anpassung (Adaptation) bedeutet im Wesentlichen das Management der Klimafolgen für Mensch und Umwelt, für Wohlstand und Lebensqualität, für wirtschaftliche und soziale Entwicklung“ (BMBF 2006, 10).

Technologien zur Bewältigung der Folgen des Klimawandels können in sehr unterschiedlichen Bereichen und Regionen ansetzen. Das liegt auch daran, dass sich eine Erhöhung der globalen Temperatur in verschiedenen Regionen der Erde sehr differenziert auswirken wird. In nördlichen Regionen wie z.B. Kanada, Russland wird ein milderes Klima die Lebensbedingungen erleichtern, aber das Abtauen des Grönlandschildes beschleunigen. Trockene Sommer (Kühlwassermangel für Industrie und Energiewirtschaft, Niedrigwasserstände der Flüsse) und niederschlagsreiche Winter sowie eine Zunahme an Winterstürmen kennzeichnen hingegen die Prognosen für Mitteleuropa. Eine Verstärkung der Extremwettersituationen (lange Dürreperioden mit Erhöhung der Brandgefahr, Starkniederschläge mit Überschwemmungen) werden für Südeuropa und in stärkerem Maße für die jetzt schon heißen Regionen Asiens und Afrikas (Ausweitung der Wüstengebiete, erheblicher Süßwassermangel) vorausgesagt. Durch Erwärmung des Meerwassers erweitert sich die Zone für die Entstehung von Wirbelstürmen, deren Intensität und Stärke wahrscheinlich zunehmen wird. Durch Ansteigen des Meeresspiegels drohen die Überflutung von Inselstaaten und dicht bevölkerten Landstrichen sowie der Verlust fruchtbarer Böden. Im 4. Bericht des IPCC und zahlreichen anderen Veröffentlichungen werden die bereits spürbaren sowie wahrscheinlichen Folgen der Klimaveränderungen auf verschiedene Systeme und auch die politische Stabilität analysiert, beschrieben und weltweit diskutiert (WBGU 2007).

⁴ Detaillierte Informationen unter <http://www.itas.fzk.de/deu/projekt/lehn0427m.htm>

Grundlegend für den Komplex „Anpassung“ ist das Wissen

- um sensible Bereiche und deren Vulnerabilität (**Risikokarten**),
- über klimatische Veränderungen, ihren Umfang und in welchem Zeitraum sie auf die einzelne Region zukommen (**Prognosen, Szenarien, Modelle, Simulationen**),
- über präventive Maßnahmen, Schutzmöglichkeiten, Verhalten und Maßnahmen im Katastrophenfall (**Maßnahmenkataloge**, Sammlungen an Erfahrungen etc., jeweils an die örtliche Situation angepasst).

Auf Basis dieser verschiedenen Aspekte des Wissens sind Anpassungsstrategien direkt vor Ort zu entwickeln. Ein regelmäßiger Austausch von Erfahrungen und Information über technische Entwicklungen ermöglicht eine fortwährende Optimierung. Eine Zusammenstellung von Techniken, die für die Anpassung an Klimafolgen nutzbar, aber nicht hierfür entwickelt wurden, könnte das Blickfeld erweitern.

Anpassungsstrategien und die Weiter- oder Entwicklung geeigneter Technologien bauen idealerweise auf genauen, möglichst **räumlich** und **zeitlich eingrenzbaren Prognosen** der zu erwartenden Veränderungen, deren Intensität und Veränderungsgeschwindigkeit auf. Hierfür sollten **Klimamodelle** z.B. mit hydrologischen und „Boden“-Modellen gekoppelt werden, um genauere Voraussagen für mehrdimensionale Veränderungen zu erhalten. Insbesondere in biologischen Systemen ist auch die zeitliche Verzögerung der Reaktion auf Klimaveränderungen gefragt. Diesem Idealzustand können sich Modelle jedoch nur annähern, so dass die Ergebnisse kaum als Basis für Amortisationsrechnungen taugen werden. Entsprechend sind Finanzierungsmodelle zu entwickeln, die auch Maßnahmen gegen wahrscheinliche Gefahren abdecken. Ggf. ist es wichtig, das Wissen um Abschätzung von Risiken und auch in Finanzierungsfragen der **wettersensitiven Wirtschaftszweige** wie Versicherungen, speziell der Rückversicherungen, Flughäfen und Bauwirtschaft zu berücksichtigen. Deswegen ist beispielsweise ein Teilziel des vom BMBF-geförderten Projektes „Regio-ExAKT“, die für (Süd-)Deutschland bis 2030 zu erwartenden Trends im Auftreten von und der Bedrohung durch Extremwetterereignisse sowie die darauf aufbauende Entwicklung von Anpassungskonzepten für z.B. die Münchner Rück zu bestimmen. Ebenso ist die **Anpassung existierender Bauvorschriften** in Bezug auf Windlasten etc. an klimatische Trends wirtschaftlich relevant.

Noch große Unsicherheiten herrschen über die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Konsequenzen aus einem Versiegen des Golfstroms, der Instabilität des antarktischen Eisschildes und des Grönlandschildes, bzgl. der Methanfreisetzung beim Auftauen der Permafrostböden, dem Kollaps des Amazonas-Regenwaldes und der Monsumtransformation. In diesem Bereich ist die **interdisziplinäre Zusammenarbeit der Klimaforscher** bspw. mit Bodenwissenschaftlern und Meteorologen unabdingbar.

Maßnahmen können häufig erst dann greifen, wenn vor Ort eine ausreichende Kenntnis der Zusammenhänge und Akzeptanz vorhanden ist. Darüber hinaus ist in vielen Fällen die Strategie der kleinen Schritte sinnvoll, da der nächste Schritt an Veränderungen anpassbar ist. Allerdings sollten nach Möglichkeit, Gesamtstrategien die Grundlage sein, d.h. die Maßnahmen müssten aufeinander aufbauen, so dass anknüpfende Maßnahmen möglichst nicht verbaut werden.

Eine Sammlung von bisher durchgeführten Maßnahmen, auch jener, die nicht unter dem Aspekt des Klimaschutzes geplant wurden, aber hierfür nutzbar sind, würde Ideen anstoßen und grenzüberschreitende Strategien ermöglichen. Überprüfungen der Maßnahmen sowie eine Maßnahmenfolgeabschätzung könnten das Informationssystem Schritt für Schritt zu einem weitgehend abgesicherten Handlungskatalog werden lassen. Nachstehend werden einige ausgewählte, beispielhafte Adaptationsstrategien skizziert (in diese Darstellung fließen vor allem die zahlreichen Projekte der klimazwei-Initiative des BMBF mit ein, nähere Informationen zu den vorgestellten und weiteren Projekten sind unter www.klimazwei.de zu finden). Es handelt sich bei den folgenden Nennungen von Projekten allein um eine rein persönliche, nicht wertende Auswahl der Autoren, diese Auswahl gibt keinen Hinweis auf die Bedeutsamkeit der Maßnahmen.

Land-/Forstwirtschaft

Auf regionaler Ebene zeichnen sich im Zuge des globalen Klimawandels bedeutsame Veränderungen ab. Für einige Regionen sind aufgrund der veränderten Temperaturen erhöhte Niederschlagsmengen zu erwarten, andere Regionen werden dagegen tendenziell trockener werden. Insgesamt ist mit einer Zunahme witterungsbedingter Extremereignisse zu rechnen. Da die Landwirtschaft besonders stark von den klimatischen Bedingungen abhängt und auf Klimaveränderungen sensitiv reagiert, besteht ein großer Bedarf an Strategien zur frühzeitigen Anpassung an längerfristige Klimatrends. Um langfristig geeignete Strategien und Maßnahmen für die Landwirtschaft unter Berücksichtigung regionaler und lokaler Gegebenheiten entwickeln zu können, bedarf es eines **Entscheidungsunterstützungssystems**, wie es das Projekt „LandCaRe 2020“ zur Verfügung stellen wird. Das Entscheidungsunterstützungssystem „**LandCaRe-DSS**“ (Decision Support System) kann an die unterschiedlichsten Regionen adaptiert werden und interaktive Szenarien mit wechselnden Nutzungsoptionen der Landwirtschaft erstellen. Mit Hilfe dieser Szenarien bspw. zu Wirkungen auf die Pflanzenproduktion und Schadensrisiken durch Extremereignisse, können Instrumentarien entwickelt werden, durch die hilfreiches Entscheidungswissen für Landwirte, Ministerien und die vorgeschalteten Wirtschaftsbereiche erzeugt werden kann. Ein verwandtes dynamisches Entscheidungshilfesystem wird für eine **nachhaltige Forstwirtschaft** im Rahmen des Projektes „**DSS-WuK**“ (Decision Support System Wald und Klimawandel) entwickelt, welches dem Waldbesitzer erlauben soll, seine Bewirtschaftungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der sich ändernden Umweltbedingungen anzupassen.

Angepasste Bewirtschaftung (z.B. veränderte Fruchtfolgen, neue/andere Techniken s. Mitigationsmaßnahmen im Abschnitt 2.3.6) und **Verfahren zur frühzeitigen züchterischen Anpassung von Nutzpflanzen** an die zu erwartenden klimatischen Veränderungen sind ein Teil der Strategien aus dem Feld der Landwirtschaft. Das Projekt „Weizen“ der klimazwei-Initiative zum Beispiel, konzentriert sich auf züchterische Maßnahmen in der Weizenproduktion. Das Ziel dieses Projektes ist es, das genetische Potential von Saatweizen zielorientiert zu verändern und nutzen zu können. Der Fokus liegt auf einer Blühzeitverkürzung bei Winterweizen, um der zunehmenden Frühsommertrockenheit erfolgreich begegnen zu können. Da der zu erwartende Klimawandel langfristig erhebliche Ertragseinbußen mit sich bringen kann, ist zur Stabilisierung der Erträge und damit der Nahrungsmittelproduktion und Futtermittelerzeugung die Entwicklung neuer Sorten entscheidend. Hierbei sind auch eine **Erhöhung der Stresstoleranz der Nutzpflanzen** gegenüber Phasen der Wasserknappheit und

Starkniederschlägen sowie eine gesteigerte Resistenz gegen Schädlinge bei gleichbleibendem Ertragsreichtum wichtig. Möglicherweise muss an eine **Einfuhr geeigneter Pflanzen** gedacht werden.

Im Bereich der Land- und Forstwirtschaft müssen auch die Beobachtung der Schädlings- und Krankheitsausbreitung, die hieraus resultierenden notwendigen Schutzmaßnahmen und die „side-effects“ einwandernder Arten auf die einheimischen Arten angesprochen werden. Durch die veränderten klimatischen Bedingungen wird es desgleichen zu Tierwanderungen kommen; es sind **Biotopenverbände** ohne land- und/oder forstwirtschaftliche Barrieren, so genannte Korridore, zu schaffen.

Ein bisher nicht berücksichtigter Bereich ist der Obstanbau. Im Gegensatz zum Pflanzenbau, in welchem bspw. aufgrund der kurzen Vegetationsphasen Strategien schnell greifen können, sind bei der Anlage und Umgestaltung von Obstplantagen längerfristige Perspektiven zu bedenken. In Deutschland beträgt die Nutzungsdauer von Obstbauanlagen 12 bis 25 Jahre, so dass die Sortenwahl sorgfältig und vorzeitig zu treffen ist. Den Sektor Obstanbau und Klimawandel untersucht das klimazwei-Projekt „KliO“.

Da zukünftig landwirtschaftliche Standorte verstärkt trockenheitsgefährdet sein werden, sind Verfahren für einen verbesserten Wasserhaushalt zu entwickeln und neue **Bewässerungsstrategien und -technologien** zu entwickeln, hier ist beispielsweise die Speicherung von Starkniederschlägen zu nennen. Das BMBF-geförderte Verbundvorhaben „BatroS“ hat sich zum Ziel gesetzt, ein **Verfahren zur Verbesserung der Wasserhaltekapazität** für trockenheitsgefährdete Sandbodenstandorte zu entwickeln und wissenschaftlich auf seine Nachhaltigkeit hin zu untersuchen.

Durch eine Zunahme an Stürmen sind auch Waldränder und Nadelholzmonokulturen besonders gefährdet. Dies erfordert eine schnelle Anpassung der Forstwirtschaft an die veränderten Bedingungen, vor allem „da die Auswirkungen des Klimawandels in Deutschlands Ökosystemen nicht mehr zu übersehen sind“ (UFZ 2007). Auch die Änderungen der chemischen Zusammensetzung der Luft wie der CO₂-Anstieg in der Atmosphäre, der Stickstoffeintrag in die Ökosysteme und die O₃(Ozon)-Belastung werden Einfluss auf die langlebigen forstgebundenen Waldökosysteme haben. Um auf zukünftige Folgen der Klimaänderungen z.B. vermehrte Stürme in Trockenperioden in der nachhaltigen Waldwirtschaft „vorbereitet“ zu sein, ist die **Baumarten- und Strukturvielfalt zu erhöhen bzw. zu verändern** (z.B. Umwandlung von Fichten- in laubholzbetonte Mischwälder), die **Vorratshaltung zu senken** (weniger Sturmschäden durch verstärkte Verjüngungstätigkeit und die Reduzierung von destabilisierenden Durchforstungen), das **Prinzip der „minimalen Pflege“** anzuwenden und zum anderen ein wirksames **Controlling waldbaulicher Maßnahmen** aufzubauen. Weiterer Aspekt ist die **Weiterentwicklung von Baumarten** zur Steigerung der Biomasseproduktivität und Kohlenstoffspeicherung.

Extremwetter/Gesundheit

Aufgrund des durch den Klimawandel verursachten Anstiegs der Häufigkeit und Intensität von Unwetterereignissen, stellt sich die Frage, mit welchen Maßnahmen die menschliche Gesundheit vor derartigen Gefahren und Schäden in effektiver Weise geschützt werden kann. Im Rahmen des Projektes „SAFE“ wird zum Beispiel ein **Sensor-Aktor-gestütztes**

Frühwarnsystem zur Gefahrenabwehr bei Extremwetter realisiert. Durch die Vernetzung neu zu entwickelnder, spezialisierter Unwettersensoren mit bereits bestehenden Wetterstationen sollen die zur Zeit noch existierenden großen Lücken bei der genauen Erfassung von lokalen Wetterdaten durch ein dichteres Sensornetz geschlossen werden. Betroffene können daher bei drohenden Gefahren rechtzeitig informiert werden und auf diese Weise kurzfristig Schutzmaßnahmen ergreifen.

Im Bezug auf die Gesundheit wird auch in der Stadtplanung die zunehmende Bedeutung des **thermischen Komforts** für Menschen in der Stadt erkannt. An diesem Punkt setzt das Verbundvorhaben „KLIMES“ - Planerische Strategien und städtebauliche Konzepte zur Reduzierung von Auswirkungen von klimatischen Extremen auf Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in Städten“ an. Ziel des Vorhabens ist es, einen **human-biometeorologisch basierten Leitfaden** für die Stadtplanung zu entwickeln und zu erproben und damit die negativen Auswirkungen von großer Hitze im Sommer, auf Menschen in der Stadt gering zu halten. Bei der Stadtplanung und beim Gebäudedesign sind die veränderten Umweltbedingungen konsequent zu berücksichtigen und **Hitzewarnsysteme**, insbesondere für ältere und gesundheitlich geschwächte Menschen zu installieren. Es ist neben der Zunahme hitzebedingter Krankheiten und Todesfälle und der Abnahme der Arbeitsproduktivität bei extremer Hitze zu beachten, dass es zu einer **Zunahme von** (lokal neuen) **Krankheiten** (z.B. Malaria) kommen kann, es sind **Vorsorgemaßnahmen** in allen Bereichen (Infrastruktur, Lagerung von Medikamenten etc.) zu treffen.

Wasserwirtschaft/Gewässerschutz

Da die (Trink-)Wasserversorgung der Bevölkerung in Deutschland zum Hauptteil aus Grundwasser gespeist wird, kann es künftig durch die vorhergesagten Klimatrends zu einem Nutzungskonflikt kommen. Dieser resultiert aus den witterungsabhängigen Phasen mit ausgeprägt niedrigen bzw. hohen Grundwasserständen. Um die Grundwasserbewirtschaftung an den Klimawandel effektiv adaptieren zu können, sind die „Sicherheit dezentraler Wasserversorgungsstrukturen zu quantifizieren, das erwartete Ausmaß grundwasserverbundener Nutzungskonflikte einzugrenzen, Möglichkeiten und Grenzen einer gesteuerten Grundwasserbewirtschaftung aufzuzeigen und Strategien zur Einbeziehung der klimabedingten Veränderungen in ein **integriertes Wassermanagement** zu entwickeln“ (IW 2007, 36). Daneben wird die Zunahme von Starkregenereignissen zu einer erhöhten Belastung der **Entwässerungssysteme** führen und bei längeren Trockenzeiten mit negativen Folgen für Gewässer zu rechnen sein. Diesen Auswirkungen muss durch zahlreiche Maßnahmen in der Siedlungswasserwirtschaft Rechnung getragen werden (bspw. **Speicherung von Starkniederschlägen, neu dimensionierte und ausgebaute Kanalsysteme**).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Meere und die damit zusammenhängenden möglichen Schritte sind im Abschnitt 4.3.3 im Handlungsfeld „Wasserschutz“ näher beschrieben, in diesem Abschnitt finden sich auch die Technologien, die dem **Hochwasser- und Küstenzonenmanagement** und die der Bereitstellung von Trinkwasser (Qualität und Quantität, s. Abschnitt 4.3.1) zuzurechnen sind. Auf eine Darstellung wird deswegen an dieser Stelle verzichtet. Es sei nur beispielhaft auf ein alternatives Verfahren zur Reinigung von Wasser hingewiesen. Für die Trinkwasserversorgung im Katastropheneinsatz wurde das so genannte „**Schrägschlauchverfahren**“ vom Zentrum für Wasserforschung in Karlsruhe konzipiert. Das

Wasser wird bei diesem Verfahren durch einen zehn Meter langen Plastikschlauch geführt und durch Luftblasen, die mit einer Handpumpe erzeugt werden und durch die Zugabe von Zusätzen (Chlor, Aktivkohle), gereinigt. Dieses Verfahren kommt ohne Strom aus und kann aus verschmutztem Wasser pro Tag bis zu 10.000 Liter Trinkwasser bereitstellen (Bayer 2006). Dieses „no-tech“ Verfahren ist sehr gut für den Einsatz in Schwellen- und besonders in Entwicklungsländern geeignet. Es wird an einer Optimierung des Verfahrens gearbeitet, bspw. soll eine bessere Pumpe zum Einsatz kommen.

Stadtplanung/Gebäude

Durch Extremwetterereignisse sind vermehrt bauliche und anlagentechnische sowie städtebauliche Aufrüstungen und Anpassungen unumgänglich, wie z.B. geeignete **stabile Gebäudestrukturen** (für Orkane etc.). Einen Teilaspekt dieses Gesichtspunkts untersucht das BMBF-geförderte Projekt „Gebäudeautomation“. In diesem Projekt sollen Verfahren zur automatischen, wetterabhängigen Regelung der Gebäudetechnik entwickelt und auch in die Probephase gebracht werden. Bei den Technologien handelt es sich z.B. um Sonnenschutz und Lüftungsklappen, thermische und elektrische Kühlung sowie Licht. Eine detaillierte Beschreibung der Technologien, die im Gebäudebereich Anwendung finden (werden), sind dem Abschnitt 2.3.4 zu entnehmen. Das aktuelle Marktwachstum in der Gebäudeautomation ist aufgrund der schwachen Baukonjunktur in Deutschland nur gering. Der Bedarf wird aber durch zukünftig anstehende Adaptationsmaßnahmen in diesem Bereich tendenziell steigen (UBA/BMU 2007, 86).

Tourismus

Da der Tourismus ein äußerst wettersensibler Wirtschaftszweig ist, untersuchen zwei Projekte im Rahmen der BMBF-klimazwei-Initiative die notwendigen Anpassungen der Branche an eine Witterungsinstabilität und –variabilität und suchen nach neuen Entwicklungspotentialen. Das Projekt „GiS-KliSchee“ berücksichtigt die Adaptation an die zu erwartenden klimatischen Veränderungen im Schneesport in Bezug auf raumbezogene Veränderungen der Schneesicherheit, veränderte Schneegebiete und stellt die Frage, wie „stranded investments“ in Infrastrukturen durch flächenscharfe Planung vermieden werden können. Mit der klimabeeinflussten Entwicklung des Tourismus in Küsten- und Mittelgebirgsregionen beschäftigt sich das Projekt „KUNTIKUM“ („Klimatrends und nachhaltige Entwicklung in Küsten- und Mittelgebirgsregionen“). Ziel ist die Identifikation nachhaltiger Anpassungsstrategien in zwei Modellregionen, erste Region ist der Hochschwarzwald (veränderte Schneebedingungen) und die zweite Region wird die Nordseeküste (Anstieg des Meeresspiegels) sein.

Katastrophenschutz

Im Bereich des Katastrophenschutzes sind alle heutzutage gültigen, erprobten und zum Standard zu zählenden Maßnahmen in Bezug auf den Klimawandel und seine Auswirkungen zu überdenken (bspw. vernetzte Frühwarnsysteme, Sicherheit der Infrastruktur).

2.4 Akteure und Netzwerke

Im Bereich der Klimaentwicklung, des Klimaschutzes, der Mitigation und Adaptation sind eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen, staatliche Stellen, Fachverbänden und Netzwerken aktiv. Thematisch reichen sie von Institutionen, die sich vor allem mit dem Klimageschehen und der Wechselwirkung Klima-Mensch befassen, über solche, die bestimmte Technologien zur Verringerung der Klima verändernden Auswirkungen entwickeln bis hin zu Institutionen, die sich mit den gesellschaftlichen Reaktions- und Adaptationsvorgängen an den Klimawandel befassen. Der Schwerpunkt der nachstehenden Auflistung liegt auf den ersten beiden Themen. Der beschriebene Komplexität der anthropogenen Beeinflussung des Klimas Rechnung tragend und dem Schwerpunkt der Studie „Umwelttechnologien“ folgend, werden vornehmlich die Akteure aufgeführt, die sich mit Konsequenzen befassen, die einen technologischen Zusammenhang haben. Die Beeinflussung lediglich durch eine reine Steigerung der Energieeffizienz steht dabei weniger im Mittelpunkt.

Deutsche Fachverbände/ Vereine

VDI	Verein Deutscher Ingenieure	www.vdi.de
ProcessNet	(DECHEMA / VDI-GVC)	http://www.processnet.org/
SuPER	Fachgemeinschaft Sustainable Production, Energy and Resources	
AA-CLK	Arbeitsausschuss Chemie, Luftqualität und Klima	www.processnet.org/SuPER/Chemie_+Luftqualit%C3%A4t_+Klima/Selbstdarstellung.html
DMG	Deutsche Meteorologische Gesellschaft	www.dmg.de
FA UMET	Fachausschuss Umweltmeteorologie	http://www.dmg-ev.de/fachausschuesse/umet/umet_index.htm
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.	www.vdma.de

(Projekt)Netzwerke/ Informationsdienste

Zukunft Bau		http://www.bbr.bund.de/cln_007/nn_112742/DE/Forschungsprogramme/ZukunftBau/zukunftbau__node.html?__nnn=true
	Sustainability Center Bremen	http://www.klimawandel-unterweser.ecolo-bremen.de/index.php?obj=page&id=13&unid=e790edbeeeea7beaeb85c176012e0f61

Deutsche Universitätseinrichtungen

RWTH Aachen	Geographisches Institut	http://www.klimageo.rwth-aachen.de/index.php?id=578
	Umwelt-Forum der RWTH Aachen	http://www.foren.rwth-aachen.de/index.php?id=41
TU Berlin	Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik (ifvt) Institut für technischen Umweltschutz (itu)	www2.tu-berlin.de/~ifvt/uvt/uvt.html www2.tu-berlin.de/fb6/itu/index.html
TU Braunschweig	Institut für Geoökologie	http://www.tu-braunschweig.de/geo-oekologie
Uni Bremen	Institut für Umweltphysik	www.iup.uni-bremen.de/
	Institut für Physik und Chemie der Atmo-	http://www.iup.uni-

	sphäre	bre- men.de/deu/forschung/physikundchemi ederatmosphaere/index.html
	Institut für Fernerkundung	http://www.iup.uni-bremen.de/deu/forschung/fernerkundung/index.html
TU Cottbus	Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik	http://www.tu-cottbus.de/btu/en/structure/facultieschools/fakultaet-4-umweltwissenschaften-und-verfahrenstechnik/
TU Darmstadt	Institut für Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung	www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de
TU Dresden	Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ilkk
TU Hamburg-Harburg	Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften	http://www.zmaw.de/home.14.0.html
TU München	Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt	http://www.wzw.tum.de/
Uni Bremen	Institut für Umweltverfahrenstechnik (IUV) Institut für Umwelphysik Stiftungslehrstuhl Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus bremer energie institut	www.iuv.uni-bremen.de http://www.iup.uni-bremen.de/deu/ http://housing.wiwi.uni-karlsruhe.de/index.php?link=home.php http://www.bei.uni-bremen.de/start.htm
Uni der Bundeswehr München	Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen	http://www.unibw.de/bauv/
Uni Hannover		www.isah.uni-hannover.de
Uni Karlsruhe	Institut für Meteorologie und Klimaforschung	http://www.imk.uni-karlsruhe.de/index.php
	Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften	http://www.bgu.uni-karlsruhe.de/992.php
Uni Leipzig	Institut für Geographie	http://db.uni-leipzig.de/forschen/index.php?act=de&data[idx]=0000000b0005
Uni Rostock	Agrar- u. Umweltwissenschaftliche Fakultät	http://www.auf.uni-rostock.de/
Uni Siegen	Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie	http://nesa1.uni-siegen.de/index.htm?/softlab/casanova_4.htm
Uni Stuttgart	Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften	http://www.uni-stuttgart.de/bauingenieur/
Uni Weimar	Fakultät Architektur	http://www.uni-weimar.de/cms/?297
Uni Wuppertal	Atmosphärenphysik	http://www.atmos.physik.uni-wuppertal.de/index.html
Uni Mainz	Abteilung Partikelchemie: gemeinsame Einrichtung am Institut für Physik der Atmosphäre (Uni Mainz) und Max-Planck-Institut für Chemie	www.uni-mainz.de/FB/Physik/IPA/pc/pc_home_d.htm
Universität Kassel	Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung	http://www.usf.uni-kassel.de/cesr/
Sonstige deutsche Forschung		
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-13/
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	www.pik-potsdam.de/
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum	www.dkrz.de

ICG	Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre am Forschungszentrum Jülich	http://www.fz-juelich.de/icg/icg-1/
IMK	Institut für Meteorologie und Klimaforschung am Forschungszentrum Karlsruhe	http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK&node=0739&document=ID_002099
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am Forschungszentrum Karlsruhe Süddeutsches Klimabüro	http://www.itas.fzk.de/ http://www.sueddeutsches-klimabuero.de/index.php
	Norddeutsches Klimabüro	http://www.norddeutsches-klimabuero.de/
WDCC	Max-Planck-Institut für Meteorologie World Data Center for Climate	www.mpg.de http://www.mad.zmaw.de/wdc-for-climate/
	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH	http://www.wupperinst.org/de/home/
UFZ	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung	http://www.ufz.de/index.php?de=11382
Deutsche Staatliche Einrichtungen/Behörden		
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	www.bmbf.de
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	www.bmvbs.de
DWD	Deutscher Wetterdienst	www.dwd.de
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	www.bmu.de
UBA	Klimaschutz beim Umweltbundesamt	http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/index.htm
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	www.bmwi.de
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit	www.bmz.de
dkrz	Deutsches Klimarechenzentrum GmbH	http://www..de/dkrz/intro_s
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen	http://www.wbgu.de/
Sonstige		
EIONET	EEA/Central Data Repository	www.eionet.europa.eu/
PortalU	Luft und Klima im Umweltportal Deutschland	http://www.portalu.de/ingrid-portal/portal/main-environment.psml?action=doTeaser&rubric=luft
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH	http://www.iwu.de/home/
International		
EEA	Climate Change in European Environment Agency	http://www.eea.europa.eu/themes/climate
EORCU	European Ozone Research Coordinating Unit	www.ozone-sec.ch.cam.ac.uk
IACETH	Institute for Atmospheric and Climate Science at Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	www.iac.ethz.ch
ICETT	International Center for Environmental Technology Transfer	http://www.icett.or.jp/

OECD	Environment Directorate from Organisation for Economic Co-Operation and Development	www.oecd.org/department/0,3355,en_2649_33713_1_1_1_1_1,00.html
UNEP	United Nations Environment Programm	www.unep.org/
UNU	United Nations University	www.unu.edu
ESD	Environment and Sustainable Development Programme	www.unu.edu/esd/about.htm
ZEF	Zero Emissions Forum	www.unu.edu/zef/index.html
CC	Collaborating Centres of Air Quality Management and Air Pollution Control at World Health Organisation University of Helsinki	www.who.int/whocc www.umweltbundesamt.de/whocc/titel/titel21.htm http://www.helsinki.fi/research/overview.shtml
WBCSD	Energy & Climate at World Business Council for Sustainable Development	http://www.wbcsd.org/templates/TemplateWBCSD5/layout.asp?type=p&MenuId=NjY&doOpen=1&ClickMenu=LeftMenu
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1_home.html
SDI	Sustainable Development Initiative (SDI) of Columbia University	http://www2.gsb.columbia.edu/research/sdi/

2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bereits ein Blick auf Aufbau und Struktur dieses Kapitels zum Handlungsfeld „Klimaschutz“ macht deutlich, dass hier Technologien aus sehr unterschiedlichen Bereichen relevant sind. Einen Überblick gibt der Technologiekompass am Ende dieses Kapitels. 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. Technologien zur Energiewandlung sollten im Rahmen des Projekts nur kurz gestreift werden. Die teilweise sehr kontrovers diskutierte CCS-Technologie wurde wegen ihrer denkbaren Schlüsselrolle bei der globalen Entwicklung einer CO₂-armen Energieversorgung und der damit verbundenen Exportpotentiale ausführlicher beleuchtet. 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 stark wachsendem Energieverbrauch eingesetzt wird. Technisch ist bisher vor allem die Einlagerung von CO₂ ungelöst. Langfristig bleibt die nicht unbegründete Hoffnung, 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 ölbasierter Kraftstoffe zur Stabilisierung der Energiesicherheit eine wichtige Motivation. Daneben geht es bei der rationellen 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: die optischen Technologien

(insbesondere OLED), der gesamte Gebäudebereich mit seinen großen Einsparpotentialen; Effizienzsteigerung bei den in der industriellen Produktion verwendeten elektrischen Antrieben; Mess-Steuer- und Regeltechnik. 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 auch in Forschungs- und Entwicklungsprojekten optimiert, weiterentwickelt und erprobt werden. Bspw. lässt sich 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 CO₂-Ausstoß reduziert werden. Es wird deutlich, dass in vielen genannten Bereichen schon durch eine stärkere Marktdurchdringung bereits vorhandener Technologien signifikante Effizienzsteigerungen möglich wären. Innovationen sind hier oft eindeutig dem Hightech-Sektor zuzuordnen und benötigen einen relativ großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand. Viele Förderprogramme adressieren in Deutschland diesen Bedarf.

Auch Land- und Forstwirtschaft tragen beträchtlich zum Ausstoß von THG bei, 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. Für Kühe werden mittlerweile spezielle Arzneimittel 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 Ackerland eine Landnutzungsform mit vergleichsweise geringer CO₂-Speicherkapazität. Durch Umwandlung von Ackerland in eine extensivere Nutzung kann deshalb sehr einfach und effektiv CO₂ der Atmosphäre entzogen und gebunden werden. Wichtige Senken für CO₂, Methan und Lachgas stellen ebenso Wälder dar. Durch den Verlust natürlicher Wälder entstehen global mehr THG-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. Methanreduktionspotentiale können durch den Aufbau einer Deponiegas erfassung 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 er bereits in Brasilien getestet wurde. Des Weiteren bietet die energetische Verwertung von Abfällen Einsparpotentiale.

Die Folgen des Klimawandels können sehr unterschiedlich sein und divergieren stark zwischen einzelnen Regionen der Erde. Entsprechend vielfältig sind Maßnahmen zur Adaptation, d.h. zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Generell werden Anpassungstechnologien selten mit direktem Klimabezug entwickelt. Es handelt sich deswegen in der Regel weniger um vollständig neue Methoden, sondern eher um bereits angewandte State-of-the-Art-Technologien, die aber eben im Hinblick auf Klimawandel und damit einhergehenden Marktpotentiale verändert wurden, wie z.B. „inkrementelle“ Verbesserungen von etablierten Maßnahmen aus dem Bereich Katastrophenschutz. Letzendlich geht es darum, den Faktor Klimawandel in herkömmlichen Kontexten und bei bereits etablierten Routinen mitzudenken. Besondere Beachtung verdient 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.

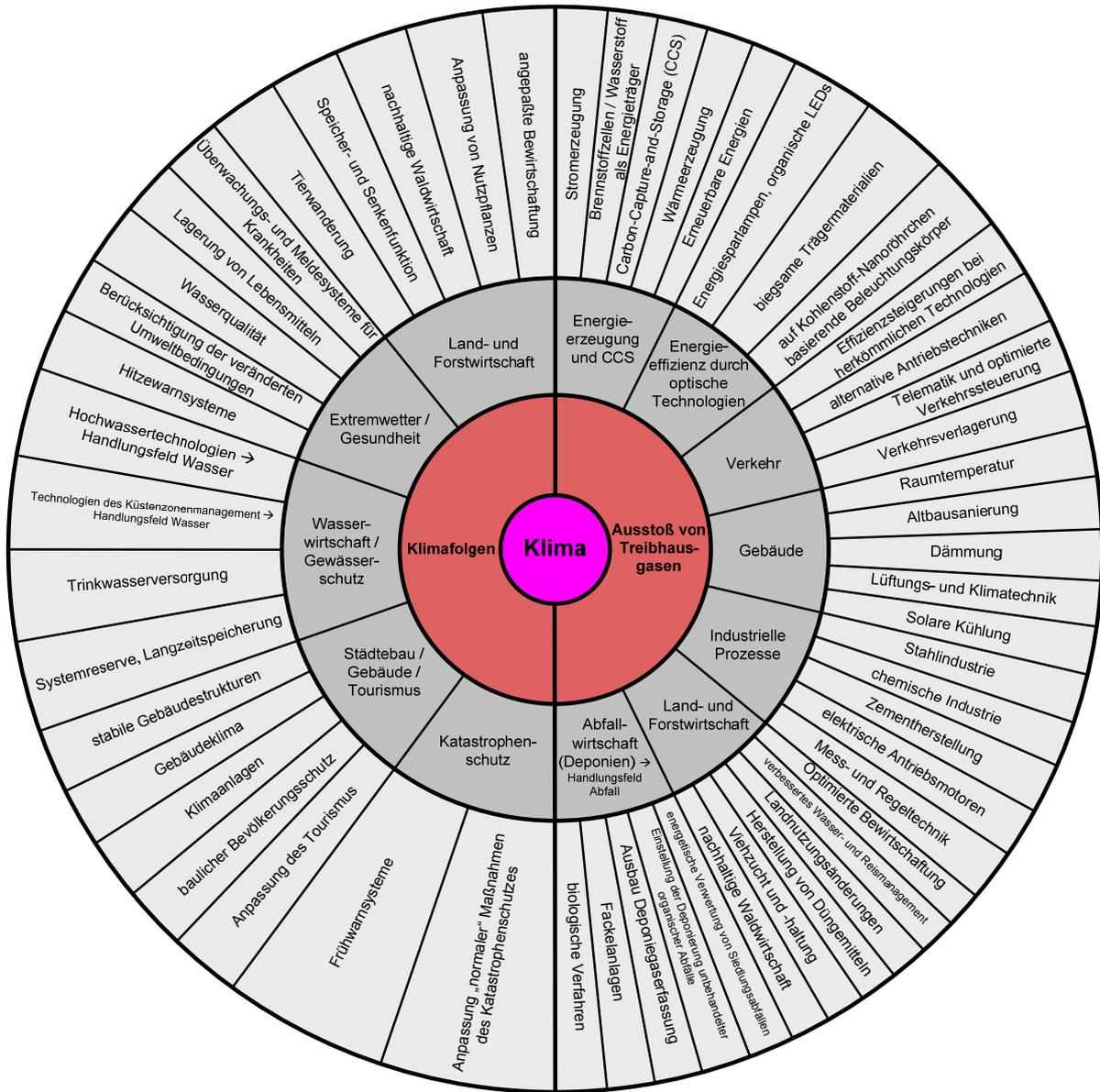
Technologien, die verlässliche Prognosen über regionale Auswirkungen des Klimawandels liefern sind ebenfalls wichtig; das gilt besonders für die Landwirtschaft. EDV-gestützte Entscheidungsunterstützungssysteme helfen der Land- und Forstwirtschaft sich besser auf den Klimawandel einzustellen. Darüber 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. SAFE, KLIMES). In Erwartung zunehmender Hochwasserereignisse und steigender Meeresspiegel kommt dem Bereich Hochwasser- und Küstenmanagement große Bedeutung zu.

Insgesamt erscheinen die globalen Potentiale der Forstwirtschaft 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 zukommen scheint.

Ebenso vielfältig wie die im Bereich Adaptation 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 findet 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 Energiewandlung bzw. der Abspaltung und Einlagerung von CO₂ beschäftigen; sowie die im Rahmen der Hightech-Strategie gegründeten Innovationsallianzen mit Wirtschaft und Wissenschaft genannt. Äußerst vielfältig sind die zahlreichen Forschungs- und Anreizprogramme in den Bundesländern, dazu finden sich oft auch auf kommunaler Ebene nochmals eigene Initiativen und Ansätze. Deutschland ist also im Bereich Klimaschutz in vielfacher Hinsicht sehr aktiv. Klimawandel kann und wird dabei durchaus auch als wirtschaftliche Chance wahrgenommen. Verschiedene Bereiche zeigen große Exportpotentiale.

Im Rahmen dieses Berichts werden vielfältige technologische Entwicklungslinien, die für den Klimaschutz bedeutsam sind, teilweise detailliert beschrieben. Im weiteren Projektverlauf scheint es sich anzubieten, die Exportpotentiale näher zu beleuchten, was bedeutet, künftige relevante Entwicklungen in den Schwellen- und Entwicklungsländern für eine verifizierte Chancen- und Potentialabschätzung näher zu betrachten. Dazu kommen die großen Marktpotentiale in Osteuropa (BMU 2007b).



Technologiekompas zum Handlungsfeld „Klimaschutz“ (Entwurf)

Literatur

- Achternbosch, M.; Bräutigam, K.-R.; Hartlieb, N.; Kupsch, Chr.; Richers, U.; Stemmermann, P. (2005): Impact of the use of waste on trace element concentrations in cement and concrete. *Waste management & Research* 23. S. 328 – 337
- baulinks (2007): Starker Winzling: einzelne LED schafft 1000 Lumen, Baulinks.de-Bau Nachrichten. <http://www.baulinks.de/webplugin/2007/1frame.htm?0570.php4>, Stand 17.04.2007
- BASF (2008): Latentwärmespeicher Micronal® PCM. http://www.micronal.de/portal/basf/ide/dt.jsp?set-Cursor=1_290226, Stand 14.03.2008
- Bayer (2006): Die Quelle des Lebens erhalten, Plattform Nachhaltig Wirtschaften – Best Practice Unternehmen. http://www.nachhaltigwirtschaften.net/scripts-/basics/ecoworld/wirtschaft/basics.prg?session=42f9486d474cef8b_556&a_no=486&r_index=3, Stand 03.03.2006
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2006): Die Hightech-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): Klimaschutz durch Werkstoffinnovationen im Automobilbau - Hochleistungswerkstoffe zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Erste Ergebnisse im Werkstoffprogramm des BMBF. Berlin
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2008): Kongress Optische Technologien 2008, BMBF-Pressemitteilung 019/2008. <http://www.bmbf.de/press/2229.php>, Stand 05.02.2008
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hrsg.) (2007a): Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung. Stand: Juni 2007. Bearbeitung: Prof. Dr. Frithjof Staiß, Dipl.-Ing. (FH) Christel Linkohr, Dipl.-Kffr. Ulrike Zimmer; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Stuttgart.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hrsg.) (2007b): GreenTech made in Germany. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. Verlag Franz Vahlen. München
- 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, Online-Quelle: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3337.pdf>, Stand 14.03.2008
- BMW i (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2007): Leuchtturm COORETEC. Der Weg zum zukunftsfähigen Kraftwerk mit fossilen Brennstoffen. Forschungsbericht No 566.
- BMW i (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2006): Energieversorgung für Deutschland. Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006.
- BMW i (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit); BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2007): Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland. Gemeinsamer Bericht des BMW i, BMU und BMBF für die Bundesregierung 19. September 2007
- Cerri, C.E.P.; Sparovek, G.; Bernoux, M.; Easterling, W.E.; Melillo, J.M.; Cerri, C.C. (2007): Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. *Scientia Agricola* 64, S. 83-99.
- co2online (2008): CO₂-Gebäudereport 2007. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Kurzfassung, Online-Quelle: http://www.bmvbs.de/Anlage/original_1020257/CO2-Gebaeudereport-Kurzfassung-barrierefrei.pdf, Stand 14.03.2008

- Disch, R. (2008): Das Plusenergiehaus. Architekturbüro Rolf Disch. <http://www.plusenergie-haus.de/index.php>, Stand 14.03.2008
- EEA (European Environment Agency) (2007): Transport and environment: on the way to a new common transport policy. Indicators tracking transport and environment in the European Union. EEA-Report No 1/2007
- EIA (Energy Information Agency) (2006): International Energy Outlook 2006. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>, Stand 30.10.2006
- Eickhout, B.; Bouwman, A.F.; van Zeijts, H. (2006): The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116, S. 4-14
- Energie-Enquete (2002): Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“, Endbericht. BT-Drucksache 14/9400. Berlin
- enob (2008a): Klimaaktive Wärmespeicher in Baustoffen. Forschung für Energieoptimiertes Bauen. <http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/klimaaktive-waermespeicher-in-baustoffen/>, Stand 14.03.2008
- enob (2008b): Sandwich-Bauelemente mit Vakuumisolation. – Forschung für Energieoptimiertes Bauen. <http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/sandwich-bauelemente-mit-vakuumisolation/>, Stand 14.03.2008
- enob (2008c): Vakuum-Isolierglas. – Forschung für Energieoptimiertes Bauen. <http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/vakuum-isolationsglas/>, Stand: 14.03.2008
- Eschey, H.; Haubrichs, R. (2007): Durchgängiges Deponiegas-Behandlungskonzept mit herkömmlichen und innovativen Verfahren über den gesamten Methanbereich, LAMBA Gesellschaft für Gastechnik GmbH, Wuppertal
- Europäisches Parlament (2008): Entschließung des Europäischen Parlaments vom 31. Januar 2008 zu dem Thema "Aktionsplan für Energieeffizienz: Das Potenzial ausschöpfen" (2007/2106(INI)). <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT%2BTA%2BP6-TA-2008-0033%2B0%2BDOC%2BXML%2BV0//DE>, Stand 17.03.2008
- European Commission (2001): "White Paper - European transport policy for 2010: time to decide", COM (2001), 370.
- European Commission (2006): Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Keep Europe moving – Sustainable mobility for our continent Mid-term review of the European Commission's 2001 Transport White Paper.
- EWI (Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln) (2007): Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept. Erstellt vom EWI zusammen mit der Energy Environment Forecast Analysis (EEFA) GmbH. Münster
- Feldhoff, T. (2006): Zivile Nutzung der Kernenergie in Japan und nachholende Kerntechnische Entwicklung in Ostasien. In: *Geographische Rundschau* 58, Heft 9, S. 54-61.
- FIZ (Fachinformationszentrum Karlsruhe, Hrsg.) (2008a): Gebäude. http://www.bine.info/-templ_main.php/gebaeude/, Stand 28.02.2008
- FIZ (Fachinformationszentrum Karlsruhe, Hrsg.) (2008b): Vakuumgedämmte Fertigteile in der Baupraxis. http://www.bine.info/-templ_main.php/gebaeude/technik_komponenten, Stand 28.02.2008
- FORNEL (2007): Bayrischer Forschungsverbund für Nanoelektronik. <http://www.fornel.de>, Stand 14.03.2008
- Foster, C.; Green, K.; Bleda, M.; Dewick, P.; Evans, B.; Flynn, A.; Mylan, J. (2006): Environmental Impacts of Food Production and Consumption: A Report to the Department for Environment Food and Rural Affairs, Manchester Business School, Defra. London

- FTD (Financial Times Deutschland) (2007): Mmmmhh, lecker Müll, Artikel vom Montag, den 10. September 2007. http://www.klimazwei.de/Portals/0/FTD_10.09.07_MitMe-thox.pdf, Stand: 10.09.07
- Gough, C. (2007): State of the art in carbon dioxide capture and storage in the UK: An experts' view. In: International Journal of Greenhouse Gas Control. doi: 10.101/S1750-5836 (07) 00073-4
- Grenzebach (Fa. Grenzebach Maschinenbau GmbH (2008): PROVIG - Produktionstechniken für Vakuum-Isolierglas. <http://www.vig-info.de/index.htm>, Stand 14.03.2008
- Heinloth, K. (1997): Die Energienachfrage: Bedarf und Potenziale, Nutzung, Risiken und Kosten. Braunschweig/Wiesbaden
- heise (2007): Kühe für Kyoto, News aus Energie und Klima, Telepolis. <http://www.heise.de/tp/blogs/2/92012>, Stand 09.07.2007
- Henning, H.-M. (2006): Solarthermische Kühlung und Klimatisierung. Grundlagen, Verfahren und Anwendungen, insbesondere im Mittelmeerraum. http://www.exportinitiative.de/media-/article006028/5_H.M.%20Henning_Fraunhofer%20ISE.pdf, Stand: 14.03.2008
- Hirth, Th.; Woidasky, J.; Eyerer, P. (2007): Nachhaltige rohstoffnahe Produktion, herausgegeben durch das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT. Stuttgart
- IEA (International Energy Agency) (2006): World Energy Outlook 2006. <http://www.worldenergyoutlook.org/2006.asp>, Stand 18.12.2007
- IEA (International Energy Agency) (2007): Renewables in Global Energy Supply. An IEA Fact Sheet. http://www.iea.org/textbase/papers/2006/renewable_factsheet.pdf, Stand 30.10.2006
- InnoRep (2007): Rote Karte für Lachgas in der Düngemittelindustrie, Innovationsreport Biowissenschaften/Chemie. http://www.innovationsreport.de/html/berichte-/biowissenschaften_chemie/bericht-96598.html, Stand 21.11.2007
- 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
- IW (Institut der deutschen Wirtschaft) (2007): Forschung und Praxis für Klimaschutz und Anpassung, Broschüre der klimazwei-Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Hrsg.), Forschungsstelle Ökonomie/Ökologie des IW. Köln
- LWI (Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig) (2004): Eignung von Deponie-Methangasoxidationsschichten für den Einsatz in humiden Klimaten, <http://www.lwi.tu-bs.de/abwi/englisch/geraetausstattung/methangasoxidation.htm>, Stand 14.08.2008
- Jakob, U. (2007): Solares Kühlen in Gebäuden. Vortrag: Informationsveranstaltung des Kompetenzzentrums für Energietechnik am 18.09.2007. Würzburg
- Jörissen, J.; Coenen, R.; Stelzer, V. (2005): Zukunftsfähiges Wohnen und Bauen. Herausforderungen, Defizite, Strategien. In: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland, Bd. 7. Berlin
- Johnke, B.; Butz, W. (2005): Klimarelevanz der Abfallwirtschaft, Umweltbundesamt. Berlin
- JRC (Joint Research Centre) (2006): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-to-WHEELS Report Version 2b, May 2006. European Commission, Directorate General, JRC in cooperation with EUCAR and CONCAWE
- Kates, R.W.; Parris, T.M. (2003): Science and Technology for Sustainable Development Special Feature: Long-term trends and a sustainability transition, S. 8062-8067.
- Kleemann, M. (2007): Vorschlag für Leuchtturmprojekte im Gebäude- und Heizungsbereich. Evaluierung der Energie- und CO₂-Einsparung. Im Auftrag des Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V. (BDH). Köln

- klimazwei (2007): Methahat – Katalytisch-thermische Entsorgung methanhaltiger Schwachgase, Projektdarstellung, Online-Quelle: <http://www.klimazwei.de/ProjektzumKlimaschutz-/Projekt%C3%BCbersicht/Methakat/tabid/104/Default.aspx>, Stand 14.03.2008
- Kohler, N.; Hassler, U.; Paschen, H. (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Im Auftrag der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages. Springer-Verlag. Heidelberg
- Kratz, M. (2007): Vakuumgedämmte Fertigteile in der Baupraxis. In: BINE-Projektinfo 09/07. Bonn
- 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, Stand 14.03.2008
- McKinsey (2007a): Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Studie der McKinsey&Company im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Industrie (BDI)
- McKinsey (2007b): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland – Sektorbericht Industrie, Studie der McKinsey & Company im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Industrie (BDI)
- Milles, U. (2001): Energiesparen zu Hause. In: BINE-Informationdienst (Hrsg.): basisEnergie 9. Bonn
- NanoMarkets (2007): Hohes Marktpotential für organische Beleuchtung, <http://www.elektroniknet.de/home/optoelektronik/news/n/d/hohes-marktpotential-fuer-organische-beleuchtung/>, Stand 24.07.2007
- Netzzeitung (2007): Klimakiller Reisanbau, Aktuelles aus Wissenschaft, <http://www.netzeitung.de/spezial/klimawandel/730711.html>, Stand 5.09.2007
- Nitsch, J. (2007): Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“. Erstellt im Auftrag des BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Systemanalyse und Technikbewertung“ des DLR – Institut für Technische Thermodynamik.
- Paffenrott, J.; Katz, D. (2007): Thermoaktive Bauteilsysteme. Nichtwohnungsbauten energieeffizient heizen und kühlen auf hohem Komfortniveau. In: BINE Themeninfo I/2007
- Passivhausinstitut (2008a): Eingangsseite des Passivhausinstituts. <http://www.passiv.de/>, Stand 14.03.2008
- Passivhausinstitut (2008b): Was ist ein Passivhaus, Online-Quelle: <http://www.passiv.de/> Stand 14.03.2008
- RNE (Rat für Nachhaltige Entwicklung) (2004): Effizienz und Energieforschung als Bausteine einer konsistenten Energiepolitik, Endfassung vom 11. Oktober 2004. Berlin
- REW Power (2007): Aktuelle Fragestellungen und Materialien zur CO₂-Speicherung. <http://www.rwe.com>, Stand 17.03.2008
- Schippl, J; Dieckhoff, Chr.; Fleischer, T. (2007): Alternative Technology Options for Road and Air Transport. Final Report of a project commissioned by STOA (Scientific Technology Options Assessment Panel of the European Parliament) and carried out by ETAG (European Technology Assessment Group)
- scinexx (2008): Klimakiller Papier – WWF: Zerstörung von Torfwäldern auf Sumatra heizt Klimawandel an, <http://www.g-o.de/wissen-aktuell-7884-2008-02-29.html>, Stand 29.02.2008
- 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, Stand 01.2008

- 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, Stand 12.11.2006
- Stolaroff, J.; Keith, D.; Lowry, G. (2006): A pilot-scale prototype contactor for CO₂ capture from ambient air: cost and energy requirements. GHGT-8, 8th International Conference on Greenhouse gas Control Technologies Trondheim, Norway.
- Stoop, W.A.; Kassam, A.H. (2006): The "system of rice intensification": Implications for agronomic research, Tropical Agriculture Association Newsletter, S. 26, 22-24.
- Stroink, L. (2007): Speicherung von CO₂ im tiefen Untergrund. Eine Schlüsseltechnologie für den Klimaschutz. Veröffentlichung im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsprogramms GEOTECHNOLOGIEN, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).
- Taylor, M.; Tam, C.; Gielen, D. (2006): Energy Efficiency and CO₂ Emissions from the Global Cement Industry. Vortrag anlässlich der Konferenz "Energy Efficiency and CO₂ Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry", International Energy Agency. Paris 4-5 September
- UBA (Umweltbundesamt) (2007a): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix, Dessau, April 2007, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3195.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt) (2007b): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2005. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2007, Dessau. <http://www.bmu.de/files/klimaschutz/downloads/application/pdf/treibhausgasinventar.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz - Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation, Forschungsprojekt durchgeführt von: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Berlin), Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Karlsruhe), Roland Berger Strategy Consultants.Dessau, München, Berlin
- UFZ (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung) (2007): Auswirkungen des Klimawandels in Deutschlands Ökosystemen sind nicht mehr zu übersehen, Pressemitteilung, Stand 30.03.2007
- Universität Duisburg (2008): Algenreaktor schluckt CO₂. http://www.uni-due.de/home/fb/presse/presse_allg/presse_10.03.2008_44174.shtml, Stand 10.03.2008
- Vattenfall (2006): Klimaschutz durch Innovation. Das CO₂-freie Kraftwerk von Vattenfall. www.vattenfall.de
- VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.) (2005): Endenergieverbrauch in Deutschland 2003. In: VDEW Materialien, H. M-16/2004
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) (2007): The "Zero Net Energy" Challenge. Genf, Online-Quelle: <http://www.wbcd.org/Plugins/DocSearch/de-tails.asp?DocTypeId=251&ObjectId=MjYyODg>, Stand 17.09.2007
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2007): Welt im Wandel - Sicherheitsrisiko Klimawandel. Berlin, http://www.wbgu.de/wbgu_jg2007.pdf
- Wood S.; Cowie, A. (2004): A review of greenhouse gas emission factors for fertiliser production. International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 38

3 Luftreinhaltung

3.1 Charakterisierung des Handlungsfeldes

Gemäß § 3 Begriffsbestimmungen (4) des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG, Fassung vom 26. September 2002) sind „Luftverunreinigungen [...] Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe“. Gemeint sind hier Immissionen, die durch anthropogene Emissionen verursacht wurden.

Luftschadstoffe, Ausbreitung und Wirkung

Auf Grund ihrer Schädlichkeit für Mensch und Umwelt werden die **Luftschadstoffe** Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Kohlenmonoxid (CO), Ammoniak (NH₃) sowie die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) auf breiter Basis erfasst. Besonderes Augenmerk gilt auch den Stäuben (Particulate Matter - PM), klassifiziert in Gesamtschwebstaub (TSP), inhalierbare Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10\mu\text{m}$ (PM₁₀) und den lungengängigen Partikeln $\leq 2,5\ \mu\text{m}$ (PM_{2,5}) sowie den darin enthaltenen Elementen und Verbindungen (z.B. Schwermetalle). Langlebige Kohlenwasserstoffe (POP, persistent organic pollutants) und andere Kohlenwasserstoffverbindungen wie die Krebs erzeugenden halogenierten Kohlenwasserstoffe, Benzol, polycyclischen Kohlenwasserstoffe (PAK, polycyclic aromatic hydrocarbons) und aliphatische Kohlenwasserstoffe (z.B. Formaldehyd) zählen ebenso zu den Luftschadstoffen.

Zu den sekundären Luftschadstoffen zählt beispielsweise das Ozon (O₃), welches in der Atmosphäre durch Photooxidation aus primären Emissionen (NMVOC, NO_x) gebildet wird. Sekundär-Aerosole bilden sich durch chemische Reaktionen und/oder Anlagerung an einen Kondensationskern und tragen als „Sekundär-Partikel“ zur Partikelbelastung bei (z.B. Sulfate, Nitrate, Ammoniumsulfate, -nitrate).

Die **Ausbreitung** der Schadstoffe in der Luft hängt stark von der Durchmischung der Schichten in der Atmosphäre ab, die wesentlich durch die thermische Schichtung und den Wind beeinflusst wird. Die Ablagerung der Schadstoffe wird v.a. von der Art des Schadstoffes (z.B. Partikelgröße, Wasserlöslichkeit) und der Witterung (z.B. Nebel) beeinflusst.

Die schädigende **Wirkung** auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Ökosysteme und Sachgüter ist abhängig vom einzelnen Schadstoff, dessen Konzentration, Einwirkhäufigkeit und -dauer, aber auch von der Kombination in der verschiedene Schadstoffe vorkommen bzw. von deren chemischen Reaktionen untereinander oder mit anderen Stoffen.

- Beim Menschen führen die Luftschadstoffe oft zu Reizungen der Atemwege, zu einer Verminderung der Abwehrkräfte gegen luftgetragene Krankheitsüberträger und einer Erhöhung der Empfindlichkeit bzw. Allergiebereitschaft z.B. gegen Pollen. Aerosole und lungengängige Partikel können auch Schadstoffe und Gifte über die Atemwege bis in die Alveolen (Lungenbläschen) transportieren und einige stehen im Verdacht die Blut-Hirnschranke zu überwinden. Akute oder chronische Schäden und Vergiftungen bis hin zur Schädigung der Erbsubstanz sind möglich.

- Säurebildende Emissionen können zu sauren Niederschlägen oder Nebel (verursacht durch SO_2 , NO_x und NH_3) führen, die Ökosysteme wie z.B. Wälder, Böden, und Gewässer aber auch Gebäude schädigen können. Auf die Auswirkungen wird in den Kapiteln 3 „Wasserschutz“, Kapitel 5 „Bodenschutz“ und Kapitel 6 „Naturschutz und Biodiversität“ eingegangen.
- NO_x und NH_3 führen zur Überdüngung von Naturböden sowie Gewässern (Eutrophierung) und beeinträchtigen hierdurch die Biodiversität, das Grundwasser sowie auf Stickstoffeinträge empfindlich reagierende Ökosysteme wie z.B. Moore. Konsequenzen werden in Kapitel 3 „Wasserschutz“ und Kapitel 5 „Bodenschutz“ behandelt.

Quellen und Mengen der Luftschadstoffe

Quellenschwerpunkte der anthropogenen Emissionen sind, wie für die Klimagase, die Energieerzeugung und -umwandlung (Energiewirtschaft, industrielle Kraftwerke, Hausbrand und Verkehr), die nicht Gegenstand dieser Studie sind (s.o.). Industrielle Produktionsprozesse, die Landwirtschaft aber auch die Nutzung lösemittelhaltiger Produkte, der Umschlag staubiger Güter oder die Abfallwirtschaft sind weitere wesentliche Schadstoffquellen. Hinzu kommen natürliche Quellen wie Fäulnisprozesse, Waldbrände oder Vulkanausbrüche.

Luftschadstoffe beeinflussen die Qualität der Umgebungsluft aber ebenso die Luftqualität in Innenräumen z.B. am Arbeitsplatz (Partikelbelastungen, Lösemitteldämpfe, Rauch beim Schweißen usw.) oder in Wohnräumen (Formaldehyd aus Möbeln, Lösemittel aus Lacken, Farben, Anstrichmitteln usw.). Ganz besonders in den Entwicklungsländern trägt das Verbrennen fester Brennstoffe in offenen Feuerstellen zu massiven Gesundheitsschäden bei. Die WHO (2004) schreibt diesem Einfluss weltweit 1,6 Mio. zusätzliche Todesfälle und 3% der globalen Belastung durch Krankheiten zu. Insbesondere in Schwellenländern sind außerdem häufig Produktionsstätten mit hohen Emissionen und entsprechend hohen Arbeitsplatzkonzentrationen anzutreffen.

Abhängig von der Art, Anzahl und Intensität der einzelnen Emissionsquellen sowie der Ausbreitung der Emissionen sind die Immissionssituationen regional sehr unterschiedlich zu beurteilen.

Daten des Emissionsinventars für **Deutschland** (UBA 2007b) in Tabelle 2 verdeutlichen die starke Dominanz der energetisch bedingten Luftschadstoffemissionen, die sich auch weitgehend auf die hier nicht aufgeführten Luftschadstoffe (z.B. POP, Schwermetalle) erstreckt.

Gemäß diesen Schätzungen und Berechnungen sind wesentliche Anteile der Emissionen in der Gruppe der Industrieprozesse auf die Eisen- und Stahlherstellung zurückzuführen (Anteile am jeweiligen Gesamtinventar: CO (11,2%), SO_2 (6,1%) und Stäube (15,7% TSP, 14,8% PM_{10} , 9,8% $\text{PM}_{2,5}$), PCB (98%), Dioxin (63%). Mineraliengewinnung (Steinbrüche, Bergbau ohne Kohle) sowie die Verarbeitung in Zementwerken tragen insbesondere zu den NO_x -, NMVOC-, SO_2 - und Staubemissionen bei. Chemieprozesse wie z.B. die Schwefelsäureproduktion (UBA 2007d), die Zellstoff- und Papierherstellung verursachen SO_2 -Emissionen. Schwermetalle sind natürliche Bestandteile der Erdkruste und gelangen über die Förderung der Bodenschätze und deren Verarbeitung in die Luft (meist angelagert an Feinstäube), ins Abwasser und in den Abfall. Beispielsweise kommt Arsen in Kohle vor und lagert sich bei thermischen Prozessen am Feinstaub an. Weitere Schwermetallquellen sind die Zement-

und Glasindustrie, sowie Müllverbrennungsanlagen. Cadmium stammt aus der Metallverarbeitung (Eisengießerei), Zement-, Keramikherstellung, der Müllverbrennung und aus Feuerungsanlagen (LUBW 2006). Ein Schwerpunkt der Staubemissionen unter der Rubrik „andere“ ist der Umschlag von staubenden Gütern.

Rinder- und Schweinehaltung sowie das Ausbringen des Wirtschaftdüngers insbesondere in der Wachstumsphase der Feldfrüchte (vgl. Handlungsfeld 5 „Bodenschutz“) bestimmen die hohen NH₃-Emissionen (UBA 2007c).

NMVOC-Emissionen aus der Verwendung von Produkten stammen etwa zur Hälfte aus der Lösemittelverwendung in Haushalten, in Druckereien usw., zu etwa 40% aus der Verwendung von Lacken und Farben und zu etwa 10% der Entfettung von Oberflächen, der chemischen Reinigung oder der industriellen Herstellung bzw. Nutzung chemischer Produkte und anderer Anwendungen (UBA 2007c).

Tabelle 2: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellengruppen in Deutschland (2005) – Auszug aus den Hochrechnungen des Emissionsinventars (UBA 2007a, 2007b)

	NO _x	NH ₃	NMVOC	SO ₂	Gesamtstaub	PM ₁₀	PM _{2,5}	CO	Säure Äquivalent ⁴
Energiewirtschaft	19,8%	0,5%	0,6%	51,8%	4,5%	5,7%	9,0%	3,3%	18,1%
Verarbeitendes Gewerbe	4,7%	0,2%	0,2%	11,3%	0,7%	1,0%	1,8%	15,4%	4,1%
Verkehr ¹	51,8%	1,8%	12,7%	0,4%	9,7%	11,4%	19,8%	39,0%	19,8%
Haushalte Kleinverbrauch ²	11,2%	0,5%	8,1%	13,9%	11,6%	14,5%	23,4%	27,9%	7,2%
Industrieprozesse	6,5%	1,6%	5,3%	20,2%	26,5%	22,8%	15,3%	14,1%	7,2%
Diffuse Emissionen aus Brennstoffen			3,8%	2,7%	0,7%			0,2%	0,6%
Landwirtschaft	6,0%	95,3%	10,0%			10,9%	4,5%		42,9%
Lösemittel und andere Produktverwendung		0,3%	59,3%						0,1%
Andere ³					46,3%	33,7%	27,0%		
Gesamtmenge	1.443 kt	619 kt	1.253 kt	560 kt	269kt	193 kt	111 kt	4.035 kt	85.308 t
Internationale Luftfahrt	90 kt	1 kt	10 kt	3 kt	3 kt			59 kt	
Internationale Schifffahrt	200 kt		6 kt	140 kt	7 kt			20 kt	
¹ ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr									
² mit land- und forstwirtschaftlichem Verkehr sowie Militär									
³ Umschlag staubender Güter, Feuerwerk, Zigaretten, Grillfeuer, Abrieb von Reifen, Bremsen und Straßen									
⁴ stöchiometrisch errechnet bezogen auf das wirksame Säureion H ⁺ (d.h. Berechnung erfolgt aus den Emissionsangaben von SO ₂ (/32), NH ₃ (/17) und NO _x (berechnet als NO ₂ /46)									

Der Statusreport der European Environment Agency auf der Basis der NEC(National Emission Ceilings)-Richtlinie (vgl. 3.2) zeigt für **Europa** ein differenziertes Bild für die Emissionen in den einzelnen europäischen Ländern. Sie weist darauf hin, dass noch einige Anstrengungen unternommen werden müssen, die festgelegten Gesamtemissionen in den Ländern der Europäischen Union zu unterschreiten (EEA 2007a). Emissionsschwerpunkt, der in der NEC-Richtlinie erfassten Gase, liegen in den EU15-Staaten. Die Entwicklung von 1990 bis 2005 ist in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich. Prognosen bis 2010 lassen vermuten, dass die Mehrzahl der Länder die Vorgaben hinsichtlich NO_x -Emissionen nicht erreichen werden (EEA 2007a, 17). Die Limits für SO_2 , NMVOC und NH_3 werden vermutlich von fast allen Staaten gerade erreicht oder unterschritten, allerdings häufig nur dann, wenn die aufgeführten Maßnahmenpakete im prognostizierten Umfang greifen. Die Niederlande und Malta werden nach Stand 2005 die zulässigen Höchstmengen der SO_2 -Emissionen, Frankreich, Dänemark, Portugal und insbesondere Spanien diejenigen für die NMVOC-Emissionen, Deutschland und Spanien diejenigen für NH_3 -Emissionen überschreiten.

Grundsätzlich liefern auch in **Schwellen- und Entwicklungsländern** die Energieerzeugung und -nutzung sowie der Verkehr wesentliche Ansatzpunkte zur Verminderung der Luftschadstoffe, zumindest in den großen und boomenden Städten. Problematisch nicht nur aus der Sicht aller Umweltbereiche ist in diesen Ländern die zunehmende Konzentration der Bevölkerung in kaum mehr zu beherrschenden Megastädten mit großen Randbereichen ohne jegliche Infrastruktur.

Die rohstoffintensive Industrie mit ihren hohen Emissionen liegt hingegen meist in der Nähe der Rohstoffvorkommen und damit meist abseits großer Städte. Die Bemühungen zur Minderung von Luftschadstoffen in der Produktion wurde v.a. in den Schwellenländern von der raschen Entwicklung insbesondere kleiner Betriebe „übertannt“.

Von 10 der am meisten belasteten Städte liegen je zwei in China, Indien und Russland. (Blacksmith Institute 2007). Hierzu gehört beispielsweise Linfen (China), das durch die Kohleminen und die Teer- und Stahlerzeugung eine sehr hohe Luftverschmutzung durch Partikel, NO_x , SO_x und CO aufweist und außerdem durch die Gifte Arsen und Blei belastet ist. Bilder erinnern an extreme Smogsituationen im „Ruhrpott“ der fünfziger und sechziger Jahre. Der Hauptanteil der kleinen Stahl- und Kohlefabriken soll gemäß Planungen der Stadtverwaltung durch größere Anlagen, die weniger Schadstoff emittieren, ersetzt werden.

In vielen Regionen der Erde behindert die geringe Quantität und die Qualität der vorhandenen Daten eine grundlegende Bewertung der Situation (EEA 2007b). Entsprechend vorsichtig bewertet die Weltbank (Weltbank 2008) die in ihren World Development Indicators (2005) veröffentlichten Umweltdaten verschiedener Städte weltweit. Ausgewiesen werden Jahresmittelwerte für PM_{10} (1999), SO_2 und NO_2 (2001), die teilweise bei einem Vielfachen der deutschen Grenzwerte liegen. Das World Resources Institute (WRI 2008) weist für 2000 weltweite Emissionen in der Größenordnung von 1.077 Mio. t CO, 127 Mio. t NO_x , 186 Mio. t NMVOC und 150 Mio. t SO_2 aus.

Der internationale **Flug- und Schiffsverkehr** gerät zunehmend in den Fokus der Emissionsminderung. Zur Entwicklung umweltfreundlicherer und effizienterer Flugzeuge wurde im

Februar 2008 das Programm „Clean Sky“ gestartet⁵. Ein Problem des Schiffsverkehrs ist es, dass der in Schiffen auf hoher See eingesetzte Treibstoffe von geringer Qualität sind. Die Emissionen der internationale Schifffahrt wurden für 2001 auf 21,4 Mio. t NO_x, 12,0 Mio. t SO₂ und 813 Mio. t CO₂ geschätzt (Eyring, 2005a). Bei einer weiteren Reduktion der Luftschadstoffe an Land könnten sie diese in Zukunft übertreffen (EEA 2007b)⁶.

Entwicklung der Schadstoffemissionen

Da auf die Verbrennung fossiler Energieträger nicht nur wesentliche Anteile der Klimagas-, sondern auch der Luftschadstoffemissionen zurückzuführen sind, stellen Maßnahmen zur effizienteren Energieerzeugung und Energieumwandlung, der Einsatz erneuerbarer Energiequellen wie Solar- oder Windenergie und die effizientere Energienutzung zur Verminderung des Energiebedarfs in beiden Handlungsfeldern die wirksamsten Ansatzpunkte zur Emissionsminderungen dar (Beispiele hierzu vgl. Kapitel 1 „Klimaschutz“). Darüber hinaus wirken sich additive Technologien zur Luftreinhaltung wie Entschwefelung, Entstickung, Staubabscheidung in der Elektrizitätserzeugung sowie in Industrie und Gewerbe positiv auf die Emissionsbilanz aus. Der Einsatz benzol- und schwefelarmer Kraftstoffe und Kfz-Katalysatoren senkte die Emissionen des Verkehrs.

Abbildung 7 zeigt die erreichten Verminderungen an Luftschadstoffen am Beispiel Deutschlands. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die erheblichen Minderungen Anfang der 1990er Jahre wesentlich durch die Änderung der Produktionsstruktur (Ersatz alter Anlagen, Betriebsschließungen) auf dem Gebiet der ehemaligen DDR beeinflusst wurde (Hentrich et al. 2000).

Immissionsprobleme bereiten in Deutschland nach wie vor Überschreitungen der Tagesmittelwerte der Partikelkonzentrationen PM₁₀ von 50 µg/m³ an mehr als 35 Tagen p.a. und des Jahresmittelwertes für NO₂ von 40 µg/m³ (22. BImSchV), vorwiegend in Bereichen mit hohen Verkehrsbelastungen. Welche Rolle hierbei die Aerosole spielen, ist noch nicht abschließend geklärt.

An 100 von 450 Messstationen wird der PM₁₀-Grenzwert, an etwa der Hälfte der städtischen verkehrsnahen Messstellen der NO₂-Grenzwert überschritten (UBA 2007e). Modellrechnungen (Jörß et.al. 2007) weisen einen Rückgang der Staubemissionen bis 2020 insbesondere in Quellgruppen mit hohem PM_{2,5}-Anteil aus. In allen Partikelgrößen werden bedeutende Beiträge der Emissionsminderung in den Bereichen Straßenverkehr und mobilen Maschinen sowie Holzfeuerung erwartet, Hinsichtlich TSP und PM₁₀ liegen die Minderungsschwerpunkte bei der Eisen- und Stahlindustrie sowie dem Umschlag staubender Güter.

⁵ Ziel des Forschungsprogramms „Clean sky“ ist es bis 2020 80% der NO_x-, 50% der CO₂- und 50% der Lärm-Emissionen zu mindern (Clean sky 2008).

⁶ Tendenzen gehen dahin, eine weitere Verminderung des Schwefelgehaltes des Treibstoffes (EU-Parlament 2007) und eine Verminderung der NO_x- und Partikelemissionen zu erreichen, was jedoch mit erheblichen Kosten verbunden ist. Technisch wird unter anderem auch die Ausrüstung mit Segeln getestet (<http://www.skysails.info/>).

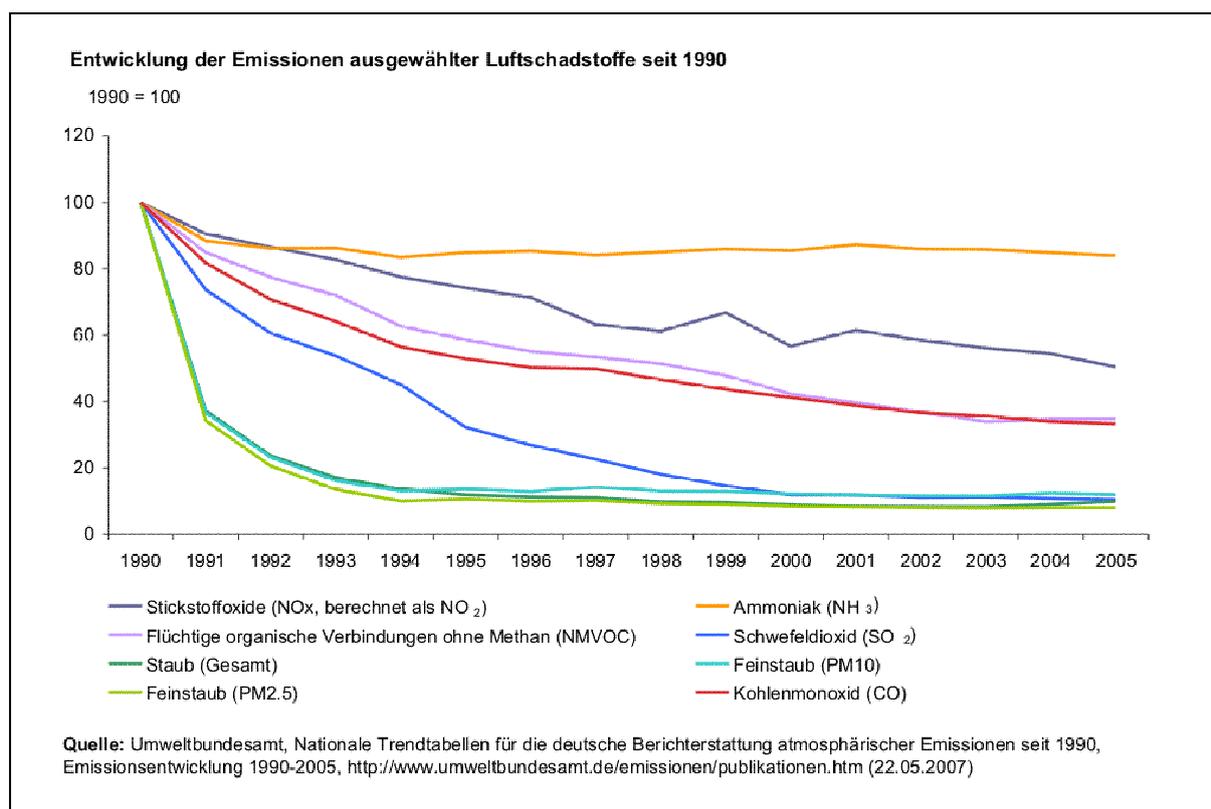


Abbildung 7: Entwicklung der Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe seit 1990
(Quelle s.o. aus: UBA 2008e)

Dank der Reduktion der SO₂-Emissionen gingen die Schäden infolge der Versauerung in den stark belasteten Regionen zurück. Damit erhöhte sich auf europäischer Ebene der Anteil der Flächen, bei denen die ökologischen Belastungsgrenzen der Versauerung nicht mehr überschritten werden (Öko-Data 2008). Allerdings nahm die versauernde und gleichzeitig eutrophierende Wirkung des NO_x und des NH₃ nicht in gleichem Maße ab, so dass ein Wechsel zu stickstoffdominierter Belastung festzustellen ist und in Deutschland meist nur eine Minderung der Überschreitung der Belastungsgrenze erreicht werden konnte (Nagel et.al 2004). Werden europaweit die Emissionshöchstmengen eingehalten, wird für Deutschland die Versauerung auch 2010 noch 60% der Fläche betreffen (1990 90%). Die Prognosen für 2020 sehen die höchste Belastung durch Versauerung im norddeutschen Raum (CAFE 2005). Die Ozonbelastung für die menschliche Gesundheit wird um ca. ein Drittel gegenüber 1990 zurückgehen, für die Pflanzen um etwa die Hälfte. Insbesondere durch die hohen NH₃-Emissionen der Tierhaltung wird weiterhin mit einer Überdüngung der Ökosysteme gerechnet (UBA 2007f). Ergänzt um die Belastung durch NO_x sehen die Prognosen für 2020 eine mindestens 100%ige Überdüngung für große Teile Mitteleuropas (CAFE 2005).

Die von Deutschland zugesicherte jährlichen Gesamtemission an SO₂ von 520 kt p.a. wird bis 2010 mit den eingeleiteten Maßnahmen nicht nur eingehalten, sondern um prognostizierte 61 kt unterschritten. Unter der Voraussetzung dass die Minderungsmaßnahmen der NMVOC-Emissionen den prognostizierten Erfolg aufweisen, wird die Einhaltung der zugesicherten Reduktion knapp gelingen (-8 kt) (Lahl 2007). Bei weiterem Wirtschaftswachstum sind allerdings für NMVOC ebenso zusätzliche Maßnahmen erforderlich wie für NO_x- und

NH₃-Emissionen (UBA 2007c). Gemäß Referenzprognose liegt die Überschreitung der Emissionshöchstmenge 2010 für NO₂ bei 61 kt, für NH₃ bei 60 kt (Lahl 2007)⁷. Die Ozonbelastung konnte deutlich vermindert werden, aber auch hier sind zum Erreichen der Zielwerte bis 2020 weitere Verminderungen der Vorläufersubstanzen NO_x und NMVOC erforderlich.

Weltweit nahmen die Emissionen zu. Das World Resources Institute (WRI 2008) weist im Jahr 2000 gegenüber 1990 um 28% höhere Emissionen für NO_x und CO, 22% höhere Werte für NMVOC aus. Lediglich die SO₂-Emission wird um knapp 3% geringer angegeben.

3.2 Meilensteine

Luftschadstoffe stellen ein grenzüberschreitendes Problem dar. Es bedarf daher einer überregionalen und **internationalen** Zusammenarbeit. Grundlage hierfür ist die Genfer Luftreinhalte-Konvention von 1979 (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) 1982 im Bundesgesetzblatt veröffentlicht). Hierin wurde die weiträumig grenzüberschreitende Luftverunreinigung und deren schädigender Einfluss auf den Menschen und die Umwelt anerkannt und die Verpflichtung der Unterzeichnerstaaten zu einer Reduktion der Luftverunreinigung festgehalten (UN/ECE 2008).

Folgeprotokolle konkretisieren dieses Abkommen:

- erstes und zweites Schwefelprotokoll (Helsinki 1985, Oslo 1994)
- Stickstoffoxidprotokoll (Sofia 1988)
- VOC-Protokoll (Genf 1991)
- Schwermetallprotokoll (Aarhus 1998)
- POPs-Protokoll (Aarhus 1998)
- Multieffektprotokoll: Protokoll zur Verringerung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon (Göteborg 1999)

Entsprechende Messdaten und Berichte der Staaten, die diese Abkommen ratifizierten, werden vom zuständigen UN/ECE-Sekretariat überprüft und ggf. Konsequenzen festgelegt.

Das Wiener Übereinkommen aus dem Jahre 1985 beschrieb die Bedeutung des Schutzes der Ozonschicht. 1987 konkretisiert das Montrealprotokoll das Wiener Abkommen hinsichtlich der Luftschadstoffe wie FCKW, Halone und Methylbromid, die zum Abbau der Ozonschicht führen und legt Ziele zu deren Reduktion fest. In den Folgejahren wurde es mehrfach modifiziert und angepasst und 2003 in deutsches Recht übernommen.

Die Luftqualität ist eines der Umweltthemen mit den größten Aktivitäten der **Europäischen Union** (EU). Noch im Zeichen der EWG wurde 1975 eine Richtlinie verabschiedet, die die Angleichung der Rechtsvorschriften bzgl. des Schwefelgehaltes bestimmter Brennstoffe beinhaltete. 1980 legte eine Richtlinie Grenz- und Leitwerte der Luftqualität für Schwefeldioxid und Schwebstaub fest. Es folgten zahlreiche Richtlinien, die sich teilweise auf Schadstoffe, teilweise auf bestimmte Emittenten wie z.B. Industrieanlagen oder Verbrennung von Abfällen

⁷ Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie: SO₂ 520 kt, NO_x 1.051 kt, NH₃ 550 kt, NMVOC 995 kt (Lahl 2007).

beziehen oder Folgeerscheinungen der Luftschadstoffbelastung wie die Ozonbildung zum Gegenstand hatten.

Als Konsequenz aus der Genfer Luftreinhalte-Konvention wurde das European Monitoring and Evaluation Programm (EMEP) gegründet. Seine Aufgaben sind die Sammlung der Emissionsdaten, Messungen der Luft- und Niederschlagsqualität sowie die Modellierung des Luftschadstofftransportes und der Deposition. In Gutachten und regelmäßigen Berichten informiert die EMEP über die Emissionen, deren Konzentration und Deposition, den grenzüberschreitenden Emissionsimport und –export sowie über kritische Luftschadstoffkonzentrationen und Grenzwertüberschreitungen.

1996 erließ die EU die Luftqualitätsrahmenrichtlinie. Sie definiert die Luftqualität über Immissionswerte und wurde durch Tochterrichtlinien weiter präzisiert. Am 10.12.2007 nahm das EU-Parlament eine neue Richtlinie für Luftqualität und saubere Luft in Europa an, welche die Luftqualitätsrichtlinie und ihre 4. Tochterrichtlinien vereint (EU Parlament 2008). Sie ergänzt die bisherigen Regelungen um die Begrenzung der PM_{2,5}-Belastung. Diese soll bis 2020 um bis zu 20% reduziert werden. Die Einhaltung der PM₁₀-Tagesmittelwerte von 50 µg/m³ (maximale 35 Überschreitungen p.a.) wird auf drei Jahre nach Inkrafttreten der neuen Richtlinie ausgesetzt

Die ebenfalls 1996 beschlossene IVU-Richtlinie der EU („Integrative Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“) regelt die Zulassung und den Betrieb von Anlagen, von denen ein hohes Maß an Umweltgefährdung ausgeht und berücksichtigt hierbei die Gefährdung der verschiedenen Medien (Boden, Wasser, Luft). Sie berücksichtigt ebenso abfallwirtschaftliche Aspekte, Ressourcen- und Energieeffizienz sowie Unfallgefahren. Gefordert wird die Anwendung der besten verfügbaren Techniken zunächst bei neuen Anlagen, seit 2007 aber ebenso für alte Anlagen. Auf Grundlage des Informationsaustausches zwischen den Mitgliedstaaten und deren Industrien, organisiert durch das EIPPC (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau), werden die besten verfügbaren Techniken in Merkblättern zusammengestellt (BREF/Best Available Technique Reference Document).

Mit der National Emissions Ceilings Directive (NECD) (2001) wurden Gesamtbegrenzungen der nationalen Luftfrachten für SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC festgelegt, die ab 2010 von den einzelnen Ländern nicht mehr überschritten werden sollen. Jedes Jahr sind von den Mitgliedsstaaten Berichte in einheitlicher Struktur über die Emission und deren Prognose bis 2010, einschließlich ggf. notwendiger Programme zur Verminderung zu hoher Emissionen an die Europäische Union und die European Environment Agency (EEA) zu richten.

2002 legte das sechste Umweltaktionsprogramm (6. UAP) thematische Strategien u.a. für die Luftreinhaltung („Clean Air for Europe“-Programm, CAFE) fest. Die Strategien geben Umweltziele vor, um davon ausgehend die optimalen Instrumente zur Erreichung dieser Ziele zu ermitteln. Die Luftstrategie zielt darauf ab, die Emission von fünf primären Luftschadstoffen (SO₂, NO_x, VOC, NH₃ und Partikel) und von bodennahem Ozon zu reduzieren (EU 2005).

Das Gesetz zum „Schutz vor schädlichen Umweltauswirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“, das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) setzt in **Deutschland** den Rahmen für zahlreiche Verordnungen verschiedener Anwendungsbereiche (UBA 2008c):

- Anlagen- und betriebsbezogene Immissionsschutzverordnungen z.B. die 31. BImSchV (Verordnung über Emissionsbegrenzung bei der Lösemittelverwendung) oder die 1. BImSchV (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen),
- Produktbezogene Immissionsschutzverordnungen z.B. die 3. BImSchV (Verordnung über den Schwefelgehalt bestimmter flüssiger Kraft- und Brennstoffe)
- Gebietsbezogene Immissionsschutzverordnungen z.B. die 22. BImSchV (Verordnung über Immissionswerte für Luftschadstoffe) oder die 33. BImSchV (Verminderung von Sommersmog, Versauerung und Nährstoffeintragsverordnung).

Die Technische Anleitung Luft (TA-Luft) beinhaltet konkrete Vorgaben (Vorschriften, Grenzwerte, Abstandsregelungen usw.) für die immissionsschutzrechtliche Beurteilung von genehmigungsbedürftigen Anlagen.

2001 wurde die IVU-Richtlinie in nationales Recht umgesetzt. In die Diskussionen der Besten Verfügbaren Techniken (BVT) eingeflossen sind Techniken, die im Rahmen eines BMBF-Projektes aus den geförderten Entwicklungen ausgewählt wurden (UBA 2008d) Zusammenfassungen der Anforderungen an die BVTs zur Minderung der Emissionen liegen meist in deutscher Sprache vor (UBA 2008a).

Weiterführende Informationen zur Historie der Luftreinhaltung und zu den einzelnen Gesetzen sind z.B. den Internetseiten der Landesämter für Umweltschutz, des Umweltbundesamtes oder verschiedener Fachfirmen zu entnehmen (LfU Bayern 2004; UBA 2008b; UWS 2008).

Neben Förderprogrammen und entsprechenden Projekten, die sich auf die Minderung der Emissionen/Immission von Luftschadstoffen oder die Entlastung der Umwelt allgemein konzentrieren, wirken sich zahlreiche andere Förderprogramme indirekt emissionsmindernd aus. Dies sind vor allem Programme die zur Substitution der fossilen Energieträger und/oder deren effizienterer Nutzung dienen sowie Klimaprogramme. Darüber hinaus können sich bspw. Programme zur Schonung endlicher Ressourcen, zur effizienteren Gestaltung von Produktions- und landwirtschaftlichen Prozessabläufen, für die Entwicklung neuer Technologien und Umsetzungen aus der Bionik oder für die Bereiche Verkehr, Bausanierung usw. auf die Emissionen mindern auswirken. Der Verbreitung möglicher Maßnahmen mit emissionsminderndem Effekt dienlich sind Förderprogramme, welche die Zusammenarbeit in der Forschung, zwischen Forschung und Praxis und von Betrieben untereinander fördern.

Im Folgenden sind Förderprogramme aufgeführt und weitgehend keine einzelnen Projekte. Einige weitere Programme sind in Zusammenhang mit den entsprechenden Maßnahmen im Text erwähnt.

Bund Fachprogramme	
PFT	Forschung für die Produktion von morgen
mehrere	Innovation und neue Energietechnologien (5. Energieforschungsprogramm)
PTJ	Biotechnologie
VDI/VDE - IT	Mikrosystemtechnik
VDI TZ	Optische Technologien
VDI TZ	KMU-innovativ- Programme. Optische Technologien
PTJ	Schifffahrt und Meerestechnik
Bund Förderung	
KfW	Anschaffung emissionsarmer schwerer Nutzfahrzeuge
KfW	KfW- Umweltprogramm – Investitionskredite für Umweltschutzmaßnahmen
KfW	CO ₂ -Gebäudesanierungsprogramm (Kredit / Zuschuss)
KfW	KfW-Kommunalkredit – Energetische Gebäudesanierung
KfW	Sozial Investieren – Energetische Gebäudesanierung
KfW	Wohnraum Modernisieren
KfW	Ökologisch Bauen
KfW	Solarstrom erzeugen (kleine Investitionen)
BAFA	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
BAFA KfW	Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm)
dena	Exportinitiative Erneuerbare Energien
mehrere	Public Private Partnership – Entwicklungspartnerschaften mit der Wirtschaft
DBU	Umweltschutzförderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung	
	Klimaprojekte wie „Hightech-Strategie für Klimaschutz“, „klimazwei - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ einschließlich des Aktionsprogramms Forschung zum Klimawandel, Regionalwettbewerb KLIMZUG
BAFA	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWK)
PTJ	Biotechnologie-Chancen nutzen und gestalten und Grundlagenforschung Energie 2020+/ BioEnergie 2021
DLR	Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien-BIONA
PTJ DLR	FONA: Forschung für Nachhaltigkeit (Fachprogramm): u.a. Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Rohstoffintensive Produktionsprozesse
PTJ	Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft (WING)
PFT	Forschung für die Produktion von morgen: Ressourceneffizienz in der Produktion
PTJ	KMU-innovativ: Ressourcen- und Energieeffizienz
PFT	KMU-innovativ: Produktionsforschung
VDI-TZ	KMU-innovativ: optische Technologien
DLR	KMU-innovativ: Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)

BMBF (Fortsetzung)	
PTJ	KMU-innovativ: innovative Biotechnologie - BioChance
VDI TZ, PTJ	KMU-innovativ: Nanotechnologie - NanoChance
VDI TZ	Nanotechnologie (Fachprogramm)
VDI/VDE - IT	Innovations- und Technikanalyse (ITA)
PTJ	Hightech-Strategie/Innovationsinitiative Neue Länder „Unternehmen Region“/Forschung für den Markt im Team (ForMaT)
IB	Internationale Zusammenarbeit in Wissenschaft und Forschung
DLR	EU-Zentralasienstrategie: Zusammenarbeit mit Ländern Zentralasiens, des Südkaukasus, sowie mit Moldau und Weißrussland in Wissenschaft, Technologie und Innovation
DLR	Deutsch-Argentinische Zusammenarbeit
DLR	Innovationen und Dienstleistung (Fachprogramm)
BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz	
BLE	Innovationsförderung des BMELV (Fachprogramm)
BLE	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Agrarbereich für Umweltschutz (FER-BMELV)
BLE	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie Maßnahmen zum Technologie- und Wissenstransfer im ökologischen Landbau
FNR	Markteinführungsprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ – Einsatz von biologisch schnell abbaubaren Schmierstoffen und Hydraulikflüssigkeiten auf Basis nachwachsender Rohstoffe
LR	Sonderkreditprogramm Umweltschutz und Nachhaltigkeit
BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung	
WSD	Förderprogramm für emissionsärmere Dieselmotoren in Binnenschiffen
BBR	Zukunft Bau 2008
BMWFi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	
	Mobilität und Verkehr (Fachprogramm)
mehrere	Exportinitiative Energieeffizienz
KfW	Sonderfonds Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) <ul style="list-style-type: none"> - Energieeffizienzberatung - ERP-Energieeffizienzprogramm
HTGF	High-Tech Gründerfonds
VDI/VDE - IT	Förderung von innovativen Netzwerken (InnoNet)
demea	Förderung von Netzwerken zur rentablen Verbesserung der Materialeffizienz primär in kleinen und mittleren Unternehmen (NeMat)
AiF	Initiativprogramm Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen (ZU-TECH)
BAFA	Innovativer Schiffbau sichert wettbewerbsfähige Arbeitsplätze
DLR	Luftfahrtforschungsprogramm (Fachprogramm)

BMW (Fortsetzung)	
	Klimaprojekte wie z.B. „Wirtschafts- und Arbeitsmarktpotentialen anspruchsvoller Klimaschutzmaßnahmen“ „Energieeffizienz als Schlüssel für ein integriertes Klima- und Energiekonzept“ „Klimaschutz durch Begrenzung des Kühlbedarfs von Gebäuden“ sowie das Reduktionsprogramm zur Minderung der Emission fluorierter Treibhausgase (F-Gase)
KfW	Demonstrationsvorhaben zur Verminderung von Umweltbelastungen (Umweltinnovationsprogramm)
PTJ	5. Energieforschungsprogramm: <ul style="list-style-type: none"> - Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien - Forschung und Entwicklung im Bereich „Rationelle Energieverwendung, Umwandlungs- und Verbrennungstechnik“ - 100% Erneuerbare Energien Regionen
PTJ	Solarthermie2000plus

3.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen

Wie beschrieben liegen die Schwerpunkte der Emissionen, abgesehen von der Energieerzeugung und -umwandlung, vorwiegend in

- Industrieprozessen einschließlich dem Umschlag staubender Güter,
- der Herstellung und Nutzung lösemittelhaltiger Produkte sowie in
- der Landwirtschaft.

Grundsätzlich können technische Maßnahmen der Emissionsminderung an verschiedenen Punkten ansetzen, anhand derer im Folgenden Beispiele für obige Emissionsschwerpunkte behandelt werden:

1. **Modifizierung, Minderung oder Substitution der Produkte bzw. der Einsatzstoffe und Hilfsmittel**, welche die Emissionen in der Produktion oder Nutzung entscheidend beeinflussen
2. **Modifizierung oder Substitution der eingesetzten Technik**, verstärkter Einsatz der Mess-, Steuer-, Regeltechniken (integrierter Umweltschutz)
3. **Behandlung der Abgase/Abluft** einschließlich der hierfür erforderlichen Überwachungs- und Regeltechnik (additiver Umweltschutz)

Die Modifikation oder Substitution von Produkten oder Einsatzstoffen bzw. Hilfsmitteln beinhaltet in starkem Maße den Aspekt der Schädlichkeit und der hohen Sekundärbelastung im Kapitel 6 „Schonung endlicher Ressourcen“. An dieser Stelle werden daher nur ergänzende Aspekte behandelt.

Auf Grund der Vielfalt der Emittenten steht eine Vielzahl von jeweils angepassten Möglichkeiten zur Reduktion der Luftschadstoffe zur Verfügung. Dies gilt insbesondere für Maßnahmen zur Optimierung des Prozessablaufes, des Energie- oder Rohstoffeinsatzes sowie der Einsatz der Querschnittstechnologien (z.B. Nano- oder Biotechnologie). Häufig ist hier die Emissionsminderung nur ein Nebeneffekt z.B. der effizienteren Nutzung von Ressourcen,

demzufolge die Maßnahmen auch weniger unter dem Emissionsminderungsaspekt publiziert und bekannt werden. Aber gerade im bewussten Übergang von der Philosophie des „additiven Umweltschutzes“ hin zum „integrierten Umweltschutz“ mit der hierfür erforderlichen engen und innovativen Zusammenarbeit von Grundlagen-/Angewandter Forschung und Praxis, werden Deutschland langfristig die besten internationalen Marktchancen im Bezug auf Umwelttechniken eingeräumt (Legler et.al. 2007).

Für die Abgas-/Abluftreinigung als nachgeschaltete Maßnahme bedeutet dieser Übergang zwar eine Verminderung der Einsatzbereiche und des Umfanges, andererseits aber auch, dass zunehmend eher problematische Fälle, wie z.B. die quantitative Abscheidung feinsten Partikelfractionen, übrig bleiben (FA-GAS 2008). Der Anspruch an die Qualität nachgeschalteter Maßnahmen wird daher steigen. Schon jetzt können Abluftreinigungsmaßnahmen sowohl vom technischen/apparativen wie vom finanziellen Aufwand erhebliche Belastungen für den einzelnen Betrieb bedeuten. Daher werden ebenfalls preiswertere/effizientere Techniken nachgefragt werden.

Unter verschiedenen Aspekten überschneidet sich die Problematik der Luftschadstoffe mit den Maßnahmen der anderen betrachteten Handlungsfelder. So tragen Luftschadstoffe wie NO_x oder NMVOC zum Treibhauseffekt bei. Je nachdem in welcher Luftschicht sich Aerosole befinden reduzieren sie die Sonneneinstrahlung oder deren Reflexion von der Erdoberfläche und wirken somit reduzierend oder steigernd auf die Temperatur der Erde (vgl. Kapitel 1 „Klima“). Immission und Deposition der Luftschadstoffe können Ökosysteme durch Nährstoffanreicherung oder Versauerung schädigen (vgl. Kap. 4 „Bodenschutz“ und Kap. 5 „Wasserschutz“) und hierdurch zu Veränderungen/Verarmung der Artenzusammensetzung führen (vgl. Kapitel 8 „Biodiversität“).

Umgekehrt sind beispielsweise Böden, insbesondere deren Nutzung in der Landwirtschaft, stehende oder fließende Gewässer und Abfälle sowie deren Behandlung auch Emittenten von Luftschadstoffen. Eine Reduzierung von Luftschadstoffen kann demnach auch in diesen Kompartimenten angestoßen und erzielt werden. Schließlich wirken sich Maßnahmen zur effizienteren Ressourcennutzung vielfach mindernd auf die Emissionen der Luftschadstoffe aus (vgl. Kap. 6 „Schonung endlicher Ressourcen“).

3.3.1 Modifizierung, Minderung oder Substitution der Produkte oder der Einsatzstoffe/Hilfsmittel

Industrieprozesse

Ansatzpunkt zur Verminderung der Emissionen durch Verminderung des Materialbedarfs sind die Miniaturisierung von Bauteilen oder Produkten bei gleicher Leistung und Funktion, die Erhöhung der Materialeffizienz (z.B. innovative Stahlprodukte, Metallschäume, Metallfaserverbundstoffe, Nanokomposite) sowie bspw. zementsparende Konstruktionen und alternative Betonwehungen, welche Stahl oder Stahlbeton teilweise vollständig substituieren können. Diese Möglichkeiten werden im Kapitel 6.3.2 ausführlich beschrieben.

Aufgrund steigender Energiepreise werden in energieintensiven Branchen vermehrt Ersatzbrennstoffe eingesetzt. Das entsprechende Produktionsverfahren ist hierauf abzustimmen auch um eine Verschlechterung der Emissionssituation zu vermeiden. So wird untersucht

wie der Ausbrand von Ersatzbrennstoffen (z.B. in Drehrohröfen der **Zementindustrie**) und damit sowohl der Energieverbrauch wie auch die Emissionen durch eine optimale Anpassung der Fördertechnik an das Ausbrandverhalten optimiert werden können (baulinks 2007). Vor einer Verwendung von Abfallstoffen als Ersatzbrennstoff ist dessen Sortierung z.B. im Hinblick auf Schwermetall- und Chlorgehalte meist entscheidend für die Emissionen. In der Regel werden durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen angepasste „additive“ Technologien erforderlich, um die gesetzlichen Emissionsvorgaben zu erfüllen (vgl. 2.2.3 Behandlung der Abgase/Abluft, Anwendungsbeispiel Zementindustrie). Als spezifische Quecksilber-Emissionsminderungsmaßnahmen stehen bei Verwendung von Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken die Koks-Adsorption oder die selektive Abscheidung im Wäscher, bei Zementwerken die Staubausschleusung zur Verfügung (Fehrenbach et al. 2006; Fehrenbach et al. 2007).

In einer der energieintensivsten und emissionsträchtigen Branchen, der **Eisen- und Stahlherstellung** konnte in den vergangenen Jahren durch die Modifizierungen der Reduktionsmittel, insbesondere durch die Verwendung von Einblaskohle, der Energieverbrauch und die hiermit verbundenen Emissionen vermindert werden (Stahl-online 2008).

Lösemittelhaltige Produkte

Die Produktpalette der lösemittelhaltigen Produkte ist sehr vielfältig, ebenso wie deren Einsatz- und Anwendungsbereiche. Etwa 68% der Anwendung der **Aerosolsprays** entfällt auf Deodorantien, Haarsprays, Haarschaum, etwa 6% auf Haushaltsprodukte. Der verbleibende Rest wird in sehr vielfältigen Anwendungen wie Körperpflegemittel, Farben, Lacke und pharmazeutische Sprays genutzt.

Ideal wäre der Verzicht auf Sprays, z.B. durch einen Konsumentenwechsel von Deosprays zu Deoroller. Teilweise treten hier jedoch andere Probleme in den Vordergrund wie für das Beispiel Deoroller die Hygienefragen. Der Übergang zu Pumpsprays eröffnet die Option für nachfüllbare Flaschen und damit für die Reduktion von Abfall bzw. die Minderung des Ressourcenbedarfs für die Produktion neuer Behälter. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung anderer lösemittelfreier Treibgase wie z.B. Luft, Stickstoff, auch die Treibhausgase CO₂ und N₂O werden genannt. Eine Umstellung ist jedoch nicht für jedes Produkt ohne weiteres machbar, z.B. dann wenn das Produkt NMVOC gleichzeitig als Lösemittel benötigt. Ggf. sind vollständige Neuentwicklungen der Produkte erforderlich. In der Regel müssen Veränderungen in der Produktionstechnik realisiert werden (UBA 2007c).

Die deutsche **Lackindustrie** (DLI 2007) weist darauf hin, dass in den letzten 20 Jahren rund 2,74 Mio. t Lösemittel durch Produktänderungen und Neuentwicklungen eingespart werden konnten. Ohne organische Lösemittel kommen Pulverlacke, Silikatfarben und -putze sowie z.B. UV-Lacke aus. Dispersionsfarben enthalten weniger als 5% organische Lösemittel, kunstharzgebundenen Putze, Grundierungen und Elektrophoreselacke, weniger als 20%, Wasser-, Dispersionslacke und Very High Solids (festkörperreiche Lacke), bis zu 30%, High Solids und Autoreparatur-, Möbel- und Holzlacke, Elektroisolier-, Coil-Coating-Lacke (für die Beschichtung der Stahl oder Aluminiumbänder beim Hersteller), Maschinen- und Speziallacke bis zu 55% Lösemittel. Demnach sind insbesondere in der Metalllackierung und in Lacken für den Bau- und Möbelbereich die höheren Lösemittelanteile zu finden.

Die „Decopaint“-Richtlinie (2004/42/EG) fordert daher Maßnahmen zur Verminderung der Lösemittlemissionen insbesondere für Bauanstriche und in Autoreparaturwerkstätten. Nicht immer lassen sich jedoch befriedigende Alternativen finden. So werden wasserbasierte Lacke für den Lkw-Bereich als nicht ausreichend strapazierfähig bezeichnet. Bei Verwendung der Wasserlacke in der Metallbearbeitung, im Innenausbau oder bei der Holzbehandlung sind längere Trocknungszeiten zu berücksichtigen. Außerdem sind ggf. verschiedene Anlagen- und prozesstechnische Besonderheiten bei der Umstellung auf Wasserlacke zu beachten (Umweltschutz-BW 2008). Im Maschinenbau ist auch der Einsatz von Pulverlacken⁸ denkbar, allerdings um den Preis erheblicher Investitionen. Im Innenausbau und Schreinerhandwerk bieten teilweise Wachse und Öle oder UV-Lacken eine Alternative. Die Umsetzung der Richtlinie in der EU durchleuchtet ein Projekt „Generaldirektion Umwelt“ der Europäischen Kommission. Ziel dieses Projektes ist es auch Lösemittelhöchstmengen für Kfz-Reparaturlacke ab 2010 vorzuschlagen und hierbei die ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen zu berücksichtigen (Ökopol 2008).

Im **Bogenoffsetdruck** sind die Umstellung auf höher siedende Reinigungsmittel, Reduzierung des Isopropanolanteils im Wischwasser und die sorgfältige Handhabung dieser Mittel Ansatzpunkte zur Verminderung der NMVOC-Emissionen. Die längere Verweildauer der höhersiedenden Produkte ist im Ablauf zu berücksichtigen und das Personal zu schulen. Für ältere Maschinen sind die Mittel gegebenenfalls nicht anwendbar. Auch eine Minimierung der Reinigungslösungen beim Siebdruck erfordert eine Veränderung der Arbeitsabläufe. Digital mit Laserdruck bedrucktes Papier bereitet teilweise im Deinking-Prozess (Entfärben des Papierbreis im Recyclingprozess) Schwierigkeiten, da je nach den Parametern beim Druck (z.B. Temperatur, Verweilzeit, Anpressdruck) sich der Toner nicht vollständig vom Papier löst und im Endprodukt als schwarze Flecken im Papier sichtbar ist. Die hydrophilen kleinen Partikel der wasserbasierten Farben lösen sich im Deinkingprozess auf und lassen sich nicht entfernen. Daher ist derartig bedrucktes Papier nicht für das Recycling zu weißem Umweltschutzpapier einsetzbar und würde bei sehr breitem Einsatz im Druckgewerbe diesen Bereich des Recyclings ggf. unrentabel machen. Mit den verschiedenen Parametern des Deinking-Prozesses und dessen Optimierung beschäftigt sich ein mehrjähriges BMBF-Verbundprojekt (Putz 2005).

Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz lösemittelhaltiger Produkte in der **Oberflächenreinigung** z.B. in der Metallbearbeitung vor Beschichtungsverfahren wie Lackieren, Galvanisieren oder Feuerverzinken. Rost, Schmutz, Fette oder Öle sind zu entfernen. Die sparsamere Verwendung von Hilfsstoffen wie Ziehfette, Schneideöle oder gegebenenfalls der Einsatz trockener Verfahren kann den Bedarf an Oberflächenreinigung vermindern, verlagert aber z.B. beim Trockenverfahren die Emission der Metallstäube vom Öl in die Luft und erfordert hier eine veränderte Absaugung und Abluftbehandlung. Wird im nachfolgenden Prozess genietet oder geschraubt, ist eine weniger intensive Reinigung erforderlich wie z.B. für Klebevorgänge, bei Lötvorgängen können Spezialflussmittel verwendet werden. Korrosionsschutz erübrigt sich unter Umständen durch kürzere Lagerzeiten (umweltschutz-bw 2008). Der Ein-

⁸ Pulverlacke werden meist mittels elektrostatischer Sprühverfahren aufgetragen und durch Wärmeeinwirkung (meist 160 bis 200°C) zu einem geschlossenen Film verschmolzen. Das Verfahren eignet sich für leitfähige und hitzebeständige Materialien (Umweltschutz-BW 2008).

satz der Mess- und Regeltechnik zur Optimierung des Reinigungsvorganges in Lösemittelbädern und der Wiederverwendung von Lösemitteln ist in Kapitel 6.3.5 beschreiben.

Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist nicht nur Hauptemittent für NH_3 , sondern auch wesentlich an der Emission der Klimagase Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) beteiligt. Ein großer Teil der Emissionen ist auf die Rinder-, Schweine- und Geflügelhaltung (direkte Emissionen des Viehs, insbesondere der Rinder; Veränderung der Landnutzung zur Viehfuttererzeugung) und den Einsatz von Nitratdüngern (sowohl Mineraldünger als auch Wirtschaftsdünger wie Gülle und Mist) zurückzuführen.

Eine Reduzierung des Fleischkonsums wäre ein Ansatzpunkt, dem jedoch der wachsende Fleischkonsum bei sich bessernder ökonomischer Ausgangslage, vor allem in den Schwellenländern, entgegensteht. So verdoppelte sich die weltweite Fleischproduktion gegenüber den 80er Jahren auf fast 260 Mio. t. In China steigerte sich die Produktion im gleichen Zeitraum um fast das 5fache von 15 auf 74 Mio. t (IFA 2006).

Im Ackerbau ist eine Verminderung der Nitratdüngereinsatzes durch bedarfsgerechte Düngung (vgl. 2.2.2) oder durch ökologischen Landbau zu erreichen (UBA 2007d). Darüber hinaus kann eine geeignete Fruchtfolge (z.B. mit einem Anteil an stickstoffspeichernden Leguminosen) den Düngerbedarf reduzieren. Der ökologische Landbau verzichtet auf mineralische und leichtlösliche Düngemittel und wird im Rahmen des Programms der Bundesregierung zur Senkung der Ammoniakemission aus der Landwirtschaft gefördert. Gewisse Nutzungsänderungen, insbesondere die Umwandlung von Wald in Ackerflächen setzt Kohlenstoff/ CO_2 frei. Einerseits gilt es solche Umwandlung zu vermeiden, andererseits sieht die Bundesregierung im Inland eine Förderung der extensiven Grünlandnutzung, von Blühflächen und -streifen sowie eine mehrjährige Stilllegung von Ackerland vor (UBA 2007d). Die Vermeidung von offenen und unbepflanzten Böden durch Zwischenfruchtanbau oder Schutzbepflanzung vermeidet Erosion und Auslaugung der Böden (vgl. Kapitel 5 „Bodenschutz“).

Querschnittstechnologien

Auch die weiße **Biotechnologie** bietet zahlreiche Ansatzpunkte zur Optimierung der Oberflächenbehandlung, wie z.B. die mikrobielle Oberflächenentfettung in der Feuerverzinkindustrie (HS Mannheim 2008). Die biologische Entrostung mittels Eisen-Chelatoren vermindert den Einsatz von Schutzfetten (Kunz 2005).

Aus dem Bereich der **Bionik** (ausführliche Beschreibung in 6.3.2) stammen verschiedenartige Ansätze Anstrichmittel und damit auch deren Emissionen zu ersetzen. Beispiele sind die Antifoulingbeschichtungen⁹ nach dem Vorbild der Haihaut („Schuppen“) oder dem Vorbild des Delphins (Gelschicht) (HS Bremen 2008) Ein anderes Projekt beschäftigt sich mit dem Kleben ohne Klebstoff nach dem „Gecko-Prinzip“. Geckos und viele Insekten nutzen schwa-

⁹ Fouling ist z.B. die unerwünschte Anlagerung von Muscheln oder Seepocken an Schiffsrümpfen. Hierdurch wird die Korrosion beschleunigt. Außerdem erhöht sich der Energieverbrauch durch das höhere Gewicht und den höheren Strömungswiderstand.

che elektrostatische Anziehungskräfte zwischen Atomen, die Van-der-Waals-Kräfte, um z.B. kopfüber an Decken zu laufen. In diesem Projekt spielen Polymeroberflächen im Mikro- und Nanobereich eine wesentliche Rolle. Wieder verwendbare Klebestreifen bis hin zu „Gecko-Schuhen“ für Roboter könnte man sich als Anwendungsbereiche vorstellen (Volkswagenstiftung 2007).

Durch den Einsatz der **Nanotechnologie** ist häufig eine energie- und ressourceneffizientere Produktion realisierbar, aber auch die Vermeidung hoher Emissionen durch veränderte Produkte ist denkbar. Ein Beispiel sind ökoeffiziente Nanolacke, die mit einem deutlich geringeren Anteil an Löse- und Bindemitteln auskommen, in der Anwendung auf eine Chromatierung verzichten können, sowie darüber hinaus in geringerer Schichtdicke aufgebracht werden (Steinfeldt 2007). Nanobeschichtungen mit katalytischen Eigenschaften sind in Pkw-Abgaskatalysatoren zu finden, ebenso z.B. in der Styrolsynthese oder auch in der Baustoffbeschichtung. Beispielsweise wird untersucht inwieweit eine Beschichtung von Baustoffen mit nanoskaligem, kolloidal gelöstem Titandioxid (TiO_2) zu einer photokatalytischen Zersetzung von Luftschadstoffen (z.B. Formaldehyd in Innenräumen, Reaktion von NO_x zu Salpetersäure) genutzt werden kann. Organische Stoffe werden abgebaut und hierdurch auch eine Ansiedlung von Algen, Flechten und Moosen an Hausfassaden verhindert (Stephan 2007). Auch die Abtötung von Bakterien wird beschrieben. Entscheidend für die Wirksamkeit ist eine ausreichende UV-Bestrahlung (VDI/ZTC 2007). Zahlreiche Anwendungen speziell für die Umweltentlastung oder mit einem entsprechenden Sekundäreffekt (z.B. über Verminderung des Energieverbrauchs) auf die Umweltentlastung sind denkbar, in Erforschung oder bereits in der Anwendung. Diese Aspekte sind u.a. Bestandteil des Forschungsförderungsplans „Nano-Initiative Aktionsplan 2010“ (BMBF 2006a).

Eine langfristig breite Anwendung der Nanotechnologie wird wesentlich von der intensiven Forschung einerseits hinsichtlich Verbreitung der Partikel bei der Herstellung, Nutzung (z.B. Abrieb), Entsorgung oder beim Recycling einschließlich der Verlagerung in andere Medien, andererseits hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auf die Natur und den Menschen abhängen.

Die Europäische Kommission verabschiedete am 7.02.08 einen Verhaltenskodex für verantwortungsvolle Forschung in Nanowissenschaften und Nanotechnologie. Bis 20. Juni 2008 sind die Länder aufgefordert die EU-Kommission über ihre Maßnahmen zu informieren, 2010 ist eine erste Prüfung des Verhaltenskodexes vorgesehen (EU 2008). Dies ist umso wichtiger, da Tierversuche darauf hinweisen, dass diese Nanopartikel z.B. in sich bereits gesundheitsschädigendes Potential im Hinblick auf die Bildung von Plaques in den Arterien (Arterienverkalkung) beinhalten (UCLA 2008). In Deutschland wird im Rahmen des Forschungsprojektes NanoCare die Toxizität von Nanopartikeln untersucht (BMBF 2006b). Aus diesem Projekt und anderen Projekten werden z.B. auch Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung der Konzentration von Nanopartikeln am Arbeitsplatz finanziert (IUTA 2008). Mit der biologischen Wirksamkeit der Nanopartikel, die aufgrund ihrer Größe auch in Zellen und Zellkerne eindringen können beschäftigt sich das Schwerpunktprogramm „Bio-Nano-Responses“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 2006).

3.3.2 Modifizierung oder Substitution der eingesetzten Technik (integrierter Umweltschutz)

Grundsätzlich sind emissionsarme Technologien, die eine Verminderung oder Vermeidung der Schadstoffemissionen in den Prozessablauf integrieren einer Nachbehandlung vorzuziehen. Nachgeschaltete additive Technologien sollten den nicht mehr vermeidbaren Emissionen vorbehalten bleiben.

Industrieprozesse

Möglichkeiten einer integrierenden Prozesstechnik sind Verfahrensoptimierungen, die eine bessere Ausnutzung der Einsatzstoffe und des Energieverbrauches beinhalten und i.d.R. eine angepasste Mess-, Steuer- und Regeltechnik erfordern. In zunehmendem Maße greift hier die Mikrotechnik sowie eine immer stärker werdende Zusammenfassung der Steuerung in zentrale, häufig funkgesteuerte Regelungen ein (vgl. Kapitel 2.3.5). Andere Gesichtspunkte sind die Gewinnung von Koppelprodukten, die anderweitig Verwendung finden können, die Abgasrückführung und Nachverbrennung, die Wärmerückgewinnung aus Abgasen zur Vorwärmung des Materials oder der Brennerzuluft, Abhitzeessel oder kaskadenförmige Nutzung heißer Abgase zum Beheizen anderer Prozesse (ggf. mit einer Heißgaszwischenreinigung) und andere Verfahren mehr. Low-NO_x-Brenner senken die NO_x-Emissionen im Abgas.

Je effizienter die Abgasnachbehandlung der Emissionen an Punktquellen ist, umso mehr fällt der Anteil der diffusen Quellen an der Gesamtemission ins Gewicht. Insbesondere an Flanschverbindungen, Verdichtern u.ä. können Abdichtungen erhebliche Emissionsminderungen erreichen. Gezielte Absaugung von Abgasen bis hin zur Kapselung von Anlagenteilen oder Einhausen von Anlagen und ggf. die Erzeugung von Unterdruck erlauben z.B. eine gezielte Behandlung der Abgase. Darüber hinaus lassen sich Beladungsvorgänge (z.B. Beschicken der Schmelzöfen in der Eisen- und Stahlherstellung, Gaspendelanlagen beim Verladen leichtflüchtiger Stoffe) sowie An- und Abfahrvorgänge optimieren und hierdurch diffuse Schadstoffemissionen vermindern (EIPPC 2008).

Die Optimierungen der Prozessführung, gravimetrische Aufgabesysteme für feste Brennstoffe und optimierte Kühleranschlüsse zu Verminderungen von NO_x, SO₂ und Staubemissionen beim Klinkerbrennen können in der **Zementindustrie** zu Emissionsminderungen führen. In Drehrohrofenanlagen mit Zyklonwärmer, Calcinator und Tertiärluftleitung ist eine gestufte Verbrennung zur NO_x-Minderung einsetzbar. Die Abluftreinigung ist hierauf einzustellen (U-BA 2007c). Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz eines Low-NO_x-Brenners.

In der **Stahlerzeugung** wird das integrierte Hüttenwerk mit einem Energieverbundsystem, d.h. mit einer kaskadenförmigen Verwendung der Abgase und deren Wärme, beschrieben (Stahl-online 2008). Nach einer Zwischenaufbereitung (um Probleme und Schäden an den nachfolgenden Anlagen zu vermeiden) können die schwefelarmen Koksofen-, Hochofen-, und Konverterabgase zum Beheizen weiterer Verarbeitungsstufen genutzt werden und senken hierdurch sowohl den Energieverbrauch als auch den Umfang der zu behandelnden Abgasmengen. Rechnerunterstützte brennstoffbeheizte Wärmeöfen in Walzwerken und eine weiterentwickelte Brenner- und Wärmerückgewinnungstechnik können den Energieverbrauch senken.

Ebenso wie die Zement- (vgl. 3.3.3) wird auch die Stahlproduktion durch den Bauboom insbesondere in Ländern mit wachsendem Wohlstand angeregt. Weltweit wuchs die gesamte Stahlproduktion von 1990 bis 2006 um 61% auf 1.244 Mio. t Rohstahl. China produzierte hiervon allein 422,7 Mio. t und damit mehr als die nächsten vier größten Stahlproduzenten der Welt zusammen (IISI 2008). Nach Schätzungen des größten Stahlproduzenten in der Nahostregion steigerte sich hier der Stahlverbrauch in 2006 und 2007 um 8,3% p.a. und wird für 2007 mit 40,7 Mio. t angenommen. Die Produktion an Bewehrungsstahl für den Baubereich der Region könnte sich ausgehend von 2006 bis 2015 auf 21 Mio. t verdreifachen. Fast die Hälfte des Gesamtvolumens laufender oder geplanter Bauvorhaben entfällt auf die Vereinigten Arabischen Emirate (VAE). Maschinen und Anlagen für die Stahlverarbeitung werden vorwiegend aus dem Ausland gekauft, wobei Technik und Know-how aus Deutschland besonders gefragt sind (Industrieforum 2008). Weiterhin wird mit einer Konzentration der Stahlindustrie durch Transaktionen und Konsolidierungen vor allem in Ost- und Mitteleuropa erwartet. Besonders trifft dies auf China zu, da die stark zersplitterte und unkontrolliert wachsende Stahlindustrie hier das hochwertige Segment nur schwer abdeckt. Diese Umstrukturierungen insbesondere in den BRIC-Ländern darüber hinaus aber auch in Ländern wie Vietnam und Indonesien generieren große Märkte für den Hütten- und Walzwerksneu- und -ausbau. Als kritisch werten die deutschen Großanlagenbauer und Komponentenlieferanten insbesondere die Entwicklungen der Preise und Verfügbarkeit der Rohstoffe sowie die Verfügbarkeit geeigneter Arbeitskräfte (VDMA 2008).

Die traditionelle **Verarbeitung der flüssigen Metalle** durch Gießen von Urformen, die dann als Halbzeuge und Zwischenprodukte weiterverarbeitet werden, lässt sich durch endkonturnahe Fertigung von Urformen („Near-net-shape“-Technologien) deutlich vereinfachen. Derartige Verfahren dienen in erster Linie der Minderung des Ressourcenverbrauchs und werden daher im Kapitel 6.3.5 beschrieben.

Zur Optimierung der **Glasschmelze** und Reduzierung der NO_x-Emissionen sind nach einer Untersuchung (UBA 2007c) verschiedene Brennervarianten in Entwicklung oder im Labormaßstab in Erprobung (Ultra-Low-No_x-Brenner, High-Luminosity Oxy-Gas-Brenner, Advanced Glas Melter (AGM), Flex-Melter, Sorg Low-NO_x). Die einzige deutsche Pilotanlage für Flachglas mit dem FENIX-System wurde außer Betrieb genommen. Eine Verfügbarkeit wird frühestens mittelfristig bei quergefeuerten Brennern angenommen. Eine wesentliche Minderung wenn nicht sogar Vermeidung der SO₂- und NO_x-Emissionen wird vom Plasmaschmelzverfahren erwartet. Allerdings existiert hierzu bisher noch keine funktionierende Pilotanlage.

Die TA-Luft (TA-Luft 2002, Kapitel 5.2) empfiehlt zur Verminderung der Staubemissionen beim **Umschlag staubender Güter** (Transport und Verladung) dichte Greifer und geschlossenen Transportsysteme zu verwenden, geringe Fallstrecken einzuhalten und Konusaufsätze bei Senkrechtbeladung einzusetzen. Windgeschützte Lagerung von Schüttgütern, ggf. Befeuchten oder Abdecken der Oberfläche bis hin zur geschlossenen Lagerung vermindern die Staubaufwirbelung. Die Verschmutzung der Fahrwege z.B. außerhalb einer Halle kann durch Überfahrroste oder Reifenwaschanlagen vermieden oder durch Kehrmaschinen beseitigt werden.

Lösemittelhaltige Produkte

Eine Verminderung der NMVOC-Emissionen bietet sich beim **Spritzlackieren**. Die Verwendung von HVLP-(high volume low pressure)-Lackierpistolen oder druckreduzierten Hochdruckpistolen vermindert durch konzentriertes Aufsprühen des Lackes auf die Oberfläche in geringerem Arbeitsabstand Materialverluste durch Overspray¹⁰ und erhöht damit den Auftragswirkungsgrad bis zu ca. 20% und mehr (Umweltschutz-BW 2008). Durch die Reduktion des Spritznebels verbessern sich die Arbeitsplatzbedingungen und größere Reinigungsintervalle der Spritzkabine sind möglich. Als positiver Nebeneffekt werden die Abfallmengen durch den geringeren Filtermattenverbrauch oder alternativ die Lackschlammmenge bei der Nassabscheidung reduziert. Bei größeren Lackmengen gleicher Farbe ist auch eine Rückgewinnung des Oversprays durch geeignete Konstruktion der Spritzkabine denkbar.

Oberflächenreinigungsprozesse umfassen eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Darunter fallen z.B. die industrielle Metallentfettung mit Kohlenwasserstoffen, Reinigungsprozesse in der Fertigung elektronischer Komponenten oder in der feinmechanischen Bearbeitung sowie in der Herstellung von Zwei-Komponentenkunststoffen. Auch im Produktfinishing sind Oberflächen zu reinigen, z.B. Fahrzeugen zu entwachsen oder Farben und Lacken zu entfernen (z.B. Abbeizprozesse). Neben den unter 3.3.1 beschriebenen Möglichkeiten der Veränderung der Verfahren zum Oberflächenschutz bieten sich verschiedene Alternativen zur Entfernung der verwendeten Stoffe an. Fallweise sind mechanische Verfahren wie z.B. das Sandstrahlen oder das Hochdruckreinigen mit haftungsvermittelnden Zusätzen (Reinigung von Stahlflächen und beschichteten Pkw-Oberflächen) anwendbar. Thermische Verfahren werden z.B. zur Entlackung eingesetzt. Für organische Verschmutzungen sind z.B. Plasmareinigungsverfahren¹¹ einsetzbar. Ist die Verwendung organischer Lösemittel in größeren Mengen erforderlich, ist der Einsatz der organophilen Nanofiltration zur Entfrachtung des Lösemittel und dessen Kreislaufführung denkbar. Erfahrungen im praktischen Betrieb liegen hier für keramische Nanofiltrationsmembrane vor (Voigt 2007); polymere Nanofiltrationsmembrane sind noch in der Entwicklung (Ebert et. al. 2007) (vgl. auch Kapitel 6.3.5).

Landwirtschaft

Emissionsminderungen in der Viehhaltung sind durch Änderungen in der Betriebsführung zu erreichen. Beispielweise können verbesserte Fütterungs-, Entsorgungs-, und Lüftungsstrategien sowie eine Verbesserung der Futterqualität (Verminderung des Stickstoffgehaltes), eine Optimierung der Einstreumaßnahmen, ebenso Trockenheit und Sauberkeit im Stall und eine Anpassung des Stallklimas (Lüftungsraten, Stalltemperatur) zum Erfolg führen. Die geschlossene Lagerung des Wirtschaftsdüngers, dessen emissionsarme Ausbringung (mit modernen Geräten) und sofortige Einarbeitung in den Boden vermindern die Verbreitung von NH₃-Emissionen ebenso wie die Geruchsbelästigung. Bei Zwangsentlüftung des Stalles kann eine Abscheidung des Staubes erfolgen. Dungstätten für Festmist sollten windgeschützt liegen, Flüssigmistbehälter geschlossen sein (UBA 2007d).

¹⁰ Verluste durch fehlverspritzte Lacke am zu lackierenden Werkstück vorbei.

¹¹ Organischen Verschmutzungen reagieren mit ionisierten Gasen zu CO₂ und Wasser.

Die gemeinsame Agrarpolitik (GAP) im Rahmen der EU zielt auf eine Senkung des „übermäßigen“ Einsatzes des Mineraldüngers, insbesondere des Nitratdüngers, und von Gülle/Mist in der Landwirtschaft. Weltweit ist allerdings ein enormer Anstieg der Verwendung industriell hergestellter Mineraldünger zu verzeichnen. Zwischen 1960/61 und 2005/06 stieg der Verbrauch von 33 Mio. t auf 154 Mio. t (ifa 2006) bzw. 2006/07 auf 164 Mio. t Nährstoff (Heffer 2008), mit weiter steigender Tendenz. Der Anteil des Nitratdüngers beträgt weltweit rund 60% (Heffer 2008). Wesentliche Hintergründe für den Bedarf an Ertragsteigerungen durch Dünger sind das Bevölkerungswachstum, die Zunahme des Fleischkonsums mit dem erhöhten Bedarf an Fläche für den Futtermittelanbau sowie die pro Kopf der Bevölkerung abnehmenden Agrarflächen (Gransee 2007). Soweit für 2006 erfasst, verwendet allein China knapp 30% des industriell hergestellten Mineraldüngers (49 Mio. t Nährstoff) bzw. knapp 32% des Nitratdüngers. An zweiter Stelle liegt Indien mit einem Verbrauch von knapp 14% des weltweit verwendeten Mineraldüngers, bzw. gut 14% des Nitratdüngers. (Heffer 2008). Entscheidend für eine Entlastung der Böden und die Emissionsminderung ist die Einführung der ertragsorientierten Düngung (standort- sowie sorten- und artenangepasste Düngung) mit geeigneten Düngerelementzusammensetzungen.

Eine Reduktion des Nitratdüngereinsatzes würde sowohl die Nitrate im Wasser als auch die Emission von Ammoniak und Distickstoffoxid in die Luft verringern. Das Forschungsverbundprojekt „pre agro“ untersucht in diesem Zusammenhang Möglichkeiten und Auswirkungen des „Precision Farming“, d.h. Einsatz von Hochtechnologien (Sensoren, Bordcomputer, Satellitenortung, elektronisch steuerbare (Anbau-)Geräte) zur optimierten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung der Anbaufläche (vgl. Kapitel 5 Bodenschutz). Konsequenz ist unter anderem ein verminderter Einsatz von Düngemitteln. Andere Projekte z.B. der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) oder des Institutes für ökologischen Agrarwissenschaften (Uni Kassel) beschäftigen sich mit den diversen Detailfragen der Bodenbeschaffenheiten und der optimierten nachhaltigen Bewirtschaftung sowie technologischen Maßnahmen wie z.B. Einsatz der digitalen Bildverarbeitung zur Steuerung von Bodenbearbeitungsgeräten in Abhängigkeit von der Mulchauflage zur Vermeidung von Erosion mit den hieraus resultierenden Gas- und Staubemissionen (Hensel 2007).

Mess- und Regeltechnik

Ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Optimierung des Prozessablaufes und ggf. zur Kontrolle der Emissionen ist der Einsatz von Mess- und Regeltechniken (vgl. auch Kapitel 2.3.5).

Bei immer komplexeren Mess- und Regelaufgaben müssen die einzelnen Komponenten immer kleiner und präziser gefertigt werden. Eng verzahnt mit dem Einsatz der Mikro- und Nanotechnologie zum Messen und Regeln ist die Entwicklung der optischen Technologie. Durch photonische Mikrofertigungstechniken (diodengepumpte Festkörperlaser, Diodenlaser, Kurzpulslaser, EUV-Strahlenquellen) werden bei kurzen Produktionszeiten immer präzisere miniaturisierte Aktoren, Sensoren, Pumpen, Düsen oder Mikrooptiken erzeugt, die sich zu immer komplexeren Mikrosystemen zusammenfügen lassen. Andererseits garantieren präzise optische Messmethoden die Fertigungssicherheit und Genauigkeit (Kompetenznetze 2008).

Der gesamte Bereich der optischen Systeme erwartet bis 2015 einen Zuwachs der Produktion um 8,5% jährlich (2005 Produktionswert 16,2 Mrd. €) und einen Anstieg der Beschäfti-

gung von etwa 34.500 auf 140.000 Beschäftigte (Kompetenznetz 2008). Die Exportquote lag 2005 bei 65%.

3.3.3 Abluft-, Abgasbehandlung (additiver Umweltschutz)

Die Bezeichnung „additive Maßnahme“ suggeriert, dass diese Techniken keinen Bezug zum gesamten Produktionsablauf aufweisen. Wie bereits beschrieben sind die Optimierung der Abluft-/Abgasführung und der Emissionsmassenströme (meist möglichst konzentrierte Abführung der Schadstoffe) als integrierte Maßnahmen in der Produktion aber meist wesentliche Voraussetzungen für eine effiziente und kostengünstige Reinigung. Andererseits kann ggf. eine Wärmerückgewinnung, eine Abgasrückführung oder der Einsatz thermisch nachzubehandelnder Abgase im Motor oder in der Turbine einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (z.B. bei geringer NMVOC-Beladung) zur Kostenreduktion im gesamten Prozess beitragen (Rafflenbeul 2005). Eine solche Gesamtbetrachtung sollte auch die Gesamtbilanz der Schadstoffe und Klimagase, einschließlich eines ggf. erforderlichen zusätzlichen Energieeinsatzes, umfassen. So ist zu vermeiden, dass die gewählte Abluftreinigungstechnik selber zu hohen Emissionen führt.

Bei der Vielzahl der technischen Abgasreinigungsprinzipien liegt im Regelfall die Effizienz in erster Linie an der Auswahl der geeigneten Technik und deren Anpassung an die spezifischen Gegebenheiten vor Ort (Abluftzusammensetzung, Störgrößen, räumliche Verhältnisse, Brand-, Lärm-, Explosionsschutz usw.). Ein hohes Maß integrierter Maßnahmen mit dem Effekt der Luftschadstoffminderung hinterlässt den nachgeschalteten Minderungstechniken in erster Linie jedoch Problemfälle, welche mit den vorhandenen Techniken nicht immer gelöst werden können. Entsprechende Forschungs- und Entwicklung kann hierbei u.a. auf Entwicklungen der Querschnittstechnologien zurückgreifen und diese auf ihre Anwendbarkeit für das konkrete Problem prüfen. Vom Markt gefordert werden in erster Linie effizientere Verfahren, die einen möglichst geringen Energie- und Hilfsmittelverbrauch sowie apparativen Aufwand aufweisen (z.B. Kombination verschiedener Verfahren in einer Anlage) und möglichst geringe Investitions- und laufende Kosten erzeugen.

Exportiert werden die Abgas-/Abluftreinigungstechniken insbesondere in Länder, in denen vergleichbare gesetzliche Regelungen wie in Deutschland, strenge Anforderungen an die Luftqualität setzen. Neben den europäischen Ländern und den USA spielen zunehmend auch die Märkte im Osten und der asiatische Raum eine Rolle (VDMA 2006).

Firmen, die Abluftreinigungstechniken anbieten, weisen meist eine hohe Spezialisierung auf eine Technik auf. Im industriellen Bereich ist zur Erfüllung der gesetzlichen Voraussetzungen meist jedoch eine Technik alleine nicht ausreichend. Insbesondere für den Export werden daher auch Bietergemeinschaften, ggf. zusammen mit Herstellern der Produktionsanlagen, realisiert.

Verfahren

Zur **Abscheidung** von Abgas-/Abluftbelastungen stehen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Verfahren zur Verfügung, die je nach Bedarf auch kombiniert werden können. Sie unterscheiden sich vor allem im Hinblick darauf, ob die abgeschiedenen Luftschadstoffe entsorgt, weiterbehandelt oder zurückgewonnen werden soll.

Ebenso entscheidend ist die Weiterverwendung des Gases. Soll das Gas z.B. zum Heizen eines anderen Prozesses, zur Wärmerückgewinnung oder zur Stromerzeugung in einer Gasturbine verwendet werden, ist meist eine Heißgasfilterung mit geringem Temperaturverlust erforderlich, um nachfolgende Anlagen z.B. vor Erosion durch größere Partikel oder Verbacken mit kleineren Partikeln zu schützen. In anderen Fällen ist eine Abkühlung erwünscht. Beispielsweise wird für das Auskondensieren hoher Konzentrationen leicht flüchtiger Dämpfe und Gase (z.B. Lösemittel-, Benzindämpfe, Fluorchlorkohlenwasserstoffe) wie sie in Abluft- oder Prozessgasströmen chemischer Reaktoren oder der Recyclinganlagen für Kühlschränke vorkommen, ein Verfahren mit tiefkaltem Stickstoff angeboten (Messer 2008).

Für gasförmige Abgasbelastungen bieten sich beispielsweise folgende Behandlungsverfahren an:

- Thermische Nachverbrennung, katalytische (SCR) oder nichtkatalytisch-chemische Verfahren (SNCR) sind z.B. zur VOC-Minderung der Abgase aus Lackierereien oder zur Reduktion der NO_x -Emissionen beispielsweise aus Feuerungsanlagen geeignet;
- Absorptionsverfahren nutzen die Absorptionsfähigkeit des Wassers und ggf. chemischer Zusätze (Chemisorption),
- Adsorptionsverfahren binden die Luftschadstoffe an Adsorptionsmittel wie z.B. Aktivkohle oder Chemikalien (trockene oder quasitrockene Chemisorption)
- Biologische Filter erreichen hohe Abscheidegrade für geringe Konzentrationen organischer Belastungen wie z.B. VOC oder Gerüche. Konstruktionsvarianten sind Biofilter, Biowäscher, Biotropfkörper, Biorieselbettreaktoren oder Biotricklingfilter
- Niedertemperatur-Plasmaverfahren (NTP) eignen sich ebenfalls für geringe Konzentrationen an Schadstoffen. Freie Elektronen mit hoher mittlerer Energie reagieren mit den Schadstoffen und führen durch Spaltung und Oxidation zu den Endprodukten CO_2 und Wasser. Bei Bedarf lässt sich das Verfahren mit katalytischen Methoden kombinieren. Geeignet es für die Entfernung von Gerüchen, organischen Stoffen wie Dioxinen, Cyanen, halogenierten und fluorierten Kohlenwasserstoffen oder auch von Keimen aus der Abluft aus z.B. Tierkörperverwertungsanstalten, Autotunnelabgasen, chemischen Anlagen (Rafflenbeul 1999).

Partikelfilter stehen zur Abscheidung von Partikeln und Flüssigkeitstropfen zur Verfügung:

- Trägheitsabscheider wie Sedimentationskammern, Prallabscheider, Zentrifugalabscheider (Zyklone oder Multizyklone) nutzen die Massenkräfte der Partikel im Fluid zur Abscheidung. Die Abscheider werden jeweils auf einen begrenzten Partikelgrößenbereich ausgelegt. Muss ein breites Spektrum an Partikelgrößen abgeschieden werden, sind mehrere Stufen hintereinander zu schalten.

- Nassabscheider (Wäscher/Nasswäscher/Nassentstauber) erreichen ihre Abscheidewirkung mit Hilfe einer Waschflüssigkeit z.B. zur SO₂-Minimierung nach der Sinterung. Ergänzend können hier z.B. Füllkörper mit speziellen Eigenschaften eingesetzt werden. Ein Beispiel zur Dioxinabscheidung sind Polypropylen/Kohlenstoff-Füllkörper welche die Absorptionsfähigkeit des Kunststoffes für Dioxin mit der Affinität des Dioxins zu Kohlenstoff kombinieren. Dies verhindert den sogenannten „Memoeffekt“, d.h. die Freisetzung des Dioxins bei Änderungen von Prozessparameter wie z.B. einer Temperaturerhöhung (Andersson et.al. 2004).
- Elektroabscheider/Elektrofilter scheiden durch Ionisationseffekte in einem elektrischen Feld die Luftschadstoffe ab. Vorteil ist die Abscheidung sehr feiner Stäube und der Wegfall von Filtermaterialien, Nachteil der sehr hohe Energieverbrauch. Die Abscheidewirkung kann z.B. durch Zugabe von Ammoniak zur Erhöhung der Leitfähigkeit der Stäube verbessert werden. Allerdings haben Elektrofilter konstruktionsbedingt einen Partikelgrößenbereich von 0,5 bis 1µm, der schlecht abgeschieden wird (Abscheidesecke). Dies macht sich besonders bei Trockenfiltern bemerkbar und ist bei entsprechender Staubzusammensetzung zu beachten ist.

Gegenüber den konventionellen großflächigen und energetisch sehr aufwändigen Elektrofiltern konzentriert ein anderes System die Ionisierungsenergie auf einen kleinen Bereich und benötigt hierfür nur etwa 40% der Energie eines vergleichbaren konventionellen Elektrofilters und außerdem deutlich weniger Elektrodenmaterial. Die Abscheidung der Feinstpartikel erfolgt an nachgeschalteten geerdeten Flächen. Feuchte Bestandteile der Abgase kondensieren an den Abscheideflächen, so dass diese durch die ablaufende Flüssigkeit gleichzeitig auch gereinigt werden. Bei trockenen Abgasen werden in Intervallen Sprühdüsen oberhalb der Abscheideflächen betätigt. Es sind große Durchsätze möglich (Paur 2006).

- Filternde Abscheider nutzen den Sperreffekt der Filtermedien und des Kuchens z.B. in Schlauchfiltern zur Staubabscheidung in der Zement-, Kalk-, Gips-, Chemie-, Stahlindustrie. Zusätzliche Einflussgrößen sind Trägheits-, Prall- und elektrostatische Effekte. Filternde Abscheider stehen als Oberflächenfilter (Entstauber) oder Tiefenfilter (Speicherfilter) aus vielfältigen ggf. oberflächenbehandelten Materialien zur Verfügung. Flexible und starre Systeme sind im Einsatz. Auch die Nanotechnologie ist hier mit verschiedenen Materialien und Oberflächenbeschichtungen vertreten (VDI/ZTC 2007, 48). Pre-coatingmethoden der Abluftbeladung oder Katalysatorzugaben erreichen eine gezielte Abscheidung verschiedener Substanzen.

Je nach Anwendung sind vielfältige Mischformen anzutreffen. Z.B. sind Nassabscheider durch entsprechende Zusätze neben der Staubabscheidung auch zum Abscheiden von gasförmigen Verunreinigungen wie auch für feuchte, ölige, klebrige, kondensierende oder zündfähige Abgase und Dämpfe geeignet.

Schwierigkeiten bereitet teilweise die **Mess-, Steuer-, Regeltechnik**. Beispielsweise könnte das Messen und Steuern einer gleichmäßigen Feuchte in der Packung eines Biofilters dessen Wirkungsgrad erheblich steigern, eine gute Lösung ist jedoch noch nicht erreicht. Ein weiterer Forschungsansatz ist die Entwicklung preiswerter, möglichst langzeitstabiler Gassensoren als Messwertgeber für ein Prozessmonitoring der Biogasanlagen. Dieses Ziel verfolgte das Projekt BioMon (VDI/VDE 2000) über die Bestimmung bestimmter Geruchstoff-

klassen mit Schwingquarz-Arrays. Deren Nano-Beschichtungen erlauben die selektive Anlagerung bestimmter Stoffgruppen die zu definierten Schwingungsänderungen führen. Allerdings erwiesen sie sich als sehr sensibel auf Feuchtigkeit, so dass eine aufwendige Messgasaufbereitung erforderlich wurde. Dies führte zu einer wesentlichen Kostensteigerung, die beim Einsatz von Biofiltern in der Regel nicht rentabel ist.

Gassensoren mit nanostrukturierten Oberflächen eignen sich prinzipiell für mobile Analyseinheiten zur schnellen Vor-Ort-Diagnostik, mit geeigneter Beschichtung auch zum schnellen Nachweis luftgetragener pathogener Keime. Nanoskalige Halbleitermaterialien verbessern die Sensitivität von Festkörpersensoren zum Nachweis von Gasen. Kohlenstoffnanoröhrchen können Stickoxide oder stickstoffhaltige Gase detektieren (VDI/ZTC 2007, 49/50). Preiswerte Herstellungsverfahren, wie die Weiterentwicklung des Druckens anorganischer Bauteile, könnten derartigen Analyseverfahren zu einem erheblichen weiteren Entwicklungsschub verhelfen (List 2007).

Zementindustrie

Am 30.10.07 endete die befristete Ausnahmeregelung der 17. BImSchV hinsichtlich der Abluftqualität beim Einsatz von Abfall als Ersatzbrennstoff z.B. in der Zementindustrie. Sie erlaubte, unabhängig vom Anteil des Abfalls an der Feuerwärmeleistung, einen Tagesmittelwert der NO_x -Emission (ausgedrückt als NO_2) von 500 mg/m^3 . Seither gilt eine Mischungsregel¹², die ab 60% Abfalleinsatz eine anteilige Minderung der Emissionen bis auf 200 mg/m^3 bei 100% Abfalleinsatz vorsieht. Etwa 50% der deutschen Zementanlagen sind hiervon betroffen (Teibert 2008b). Wird bei diesen Anlagen die Regelung ohne Ausnahme angewandt, müsste die Zementindustrie gegenüber den Prognosen für 2010 (UBA 2007b) weniger NO_x emittieren. Würde aber für alle Anlagen eine Ausnahmegenehmigung erteilt und sie wie bisher mit 500 mg/m^3 gefahren, würde die Überschreitung der zulässigen Maximalemission gemäß der IVU-Richtlinie um 10% vergrößern. Bisher schreibt die Europäische Abfallverbrennungsrichtlinie, unabhängig von der Höhe des Abfalleinsatzes, $800 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ für bestehende und 500 mg/m^3 für Neuanlagen vor. Im Rahmen der Revision der IVU-Richtlinie und der Abfallverbrennungsrichtlinie wird der Grenzwert von 500 mg/m^3 voraussichtlich auch für bestehende Anlagen festgeschrieben.

Neben Veränderungen im Prozess wird die SCR- (selective catalytic reduction) oder SNCR-Technik (selective non-catalytic reduction) und deren Optimierung zur High Efficiency-SNCR eingesetzt. Sie reduzieren NO_x mit Hilfe von Ammoniak (NH_3) zu Stickstoff und Wasser. Die High-Dust-Variante nutzt die Wärme des Rauchgases ($300\text{-}400^\circ\text{C}$) zur Reaktion, die Low-Dust Variante schließt sich der Rauchgasentschwefelung an und ist somit nicht mit SO_2 und Partikeln belastet. Anhand einer Pilotanlage im Zementwerk Solnhofen (UBAÖ 2007) wurde der Betrieb einer SCR-Anlage im High-Dust-Betrieb getestet und NO_x -Konzentrationen im Abgas von weniger als $500 \mu\text{g/m}^3$ erreicht, durch Steigerung der Ammoniakzugabe sogar Werte von $200 \mu\text{g/m}^3$. Die SCR-Anlage benötigt für gleiche Abgaswerte weniger NH_3 und weist einen geringeren NH_3 -Schlupf auf als die SCNR-Variante. Probleme bereiteten die ho-

¹² Die vorgeschriebenen Emissionswerte der TA-Luft (500 mg/m^3) und der 17. BImSchV für Abfallverbrennungsanlagen werden entsprechend der Abgasvolumina aus der Abgas- und Regelbrennstoffverbrennung gemischt (Teibert 2008b).

he Staubbelastung des Rohgases und der Standardrußbläser. Die Optimierung des Rußblägers verbesserte die Staubabreinigung des Katalysators und die benötigte Luftmenge konnte durch verschiedene Maßnahmen vermindert werden. Das Verfahren wurde durch eine UBA-Studie begleitet (Tebert et.al. 2008). In Italien ist eine vergleichbare Anlage (Monselice 2008) mit einer mittleren NO_x -Emission von 452 mg/m^3 in Betrieb (Tebert 2008a).

Für den SO_2 -Gehalt des Abgases ist der Schwefelgehalt im Rohstoff entscheidend. Zur Reduzierung sind z.B. Absorptionsmittel sowie Nass- oder Trockenabscheider einsetzbar.

Elektrofilteranlagen reduzieren die Staubbelastung an den Punktquellen. Quecksilber wird derzeit nur in einem Schweizer Zementwerk entfernt (EIPPCB 2008).

Märkte für diese Emissionsminderungsmaßnahmen sind weltweit vorhanden, da die Zementwerke, aufgrund der hohen Transportkosten der Ausgangs- und Endprodukte, in der Nähe der Rohstoffvorkommen liegen und die regionalen Märkte bedienen. Die Zementproduktion nimmt insbesondere in Ländern mit boomender Bauwirtschaft erheblich zu. So produziert China 2006 mit 1.204 Mio. t Zement weit über 50% der Weltproduktion. Indien als zweitgrößter Produzent folgt mit 162 Mio. t, Deutschland liegt auf dem 13. Platz mit 34 Mio. t (BdZ 2008). Die weltweit steigende Zementproduktion, insbesondere in den BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China) ist sowohl mit einem deutlichen Bedarf an neuen Anlagen, gleichzeitig aber auch mit einem erheblichen Erneuerungsbedarf alter Anlagen verbunden (bfai 2008).

Kalkindustrie

Der Kalkbrennprozess sowie Sekundärprozesse (z.B. Löschen und Mahlen) sind für die hohe CO_2 - (Entsäuerung des Kalkes, Energieverbrauch), CO -, NO_x -, SO_2 - und Staubemissionen verantwortlich. Die NO_x -Emissionen hängen von der Qualität des Kalkes und der Bauart des Ofens ab. Teilweise werden in Drehöfen auch NO_x -arme Brenner eingesetzt. CO und SO_2 fallen zum größten Teil in den Vorstufen des Brennprozesses an. Die SO_2 -Emission ist abhängig vom vorgegebenen Schwefelgehalt des Kalkes. Bei der Herstellung wird SO_2 , im vorgeschriebenen Umfang, durch eine chemische Reaktion zu Calciumsulfat (CaSO_4) im Kalk gebunden (Hirth et.al. 2007). Die Staubentfernung erfolgt durch Gewebefilter und Rauchgaselektrofilter.

Glasindustrie

Verschiedene Möglichkeiten der optimierten Verbrennung der Heizstoffe (vgl. 2.2.2) können zu einer erheblichen Minderung der NO_x -Emissionen führen. Für Regenerativöfen wird das Einspeisen von Brennstoff in den Abluftstrom zur Reduktion der NO_x -Emission durch chemische Reaktion beschrieben (Pyrolyse der Radikale, die mit Bestandteilen des Abgases reagieren, Rückbrennprozess). Außerdem steht auch die SCR-Technik zur Verfügung, die in der Glasindustrie meist dreistufig mit einer Entstaubung und einer Sauer gaswäsche gekoppelt ist. Alternativ ist die SNCR mit Ammoniak bei 800 bis 1100 °C ohne Entstaubung und Sauer gaswäsche möglich.

Abgesehen vom Schwefelgehalt des Brennstoffes ist die SO_2 -Emission auch von der Chargenrezeptur und damit vom Zusatz von Sulfaten als Läuterungs-/Oxidationsmittel abhängig. Schwefelhaltige Abgase können allerdings auch durch Rückführung in den Prozess den Zu-

satz von Sulfaten ersetzen. Zur Entfernung des SO₂ aus dem Abgas wird eine Sauergaswäsche (halbtrocken oder trocken) verwendet. Das Absorptionsmittel verbindet sich mit dem SO_x zu einem Feststoff, der mit elektrostatischen Filtern oder Schlauchfiltern abgeschieden werden kann (EIPPCB 2008).

Eisen- und Stahlerzeugung

Sinteranlagen weisen hohe NO_x- und SO₂-Emissionen auf. SCR-Technik zur NO₂-Reduktion sowie Nasswäscher bzw. Nassentschwefelung werden vorgeschlagen, um hiermit gleichzeitig auch die NH₃-Emissionen zu mindern (UBA 2007c). Neben Low-NO_x-Brennen in der Walzstahlherstellung wird die primärseitige Wasserstoffperoxid (H₂O₂) oder Harnstoffzugabe und der Einsatz der SCR oder SNCR-Techniken als Möglichkeit der NO_x-Minderung gesehen.

Stationäre Feuerungsanlagen

Braunkohle: Bei Großanlagen (>300 MW Feuerungswärmeleistung (FWL)) kann durch prozessintegrierte Maßnahmen der NO_x-Gehalt nicht in gefordertem Maße reduziert werden. Zusätzlich sind SNCR-Anlagen erforderlich. Die Wirksamkeit des Verfahrens konnte bezogen auf das installierte Katalysatorvolumen deutlich erhöht und die Kosten gleichzeitig halbiert werden (Gutberlet 2005). Ein wirksames Verfahren zur Regeneration der Katalysatoroberfläche und -aktivität erhöht die Standzeit des Katalysators.

Emissionsminderungen bei kleineren Anlagen (50-300 MW FWL) sind durch die Implementierung und Optimierung von trockenen Absorptionsverfahren, Kalksteinwaschverfahren und kombinierter NO_x/SO₂-Abscheidung zu erreichen (UBA 2008a).

Steinkohle: Neben prozessintegrierten Maßnahmen stehen bei Großanlagen (>300MW FWL) Optimierungsmaßnahmen der meist installierten SCR-Anlagen im Vordergrund. So gilt es die Standzeit der Katalysatoren durch eine optimale Ausnutzung seiner Kapazität zu erhöhen um die Häufigkeit der Regenerierung/des Austauschs zu vermindern. Durch Messung der Ammoniakmenge nach dem Reaktor (NH₃-Schlupf) kann dessen Einsatz zu Verbesserung der Stickstoffoxidabscheidung optimiert werden. Sofern das Verhältnis von vorhandenem Platz und Mischungslänge es zulässt, ist ggf. auch das Katalysatorvolumen zu erhöhen. Über die gleichmäßige Aktivität des Katalysators kann eine Messung der NO_x-Verteilung im Reingas Aufschluss geben. Schließlich trägt eine gute Inspektion und Wartung zum optimalen Betrieb bei (UBA 2008a).

Kleinfeuerungsanlagen mit Brennholz stellen nach wie vor ein erhebliches Problem im Hinblick auf die Staubemission, aber auch CO- und Kohlenwasserstoffemissionen dar. In einer Untersuchung (Struschka et. al. 2003) wurden die Partikelemissionen für 2010 auf 23 bis 26 kt in Deutschland geschätzt. Probleme bereiten diese Emissionen insbesondere dann, wenn Holzheizungen regional konzentriert auftreten. Sehr gut gebaute Öfen erzielen hohe Verbrennungstemperaturen und hierdurch eine nahezu vollständige Verbrennung mit geringen Emissionen. Weit verbreitet jedoch sind einfache Konstruktionen, deren Emissionen zudem stark von der Handhabung beeinflusst werden. Eine zufriedenstellende additive Lösung zur Emissionsminderung ist derzeit noch nicht auf dem Markt.

Müllverbrennung

Die Abgase von Müllverbrennungsanlagen können u.a. Dioxin, Schwermetalle wie Quecksilber und Arsen oder gasförmige Komponenten wie Chlorwasserstoff enthalten. Zur Beseitigung dieser Schadstoffe ist es häufig erforderlich, mehrere Abgasreinigungsanlagen hintereinander zu schalten. Staubfilter dienen zur Beseitigung der Partikelfracht (Gewebefilter, Elektrofilter), Absorptionsfilter und katalytische Verfahren zur Abscheidung von Gaskomponenten. Für die Adsorption von Gaskomponenten im niedrigen Konzentrationsbereich werden hochporöse Feststoffe mit großer innerer Oberfläche wie Aktivkohle eingesetzt.

3.4 Akteure und Netzwerke

Zahlreiche Institute und Institutionen beschäftigen sich mit dem Thema Luftschadstoffe und arbeiten in unterschiedlichen Gremien auf nationaler und internationaler Ebene zusammen. Der Übergang zum Thema „Klimagase“ ist hierbei fließend. Die Ansatzpunkte sind sehr verschieden: Produktionsspezifische Emissionen und deren Vermeidung; Betrachtung der Luftschadstoffe, deren Verbreitung und Reaktionsmechanismen; Messtechnik; Abluft-/Abgasreinigungstechniken; medizinische Wirkung/Toxikologie; Datenbanken; Umweltpolitik. Die folgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Technische Maßnahmen im Produktionsprozess mit Auswirkungen auf die Emissionen der Luftschadstoffe obliegen jedoch meist den branchenspezifischen Akteuren. Techniken gehen zum einen in die „Best Available Technique Reference Document“ (BREF) ein, soweit die entsprechende Branche hier erfasst wird. Zum anderen werden sie in den jeweiligen Fachverbänden und ggf. in den Fachausschüssen übergeordneter Verbände/Vereine oder Kooperationen diskutiert und somit verbreitet. Dies trifft auch auf die Entwicklungen im Bereich der additiven Abluft-/ Abgasreinigungssysteme zu, welche sich meist aus den praktischen Erfahrungen der einschlägigen Ingenieurbüros oder aus deren innovativer Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten entwickeln. Entsprechend sind diese Akteure häufig über branchenspezifische Recherchen oder konkrete technische Fragestellungen der Luftreinigungstechnik einzugrenzen würden jedoch in ihrer Vielfalt die folgende Aufstellung überfrachten.

Fachverbände/Vereine/Kooperationen		
BBU	Bundesverband der Bürgerinitiativen	www.bbu-online.de/
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie	www.dechema.de
DMG FA UMET	Deutsche Meteorologische Gesellschaft Fachausschuss Umweltmeteorologie	www.dmg.de http://www.dmg-ev.de/fachausschuesse/umet/umet_index.htm
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker u.a. Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie Fachgruppe Anstrichstoffe und Pigmente	www.gdch.de www.oekochemie.tu-bs.de/ak-umweltchemie/start.php www.aktuelle-wochenschau.de/2007/index07.htm
	Greenpeace	www.greenpeace.de/
ProcessNet SuPER	(DECHEMA / VDI-GVC) Fachgemeinschaft Sustainable Production,	

AA-CLK	Energy and Ressources Arbeitsausschuss Chemie, Luftqualität und Klima	www.processnet.org/SuPER/Chemie_+Luftqualit%C3%A4t_+Klima/Selbstdarstellung.html
AA-Fst	Arbeitsausschuss Feinstäube	www.processnet.org/SuPER/Feinst%C3%A4ube/Selbstdarstellung.html
FA-GAS	Fachausschuss Gasreinigung	www.processnet.org/SuPER/Gasreinigung/Selbstdarstellung.html
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	www.vdi.de
KRdL	Kommission Reinhaltung der Luft	www.krdl.de
VDITZ	VDI-Technologiezentrum	www.vditz.de
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. Fachabteilung Luftreinhaltung	www.vdma.de
	KompetenznetzeDeutschland	www.kompetenznetze.de
PortalU	Umweltportal Deutschland	www.portalu.de
WaBoLu	Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene	www.wabolu.de

Forschungseinrichtungen und -institute

CUTEC	Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH	www.cutec.de/
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	www.dfg.de
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	www.dlr.de
IPA	Institut für Physik der Atmosphäre	www.dlr.de/pa/desktopdefault.aspx/tabid-2342/
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft Allianz Reinigungstechnik Abteilung Partikelchemie: gemeinsame Einrichtung am Institut für Physik der Atmosphäre (Uni Mainz) und Max-Planck-Institut für Chemie	www.fhg.de www.allianz-reinigungstechnik.de www.uni-mainz.de/FB/Physik/IPA/pc/pc_home_d.htm
ISI	Institut für System- und Innovationsforschung	www.isi.fhg.de
HGF	Helmholtz Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren	www.helmholtz.de
GSF	Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in der Helmholtz-Gemeinschaft (Gesundheitsrelevanz von Aerosolen)	www.gsf.de
ICG	Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre	www.fz-juelich.de/icg/icg-1/
IMK-IFU	Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung	http://imk-ifu.fzk.de/
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH	www.ifeu.de
IUTA	Institut für Energie und Umwelttechnik e.V	www.iuta.de
MPG	Max-Planck-Gesellschaft Institut für Chemie	www.mpg.de www.mpch-mainz.mpg.de/
NIW	Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung	www.niw.de
Ökopol	Institut für Ökologie und Politik GmbH	www.oekopol.de
WGL	Leibniz Gemeinschaft	www.leibniz-gemeinschaft.de
IFT	Leibniz-Institut für Troposphärenforschung	www.tropos.de/
ZEW	Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung Umwelt- und Ressourcenökonomie, Um-	www.zew.de

weltmanagement		
HS Hochschulen		
HS-Mannheim	Institut für Biologische Verfahrenstechnik	www.che.hs-mannheim.de/ibv
UNI Universitäten		
FU Berlin	Forschungsstelle für Umweltpolitik	http://web.fu-berlin.de/ffu/index_d.htm
TU Berlin	Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik (ifvt)	http://itu107.ut.tu-berlin.de/uvt/index.html
Uni Bremen	Inst. f. Umweltverfahrenstechnik (IUV)	www.iuv.uni-bremen.de
TU-Clausthal	Institut für Umweltwissenschaften	www.iuw.tu-clausthal.de/
BTU Cottbus	Brandenburgische Technische Universität Cottbus Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik	www.tu-cottbus.de/w-tech/startseite.php www.tu-cottbus.de/fakultaet4/de/die-fakultaet/
JLU	Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung Justus-Liebig Universität Gießen Institut für Innenraum- und Umwelttoxikologie	www.luft.tu-cottbus.de/ www.uni-giessen.de www.uniklinikum-giessen.de/toxi
TU Dortmund	Lehrstuhl Umwelttechnik	www.bci.uni-dortmund.de/ut/
Uni Duisburg-Essen	Arbeitskreis Prof. Zellner	www.uni-due.de/iptc/
LUAT	Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik und nalgentechnik/ Bereich Umwelttechnik	http://www.luat.uni-duisburg-essen.de/
Uni Heidelberg	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg Institut für Umwelphysik	www.iup.uni-heidelberg.de/
Uni Karlsruhe	Institut für technische Thermodynamik und Kältetechnik Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik	www.ttk.uni-karlsruhe.de www.mvm.uni-karlsruhe.de
Uni Kassel	Center for Environmental Systems Research NEST Nachhaltiges Energie- und Stoffstrommanagement	www.usf.uni-kassel.de/cesr/
Uni Stuttgart	IVD Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkeselwesen (Leitung ALS)	www.ivd.uni-stuttgart.de
	ALS Arbeitsgruppe Luftreinhaltung der Universität Stuttgart	www.ivd.uni-stuttgart.de/als
Bergische Uni Wuppertal	Fachgebiet Sicherheitstechnik /Umweltschutz	www.uws.uni-wuppertal.de/
Staatliche Einrichtungen/ Behörden		
Atmo-rhenA	Die Luftqualität am Oberrhein	www.atmo-rhinsuperieur.net
ASPA	Association pour la Surveillance et l'Etude de la Pollution Atmosphérique en Alsace	http://w3.atmo-alsace.net
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Lufthygieneamt beider Basel	www.lubw.baden-wuerttemberg.de www.baselland.ch/index.htm
LUWG	Landesanstalt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland Pfalz	www.luft-rlp.de
BMBF	Bundesministerium für Bildung und For-	www.bmbf.de

	schung Hightech-Strategie	www.bmbf.de/de/6608.php
EUREKA	Europäische Initiative für marktnahe Forschung und Entwicklung	www.eureka.dlr.de/
EUROTRAC-2	The EUREKA Project on the Transport and Chemical Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe - second phase	http://www.helmholtz-muenchen.de/eurotrac/
FONA	Forschung für Nachhaltigkeit	www.fona.de
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	www.bmu.de
UBA	Umweltbundesamt	www.umweltbundesamt.de
IRK	Kommission Innenraumlufthygiene	www.umweltbundesamt.de/gesundheits/innenraumhygiene/irk.htm
ENVIT	Luftdaten, Umweltdaten	www.env-it.de
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	www.bmvbs.de
DWD	Deutscher Wetterdienst	www.dwd.de
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	www.bmwi.de
bfai	Bundesagentur für Außenwirtschaft	www.bfai.de
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit	www.bmz.de
LAI	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz Arbeitskreis Luftqualität	www.lai-immissionsschutz.de
AISV	Ausschuss: Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge	
LWV	Ausschuss Luftqualität/Wirkungsfragen/ Verkehr	

Internationale Organisationen und Forschungsinstitutionen

UBA-Broschüre: enthält wesentliche Ansprechpartner zum Thema Luftqualität und Gesundheit in Europa (Behörden, Forschungseinrichtungen, intern. Institutionen)
www.umweltbundesamt.de/whocc/archiv/AHR16end.pdf

BCC	Business Communications Company Inc.	www.bccresearch.com
	Blacksmith Institute	www.blacksmithinstitute.org
EU	Europäische Union, z.B.	
EC	European Commission Environment (CAFÉ-Programm)	http://ec.europa.eu/environment/index_en.htm
JRC	Joint Research Centre	http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm?id=1440
IES	Institute for Environment and Sustainability	http://ies.jrc.cec.eu.int/
IPTS	Institute for prospective technological Studies	http://ipts.jrc.ec.europa.eu/
- EIPPCB	European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau	http://eippcb.jrc.es
ENVI	Europäisches Parlament Committee on Environment, Public Health and Food Safety	www.europarl.europa.eu/comparl/envi/default_en.htm
EEA	European Environment Agency	www.eea.europa.eu
EIONET	European Environment Information and Observation Network	http://eionet.europa.eu/
- ETC	European Topic Centre on Air and Climate Change	http://air-climate.eionet.europa.eu/
- EURO-		http://epp.eurostat.ec.europa.eu

STAT EMEP		www.emep.int
ICSU	International Council for Science	www.icsu.org
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics	www.iugg.org
IAMAS	International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences	www.iamas.org
-CACGP	Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution	www.icacgp.org
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry	www.igac.noaa.gov
METEO	Bulgarian Academy of Sciences / National Institut of Meteorology and Hydrology	www.meteo.bg
EURASAP	European Association for the Science of Air Pollution	www.meteo.bg/EURASAP/
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development (Environment Directorate)	www.oecd.org/department/0,3355,en_2649_33713_1_1_1_1_1_1,00.html
PRONET	Pollution Reduction Options NETwork	www.proneteurope.eu
UN	United Nations	www.un.org
UNEP	United Nations Environment Programme	www.unep.org
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe	www.unece.org/
CEP	Committee on Environmental Policy	www.unece.org/env/cep/welcome.html
EfE	Environment for Europe	www.unece.org/env/efe/welcome.html
WGEMA	Working Group on Environmental Monitoring and Assessment	www.unece.org/env/europe/monitoring/index.html
WHO	World Health Organisation	www.who.int/en/
	AIR	www.who.int/topics/air/en/
CC	Collaborating Centres of Air Quality Management and Air Pollution Control	www.who.int/whocc www.umweltbundesamt.de/whocc/titel/titel21.htm
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development	www.wbcSD.org
WRI	World Resource Institutes /earth trends	http://earthtrends.wri.org

3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Luftverunreinigung, ein nicht gelöstes Problem

In West- und Mitteleuropa konnten in den letzten Jahrzehnten die Luftverunreinigungen erheblich gesenkt werden. Dennoch werden auch weiterhin die Ökosysteme durch Versauerung und Eutrophierung insbesondere durch Stickstoffoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃) geschädigt. Der Mensch leidet unter den Partikelemissionen und Ozon, gebildet über Vorläufersubstanzen wie Stickstoffoxide und flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC). So führt die verbleibende Belastung durch NO_x, Feinstaub und bodennahes Ozon nach Einschätzung der European Environment Agency in Europa zur Verkürzung der Lebensdauer um durchschnittlich fast ein Jahr und bedroht die gesunde Entwicklung der Kinder (EEA 2007b). Nach einem Bericht der EU aus 2005 sterben pro Jahr 370.000 EU-Bürger vorzeitig aufgrund der Luftbelastung. Die Krankheitskosten durch Luftverunreinigung werden auf 427 bis zu 790 Mrd. € p.a. geschätzt. Trotz der im Jahr 2005 bereits implementierten und geplanten Maßnahmen werden 2020 immer noch 290.000 vorzeitige Todesfälle und bis 2020 jährliche Krankheits-

kosten zwischen 189 und 609 Mrd. € erwartet. Darüber hinaus ist auch weiterhin mit erheblichen Schäden an den Ökosystemen zu rechnen (Europa 2005).

Ein grundsätzliches Problem wirft die Bewertung der Aerosole auf. Noch in vielen Bereichen unklar sind die Bildungsmechanismen, die Zusammensetzungen, biologische Wirksamkeit und Wirkungszusammenhänge sowie Dosis-Wirkungsbeziehungen. Auch die Kombinationswirkungen der Aerosole mit anderen Luftschadstoffen, deren Akut- und Langzeitauswirkungen sowie die Rahmenbedingungen für eine besondere Gefährdung sind bisher z.B. für differenziertere Grenzwerte nicht ausreichend erforscht (GSF 2008).

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). Dramatischer ist die Situation in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern. 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 großen Bereichen ohne Infrastruktur generiert in allen Umweltbereichen erhebliche Probleme. Hohe SO₂-, NO_x- und Partikel-Emissionen werden durch den Einsatz schwefelhaltiger Kohle oder Heizöle in Heizungen und Kraftwerken solcher Ballungsgebiete erzeugt. Die Belastungssituation verschärft sich in Städten bzw. Regionen mit großem Anteil an emissionsintensiver Industrie (z.B. Eisen- und Stahlproduktion, Zementherstellung).

Wesentliche Voraussetzung für die Einführung wirksamer Technologien ist eine angemessen strenge Gesetzgebung sowie deren Vollzugskontrolle 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 nur langsam vorankommt. Unter anderem fordert der Bericht eine intensive internationale Zusammenarbeit ein (OECD 2007).

Minderungsstrategien

Dem gesamten Bereich der Minderungsmaßnahmen einschließlich der Luftschadstoffbestimmung, der Überwachung und der Vermeidungstechniken schreibt ein BCC-Research Report (LoPrinzi 2007) ein weltweites jährliches Wachstum von 10,6% und 2012 einen Wert von 138 Mrd. US\$ zu. Die jährliche Wachstumsrate der Vermeidungstechniken wird ebenfalls auf 10,6%, der Wert für 2012 auf 75,9 Mrd. US\$ geschätzt.

In Schwellen- und Entwicklungsländern lassen sich häufig mit relativ einfachen Mitteln und vorhandenen Techniken große Minderungspotentiale erschließen. Emissionsminderungsmaßnahmen müssen sich hierbei an der Situation vor Ort orientieren. So macht es wenig Sinn z.B. Solarkocher für Menschen zur Verfügung zu stellen, deren Lebensumstände das Kochen bei Tag verhindert. Anleitung zum Bau eines Herdes mit Ableitung der Abgase nach außen kann die sinnvollere Lösung zur besseren Ausnutzung der Brennstoffe und zur Verbesserung des Innenraumklimas sein. Andererseits werden in besonders belasteten Gebieten die gewachsenen, häufig ineffizienten industriellen Anlagen zunehmend durch größere

modernere Anlagen ersetzt. „Entwicklungssprünge“ dürften hierbei eher die Regel sein und Marktchancen für Beratung und für weitere angepasste aufeinander abgestimmte technische Komplettangebote, wie sie auch heute schon vielfach üblich sind, eröffnen.

Grundsätzliche Ansatzpunkte zur Emissionsminderung sind die Modifizierung, Minderung oder Substitution der Produkte, Hilfsmittel und Einsatzstoffe, die für die Emissionen verantwortlich zeichnen. Meist ist hier die Emissionsminderung jedoch ein Nebeneffekt der Ressourcenschonung, des Bedarfs nach neuen Produkten mit veränderten Eigenschaften oder der Kostenreduktion.

Umweltschutz bereits in den Produktionsablauf zu integrieren erfordert eine enge Zusammenarbeit von Grundlagen-/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 (Legler et al. 2007). Der Umweltschutz ist auch hier häufig ein Nebeneffekt der Optimierung des Prozesses und des Ressourceneinsatzes.

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

Eine Verminderung des Lösemitelesinsatzes und damit der NMVOC-Emission ist das Ziel von Forschung und Entwicklung in dem sehr breiten Feld des Lösemitelesatzes. 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 von wasserlöslichen Farben). Ebenso ist der Produktionsablauf anzupassen und eine entsprechende Schulung des Personals erforderlich (ökopol 2008).

Große Probleme bereiten 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 erhöhtem Anfall an Wirtschaftsdünger und Veränderung der Landnutzung zur Viehfuttererzeugung.

Querschnittstechnologien

Die Querschnittstechnologien tragen in zunehmendem Maße zur Vermeidung, Verminderung und Beseitigung von Luftschadstoffen bei. Neu- und Weiterentwicklungen in diesem Bereich können ein weiteres Potential zur Luftschadstoffminderung aufweisen.

- Entwicklungen in der Biotechnologie und Bionik mindern die Luftschadstoffemissionen durch Verminderung des Bedarfs an emissionsrelevanten Produkten/Einsatz- und Hilfsstoffen 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 Prozessen und durch additive Luftreinigungsmaßnahmen (z.B. als Katalysatorbeschichtung) sowie durch vielfältige Anwendungen in der Mess-, Steuer- und Regeltechnik.

BCC Research (BCC 2006) beziffert den Umsatz nanotechnologischer Anwendungen im Umweltbereich im Jahr 2005 mit 374,9 Millionen US\$ und prognostiziert ein Wachstum von 75,2% auf mehr als 6 Milliarden US\$ für das Jahr 2010. Nanotechnologischen Verfahren zur Wasser- und Bodensanierung sowie zur Reinigung von Luft wird bei Wachstumsraten von über 100% (prognostizierter Umsatz 2010 2,3 Milliarden US\$ p.a.) 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.

In einer Studie (LoPrinzi 2007) wird der Luftschadstoff-Mess- und Regeltechnik ein weltweit hohes jährliches Wachstum von 13,9% und für 2012 ein Wert von 36,2Mrd. US\$ zugeschrieben.

Wesentlich für den sinnvollen Einsatz neuer Techniken zur Emissionsminderung ist es den gesamten Produktzyklus vom Anbau/Herstellung über die Nutzung (z.B. Abrieb von Nanopartikeln) bis hin zur Entsorgung/Recycling hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Natur und den Menschen zu bewerten.

Literatur

- Andersson, S.; Kreis, S.; Hunsinger, H. (2004): ADIOX – Betriebserfahrungen mit einer integrierten Lösung zur Dioxinabscheidung in Nasswäschern. VDI-Wissensforum: BAT-energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/Rauchgasreinigungstechniken für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. München, 16./17. September 2004
- baulinks (2007): Ersatzbrennstoffnutzung in Zementwerken – Untersuchung des Förder-, Flug- und Ausbrandverhaltens. Pressebericht 05.06.2007. http://www.baulinks.de/webplugin/2007_1frame.htm?0869.php4, Stand 22.01.08
- BCC (Business Communications Company Inc.) (2006): Nanotechnology in Environmental Applications. Report ID: NAN039A. Mai 2006. <http://www.bccresearch.com/nanotechnology>
- BdZ (Bundesverband der Deutschen Zementindustrie) (2008): Statistik. <http://www.bdzement.de/550.html?tab=Weltzementproduktion>, Stand 21.01.08
- bfai (Bundesagentur für Außenwirtschaft) (2008): Länder und Märkte. <http://www.bfai.de/DE/Naviga tion/Datenbank-Recherche/Laender-und-Maerkte/laender-und-maerkte-node.html>, Stand 21.01.08
- Blacksmith Institute (2007): The World's Worst Polluted Places – The Top Ten of The Dirty Thirty. New York, <http://www.blacksmithinstitute.org/wwpp2007/finalReport2007.pdf>
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006a): Nano – Initiative – Aktionsplan 2010. <http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006b): NanoCare – verantwortungsvoller Umgang mit der Nanotechnologie. Beginn des Leitprojektes am 1. März 2006. <http://www.bmbf.de/de/5915.php>
- CAFE (Clean Air for Europe) (2005): Percentage of forest area receiving acid deposition above the critical loads for the current legislation Climate Policy scenario 2020. Baseline Analysis 2000-2020. Europäische Kommission 2005, S. 43
- Clean sky (2008): The „Clean Sky“ JTI, http://www.cleansky.eu/index.php?arbo_id=83&set_language=en
- DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (2006): Schwerpunktprogramm 1313 „Biological Responses to Nanoscale Particles“ („Bio-Nano-Responses“). Information für die Wissenschaft Nr. 42, 14. http://www.dfg.de/aktuelles_presse/information_fuer_die_wissenschaft/schwerpunktprogramme/archiv/info_wissenschaft_42_06.html
- DLI (Deutsche Lackindustrie GmbH) (2007): Lösemittel – flüchtige organische Verbindungen. Fakten zu Lacken und Farben. http://www.lacke-und-farben.de/fileadmin/document_archive/VOC.pdf
- Ebert, K. (2007): Polymere Nanofiltrationsmembranen für den Einsatz in organischen Lösemitteln. Vortrag auf dem DECHEMA-Kolloquium: Organophile Nanofiltration – Neue Entwicklungen und Anwendungspotentiale. Frankfurt, 22.11.2007
- EEA (European Environment Agency) (2007a): NEC Directive status report 2006. EEA technical Report 15/2007. http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2007_15/en
- EEA (European Environment Agency) (2007b): Europe's environment – the fourth assessment. Chapter 2: Environment and health and the quality of life. Copenhagen, 10. Oktober 2007. <http://www.eea.europa.eu/pan-european/fourth-assessment>
- EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau) (2008): Best Available Technique Referenz Documents (BREFs). <http://eippcb.jrc.es>, Stand 21.01.08

- EU (Europäische Kommission) (2008): Kommission bei nanotechnologischer Forschung vorsichtig. Nachrichten. <http://www.euractiv.com/de/wissenschaft/kommission-nanotechnologischer-forschung-vorsichtig/article-170248>, Stand 12.02.08
- 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>
- EU Parlament (Europäisches Parlament) (2007): Leitfaden. Kapitel 4.9.6 Luftverschmutzung und Lärmbelästigung. http://www.europarl.europa.eu/facts/4_9_6_de.htm, Stand 23.01.08
- EU Parlament (Europäisches Parlament) (2008): Standpunkt des Europäischen Parlaments festgelegt in zweiter Lesung am 11. Dezember 2007 im Hinblick auf den Erlass der Richtlinie 2008/.../EG des Europäischen Parlaments und des Rates für Luftqualität und saubere Luft für Europa. <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=TA&reference=P6-TA-2007-0596&language=DE&ring=A6-2007-0398#BKMD-20>, Stand 02.04.08
- Eyring, V. (2005a): Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of geophysical Research* 110 (2005) doi: 10.1029, <http://www.agu.org/journals/jd/jd0517/2004JD005619/2004JD005619.pdf>
- Eyring, V. (2005b): Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050. *Journal of geophysical Research* 110 (2005) doi: 10.1029. <http://www.agu.org/journals/jd/jd0517/2004JD005620/2004JD005620.pdf>
- FA-GAS (Fachausschuss Gasreinigung) (2008) in der Fachgemeinschaft Sustainable Production, Energy an Resources (SuPER) in ProzessNet: Selbstdarstellung. <http://www.processnet.org/SuPER/Gasreinigung/Selbstdarstellung.html>, Stand 27.02.08
- Fehrenbach, H.; Giegrich, J., Möhler, S. (2006):: Behandlungsalternativen für klimarelevante Stoffströme. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Heidelberg
- Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Schmidt, R.(2007): Ökobilanz thermischer Entsorgungssysteme für brennbare Abfälle in Nordrhein-Westfalen. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg, http://www.ifeu.org/abfallwirtschaft/pdf/therm_entsorg.pdf
- Gransee, A. (2007): Minereraldüngerverbrauch im globalen Vergleich – Nährstoffun-gleichgewichte bei der Düngung. Tagung: Rohstoffverfügbarkeit für Mineraldünger – Perspektiven unter hohen Energiekosten und begrenzten Ressourcen. Verband der Landeswirtschaftskammern e.V. (VLK), Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Würzburg 24./25. April 2007. http://www.duengung.net/downloads/TB2007_Internet.pdf
- GSF (Partikelforschung für die Gesundheit in der Helmholtz-Gemeinschaft) (2008): Großes Netzwerk für kleine Teilchen – Aerosolforschung in der GSF. Broschüre (2005) und mündliche Mitteilungen
- Gutberlet, H. (2005): Developments in SCR Technology. VDI-Seminar Optimierung von REA- und SCR-Anlagen in Großkraftwerken. Düsseldorf, 30.11. – 01.12.2005, zitiert in UBA (2007c)
- Heffer, P. (2008): Assessment of Fertilizes Use by Crop at the Global Level. International Fertilizer Industrie Assoziation, Paris Januar 2008. http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/PDF/2008_fubc_assessment_at_the_global_level.pdf
- Hensel, O. (2007): Bodenbearbeitungstechnik vermeidet Erosion. Pressemitteilung. <http://www.agrar.uni-kassel.de>

- Hentrich, S., Komar, W., Weisheimer, M. (2000): Umweltschutz in den neuen Bundesländern – Bilanz im zehnten Jahr deutscher Einheit. Institut für Wirtschaftsforschung Halle: Diskussionspapier Nr. 128. Halle, November 2000, <http://www.regulationomics.de/d/publik/disc/128.pdf>
- Hirth, T.; Woidasky, J.; Eyerer, P. (2007): Nachhaltige rohstoffnahe Produktion. Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, Pfinztal, Februar 2007
- HS Bremen (Hochschule Bremen) (2008): Marine Bionik, Projekt: Giffreies Antifouling nach biologischem Vorbild, Fakultät Natur und Technik, Abt. Bionik, <http://bionik.fbsm.hs-bremen.de>, Stand 05.03.08
- HS Mannheim (Hochschule Mannheim) (2008): Biotechnische Produkte und Verfahren (PIUS)-weiße Biotechnologie, Fakultät Verfahrens- und Chemietechnik, Institut für biologische Verfahrenstechnik, <http://www.che.hs-mannheim.de/ibv/indexde.htm>, Stand 28.02.08
- IFA (International Fertilizer Industry Association) (2006): Total fertilizer nutrient consumption – Million tonnes nutrients, $N+P_2O_5+K_2O$. Statistik. http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/indicators/table_npk.asp, Stand 28.02.08
- IISI (International Iron and Steel Institute) (2008): World Steel in Figures 2007. <http://www.worldsteel.org/?action=storypages&id=23>, Stand 18.01.08
- Industrieforum (2008): Bauboom beflügelt Stahlindustrie. http://www.industrie-forum.net/de/ncfertigungde/september052007/rubrik/saegemaschinen_/bauboom-befluegelt-stahlindustrie/;jsessionid=a0Miu4zjPq5-q_8u-B, Stand 21.01.08
- IUTA (Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.) (2008): Luftreinhaltung/nachhaltige Nanotechnologie. http://www.iuta.de/index.php?article_id=130, Stand 15.02.08
- Jörß, W.; Handke, V.; Lambrecht, U.; Dünnebeil, F. (2007): Emissionen und Maßnahmenanalyse Feinstaub 2000 -2020. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin, und Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu). Im Auftrag des UBA – Umweltbundesamt, Dessau, November 2007. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3309.pdf>
- Kompetenznetze Deutschland (2008): Kongress Optische Technologien 2008 – optische Technologien sind Schrittmacher für Innovationen. News <http://www.kompetenznetze.de/service/nachrichten/kongress-optische-technologien-2008-optische-technologien-sind-schrittmacher-fur-innovationen-1>, Stand 10.03.08
- Kunz, P. (2005): Mikroorganismen als natürliche Rostentferner. Biopro – das Biotech/Life Science Portal Baden-Württemberg. <http://www.bio-pro.de/de/life/magazin/01491/index.html>, Stand 28.02.08
- Lahl, U. (2007): Neueste Entwicklungen europäischer Emissionsgrenzwerte einschließlich der National Emission Ceilings. Vortrag anlässlich des 19. Kasseler Abfallforum und Bioenergieforum. Kassel 24. bis 26. April 2007. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/vortrag_lahl_emissionsgrenzwerte.pdf
- Legler, H.; Krawczyk, O.; Leidemann, M.; Rammer, C.; Löhlein, H.; Frietsch, R. (2007): Zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Umweltschutzwirtschaft im internationalen Vergleich. Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung, Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Im Auftrag des BMBF: Studie zum deutschen Innovationssystem Nr. 20-2007
- LfU Bayern (Bayrisches Landesamt für Umweltschutz) (2004): Umweltberatung Bayern – Umweltmedium Luft. Augsburg, 2004. <http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/luft/doc/ueberblick/luft.pdf>
- List, E. (2007): Elektronische Bauteile aus dem Drucker: Physiker-Team stellt erstmals Sensoren aus organischem Material her. Pressemitteilung der Technischen Universität Graz 28.11.2007. <http://www.if.tugraz.at/cdl>

- LoPrinzi, S. (2007): Technologies for Air Pollution Monitoring, Prevention and Control. BCC-Research Report ID: IAS001G, März 2007. <http://www.bccresearch.com/environment>
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) (2006): Umweltdaten 2006 Baden-Württemberg. Karlsruhe
- Messer (Messergroup) (2008): Recycling von Altkühlgeräten (Duo-Condex®-Verfahren). <http://www.messergroup.com>
- Monselice (2008): Cementeria die Monselice – Monitoraggio delle emissioni. <http://www.cementeria dimonselice.it/emissioni/emissioni.php>
- Nagel, H.D.; Becker, R.; Eitner, H.; Hübener, P.; Kunze, F.; Schlutow, A.; Schütze, G.; Weigelt-Kirchner, R. (2004): Critical Loads für Säure und eutrophierenden Stickstoff. Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement (mbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes. Straußberg
- 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. Vorgestellt 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
- Öko-Data (Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH) (2008): Critical Loads – Überschreitungen. <http://www.oekodata.com>, Stand 15.02.08
- Ökopol (Institut für Ökologie und Politik) (2008): Umweltbelastungen und Umweltqualität – Lösemittelminderung in Farben und Lacken (Projekt-Nummer 487). <http://www.oekopol.de/de/aktuell/index.htm>, Stand 08.02.08
- Paur, H.R.; Korell, J.; Bologa, A.; Seifert, H. (2006): Quecksilber- und Feinstaubproblematik der Abfallverbrennungsanlagen und Lösungsansätze. Berliner Abfallwirtschaftskonferenz. Berlin, 21.-22. März 2006. In: Thome-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. Neuruppin, S. 581-584
- Putz, H.J. (2005): Verbesserung der Deinkbarkeit von Druckerzeugnissen durch branchenübergreifende Strategien für ein nachhaltiges Altpapierrecycling. Koordination des Projektes im Auftrag des BMBF. Beginn Oktober 2005. Beschreibung: http://www.ptspaper.de/live/dokukategorien/dokumanagement/psfile/file/14/06_Nov_Dei45cc7bc290128.pdf
- Rafflenbeul, R. (1999): Chancen und Grenzen der Nichtthermischen Plasmatechnologie zur Abluftreinigung. Vortrag auf der Tagung der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft 14.-16. September 1999
- Rafflenbeul, R. (2005): Leitfaden zur Luftreinhaltung und Abluftreinigung. Abluftreinigungsverfahren – 4. Auflage
- Steinfeldt, M. (2007): Chancen und Risiken für die Umwelt durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. 6.Schwerpunkttreffen der Norddeutschen Initiative Nanomaterialien zum Thema „Chancen und Risiken der Nanotechnologie“. Neumünster, 12. Februar 2007
- Stahl-online (2008): Energieverbundwirtschaft integrierter Hüttenwerke. http://www.stahl-online.de/forschung_und_technik/energie_und_umwelttechnik/energiewirtschaft.asp?highmain=2&highsub=3&highsubsub=1, Stand 29.01.08
- Stephan, D. (2007): Innovationspotentiale durch Nanotechnologie im Bauwesen. Universität Kassel-Fachbereich Bauingenieurwesen, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens. Hannover Messe 2007 http://www.ttn-hessen.de/npkpublish/filestore/77/hanmesse_unik39.pdf
- Struschka, M.; Zuberbühler, U.; Dreiseidler, A.; Baumbach, G.; Hartmann, H.; Schmid, V.; Link, H. (2003): Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur E-

- missionsminderung. Im Auftrag des UBA: Universität Stuttgart und Bayrische Landesanstalt für Landtechnik, 2003. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2318.pdf>
- TA-Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Bonn, 24. Juli 2002
- Tebert, C. (2008a): NO_x-Minderung in der Zementindustrie – Stand und Perspektiven im europäischen Kontext. Vortrag anlässlich der Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz. Berlin, 30. Januar 2008
- Tebert, C. (2008b): NO_x-Minderung in der Zementindustrie – Stand und Perspektiven im europäischen Kontext. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: Energie aus Abfall. Band 4. TK-Verlag, Nietwerder
- Tebert, C.; Sander, K.; Schilling, S. (2008): Abfalleinsatz, Staub- und NO_x-Emissionen in der deutschen Zementindustrie. Ökopol im Auftrag des Umweltbundesamtes. Projektbeschreibung. <http://www.oekopol.de/de/Archiv/Anlagenbezogener%20US/ta-luft/ta-luft.php>
- UBA (Umweltbundesamt) (2007a): Umweltdaten Deutschland Online – Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellengruppen in Deutschland 1990 bis 2005. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=9253,Stand 11.012008>
- UBA (Umweltbundesamt) (2007b): Berichterstattung 2007 unter dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzungen (UN ECE-CLRTAP) – Inventartabelle 2005. <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>
- UBA (Umweltbundesamt) (2007c): Maßnahmen zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie – Maßnahmen zur weiteren Verminderung der Emissionen an NO_x, SO₂ und NMVOC in Deutschland. Dessau, März 2007, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3305.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt) (2007d): Luftreinhaltung 2010 – Nationales Programm zur Verminderung der Ozonkonzentration und zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen. Programm gemäß § 8 der 33. BImSchV und der Richtlinie 2001/81/EG (NEC RL). Dessau, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3306.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt) (2007e): Feinstaub: Auch 2006 dicke Luft in vielen deutschen Städten. Pressemitteilung 26.01.07
- UBA (Umweltbundesamt) (2007f): Ökosysteme besser vor Luftschadstoffen schützen. Presseinformation Nr. 59 (2007). Dessau, 29.08.2007
- UBA (Umweltbundesamt) (2008a): Kurzübersicht zum Stand der BTV – Merkblätter in englischer und teilübersetzter deutscher Fassung. <http://www.bvt.umweltbundesamt.de/kurzue.htm>, Stand 21.01.08
- UBA (Umweltbundesamt) (2008b): Luft und Luftreinhaltung – Gesetze und Regelungen. <http://www.umweltbundesamt.de/luft/infos/gesetze/international/emissionsminderung.htm>, Stand: 22.01.08
- UBA (Umweltbundesamt) (2008c): Bundesimmissionsschutzgesetz http://www.umweltbundesamt.de/luft/infos/gesetze/gesetze_pdf/uebersicht_bimsg.pdf
- UBA (Umweltbundesamt) (2008d): Neue Techniken für den medienübergreifenden, integrierten Umweltschutz. <http://www.bvt.umweltbundesamt.de/neuetechnik.htm>, Stand 06.02.08
- UBA (Umweltbundesamt) (2008e): Entwicklung der Emission ausgewählter Luftschadstoffe seit 1990. <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do;jsessionid=65A9B96FC62E90DD5AC262D8C22337CB?ident=9254,Stand 10.01.08>
- UBAÖ (Umweltbundesamt GmbH Österreich) (2007): Erste Anlage zur katalytischen Entstickung (SCR) in einem Zementwerk. <http://www.ubavie.gv.at/Umweltschutz/industrie/branche/mineral/zement,Stand 21.02.2008>

- UCLA (University of California Los Angeles) (2008): Air Pollution may cause Heart Disease – Nano-sized Particles most damaging. Health Science, Pressemitteilung in newswise. <http://www.newswise.com/articles/view/536930>, Stand 13.02.08
- Umweltschutz-BW (Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg) (2008): Eine Informationsplattform des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg. <http://www.umweltschutz-bw.de/index.php>, Stand 08.02.08
- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2008): Convention on Long Range Transport of Air Pollutions (CLTRAP). <http://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html>
- UWS (Umweltmanagement GmbH) (2008): Informationsplattform im Umweltschutz. <http://www.umwelt-online.de>, Stand 21.01.08
- VDI (Verein deutscher Ingenieure); VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik) (2000): Prozessmonitoring biologischer Leitkomponenten – BioMon. Projektinfo. http://www.mst-online.de/foerderung/projektliste/printable_pdf?vb_nr=V2043
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure/Technologiezentrum); ZTC (Zukünftige Technologien Consulting) (2008): Nanotechnologien für den Umweltschutz. Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Düsseldorf, Dezember 2007
- VDMA (Verband Deutscher Maschinenbauanstalten) (2007): Bericht über das Unternehmertreffen zu den Themen Exportmärkte, Energieeffizienz und Exportfinanzierung. Fachverband Hütten und Walzwerkseinrichtungen. Metzingen, Stand 26.02.08
- Voigt, I. (2007): Keramische Nanofiltrationsmembrane und ihre Anwendung in organischen Lösemitteln. Vortrag auf dem DECHEMA-Kolloquium: Organophile Nanofiltration – Neue Entwicklungen und Anwendungspotentiale. Frankfurt, Stand 22.11.07
- Volkswagenstiftung (2007): Kleben ohne Klebstoff. Pressemitteilung, 26. Oktober 2007 <http://www.volkswagenstiftung.de/service/presse.html?datum=20071026>
- WHO (Weltgesundheitsorganisation Europa) (2004): Wohnen und Gesundheit – ein Überblick. Hintergrundpapier zur Vierten Ministeriellen Konferenz Umwelt und Gesundheit. Budapest, 23.-25. Juni 2004. <http://www.euro.who.int/document/hoh/gbackdoc01.pdf>
- WHO – World Health Organisation Europe (2005): Air Quality Guidelines – Global Update 2005. Copenhagen, 2006. <http://www.euro.who.int/Document/E90038.pdf>
- Weltbank (2008): 2005 / World Development Indicators – 3. Environment Table 3.13 / Air Pollution. http://devdata.worldbank.org/wdi2005/Tables3_13.htm, Stand 28.01.08
- WRI (World Resources Institutes) (2008): EarthTrends – The Environmental Information Portal – Climate and Atmosphere, Berechnungen und Schätzungen des Netherlands National Institute for Public Health and Environment/Netherlands Environmental Assessment Agency (RIVM/MNP)/Netherlands Scientific Research Organization (TNO), http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.php?action=select_variable&theme=3, Stand 30.01.08

4 Wasserschutz

4.1 Charakterisierung des Handlungsfeldes

Water for People, Water for Life.
(1st UN World Water Development Report, 2003)

Weltweit tragen Verschmutzung, übermäßiger Verbrauch oder schlechtes Management zum Rückgang der Qualität und der 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 Prozent dieser Menge aus nutzbarem Süßwasser. Etwa ein Fünftel der Menschheit ist heute ohne Zugang zu sauberem Trinkwasser. 2,5 Mrd. Menschen verfügen nicht über ausreichende Sanitärsysteme. 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.

Wasser ist unsere kostbarste Ressource und sie ist nicht ersetzbar. Die Gesundheit des Menschen und seine Entwicklungschancen hängen von sauberem Wasser ab. Damit sind Bereitstellung von Trinkwasser und Abwasserentsorgung wichtige Elemente der Armutsminderung. Verseuchtes Wasser ist heute schon die Hauptursache für Infektionskrankheiten, an denen über 5 Mio. Menschen jährlich sterben. Etwa ein Fünftel der Menschheit ist heute ohne Zugang zu sauberem Trinkwasser. 2,5 Mrd. Menschen verfügen nicht über ausreichende Sanitärsysteme. 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 notwendig. Nachhaltige Wasserwirtschaft bezeichnet die integrierte Bewirtschaftung aller künstlichen und natürlichen Wasserkreisläufe unter Beachtung dreier wesentlicher Ziele:

1. Dem langfristigen Schutz von Wasser als Lebensraum bzw. als zentrales Element von Lebensräumen (Erhalt des Artenreichtums der Ökozonen).
2. Die Sicherung von Wasser in seinen verschiedenen Facetten als Ressource für die jetzige wie für nachfolgende Generationen.
3. Der Erschließung von Optionen für eine dauerhafte, naturverträgliche, wirtschaftliche und soziale Entwicklung

4.2 Meilensteine

Die Thematisierung einer drohenden Wasserknappheit durch internationale Gremien und der WHO (World Health Organisation) lässt sich bis auf die Konferenz der Vereinten Nationen in Mar del Plata (Argentinien) 1977, zurückverfolgen. Ergebnis dieser Konferenz war eine politische Forderung, die allen Menschen Zugang zu sauberem Trinkwasser und zur Hygieneversorgung ermöglichen soll.

Ein weiterer *Meilenstein* in der internationalen Betrachtung des Themas „Wasser“ war die Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro, die im Themenbereich Wasser vor allem die Notwendigkeit verbesserter Managementsysteme für Süßwasser in den Vordergrund stellte.

Zur Vorbereitung der Konferenz in Rio fand die Internationale Wasserkonferenz in Dublin statt. Dort wurde sich auf verschiedene Positionen geeinigt, die so genannten „Dublin Prinzipien“, die in Rio de Janeiro vertreten werden sollten (The Dublin Statement on water and sustainable development, www.wmo.ch).

Ein *Meilenstein* national war die Verabschiedung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) im Jahr 1957, eines der ersten Gesetze im Umweltbereich überhaupt. Im Bereich der Abwasser- und Wasserversorgung markieren die Trinkwasser- (TVO), die Grundwasser- und die Abwasserverordnung (AbwVO), aber auch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz und das Bundesemissionsschutzgesetz die wichtigsten gesetzlichen Rahmenbedingungen. Im Rahmen dieser Gesetze werden zum Beispiel wichtige Richtwerte für die zulässige Belastung aufbereiteter Abwässer und Klärschlamme markiert.

Auch im Bereich der Wasserversorgung geben diese Gesetze national den wichtigen rechtlichen Rahmen vor. In der folgenden Enumeration ist die Entwicklung des deutschen Wasserschutzrechts (grau) Aktivitäten innerhalb der internationalen Wasserschutzpolitik (weiß) gegenübergestellt.

1957: Verabschiedung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG)
1975: Erlass der Trinkwasserverordnung (TVO)
1975: Wasch- und Reinigungsmittelgesetz
1976: Verabschiedung des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG)
1977: UNO-Weltwasserkonferenz Mar Del Plata
1980 bis 1990: Beginn der internationalen UN-Trinkwasser- und Sanitär-Dekade. Ziel: Bis 1990 haben alle Menschen Zugang zu Trinkwasser.
1990: Weltkonferenz Wasser: Fordert Grundrecht auf Zugang zu Trinkwasser und umweltgerechter Sanitation
1991: Einführung der kommunalen Abwässer-Richtlinie
1991: Richtlinie bezogen auf Nitrat
1992: Rio de Janeiro Konferenz
1992: Internationale Konferenz zu Wasser und Umwelt in Dublin. Dubliner Prinzipien (UNO)
1994: „Phosphat-Richtlinie“
1997: Erlass der Grundwasserverordnung (GrundwV)
1998: Einführung des GLOWA-Programms (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs) des BMBF
1998: EU Trinkwasserrichtlinie
1999: Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS)
23.10.2000: Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL)
2002: Novellierung des WHG
2002: Erlass der Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen (Beförderung wassergefährdender Stoffe in Rohrleitungsanlagen)
2002: Eigene EU-Wasserinitiative „Water for life“
2004: Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV)
2005: Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes

2005: Neufassung des Abwasserabgabengesetzes
1.08.2005: Novelle der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS)
05.05.2007: Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (löste die seit 1987 geltenden Vorschriften ab)
16.01.2007: EU-Grundwasserrichtlinie zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung
13.12.2007: Vorstellung der Dachmarke „German Water Partnership“
21.11.2007: Proklamation der UNO-Kampagne zum „International Year of Sanitation 2008“.

Der Schutz des Umweltmediums Wasser ist ein fach- und ressortübergreifendes Thema und so haben das BMBF, das BMU, das BMWi und das UBA das Thema „Wasser“ als diverse Forschungs- und Förderschwerpunkte in ihre Förderprogramme aufgenommen. Eine Liste der Akteure und eine Auswahl ihrer Förderprogramme/-schwerpunkte sind in der unten aufgeführten Tabelle aufgezeigt.

Tabelle 3: Forschungspolitik – Akteure und ihre Förderschwerpunkte und –programme

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung	
+ BMU	GWP: German Water Partnership – Deutsche Innovationsplattform Wasser
	FONA: Forschung für Nachhaltigkeit
	Programm „Forschung für die Umwelt“
	Globaler Wandel
	Wirtschaftsbezogene Nachhaltigkeit, integrierte Umwelttechnik
	KMU-innovativ: Biotechnologie (Förderrichtlinie 2007)
	KMU-innovativ: Nanotechnologie (Förderrichtlinie 2007)
	IWRM: Integriertes Wasserressourcenmanagement
	IPSWaT: International Post Graduate Studies in Water Technologies
	Fördermaßnahme „Wettbewerb zur Stärkung des Produktionsstandortes in der Biotechnologie – Entwicklung neuer Aufreinigungstechnologien“
BMW i – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	
	PRO INNO II: Förderung der Erhöhung der Innovationskompetenz mittelständischer Unternehmen
BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
	Greentech-Umwelttechnologieatlas für Deutschland
	Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte 2007
UBA – Umweltbundesamt	
	Umweltinnovationsprogramm – Demonstrationsvorhaben zur Verminderung von Umweltbelastungen

4.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen

4.3.1 Problemfeld „Verbesserung des Wasserdargebots“

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. Ursache hierfür sind Faktoren wie globale Erwärmung, Urbanisierung sowie Verschmutzungen durch Landwirtschaft (s. Kapitel „Bodenschutz“ 5.3.2) und Industrie. Die Gewinnung von Wasser zur Nutzung als Trinkwasser, Brauchwasser, Prozesswasser erfolgt i.d.R. durch die Entnahme von Grundwasser und von Oberflächenwasser aus Flüssen, Seen und Talsperren. Im Rahmen der Wassergewinnung spielt zudem die Anreicherung von Grundwasser eine bedeutende Rolle. Aufgrund der immer weiter zunehmenden Bedeutung der Gewinnung von Wasser ist das Wachstumspotential in der Branche als sehr hoch einzustufen. Nach Aussage von befragten Unternehmen beträgt das weltweite Marktvolumen für die Wassergewinnung heute ca. 900 Mio. € bei einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 10% (BMU/UBA 2007).

○ Entnahme aus Grundwasser

Zur Grundwassergewinnung werden i.d.R. Bohrbrunnen angelegt. Wasserinhaltsstoffe im Grundwasser wie Eisen, Mangan und Mikroorganismen können einen natürlichen Alterungsprozess der Brunnen hervorrufen, der die Förderleistung von **Grundwassergewinnungsbrunnen** stark verringert und zu erheblichen Trübungen des geförderten Wassers führen kann. Die Wiederherstellung des ursprünglichen Fördervermögens erfordert eine regelmäßige **Regenerierung der Brunnen**. Eingesetzt werden überwiegend chemische, mechanische oder kombinierte Verfahren zur Entfernung der Biofilme. Bei chemischen Verfahren kann oft nicht vermieden werden, dass Teile der verwendeten Chemikalien ins Grundwasser gelangen. Unter Umweltaspekten werden die chemikalienfreien mechanischen Technologien daher künftig eine höhere Bedeutung haben. Die Nachteile dieser Verfahren sind jedoch ein hoher Wasserverbrauch, lange Ausfallzeiten der Brunnen, sowie eine nachteilige Veränderung des Brunnenausbaus. Eine ohne Nachteile behaftete Alternative mit gleichen Reinigungsleistungen stellt die **Brunnenregenerierung mit Ultraschall** dar. Sie ist eine viel versprechende Technologie, durch die zudem die bestehende Brunnenkonstruktion nicht beschädigt wird. Eine weitergehende Forschung zu innovativen Brunnenbohr- und ausbautechniken ist notwendig, um zu weiteren innovativen Verfahren in der Brunnentechnologie zu kommen und somit eine standortangepasste Auswahl des „besten“ Verfahrens zu ermöglichen.

- Entnahme aus Oberflächenwasser und Regenwassernutzung

Die Nutzung von Oberflächenwasser aus Talsperren, Seen oder Flüssen hat mit rund einem Drittel einen deutlichen Anteil an der Trinkwasserversorgung in Deutschland. Neben der direkten Gewinnung aus Talsperren und Seen spielt die Uferfiltration und die künstliche Grundwasseranreicherung bei der Gewinnung aus Flüssen und Flusseinzugsgebieten eine entscheidende Rolle.

Uferfiltration ist ein naturnahes Verfahren zur Gewinnung (und kombinierten Aufbereitung) von sicherem Trinkwasser bzw. zur künstlichen Anreicherung von Grundwasser. Zur so genannten Uferfiltration kommt es, wenn der Wasserstand im Oberflächengewässer höher ist als der Grundwasserstand. Dies kann aufgrund von natürlichen Gegebenheiten der Fall sein oder, wie bspw. in Berlin, künstlich durch die Entnahme von Grundwasser aus Brunnen nahe der Uferlinie natürlicher Gewässer induziert werden. Durch den durch Brunnen induzierten Sog wird das Wasser aus Fluss oder See ins Grundwasser gezogen. Das muss sehr langsam geschehen, denn so wird das infiltrierende Wasser auf dem Weg durch die ungesättigte Bodenzone zum Grundwasserleiter gereinigt. Durch die natürliche Reinigungskraft des Untergrundes (Filter-, Abbauprozesse u.ä.) erreicht das gefilterte Oberflächenwasser Grundwasserqualität. Deswegen ist ein starker Vorteil der Uferfiltration, dass sie ohne zusätzliche teure Reinigungstechnik auskommt.

Aufgrund der geringen Investitions- und Betriebskosten ist die Uferfiltration auch für Schwellen- und Entwicklungsländer geeignet und könnte sich nach Aussagen von Prof. Martin Jekel der TU Berlin zu einem Exportschlager entwickeln (dazu ausführlich dradio 2004, Export von Planungsleistungen, Bau und Betrieb der Anlagen als Komplettpaket). Selbst die USA zeigen sich sehr interessiert, da dort in viel größerem Maße Flusswasser als Trinkwasserquelle eingesetzt wird.

Unterschiedliche klimatische Bedingungen und wesentlich höhere Kontaminationen der Gewässer könnten eine Limitierung der Reinigungsleistung und damit eine angepasste Nachreinigung zur Folge haben. Eine detaillierte Untersuchung dieser Fragestellung ist wegen der globalen Bedeutung notwendig und wird deswegen unter anderem im bis 2010 laufenden Projekt TECHNEAU untersucht (Details zum Projekt unter www.techneau.org).

In Deutschland wird dieses Verfahren aktuell eingesetzt: Die Berliner Wasserbetriebe decken bspw. rund 75% des Wasserbedarfs über die Uferfiltration. Gegenwärtig liegt ein besonderes Augenmerk der Wasserversorgung auf der Beseitigung von Arzneimittelrückständen, Bakterien und Viren, die in Gewässern nachweisbar sind. Diese Stoffe werden bei der Uferfiltration in der Uferzone nahezu vollständig aus dem Wasser entfernt. Dennoch ist die Forschung bzgl. der Elimination und dem Transport von Krankheitserregern und Arzneimittelrückständen (Forschungsprojekt der Universität Bayreuth, Näheres unter IDW 2007) weiterhin aktuell.

Die **Regenwassernutzung** ist vorwiegend im Zusammenhang mit der dezentralen Wassergewinnung/-versorgung aktuell und wird durch die zunehmende Zahl 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. So findet man beispielsweise Hinweise auf Zisternen bereits im alten Testament. Die

Regenwassernutzung spart Oberflächen- und Grundwässer und trägt gleichzeitig durch Nutzung des Niederschlagswassers zur Verringerung des schnellen Oberflächenabflusses bei, was bei flächendeckender Anwendung die Hochwassergefahr (Klimawandelbezug!) deutlich reduzieren würde.

Die moderne Gewinnung von Regenwasser erfolgt mittels **Regenwassernutzungsanlagen**. Dabei wird in erster Linie der Abfluss von Dachflächen genutzt. Relevante Technikteile in der Regenwassernutzungsanlage sind

- **Sammel-/Speicherbehälter:** in der Praxis haben sich monolithische Erdspeicher aus Polyethen (PE) oder Betonzisternen bewährt und durchgesetzt,
- **Filter:** idealerweise Filtersysteme wie Filtersammler, Standrohrfilter, Wirbelfeinfiler, die sich selbst reinigen,
- **Pumpen:** sowohl trocken (Kellerpumpen/ Saugpumpen) wie auch nass (Tauchpumpen) aufgestellt,
- **Leitungen**, ggf. Trinkwassernachspeisung: Wenn in langen Trocken- und Frostperioden der Regenwasservorrat nicht ausreicht, muss zur Gewährleistung der Betriebsbereitschaft bedarfsgerecht Trinkwasser in die Anlage eingespeist werden, auf dem Markt befinden sich von verschiedenen Herstellern so genannte „Nachspeisemodule“ oder "Kompakteinheiten", die das Trinkwasser aus einer separaten Box direkt in die Saugleitung der Pumpe einspeisen.
- **Steuerung:** Einbau einer automatischen Anlagensteuerung, die Steuerung sollte immer den Schutz der Pumpe vor Trockenlauf und bedarfsgerecht die Nachspeisung von Trinkwasser bei Regenwassermangel regeln. Bedarfsgerechte Nachspeisung bedeutet, dass bei Regenwassermangel nur soviel Trinkwasser eingespeist wird wie erforderlich ist.

Die notwendige Aufbereitungstechnik richtet sich nach dem Nutzungszweck und den gesetzlichen Vorschriften.

Auch z.B. in Indien wird Regenwasser genutzt. Dort hat man den Rückschritt von Hightech-Methoden gewagt und sich auf uralte Traditionen besonnen, da die Hightech-Methoden scheiterten. Bei dieser Lowtech-Variante wird der Monsunregen in Speicherseen aufgefangen und langsam ins Grundwasser versickert (TÜV Nord 2007).

○ Anreicherung von Grundwasser

Künstliche **Grundwasseranreicherung** (GWA) bietet eine Möglichkeit die Wasserressourcen zu bewahren und die Qualität von gebrauchtem Wasser zu verbessern. Die Grundwasseranreicherung ist besonders für aride Regionen bedeutend, aber ebenfalls zur Aufrechterhaltung des Wasserhaushaltes bspw. dort, wo der natürliche Abfluss und die natürliche Neubildung von Grundwasser durch versiegelte Flächen behindert werden. Außerdem kann eine steigende Grundwasserentnahme ausgeglichen werden. Die künstliche Grundwasseranreicherung zur Trinkwassergewinnung greift auf sehr mannigfache Verfahren zurück, die in den Wasserwerken in verschiedenen Kombinationen eingesetzt werden und meistens zu standortspezifischen Lösungen führen. Das Prinzip der künstlichen Grundwasseranreicherung

basiert somit auf einem modularen System, das abhängig von den örtlichen Besonderheiten verschiedene Anlagenkombinationen ermöglicht.

Bei der künstlichen Grundwasseranreicherung wird Oberflächenwasser

- punktförmig durch **Versickerungsbrunnen**,
- linienförmig über **Versickerungs-(Sickerschlitz-)Gräben** oder
- flächenförmig durch **Versickerungsbecken**

in ein Grundwasservorkommen eingebracht.

Grundwasseranreicherungstalsperren bieten ferner die Möglichkeit, schnell abfließende Hochwasserwellen zu speichern und das Wasser einer gezielten Versickerung zuzuführen. Zur GWA sind Anlagen für die Wasseraufbereitung, Versickerung und Wasserwiedergewinnung erforderlich.

Bei der GWA werden aber auch Regenwässer und aufbereitetes Abwasser versickert. Allein die Filterwirkung des Untergrundes reinigt das Oberflächenwasser. Dadurch und durch die Möglichkeit der Anpassung an komplexe lokale Bedürfnisse eignet sich das naturnahe Reinigungsverfahren auch für ärmere Länder. Die Kosten für eine GWA betragen z.B. im Oman nach den derzeitigen hydrologischen Daten etwa 0,15 €/m³. Verglichen mit den Kosten zur Entsalzung von Meerwasser von ca. 1,84 €/m³ ist die Grundwasseranreicherung ein sehr wirtschaftliches und vor allem ein energiesparendes Verfahren, das die CO₂-Bilanz des Oman auch in Zukunft nicht belasten wird (weitere Information unter Talsperren-komitee 2004). Grundwasseranreicherung ist aber keineswegs nur für Entwicklungsländer interessant. Auch Industrieländer mit wasserarmen Regionen wie die USA oder Australien arbeiten intensiv an Verfahren zum Wasserrecycling.

In der Wasserwirtschaft hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass Niederschlagswasser möglichst an der Stelle ihres Anfalls zu versickern ist (intewa 2007). Die gegenwärtig gebräuchlichsten Technologien zur Regenwasserversickerung sind die **Flächenversickerung, Mulden-, Rohr- und Rigolenversickerung (oder Kombinationssysteme, die auf den Einzelfall angepasst sind) und/oder Schachtversickerung oder Beckenversickerung**. Die Versickerung von Regenwasser kann neben ihrem Zweck zur Grundwasseranreicherung ferner zur Entlastung der Kanalisation bei Starkregenereignissen beitragen bzw. Abflussspitzen verringern.

Bei der Flächenversickerung ist die „**sickerfähige**“ **Oberflächenbefestigungstechnik** relevant (Gittersteine, Dränasphalt etc.). Besonders innovativ sind in diesem Zusammenhang so genannte „abwasserbehandelnde regenerationsfähige Pflasterbeläge“, die eine hohe Versickerungsleistung haben, gleichzeitig Schadstoffe (z.B. mineralöhlhaltige Bestandteile oder Schwermetalle im Abfluss) zurückhalten und so eine Verlagerung der Schadstoffe in Boden oder Grundwasser verhindern. In Zusammenhang mit den anderen Technologien sind evtl. **Absetzeinrichtungen für Feststoffe** von Belang, **Regler** oder **spezielles Material für Sicker- oder Filterschichten**.

Die Versickerung aus Oberflächengewässern wird durch **Uferfiltration** und **Langsandsandfiltration** umgesetzt. Die Langsandsandfiltration wird vor allem dann eingesetzt, wenn spezielle Wasserinhaltsstoffe, inklusive Mikroorganismen eliminiert werden müssen. Sie wird

deshalb insbesondere bei der Versickerung von vorgereinigtem Abwasser verwendet. In Regionen, in denen für die Langsamfiltration kein geeigneter Sand zur Verfügung steht, kann als **Filtermaterial** unter Beachtung spezifischer Anwendungsrestriktionen auch auf lokal verfügbares Material wie z.B. Recycling-Glasgranulat oder Kokosfasern zurückgegriffen werden (weitere Informationen unter Wasser-NRW 2007). Die hygienisch unbedenkliche Versickerung von gereinigtem Abwasser zwecks Grundwasseranreicherung kann vor allem in trockenen Regionen eine Rolle spielen. Neben den Filter- und Reinigungsverfahren sind dafür auch die entsprechenden **Kontrolltechniken** erforderlich (Messinstrumente, Analytik etc.).

Auf welche Weise die unterschiedlichen Schichten viele Schadstoffe im Lauf der Filtration aus dem Wasser entfernen, ist bis heute nur in Ansätzen verstanden. Klar ist jedoch, dass bestimmte Schadstoffe vom Boden aufgenommen oder mikrobiologisch abgebaut werden. Die aktuelle Forschung im Bereich Versickerung beschäftigt sich zum einen mit Schadstoffen in Regenwasserabflüssen, die in kolloidaler Form nicht sedimentieren und ins Grundwasser gelangen können und die u.U. in Wechselwirkung mit dem anstehendem Bodenmaterial treten können und zum anderen mit der großtechnischen Grundwasseranreicherung über alternative Wasserressourcen, bspw. Abwasser und Brackwasser, in wasserarmen Regionen (FONA 2005).

- Senkung des Wasserverbrauchs und der Abwasserproduktion

Eine Möglichkeit das Wasserdargebot zu schonen, besteht in der Senkung des Frischwasserverbrauchs. Neben **wassersparenden Geräten und Technologien (wasserarme Haushaltsgeräten und Sanitäreinrichtungen** mit z.B. Spartasten, Perlatoren, Sparstopps bei Duschen) sind aktuell und künftig vor allem **effizientere Techniken** in der Bewässerungslandwirtschaft und die **Wiederverwendung** von Wasser als Brauch-/Prozesswasser (oder **Kreislaufführung**) in der Industrie wesentlich.

Innovativ sind für den Haushaltsbereich 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. In dezentralen oder autarken Systemen können wasserlose Urinale jedoch ein wichtiger Bestandteil sein.

In der Industrie kann der Wasserverbrauch am besten durch die Kreislaufführung und die Wiederverwendung von Prozess- und Abwasser für untergeordnete Zwecke gesenkt werden. Dies ist z.B. für Kühl-, Wasch-, Spülwasser denkbar. Die **Kreislaufführung** bzw. das **Recycling von Wasser** wird im Abschnitt Abwasserbehandlung betrachtet.

Global gesehen lässt sich die Wasserentnahme mehrheitlich dem Sektor Landwirtschaft zuordnen (~70%, siehe Abb. 8).

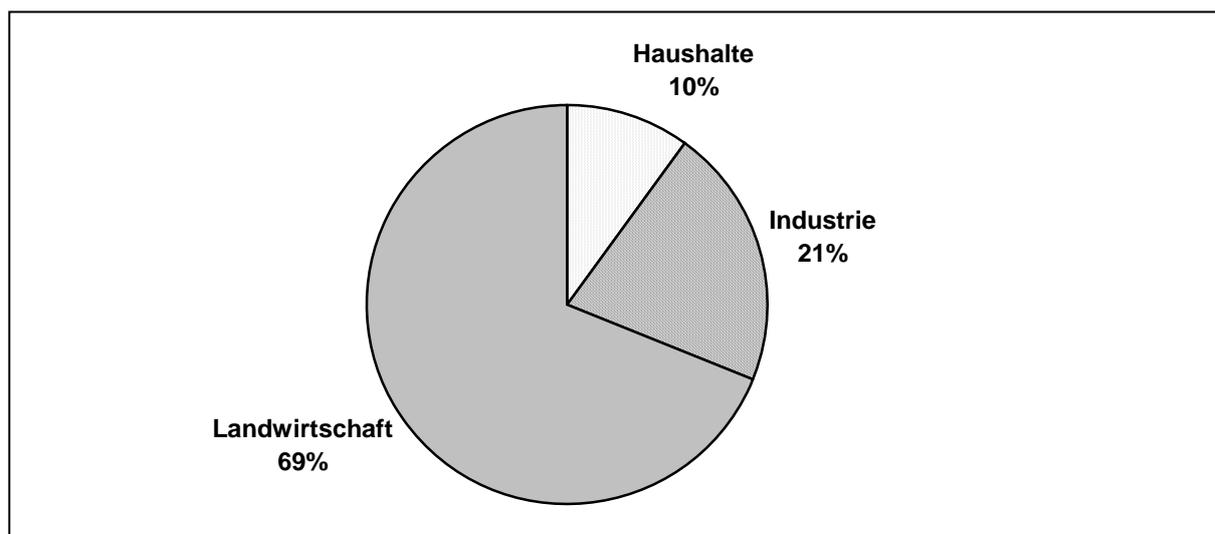


Abbildung 8: Jährliche weltweite Wassernutzung (Quelle: Water GAP 2.0 2000)

Im Sektor Landwirtschaft machen zwei Faktoren Probleme: Einerseits benötigen die ertragreicheren neuen Pflanzen meist viel mehr Wasser als traditionelle Sorten, andererseits befinden sich die großen Landwirtschaftsflächen oft in Trockengebieten. Immer größere Flächen müssen künstlich bewässert werden und erfordern u.a. **modernere Bewässerungstechniken** (siehe Abschnitt 5.3.4 im Kapitel „Bodenschutz“, Lösungen im Problemfeld Versalzung), die sich durch einen möglichst hohen Wassernutzungsgrad, d.h. auch durch möglichst geringe Verdunstungsverluste, auszeichnen. Im Zusammenhang mit effizienter Bewässerung wird auch teilweise die **Wiederverwendung von häuslichem Abwasser** zu Bewässerungszwecken praktiziert – vor allem in Trockenregionen. In diesem Fall ist jedoch eine Vorreinigung des Bewässerungswassers erforderlich, um eine hygienische Unbedenklichkeit zu gewährleisten.

- Wasserverlustmanagement/Instandhaltung Leitungsnetz

Der Zustand der Wasserver- und Abwasserentsorgungs-Leitungsnetze ist indirekt auch für den Zugang zu (qualitativ gutem) Wasser und für das Niedrighalten von Wasserverlusten im Versorgungsnetz (Verluste von bis zu 50%) mitbestimmend. Relevant sind vor allem Leckagen im Rohrnetz, durch die erhebliche Wasserverluste entstehen können. Gleichzeitig können durch undichte Stellen im Leitungsnetz Schmutzstoffe aus dem Boden und Grundwasser eintreten und so die Wasserverluste (weniger qualitativ gutes Wasser) noch zusätzlich erhöhen. Außerdem bilden sich an den Rohrwänden Ablagerungen, die die Wasserqualität beeinträchtigen. Darum sind **Technologien zur Zustandsbewertung, Instandhaltung und Sanierung von Wassernetzen**, insbesondere der Abwasserkanalisation und von Wasserreservoirs wesentlich.

Zur optimalen Planung der Instandhaltung von Rohrnetzen können spezielle **Softwareentwicklungen** eingesetzt werden. Ein innovatives Beispiel ist das Programm PiReM, das als Entscheidungshilfe bzgl. des Erneuerungsbedarfs von Leitungen eingesetzt werden soll (InnoRep 2006). In der Rohrnetzüberwachung und Früherkennung sind auch **Durchfluss- und Druckmesser/-sonden/-sensoren, sensorbasierte Rohrinspektionssysteme und Geräuschloggersysteme** bedeutend. Im Leckagemanagement wird ebenfalls die **elektroni-**

sche Fernablesung von Wasserzählern im Rohrnetz und die **rechnergestützte Datenauswertung** getestet (IDW 2000; EnBW 2004). Zur Leckageortung kommen sog. **Korrelatoren** und die **Gasdetektion** zum Einsatz (Sprint 2007; Kipp 2007; Elster 2006). Bei der Rohrsanierung ist die gängige Methode die **Rohr-in-Rohr-Technik**. Bei der Sanierung von Leitungssystemen ist die **grabenlose Sanierung** und spätere **In-situ-Überwachung** zukunftsweisend. Für lange Streckenabschnitte werden z.B. glasfaserverstärkte Schläuche in das Leitungsnetz eingebracht, die dann mit UV-Licht ausgehärtet werden. Auch das Einbringen von Kunststoffelementen, die miteinander verschweißt werden, ist eine gängige Methode (MWVLW 2005). Eine neue Methode ist das Aufsprühen einer **Spezialbeschichtung** auf die Rohrwand (Bayer 2007).

Die derzeit am Markt angebotenen Sanierungsverfahren sind aber fast ausnahmslos für die Sanierung von öffentlichen Abwasserkanälen entwickelt und optimiert worden. Für die Sanierung von privaten Grundstücksentwässerungsanlagen fehlen geeignete Sanierungstechniken. Von allen modernen Sanierungsverfahren erscheint allein das **Flutungsverfahren** für die Sanierung dieser verzweigten Leitungsnetze mit geringen Durchmessern in unzugänglicher Lage geeignet. Dabei handelt es sich um ein Abdichtungs-Verfahren, bei dem die undichte Leitung nacheinander mit zwei Injektionsflüssigkeiten gefüllt wird. Diese werden unter hydrostatischem Druck durch die undichten Stellen der Leitung in den umliegenden Boden gepresst. Dort reagieren die Komponenten miteinander und bilden ein wassersperrendes Sandstein-Konglomerat (weitere Informationen unter Wasser-NRW 2002). Im Bereich der Wasserinfrastruktur sind Innovationen zum Beispiel bei der Materialdichte und der Lebensdauer von Leitungen zu erwarten und durch gezielte Förderung zu forcieren.

Im europäischen Vergleich nimmt Deutschland mit durchschnittlich nur 8 Prozent Wasserverlusten eine Spitzenstellung im positiven Sinn ein. Die höchsten Verluste erreichen Frankreich und Italien mit 25% beziehungsweise 27%. Die deutsche Wasserwirtschaft lässt sich diese Spitzenposition einiges kosten: Rund 2,5 Mrd. € investieren die Wasserversorger pro Jahr in die Instandhaltung und Erneuerung der Infrastruktur. Ein Großteil (65%) der Investitionen fließt in die Wartung der Rohrnetze (RWE 2007).

Aufgrund der hohen Wasserverluste in öffentlichen Versorgungsnetzen (global ~50%) besteht weltweit eine hohe Nachfrage nach Dienstleistungen in Verbindung mit Produktlieferungen im Wasserverlustmanagement. Bei den Lösungen muss es sich um Gesamtkonzepte und integrative Ansätze mit einer möglichen Anbindung von „Hightech“ an konventionelle (in Schwellenländern eher Lowtech-)Systeme handeln. Für die Anbieter von Dienstleistungen im Bereich der Inspektion und Sanierung von Kanälen in Deutschland ergeben sich bei der Betrachtung der Marktsituation grundsätzliche Tendenzen. Bei der Analyse des Verhaltens potenzieller Auftraggeber ist erkennbar, dass viele Grundstückseigentümer die Untersuchung der Hausanschlusskanäle vor sich her schieben. Die Frist für eine verpflichtende Untersuchung/Sanierung endet außerhalb der Trinkwasserschutzgebiete erst 2015, was eine verschleppende Wirkung auf die Nachfrage in diesem Technologiesegment hat.

Trotzdem wird bei Beibehaltung dieses Verhaltens der Grundstückseigentümer in den Jahren vor 2015 eine wesentlich höhere Nachfrage an Dienstleistungen entstehen, die in der Folge auch ein entsprechendes Angebot nach sich ziehen wird. Gemessen an den heutigen

Erfahrungen ist jedoch fraglich, ob die technischen Anforderungen an die Qualität und Durchführung dann gewährleistet sein werden.

○ Entsalzung von Meerwasser

Hauptsächlich in Regionen mit Süßwassermangel sind oft große Salzwasservorräte vorhanden: In Küstenregionen im Meerwasser und im Inland zuweilen in salzhaltigen Grundwasservorkommen. Um ausreichend Wasser zu Trink- und Brauchwasserzwecken verfügbar zu machen sind **Entsalzungstechnologien** wesentlich. In diesen Regionen besteht Bedarf sowohl für großtechnische Entsalzungsanlagen als auch für kleine Anlagen im eher häuslichen Gebrauch. Für den Export in Entwicklungsländer werden robuste und wartungsarme Lösungen benötigt.

Die verbreitetsten konventionellen Verfahren zur Meerwasserentsalzung sind

- **Destillation**, insbesondere *Mehrstufenverdampfung* (MSF – multistage flash evaporation) und *Multi-Effekt-Destillation* (MED – multiple effect distillation), sowie die
- **Umkehrosmose** (RO – reverse osmosis).

Beide Verfahren sind energieintensiv und teuer und können aufgrund ihres hohen Energiebedarfs nicht in jedem Fall als „nachhaltig“ bezeichnet werden. Neben der verfahrenstechnisch notwendigen Nutzung endlicher Energieressourcen ist die Kohlendioxidfreisetzung ein gravierender Nachteil der großtechnischen State-of-the-Art-Meerwasserentsalzung. Deswegen bestehen zukünftige Herausforderungen in innovativen Lösungen zur Senkung des Energiebedarfs, 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 **windkraftbetriebene 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 zu senken. Im Gegenteil: Noch führen technische Anpassungsprobleme und hohe Investitionskosten bei der Stromerzeugung zu einer teilweise erheblichen Verteuerung. In diesem Bereich sind zeitnah Forschungsvorhaben voranzutreiben und zu initiieren.

Bei der Entsalzung von Meerwasser entstehen daneben als Abprodukt große Mengen an Sole. Diese Sole wird wieder zurück ins Meer geleitet und kann die Meeresumwelt stark belasten (Tidwell 2005). Für die umweltfreundliche Entsorgung der Sole besteht noch umfangreicher Forschungsbedarf.

Eine zusätzliche Herausforderung bei der Entsalzungstechnik stellt die Entwicklung von **dezentralen**, wartungsarmen, leistungsfähigen, aber preisgünstigen **Kleinanlagen** dar (DME 2007a).

Wichtig sind ebenfalls **mobile Brackwasser-/Meerwasserentsalzungsanlagen**, die in Katastrophenfällen zur Notwasserversorgung eingesetzt werden können. Auf dem Markt befinden sich Anlagen, die aus Feinfilter- und Umkehrosmoseeinheiten bestehen (Elga 2007).

In Betrieb sind derzeit etwa 12.000 größere Anlagen zur Meerwasserentsalzung. Damit hat sich die Meerwasserentsalzung zu einem bedeutenden Wachstumsmarkt entwickelt. Und die Tendenz ist weiter steigend, denn die derzeit installierte globale Entsalzungsanlagenleistung deckt nur etwa 70 Prozent des derzeitigen öffentlichen Bedarfs an entsalztem Wasser. Ein enormes Potential, wenn man etwa von dem Bau einer RO-Anlage mit einer täglichen Entsalzungskapazität von 30.000 m³ bei einem Auftragsvolumen von ca. 30 Mio. € ausgeht. Darüber hinaus generiert eine solche Entsalzungsanlage im laufenden Betrieb Kosten von über einer halben Million Euro jährlich – unter anderem für **Antiscaling- & Antifouling-Produkte** (Produkte zur chemischen Wasserbehandlung), Pumpen, Membranen und Armaturen, nähere Informationen bei DME 2007b). In dem prosperierenden Geschäft mit Meerwasserentsalzungsanlagen versucht neuerdings auch der Essener RWE-Konzern Fuß zu fassen (z.B. Anlagen in Spanien, Alicante und in England, London). Weltweit fließt 80% des entsalzten Meerwassers bislang aus Destillationsanlagen, nur 20% wird durch Umkehrosmose gewonnen. Durch stark gesunkene Preise für Spezialmembranen wird es demnächst aber eine starke Verschiebung zu Umkehrosmose-(RO-)Anlagen geben.

Zukünftige Märkte werden sich weltweit auftun, da sich die Wasserversorgungsproblematik vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländer stetig verschärfen wird. Für Solarbetriebene Anlagen gibt es vor allem in Ländern wie den Golfstaaten und Nordafrika Exportpotential, die mit dieser technischen Lösung „zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen können“: Stromerzeugung und Trinkwasserversorgung. Doch auch in Deutschland wird sich ein Markt für Meerwasserentsalzungsanlagen entwickeln. Nach Aussagen der UNO wird Deutschland bis 2020 zu den wasserkritischen Regionen der Welt gehören (ZDF-mediathek 2007). Als Standorte für Meerwasserentsalzungsanlagen bietet sich in Deutschland beispielsweise die Ostsee mit ihrem sehr geringen Salzgehalt von 0,4 Gew.-% (als Brackwasser zu bezeichnen, zum Vergleich: das Mittelmeer hat einen Salzgehalt von 3,6 Gew.-%) an. Es ist zu erwarten, dass bis 2020 die Technik der Anlagen soweit entwickelt ist, dass ein Liter Trinkwasser aus einer Meerwasserentsalzungsanlage etwa genauso viel kosten wird wie ein Liter Trinkwasser aus einer herkömmlichen Aufbereitungsanlage (nach heutigem Stand 0,60€/l).

- Alternative Verfahren

In Form von Luftfeuchtigkeit enthält die Atmosphäre rund zehnmal mehr Wasser als alle Flüsse der Welt zusammen. Um diese bisher ungenutzte Quelle zu erschließen, wurden und werden Technologien entwickelt, die die in der Erdatmosphäre **gebundene Luftfeuchtigkeit mittels Kondensation** als Trinkwasserquelle erschließen (InnoRep 2005; UniBremen 2007). Diese „**AquaMission**“-**Technik** ist vor allem für Trockenregionen geeignet, die nicht in erreichbarer Nähe einer Küste liegen und wo es sich deshalb auch 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. Die Luftwassergewinnung (aqua-society 2007) wird künftig auch für die Trinkwassergewinnung innerhalb autarker Systeme/Siedlungen von Bedeutung sein. Als „no-tech“-Variante kann ebenfalls **aufsteigender Nebel** genutzt werden. Er entsteht, wenn kalte Meeresströmungen auf warme Festlandluft treffen. **Netze** an den Hügelflanken lassen feine Nebeltropfen kondensieren und leiten große Wassermengen in ein Reservoir.

Zusammenfassende Darstellung der **Wassergewinnungs-Technologien** des Problemfelds „Verbesserung des Wasserdargebots“:

Lösungsansatz		Märkte
Grundwassergewinnung	Grundwassergewinnungsbrunnen: Regenerierung von Brunnen (mechanische u. chemische oder kombinierte Verfahren, Ultraschalltechnik) Neue Brunnenbohr- und ausbautechniken	weltweit weltweit
	Uferfiltration	weltweit
Entnahme aus Oberflächenwasser	Regenwassernutzungsanlagen: Sammel-/Speicherbehälter, Filter, Pumpen, Leitungen, Steuerungsmodule, Aufbereitungstechnik	weltweit
	Grundwasseranreicherungsanlagen: Versickerungsbrunnen, Versickerungs-(Sickerschlitz)Gräben, Versickerungsbecken, Grundwasseranreicherungstalsperren, Aufbereitungs- und Wiedergewinnungstechnologien	weltweit
Anreicherung von Grundwasser	Regenwasserversickerung: Flächenversickerung (sickerfähige Oberflächen, Befestigungstechnik wie Gittersteine o. Dränasphalt, abwasserbehandelnde regenerationsfähige Pflasterbeläge) Mulden-, Rohr- und Rigolenversickerung oder Kombinationssysteme, Schacht- oder Beckenversickerung Absetzeinrichtungen für Feststoffe Regler Material für Sicker- oder Filterschichten	weltweit
	Versickerung aus Oberflächengewässern: Uferfiltration Langsamsandfiltration (Filtermaterial: Sand, Recycling-Glasgranulat, Kokosfasern) Kontrolltechniken	weltweit (anhängig von Wasserqualität, evtl. Aufbereitung zu kostenintensiv)
	Wasserarme Haushaltsgeräte	Europa, Schwellenländer
Senkung des Wasserverbrauchs und der Abwasserproduktion	Wasserarme Sanitäreinrichtungen (wasserlose Urinale)	weltweit
	Effizientere Bewässerungstechniken (→ Technologien aus dem Problemfeld „Versalzung“, Abschnitt 5.3.4)	weltweit
	Wiederverwendung von Wasser Kreislaufführung Recycling von Wasser	weltweit
	Technologien zur Zustandsbewertung: Durchfluss- und Druckmesser/-sonden/-sensoren, Geräuschloggersysteme, elektronische Fernablesung, rechnergestützte Datenauswertung, Korrelatoren, Gasdetektion	Europa, Schwellenländer
Wasserverlustmanagement	Instandhaltung und Sanierung: Software zur Instandhaltungsplanung, In-Situ-Überwachung	Europa, Schwellenländer
	Rohr-in-Rohr-Technik, Grabenlose Sanierung, Spezialbeschichtungen für Rohre, Flutungsverfahren	weltweit

Entsalzung von Meerwasser	Meerwasserentsalzungsanlagen (Destillationsanlagen [Mehrstufenverdampfung, Multi-Effekt-Destillation], Umkehrosmose-Anlagen)	weltweit
	Solarbetriebene Anlagen („solar stills“)	Länder mit „ausreichender Sonneneinstrahlungsintensität und -dauer“)
	Windkraftbetriebene Anlagen	weltweit
	Mobile Anlagen	weltweit
	Antiscaling- und Antifouling-Produkte	weltweit
Alternative Verfahren	„AquaMission“-Technik (Luftwassergewinnung)	Schwellen- und Entwicklungsländer
	Nebelnetze	Entwicklungsländer

Wasseraufbereitung

Die Wasseraufbereitung dient der Anpassung von Rohwasser an die Anforderungen der Trinkwasser- und Nutzwassernutzung (vorgegeben durch Gesetze). Die Wasseraufbereitung umfasst im Wesentlichen zwei Gruppen der Behandlung:

- 1) Entfernung von Stoffen aus dem Wasser (z.B. Reinigung, Sterilisation, Enteisung, Enthärtung, Entsalzung) und die
- 2) Ergänzung von Stoffen sowie Einstellen von Parametern des Wassers (z.B. Einstellung von pH-Wert, gelösten Ionen und der Leitfähigkeit)

Das Rohwasser (aus Quell-, Grund-, Talsperren-, Oberflächenwasser) wird mittels **mechanischer, physikalischer, chemischer und/oder biologischer Verfahrensweisen** behandelt und so dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst. Gründe für eine Aufbereitung können Farbe, Trübstoffe, Geruch, Verunreinigung durch Bakterien/Viren/Keime, Sauerstoffmangel, Eisengehalt, Mangangehalt, Härte und Salzgehalt des Wassers sein. Mit Bezug auf Umwelttechnologien sind bei der Wasseraufbereitung vor allem Verfahren essentiell, die es erlauben, die Verwendung von (umwelt- oder 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 müssten. Gemäß ChemIng (2007) geht der Trend, insbesondere in der industriellen Wasseraufbereitung, weg von der chemischen hin zur **physikalischen Aufbereitung**.

○ Trinkwasseraufbereitung

Die Trinkwasseraufbereitung dient der Erzeugung hygienisch und chemikalisch einwandfreien Trinkwassers und zum Schutz der Rohrleitungen und Armaturen. Die wesentlichen Elemente einer (Trink)Wasseraufbereitung sind u.a. Desinfektion, Enteisung, Entmanganung, Entfernung von Partikeln und Enthärtung des Rohwassers.

Die *Entfernung von Partikeln* erfolgt zumeist über **Sedimentation** oder einfache **Filtration** (bspw. im Langsamfilter). Feinst suspendiert Partikel oder gelöste Inhaltsstoffe werden durch **Flockung/Fällung** mit anschließender Filtration abgetrennt. Bei der Flockung/Fällung wer-

den jedoch Chemikalien eingesetzt, die dann später auch im Filtrat enthalten sein können. Chemikalienunabhängige **Membranverfahren** gewinnen daher an Bedeutung. Problematisch sind dabei jedoch das Verblocken und das so genannte Fouling der Membranen. Die Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe (TEG) hat darum eine Testanlage für eine chemikalienfreie **elektrophysikalische Fällung** (EpF) zur Flockung entwickelt, die einer Membranfiltration vorgeschaltet werden kann (DIW 2007).

Die *Desinfektion* von Wasser beinhaltet das Entfernen und/oder Abtöten von Mikroorganismen (v.a. Krankheitserregern) im Wasser. Verfahren, die nach dem Stand der Technik zum Einsatz kommen, sind z.B. **UV-Bestrahlung, Elektrolyse, Ozonierung, Filtration, die Zugabe von Chemikalien**, speziell die Zugabe von Chlor oder Chlordioxid, oder auch **thermische Verfahren**. Auf einige Verfahren wird im Folgenden detailliert eingegangen. Aufbereitungsstoffe sollen jedoch nur aus zwingenden hygienischen oder technischen Gründen und stets nur im unbedingt notwendigen Ausmaß dem Trinkwasser bei der Aufbereitung hinzugefügt werden. Eine einfache Methode zur Entkeimung von Trinkwasser stellt die **solare Wasserdesinfektion** (SODIS) dar. Hierzu wird das zu entkeimende Wasser in entsprechenden PET(Polyethylenterephthalat)-Behältnissen lediglich 6h der Sonnenstrahlung ausgesetzt (weitere Informationen unter www.sodis.ch). Dieses Verfahren kann aufgrund seines Minimalismus in Entwicklungsländern sehr gut eingesetzt werden und sollte ohne Probleme von der Bevölkerung akzeptiert werden.

Für die Entkeimung wird primär die UV(Ultraviolette)-Bestrahlung eingesetzt. Durch die Bestrahlung mit ultraviolettem Licht wird die Zellteilung der Wasserorganismen blockiert, wodurch diese absterben (Rothenberger 2003). Das UV-Verfahren ermöglicht eine deutliche Reduktion der Dosiermenge oder einen gänzlichen Verzicht von Desinfektionsmitteln und es entstehen keine Nebenprodukte. Das Verfahren wird daher nach aktuellem Stand als umweltfreundlich eingestuft. I.d.R werden jedoch bei der UV-Desinfektion Quecksilberdampf-Lampen eingesetzt, die giftige Stoffe enthalten und überdies eine geringe Lebensdauer haben. Aus diesem Grund beschäftigt sich die aktuelle Forschung mit Alternativen zu Quecksilberdampf-Lampen, die ohne diese giftigen Inhaltstoffe auskommen und die zusätzlich kompakter und dauerhafter sind. Ein Beispiel ist die Entwicklung von entsprechenden Halbleiterdioden durch das Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH).

Die **elektrolytische Wasserdesinfektion** beruht auf der elektrochemischen Umwandlung von Wasserinhaltsstoffen ohne eine Zugabe oder mit einer sehr geringen Zugabe von Chemikalien. Die elektrolytische Desinfektion scheint vor allem für kleine Anlagen vorteilhaft zu sein, auch für die Desinfektion von industriellem Prozesswasser. Die elektrolytische Desinfektion findet desgleichen zur Vorbeugung von Legionellen (gesundheitsschädliche Bakterien) in Sanitärsystemen Anwendung (wasserwissen 2007). Ein weiteres Verfahren zur Legionellenbekämpfung (allg. Desinfektion) ist die **Mikrobizide Kontakt-Desinfektion**. Bei diesem Verfahren werden die Bakterien unter Nutzung der mikrobiziden Kontakt-Wirkung von metallischem Silber bekämpft. Entwickelt wurde dieses spezielle Verfahren durch die TU Dresden in Zusammenarbeit mit der Fa. Silvertex. Durch das direkte Einbringen spezieller silberhaltiger textiler Systeme in wasserführende Systeme wird eine signifikante Reduzierung der Einsiedelung und Vermehrung von Bakterien erreicht. Die mikrobizide Wirkung besteht in einer Kontaktreaktion gegen und der Übertragung von Metallionen auf die Mikroorganismen. Erwähnenswerter Vorteil dieses Verfahrens ist, dass diese Lösung keinen zusätzliche Ener-

gieaufwand oder chemische Zusätze und technischen Installationen erfordert. Die flexible Gewebestruktur erlaubt eine Anpassung an die unterschiedlichsten Profile von z.B. Rohrleitungen (InnoRep 2007b).

Die wesentlichen Einsatzbereiche der **Ozonierung** in Deutschland sind Schwimmbäder und die Trinkwasserdesinfektion. Durch die Ozonierung werden Bakterien und Viren im Wasser sehr schnell inaktiviert. Der Einsatz von Chlor bei der Wasserentkeimung kann erheblich reduziert werden. Im Gegensatz zur Chlordesinfektion entstehen durch Ozonierung offensichtlich keine Nebenprodukte. Die aktuelle Produktentwicklung beschäftigt sich mit Kombinationen der o.g. Verfahren, bspw. **Ozon mit UV-Bestrahlung** (z.B. UVitt GmbH).

Bei der Desinfektion mittels **Filtrationsverfahren** sind mit Bezug auf „Hochtechnologie“ sicherlich die **Membranfilter** wesentlich. Mittels **Ultrafiltern** mit einer Porengröße im Mikrometerbereich können Mikroorganismen/chlorresistente Keime sicher entfernt werden. **Ultrafiltrationsmembranen** sind vor allem für die Sterilfiltration wesentlich.

Ein weiteres chemikalienfreies hochtechnologisches Verfahren, das in der Trinkwasseraufbereitung eingesetzt wird, ist die **Ultraschalltechnik**. Das Verfahren der **ultraschallinduzierten Koagulation** bietet durch sein umweltfreundliches Prinzip eine zukunftsorientierte Möglichkeit der Wasseraufbereitung. Bei dieser Methode wird die verunreinigte Dispersion einer stehenden Ultraschallwelle ausgesetzt. Dabei werden verschiedene Kräfte und Prozesse wirksam, die ein Koagulieren der dispergierten Partikel bewirken.

Infolge von Naturkatastrophen oder Unfällen kommt es häufig zur Verseuchung von Trinkwasser. Daher müssen auch für den Katastrophenschutz entsprechende Desinfektionstechnologien zur Verfügung stehen. Hierfür sind z.B. **mobile Membranmodule** zur Aufbereitung/Entkeimung von Wasser denkbar. In DBU (2005) wird für Katastrophenfälle ferner eine innovative **Diaphragmalysetechnik** vorgestellt, die einzig mit Wasser und Kochsalz arbeitet und sowohl stationär als auch mobil einsetzbar ist. Eine weltweit einzigartige Anlage zur mobilen Desinfektion hat die Universität Karlsruhe entwickelt. Diese Anlage ist betriebsfertig lagerbar und kann ohne Bedienungspersonal in Betrieb genommen werden. Die transportierbare Anlage nutzt als verfahrenstechnischen Kern die **Nano-Membranfiltration in Verbindung mit einer vorgeschalteten Grobstoffabtrennung** (InnoRep 2006b). Die mobile Desinfektionstechnologie wird im Blick auf zunehmende Extremwetterereignisse durch den Klimawandel gefragt sein, es wird möglicherweise zu einer progressiven Marktentwicklung in diesem Sektor kommen.

In unterentwickelten Regionen ist das Grund- und Brunnenwasser oft durch Trübstoffe, Partikel und Keime verunreinigt. Eine zentrale Aufbereitung ist dort in ländlichen Regionen oft nicht durchführbar und es sind zuverlässige Kleinsysteme erforderlich. Die Cornelsen Umwelttechnologie GmbH hat bspw. ein **Kleinfiltersystem** zur Entfernung von Mikroorganismen und Partikeln entwickelt, welches lediglich eine Membran enthält und rein mechanisch, ohne Elektrizität und die Verwendung von Chemikalien betrieben wird (DBU 2005).

Bei der *Entsäuerung* wird überschüssige aggressive Kohlensäure aus dem Wasser entfernt, um Korrosion an Leitungen und Behältern zu verhindern. Nach dem Stand der Technik erfolgt die physikalische Entsäuerung durch eine Kohlensäure-Ausgasung mittels **Belüftung**,

Verdüsung, Verrieselung ohne Aufhärtung. Eine vollständige Entsäuerung ist physikalisch noch nicht möglich und kann nur durch chemische Verfahren erreicht werden.

Eisen und Mangan im Trinkwasser rufen Trübungen sowie einen unangenehmen Geschmack hervor und führen in Rohrleitungen/Behältern zu Ablagerungen. Die Entfernung dieser Stoffe aus dem Wasser erfolgt in der Regel über **Oxidation, Flockenbildung und anschließende Abfiltration**. Die Forschungsschwerpunkte des Umweltbundesamtes konzentrieren sich auf die **biologischen Verfahren** zur *Enteisenung und Entmanganung*, die bislang nicht immer anwendbar sind.

Zur *Enthärtung* (Entcarbonisierung) von Wasser werden als physikalische Verfahren bspw. **Ionenaustauscher** und **Umkehrosmose** angewandt und als chemische „Lösung“ im Enthärtungsprozess z.B. Kalkmilch und Kalkwasser aus Branntkalk (Calciumoxid, CaO) oder Kalkhydrat (Calciumhydroxid, Ca(OH)₂) eingesetzt.

Arsen, das auf Grund geologischer Gegebenheiten oder durch anthropogene Einflüsse in das Trinkwasser gelangt, ist ein zunehmendes globales Gesundheitsproblem. Die Wissenschaft bemüht sich immer wieder um Filtermethoden, doch meist handelt es sich dabei um sehr kostspielige Lösungen. Arsen kann aus Trinkwasser mittels **Adsorptionsverfahren** entfernt werden. Zahlreiche Unternehmen bieten hierfür Adsorptionsmittel, i.d.R. bestimmte Granulate, an. Darüber hinaus gibt es auch **Filterverfahren**, die speziell Arsen extrahieren (InnoRep 2003). Eisenoxid kann in Form von Nanopartikeln helfen, Trinkwasser zu säubern. Durch einen neuen Materialeffekt können mit feinsten Rostpartikeln Arsenverunreinigungen aus dem Trinkwasser herausgefischt werden. Das Arsen bindet sich chemisch an die nur zehn bis zwanzig millionstel Millimeter großen Eisenoxid-Partikel, die dann mit einem Magnetfeld von der Flüssigkeit getrennt werden können. Dies gelingt bereits mit einem relativ schwachen Magnetfeld. Das Magnetfeld bewirkt ein Zusammenballen des Nanorosts zu leicht separierbaren, größeren Teilchen. Daraus könnte ein einfaches und günstiges Verfahren für die Trinkwasserreinigung in Entwicklungsländern entstehen (InnoRep 2006c).

Die eawag hat ferner eine simple Methode zur Behandlung von kleinen Wassermengen in Plastikflaschen konzipiert, das auf einer **photochemischen Oxidation** basiert (Frei 2001). Das Verfahren befindet sich für die Verwendung in Entwicklungsländern in der Testphase.

Erwähnt sei hier noch, dass eine **Vielzahl alternativer Wasseraufbereitungstechniken** auf dem Markt sind, deren Wirkungen und Wirkweisen jedoch naturwissenschaftlich umstritten sind. Vielfach konstatieren Hersteller dieser Technologien ein geistiges oder informatives Naturprinzip, das – abseits bekannter stofflicher und energetischer Wirkweisen – in diesen Techniken Wirkungen entfaltet und sich positiv auf die Wasserqualität und Lebensprozesse auswirkt, bzw. zahlreiche wünschenswerte Effekte in der Nutzung dieser Wasser zeitigt. Diese „esoteriknahen“ Techniken finden sowohl in der Trink- und Prozesswasseraufbereitung als auch in der Abwasserbehandlung Anwendung.

Beispiele hierfür wären die Produkte der Firmen Roland Plocher (D), EWO Wasservitalisierung (A), Planet Horizons Technologies (CH) oder auch die Verwendung „Effektiver Mikroorganismen“. Anwendung finden diese Techniken im privaten Bereich aber auch in der Wasseraufbereitung größerer Objekte wie Hotelanlagen, Schwimmbäder, Parkanlagen, Kläranlagen oder in der industriellen (Nahrungsmittel-)Produktion.

Bestätigen Anwender dieser Techniken sehr oft deren positive Wirkungen (vgl. bspw. EWO 2008), so lassen sich diese im Labor meist nicht stabil reproduzieren. Sollten sich indes die konstatierten Wirkungen (im Zuge verbesserter Forschungen) nachweisen und reproduzieren bzw. die Techniken (in ihren Wirkungen) robuster gestalten lassen, so dürfte alternativen Wassertechniken als Umwelttechnologien ein kaum abschätzbares Potential zukommen.

Um dies herauszufinden, bedarf es aber systematischer, langfristiger und unvoreingenommener interdisziplinärer Forschung mit erheblichen Ansprüchen an ein adäquates Forschungsdesign. Dabei ist es elementarer Wichtigkeit, die Erkenntnisgrenzen gegebener naturwissenschaftlicher Methoden und Theorien im Auge zu behalten. Lassen sich Wirkungen nachweisen, darf nicht gezögert werden, gegebenenfalls auch fest stehende naturwissenschaftliche Erklärungsansätze und Theorien zu modifizieren oder zu revidieren.

- Prozesswasseraufbereitung

Das Erreichen von produktionsspezifischen Qualitätsanforderungen durch entsprechende Aufbereitung von Brauch-/Prozesswasser wird bzgl. der Mehrfachnutzung von Wasser immer elementarer. Für die Aufbereitung zu Prozesswasser setzt sich in vielen Branchen zunehmend die Reinstwasser-Anforderung durch (ChemIng 2003). Um das Wasser auf die entsprechende Qualität zu bringen, kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, z.B. **Ionenaustausch**, **Umkehrosmose** oder Kombinationsverfahren wie die **Elektrodeionisation**. Zur Reduktion des TOC-Gehaltes (Total Organic Carbon, Gesamter organischer Kohlenstoff) und zur sicheren Vernichtung von Mikroorganismen im Rein- und Reinstwasser wird die **UV-Oxidation** eingesetzt. Siemens Water Technologies bietet bspw. ein innovatives Verfahren an, das den Energie- und Wasserverbrauch sowie die Abwassermenge in Wasseraufbereitungssystemen in der pharmazeutischen Industrie deutlich verringert. Diese Vorteile werden durch das Abschalten des Versorgungskreislaufs bei Nichtgebrauch erzielt, so dass das Wasser nicht ständig zirkuliert.

In einem Projekt „Biotechnologische Kupferrückgewinnung aus Industrieabwasser“ der Universität Bremen werden kupferhaltige Abwässer in einem Bioreaktor aufbereitet. Das im Abwasser sulfidisch gelöste Kupfer setzt sich durch eine Redoxreaktion in elementarer Form an einem Eisenkörper ab. Das Ende dieser Reaktion ist erreicht, wenn das Kupfer auf den Eisenkörpern – z.B. im Betrieb anfallender Eisenschrott – eine undurchlässige Schicht gebildet hat. Das entstehende Eisensulfat wird durch Mikroorganismen oxidiert. Aufgrund der in Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse wurde ein mobiler Bioreaktor konzipiert und vor Ort in Betrieb genommen. Aufbauend auf den Erfahrungen mit der eigens entwickelten mobilen Testanlage wurden Betriebe in die Lage versetzt, eine maßgeschneiderte Anlage dauerhaft zu installieren. Auf diese Weise wird das eingesetzte Kupfer nahezu vollständig zurückgewonnen und die Abwasserbelastung deutlich minimiert (DBU 2008).

- Grundwasserreinigung/-sanierung

Durch unterschiedliche Verunreinigungen kann Grundwasser u.U. für längere Zeiträume unbrauchbar sein. In Deutschland entstehen Grundwasserverunreinigungen vorwiegend durch Einträge aus der Landwirtschaft, Einträge aus undichten Abwasserkanälen, aus Altlasten und dem Verkehr. Die Stoffgruppen, die am häufigsten in kontaminiertem Grundwasser auftreten sind die Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) gefolgt von BTEX-Aromaten und Phenolen.

Dazu kommen Methyl-*tert*-butylether (MTBE) aus dem Kraftstoffsektor. Die dominante Rolle in Industrieländern spielen jedoch die CKW (Kopinke 2003). Ein gängiges In-Situ Sanierungskonzept ist z.B. das **Pump&Treat-Verfahren** (Grundwasser wird aus dem Aquifer gepumpt, oberirdisch behandelt und wieder in einen Vorfluter geleitet). Der gegenwärtige Technologiefortschritt besteht in der Verbesserung bekannter Verfahren. Als für die Zukunft aussichtsreiche In-Situ-Technologien gelten das **In-situ-Flushing**, **in-situ chemische Oxidation**, **thermische unterstützte Verfahren** und **permeable reaktive Barrieren** (u.a. in Kopinke et al. 2003). Weitere Verfahren zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen werden im Problemfeld „Altlasten“ in Abschnitt 5.3.3 angesprochen.

Zusammenfassende Darstellung der **Wasseraufbereitungs-Technologien** des Problemfelds „Verbesserung des Wasserdargebots“:

Lösungsansatz		Märkte
Trinkwasseraufbereitung	Entfernung von Partikeln Sedimentation, Filtration, Flockung/Fällung, Membranverfahren, elektrophysikalische Fällung	alle Technologien angepasst an die lokalen und regionalen Gegebenheiten exportierbar
	Desinfektion UV-Bestrahlung, Elektrolyse, Ozonierung, Zugabe von Chemikalien, Filtration (Membranfilter, Ultrafilter, Nano-Membranfiltration, mobile Membranmodule, Diaphragmalysetechniken), thermische Verfahren, elektrolytische Wasserdesinfektion, ultraschallinduzierte Koagulation	
	Entsäuerung Belüftung, Verdüsung, Verrieselung ohne Aufhärtung	
	Eisen- und Manganentfernung Oxidation, Flockung, Filtration, biologische Verfahren)	
	Enthärtung Ionenaustauscher, Umkehrosiose	
	Arsen-Entfernung Adsorptionsverfahren, Filterverfahren, photochemische Oxidation	
Prozesswasseraufbereitung	Ionenaustausch, Umkehrosiose, Elektrodeionisation, UV-Oxidation, Reduktion der Abwassermenge	Weltweit (in Schwellen- und Entwicklungsländern: adaptierte Verfahren)
Grundwasserreinigung/-sanierung	Pump&Treat, In-situ-Flushing, in-situ chemische Oxidation, therm. unterstützte Verfahren, permeable reaktive Barrieren → alle GW-Sanierungstechnologien aus dem Problemfeld „Altlasten“ im Handlungsfeld „Bodenschutz“ (s. 5.3.3)	Europa, Schwellenländer

4.3.2 Problemfeld „Schadstoffeinträge in Wasservorkommen“

Abwasserbehandlung

- Mikroverunreinigungen

Weltweit gelangen Mikroverunreinigungen über das Abwasser ins Grundwasser und schließlich auch ins Trinkwasser. Abgesehen von den Schwermetallen handelt es sich um organische Chemikalien wie Pestizide, Arzneimittel (z.B. Antibiotika, Hormone), Diagnostika (z.B. Röntgenkontrastmittel) und eine Reihe von Umweltchemikalien (z.B. Duftstoffe, Desinfektionsmittel, Waschmittelbestandteile). Bereits sehr geringe Konzentrationen können ausreichen, um Lebewesen nachteilig zu beeinflussen. Daher steht die Abreinigung von Mikroverunreinigungen in Kläranlagen zunehmend im Mittelpunkt. Kläranlagen verfügen noch nicht über sichere Möglichkeiten zur Entfernung von Mikroverunreinigungen (DBU 2005). Laborversuche haben nun jedoch gezeigt, dass das Verfahren der **Ozonierung** erfolgreich zur Eliminierung einer breiten Palette von Mikroverunreinigungen eingesetzt werden kann (Siegrist 2007), auch im großtechnischen Maßstab. In der Schweiz wird die Ergänzung der herkömmlichen Abwasserreinigung in der Kläranlage durch eine Ozonierungsstufe aktuell getestet (u.a. BAFU 2007; Schröder 2007).

Auch die Berliner Wasserbetriebe haben ein Forschungsprojekt zur **oxidativ-biologischen Behandlung** von Klärwerksabläufen für die Entfernung organischer Spurenstoffe durchgeführt (BWB 2007; Weigert 2007). Es konnte gezeigt werden, dass die Ozonierung ein geeignetes Verfahren ist, um Medikamentrückstände zu entfernen bzw. zu transformieren. In DBU (2005) wird ferner ein Verfahren auf Basis der **UV-Oxidation** vorgestellt, mittels dessen Antibiotika und Röntgenkontrastmittel entfernt oder in unschädliche, natürlich abbaubare Verbindungen umgewandelt werden können. Geforscht wird noch an Geräten, die problemlos in Krankenhäusern und Arztpraxen einsetzbar sind.

Die Leistungsfähigkeit von Membrantechnologien hinsichtlich der Elimination von Mikroverunreinigungen wird noch untersucht (Pronk 2007).

- Nährstoffelimination /Nährstoffrückgewinnung

Wesentlich für den Gewässerschutz ist auch die Elimination von Nährstoffen bei der Abwasserbehandlung, insbesondere die Elimination der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor. Nicht nur vor dem Hintergrund der Umweltbelastung, sondern in Bezug auf Phosphor vor allem aufgrund der Endlichkeit der natürlichen Ressourcen hat sich die Rückgewinnung der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor aus Abwasser und Schlamm zu einem zentralen Forschungsthema entwickelt. Klärschlamm fällt als „Abfall“produkt in Kläranlagen an. Für die weitere Entsorgung des Schlammes muss der biologisch abbaubare organische Schlammanteil möglichst weitgehend reduziert werden. Die in Kläranlagen gängigste Technik ist dafür die **anaerobe Schlammstabilisierung** (Nickel/Neis 2003; BMU 2006a). Dieses Verfahren ermöglicht zudem die Nutzung des bei der Schlammfäulung entstehenden Methans zur parallelen Energiegewinnung. Mit dem anaeroben Stabilisierungsverfahren geht auch eine Verminderung der zu entsorgenden Schlammmasse einher. Als deutlicher Nachteil der Technologie wird jedoch die geringe Umsatzleistung angeführt. In **Kombination mit Mikrofiltern** können überdies wertvolle Nährstoffe im Schlammwasser zurückgewonnen werden (BMU

2006b). Das in zentralen Kläranlagen gängige Verfahren zum Abbau der genannten Nährstoffe ist das Belebtschlammverfahren (biologische Reinigungsstufe).

Derzeit stehen Methoden zur Intensivierung des Schlammabbaus im Blickpunkt. Eine Technologie ist die so genannte **Desintegration** des Schlammes – hierfür existieren mechanische, chemische (Zugabe von Oxidationsmitteln, z.B. Ozonbehandlung) und thermische Verfahren. Vor allem bei den mechanischen Verfahren gab es innovative Entwicklungen (Nickel/Neis 2003). Eine moderne mechanische Technologie ist die **Behandlung mit Ultraschall** (InnoRep 2000). Die Schlammstruktur wird durch Ultraschallbehandlung so verändert, dass das Schlammwasser (mit weniger Hilfsmitteln, bspw. Flockungsmitteln) besser abgetrennt werden kann.

Generell kann Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Schlammmasche zurückgewonnen werden. Bei der chemisch-biologischen Abwasserbehandlung finden sich über 90% des Phosphors im Schlamm wieder. Darum wird das maximale **Rückgewinnungspotential für Phosphor** gegenwärtig in Klärschlamm und Klärschlammaschen gesehen (Cornel 2002). Mit Bezug auf Phosphor gibt es mehrere Verfahren der biologischen Elimination aus Abwasser: z.B. das **Bardenpho®**- (eine Verfahrenskombination zur Nitrifikation, Denitrifikation und biologischen Phosphatelimination nach Barnard), **Phoredox**- (Bardenpho®-Prozess in Kombination mit einer zweistufigen Stickstoffelimination), das modifizierte **UCT**- (University of Cape Town), **A/O**- (anaerob/aerob), **Biodeniph**- (Verfahren, bei dem zwei Umlaufbecken wechselweise mit Abwasser beschickt werden; während in dem einen Becken denitrifiziert wird, wird das andere Becken zur Nitrifikation belüftet) und das **EASC**- (Extended Anaerobic Sludge Contact-) **Verfahren** (Pinnekamp et al. 2007). Nach derzeitigem Stand der Technik erfolgt die Phosphorelimination in Kläranlagen vorwiegend durch zusätzliche **chemische Elimination** mittels Fällung z.B. mit Struvit (Ammoniummagnesiumphosphat, $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot x \text{H}_2\text{O}$) und Flockungsfiltration. Nachteile der chemischen Fällung von Phosphor sind die Aufsatzung von Vorflutern, erhöhte Klärschlammengen und die Belastung der Schlämme durch Fällmittel.

Eine ergänzende Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserhauptstrom oder aus Schlammwasser, besteht im **Kristallisationsverfahren**. In speziellen Reaktoren kristallisieren Phosphate durch Chemikalieneinsatz aus und können anschließend abgetrennt werden. Entsprechende verfahrenstechnische Umsetzungen existieren (Produktbeispiele bei Pinnekamp et al. 2007). Das Institut für Technische Chemie – Bereich Wasser- und Geotechnologie (ICT-WGT) der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH hat bspw. ein neues Kristallisationsverfahren entwickelt (**P-RoC-Verfahren**, Phosphorus Recovery from Waste Water), das es ermöglicht die Phosphor-Entfernung und -Rückgewinnung aus wässrigen Phasen in nur einem einzigen Verfahrensschritt durchzuführen. Dabei wird ein phosphorreiches mineralisches Produkt erzeugt, das als Sekundärrohstoff in der Phosphorindustrie oder als Düngemittel direkt Anwendung finden kann (InnoRep 2007a).

Es gibt ferner Entwicklungen zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser mittels **Ionenaustausch**, **Adsorptionsverfahren** oder **Magnetseparation** (Pinnekamp et al. 2007). Desgleichen entwickeln die Forscher der Universität Stuttgart aktuell ein neues Verfahren, um Phosphor aus Klärschlamm zurückzugewinnen. Die Phosphate werden zunächst mit Schwefelsäure gelöst und dann in eine Form überführt, die in der Landwirtschaft direkt als Dünger verwendet werden kann und die weniger Schwermetalle, besonders Cadmium, als handels-

üblicher (industrieller) Dünger enthält (Weideler 2007; Felgentreu 2007). Der weltweit erste großtechnische Einsatz einer innovativen Technologie zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm hat in diesem Jahr den Betrieb aufgenommen (Gifhorn, Niedersachsen) und arbeitet nach dem sog. **Seaborne-Verfahren** (NRW 2007; ASK 2007). Die Nährstoffe Phosphor, Stickstoff und Kalium werden dabei separiert und in unbelastete vermarktungsfähige Dünger überführt. Die Schwermetalle werden ausgefällt, organische Schadstoffe werden abgebaut. Das bei dem Verfahren entstehende Methan eignet sich nebenbei zur Einspeisung in das Erdgasnetz oder zur direkten Kraft-Wärme-Gewinnung. Die RWTH Aachen forscht am sog. **LOPROX-Verfahren**, einem Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration. Dabei wird Klärschlamm oxidiert und das darin enthaltene Phosphor durch Nanofilter abgetrennt (RWTH 2007a).

Die Rückgewinnung von Phosphor aus Schlamm oder dessen Asche ist jedoch immer noch kosten- und energieintensiv. Daher ist die Rückgewinnung aus der Abwasserphase trotz geringeren Rückgewinnungspotentials weiterhin sinnvoll. An der RWTH Aachen wird ferner nach Lösungen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm-Asche geforscht (RWTH 2007b). Im Rahmen des EU-Projekts SUSAN wird eine Lösungsstrategie verfolgt, bei der **Klärschlämme in Mono-Verbrennungsanlagen** behandelt und die entstehenden Klärschlamm-Aschen (KSA) zu marktfähigen, phosphorreichen Düngemitteln verarbeitet werden. Durch die Mono-Verbrennung werden die organischen Schadstoffe zerstört. Die in den KSA enthaltenen Schwermetalle werden anschließend durch ein thermochemisches Verfahren entfernt, wobei gleichzeitig die Pflanzenverfügbarkeit der enthaltenen Phosphate auf bis zu 100% angehoben wird. Neben der technischen Entwicklung des thermochemischen Verfahrens stehen die Wirksamkeit der Produkte, das Produktdesign und die Nachhaltigkeit der gesamten Prozesskette im Vordergrund (SUSAN 2005).

In der Zukunft ist mit weiteren Innovationen bei Verfahren der Schlammbehandlung eher nicht zu rechnen, da die Technik weitgehend ausgereift scheint. Nach einer BMU/UBA-Studie (2007) ist mit einem weltweiten Marktvolumen im Bereich der Schlammbehandlung von ca. 2,5 Mrd. € zu rechnen. Spezialisierte Anbieter gehen von einem kontinuierlich starken Wachstum aus und rechnen mit einer Verdopplung des Marktvolumens bis zum Jahre 2020 (BMU/UBA 2007).

Die Einträge von Nährstoffen aus der Landwirtschaft werden im Handlungsfeld „Bodenschutz“ im Abschnitt 5.3.2 näher beleuchtet.

- Wärmeemissionen

Über Abwasser wird viel ungenutzte 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 eine bisher ungenutzte Wärmequelle (InnoRep 2004). Gegenwärtig besteht ein bislang noch weitgehend ungenutztes Potential zur Rückgewinnung der Wärmeemissionen aus Abwasser.

Mittels **Wärmetauschern** kann Energie aus Abwasser gewonnen werden (auch aus Kühlwasser) und **Wärmepumpen** ermöglichen es, die Energie aus Abwasser für die Raumheizung und Wasserbereitung nutzbar zu machen (DBU 2005). Wärmetauscher werden entweder in die Sohle eines Abwasserkanals integriert oder in den Ablauf einer Kläranlage einge-

baut. Für den Einbau von Wärmetauschern im Zuge von Kanalsanierungen existieren vorgefertigte Kanalelemente mit eingebautem Wärmetauscher. Wärmepumpen können zur Leistungssteigerung mit Heizkesseln oder Blockheizkraftwerken gekoppelt werden. Pilotanlagen zur Energierückgewinnung aus Abwasser wurden bereits realisiert bspw. im Betriebsgebäude der Stadtwerke Ludwigshafen (GTZ 2006). 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 (InnoNet 2007).

- Wiedernutzung von Wasser – Abwasser als „Rohstoff“

Neuartige Konzepte einer ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltigen Abwasserwirtschaft beruhen auf einer ganzheitlichen Betrachtung der gekoppelten Stoffströme mit dem Ziel

- 1) der hygienisch sicheren Sanitärversorgung der Bevölkerung,
- 2) des Schutzes der Umwelt und der Gewässer vor Verschmutzung durch Schadstoffe und Krankheitserreger sowie
- 3) der optimierten Verwertung der unterschiedlichen Abwasserteilströme.

Bei den modernen Konzepten einer stoffkreislaufforientierten Abwasserwirtschaft wird nicht eine bestimmte Technologie favorisiert, sondern die Konzepte repräsentieren eine neue Philosophie im Umgang mit den Stoffen, die in der Vergangenheit als zu beseitigende Abwässer betrachtet wurden. Die neuen Vorstellungen sehen **Abwasser als „Rohstoff“**, dienen somit der systematischen Schließung lokaler Stoffkreisläufe und ermöglichen letztlich Kreislaufwirtschaftssysteme wie sie im Bereich der festen Abfälle bereits weit verbreitet sind. Im Idealfall ermöglichen derartige Systeme eine nahezu vollständige Rückgewinnung aller in häuslichen Abwässern enthaltenen Nährstoffe, organischen Stoffe und Spurenelemente und deren Nutzbarmachung in der Landwirtschaft. Dies wird durch die **getrennte Sammlung und Behandlung von Grauwasser** (fäkalienfreies, gering verschmutztes Abwasser, wie es etwa beim Duschen, Baden oder Händewaschen anfällt, aber auch aus der Waschmaschine kommt) und **Gelb-/Braunwasser bzw. Schwarzwasser** (häusliches Abwasser) realisiert. So hat Gelbwasser (Urin) aufgrund seiner hohen (Nährstoff)Gehalte bezüglich Stickstoff, Phosphor und Kalium das Potential, als Grundstoff für Dünger zu dienen. Braunwasser (Schwarzwasser ohne Urin) ist ein wertvolles Bodensubstrat und das Schwarzwasser lässt sich anaerob gut zur Erzeugung von Biogas nutzen. Grauwasser ist aufgrund seiner Eigenschaften – im Vergleich zu den oben genannten Toilettenwässern – leichter zu reinigen und ließe sich als Brauchwasser bzw. auf noch bessere Qualität aufbereiten.

Hier können technologisch sehr ungleiche Ansätze – von einfachsten Lowtech- (**Komposttoiletten**) bis zu anspruchsvollen Hightech-Systemen – zum Tragen kommen. Zentral sind Sanitärtechnologien, bspw. **Trenntoiletten** (sog. **No-Mix- oder EcoSan-Philosophie**), wasserlose/ wasserarme Sanitärlösungen (z.B. **Vakuumtechnologie**), und die Grauwasserbehandlung und -wiedernutzung. Grauwasser kann in kleinen Anlagen vor Ort aufbereitet und in den Brauchwasserkreislauf des Haushalts zurückgeführt werden und es kann nach der Behandlung vor Ort auch versickert oder in eine Vorfluter eingeleitet werden (Kleinkläranlagen, Pflanzenkläranlagen, Bodenfilter etc.).

Neuartige dezentrale Abwasserkonzepte, in denen die Prinzipien der **Stoffstromtrennung** und **Kreislaufführung** sowie **moderne Sanitärtechnik** zum Einsatz kommen, gibt es mittlerweile an mehreren Orten in Deutschland (z.B. Hans Huber AG). Dennoch ist noch ein hohes Maß an weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich, bis sich derartige Konzepte national und international als Lösungsansatz etabliert haben werden. Darüber hinaus konzentrieren sich die bisherigen Anwendungen eher auf den ländlichen Raum oder einzelne Gebäude, Firmen etc. Die Lowtech-Systeme wie Komposttoiletten sind besonders in Entwicklungsländern gut vermarktbare und werden dort auch schon, besonders außerhalb der Städte, eingesetzt. Forschungen und Projekte, die die neuartigen Konzepte auch für die Anwendung in der Stadt etablieren, sind voranzutreiben.

Solche moderne Sanitärkonzepte stellen nicht nur ein enormes Potential zur Lösung der weltweiten Wasserkrise dar, sondern die Bereitstellung moderner Lösungen bedeutet auch eine Chance für die deutsche Exportwirtschaft. In der deutschen Forschungslandschaft werden die Bedeutung und das Zukunftspotential erkannt. So wird z.B. an der TU Hamburg Harburg, an der TU München, am Fraunhofer Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik (IGB) in Stuttgart geforscht. Eine Reihe von städtischen Wasserver- und -entsorgungsgesellschaften beteiligt sich aktiv an der Entwicklung neuartiger Abwasserkonzepte und hat zum Teil eigene Pilotmaßnahmen umgesetzt. Die Berliner Wasserbetriebe erproben in einem Demonstrationsvorhaben zum Beispiel zwei unterschiedliche Konzepte: **Schwerkrafttrenntoiletten und Kompostierung der Fäkalien sowie Vakuumtrenntoiletten und Faulung der Fäkalien**. Mit dem Gelbwasser wurden Düngeversuche durchgeführt. Das Grauwasser wird in einer **Pflanzenkläranlage** gereinigt. Parallel dazu wurde auch die Reinigung mit einer **Membranbelebungsanlage** demonstriert. Auch eine Biogasanlage zur Faulung der Fäkalien von den Vakuumtrenntoiletten ist in Betrieb.

Die iaks GmbH hat im Hinblick auf die Anwendung von dezentraler Abwasserreinigung ein Verfahren entwickelt, indem das Abwasser über Strohgroßballen gereinigt wird und die Reststoffe einer landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden (www.iaks.de). Ein gutes Beispiel für ein innovatives „no-tech“-Verfahren, das für Schwellen- und Entwicklungsländer uneingeschränkt geeignet ist, von dem Unternehmen selber aber für den Markt der osteuropäischen EU-Beitrittsländer entwickelt wurde.

In der Industrie wird bei der integrativen Abwasserwirtschaft 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, zur Kreislaufführung v.a. von Wasch- und Spülwässern und zur Mehrfachnutzung von Wasser für untergeordnete Zwecke 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**, **Nanofiltration** (Separation definierter Wasserinhaltsstoffe), **Ultrafiltration** und **Mikrofiltration** (dienen zur Rückhaltung von Trübstoffen und bakteriellen Verunreinigungen) zum Einsatz.

Einsatzgebiete sind zum Beispiel:

- Abwasser der Stärkeindustrie,
- Flaschenwaschmaschinen in der Brau- und Getränkeindustrie,
- Frucht- oder Gemüse-Waschwasser aus der Lebensmittelindustrie,
- Brau- und Mälzereiabwasser,
- Mitteldichte Holzfaser-(MDF-)Platten-Produktion (Holzindustrie),
- Aluminium-, Feinblechindustrie,
- Kondensataufbereitung,
- Recycling von Spülwasser von Fruchtsaftkonzentraten und das
- Verfärbtes Wasser in der Papierindustrie.

Im deutschen und europäischen System haben **dezentrale, stoffstromtrennungs- und kreislaufwirtschaftsorientierte Konzepte** bislang nur eine sehr geringe 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. Die deutsche Wirtschaft hat in dem Bereich aber auch Stärken, die ihr eine gute Position im Wettbewerb um die zukünftigen Märkte für neue Sanitärlösungen sichern werden (GTZ 2005).

Zusammenfassende Darstellung der **Technologien zur Vermeidung von Schadstoffeinträgen** in Wasservorkommen des Problemfelds „Schadstoffeinträge in Wasservorkommen“:

Lösungsansatz		Märkte
Abwasser- behandlung	Mikroverunreinigungen Ozonierung, oxidativ-biolog. Behandlung, UV-Oxidation	weltweit
	Nährstoffelimination/Nährstoffrückgewinnung Anaerobe Schlammstabilisierung, auch in Kombination mit Mikrofiltern, Desintegration, Behandlung mit Ultraschall	weltweit
	Bardeno-, Phoredox-, UCT-, A/O-, Bienenpho- und das EASC-Verfahren, chem. Elimination, Kristallisationsverfahren, P-RoC-Verfahren, Ionenaustausch, Adsorptionsverfahren, Magnetseparation, Seaborne-Verfahren, LOPROX-Verfahren	weltweit (aber mit lokalen und regionalen Einschränkungen)
	Wärmeemissionen Wärmetauscher, Wärmepumpen, Wärmetauscherplatten (Heatliner)	weltweit (aber mit Einschränkung)
	Dezentrale Abwasserreinigung Getrennte Sammlung und Behandlung von Grau-, Gelb-/Braun- bzw. Schwarzwasser, Sanitärtechnologien (Kompost-, Trenn-, Vakuum- und Schwerkrafttoiletten, Stoffstromtrennung, Kreislaufführung, Pflanzenkläranlagen, Membranbelebungsanlagen)	Europa, Schwellenländer
	Industrieprozesse: Kaskadenspülung, Kreislaufspültechnik mittels Ionenaustauscher, Membrantechnologie, Umkehrosmose, Nanofiltration, Ultra- und Mikrofiltration	

4.3.3 Problemfeld „Eingriffe in die Gewässerstrukturen“

Meeresschutz / Gewässerschutz

- Erwärmung und Versauerung der Meere

Die Meere enthalten 90% der Biomasse der Erde, eine ungeheure Artenvielfalt und versorgen über 1 Milliarde Menschen mit lebenswichtigem Protein. Aber nicht nur das: Sie dienen als Kohlenstoffsенke, produzieren Sauerstoff und spielen eine entscheidende Rolle im Kohlenstoff- und Wasserkreislauf der Erde. Doch die Meere sind einer der „großen Verlierer“. Veränderungen der Wassertemperatur oder der Aufnahme von Kohlendioxid – ausgelöst durch den Klimawandel – ziehen eine Wellte von weiteren Veränderungen nach sich, die das sensibel eingespielte System gefährden.

Die zunehmende Erwärmung der Atmosphäre bringt zusätzlich eine Erwärmung der Meere mit sich, primär in den obersten Wasserschichten. Die Weltmeere haben bisher etwa 80% der Wärme aufgenommen, die anthropogen dem Klimasystem zusätzlich zugeführt wurden. Dadurch kommt es zur thermischen Ausdehnung des Wassers, was einen Beitrag zum ansteigenden Meeresspiegel leistet. Für das Ökosystem Ozean aber noch viel gravierender sind die zahlreichen zusätzlichen mit einer erhöhten Wassertemperatur einhergehenden Effekte. Die Temperaturzunahme des Meerwassers hat direkte Folgen für die Meerespopulationen. So wandern kälteliebende Arten weiter in den Norden ab und wärmeliebende Arten rücken aus dem Süden nach. Eine große Wanderung polwärts setzt ein, es kommt zu einer räumlichen Verschiebung von Populationen. Dies führt zu einer extremen Veränderung in den Nahrungsnetzen und in der Artenzusammensetzung, wobei durch destruktive Fischereipraktiken das Ökosystem ohnehin bereits stark beeinflusst wird.

Eine andere Folge der erhöhten Wassertemperatur ist eine Veränderung der Dichte des Meerwassers. Die thermische Ausdehnung des Wassers wird größer und so die Dichte geringer. Parallel dazu wird das salzige Meerwasser durch Süßwasser aus stetig zunehmenden Niederschlägen und dem Schmelzwasser der Gletscher verdünnt. Die geringe Wasserdichte zieht eine Änderung der Meeresströmungen nach sich.

Die **Versauerung** der Meere zählt neben der globalen Erwärmung zu den Hauptfolgen der gestiegenen Menge des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2). Während CO_2 in der Atmosphäre physikalisch zu steigenden Temperaturen auf der Erde führt, wirkt es im Meerwasser chemisch (es geht als Kohlensäure in Lösung). Die Versauerung der Ozeane lässt sich ausschließlich auf CO_2 zurückführen, nicht wie die globale Erwärmung auch auf Emissionen anderer Treibhausgase wie z.B. Methan oder Lachgas. Die Lösung von Kohlendioxid im Meer bremst zwar die Erderwärmung, was Klimaforscher lange Zeit für einen großen Segen hielten, doch die daraus folgende langsame Versauerung der Ozeane kann einschneidende Folgen unter anderem für Tiere mit einem Schutzmantel aus Calciumcarbonat (CaCO_3 , Kalk) nach sich ziehen. Scinexx bezeichnete dieses Phänomen als „Osteoporose in der Tiefe“ (scinexx 2006). Weil diese Arten oft die Basis der Nahrungskette in den Ozeanen bilden, können sich daraus weitere gravierende Konsequenzen für die unzählbaren von ihnen abhängigen Meeresbewohner ergeben. Bisher haben die Meere nur rund ein Drittel der anthropogenen CO_2 -Emissionen aufgenommen, eine konstant zunehmende Versauerung muss gedrosselt werden.

Welche Auswirkungen die Versauerung der Meere auf die Lebewesen hat, untersuchen seit Mitte Juli 2007 auch Forscher vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR, mit Hilfe von „Riesen-Reagenzgläsern“ im Rahmen eines Projektverbundes in der Ostsee (Stern-online 2007).

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Weltmeere und damit auf den Menschen und die Meeresumwelt zu verringern bzw. zu begrenzen und damit die Resilienz des Meeresökosystems zu stärken, sind keine technologischen Entwicklungen im Spannungsfeld „Wasser“ notwendig und auch nicht zu erwarten. Technische Maßnahmen wie beispielsweise eine großflächige Kalkung gegen die Versauerung der Meere sind jedoch sehr kritisch zu sehen. Die Lösungsansätze müssen aus den anderen Handlungsfeldern als „Vorsorgemaßnahmen“ (z.B. massive Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen als ehrgeizigen Klimaschutz) kommen und es werden eher regulatorische Elemente, wie die Einrichtung eines globalen Netzwerkes von Schutzgebieten oder eine Bewirtschaftung der Meeresressourcen nach einem „ökosystemaren“ Ansatz, elementare Faktoren sein. Wie passt z.B. eine öffentlich subventionierte Überfischung der Meere zu einer allseits geforderten Nachhaltigkeit? Doch auch eine Einbringung von CO₂ in das Meerwasser als CO₂-Speicherung (Tiefseespeicherung), sollte auf Grundlage des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips aufgrund des Risikos des langsamen Entweichens des eingelagerten CO₂ sehr 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 immer noch ein unbekanntes „Wesen“. Ein intensives Monitoring ist dabei die unbedingte Voraussetzung für die bedeutungsvolle Entwicklung gekoppelter Ökosystem-Klima-Modelle.

○ Aquakulturen

Es besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass die Fangmenge aus den Weltmeeren sich mittlerweile 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, das in verstärkter Masse minderwertige Fische einschließt, beträchtlich verändert. Angesichts dieser Entwicklung überrascht es kaum, dass so genannte Aquakulturen einen regelrechten Boom erlebten.

Allerdings ist die herkömmliche Aquakultur in offenen Käfigen („offshore farming“) vor den Küsten (Wasseraustausch automatisch mit den Gezeiten und Strömungen) oder in Becken (Ver- und Entsorgung des Wassers findet durch Pumpen im direkten Austausch mit vorgelagerten Küstengewässern statt) ökologisch an ihre Grenze gestoßen. Die bislang eingesetzten marinen Aquakulturen sind aufgrund der Umweltbelastung sehr negativ zu beurteilen. Als Beispiele sind an dieser Stelle verschmutzte Küstengewässer (z.B. Lachskulturen in Norwegen, Abwässer der Lachsfarmen Norwegens, die ungeklärt in die Nordsee gelangen, entsprechen annähernd der Abwassermenge der Gesamtbevölkerung des nordeuropäischen Landes) oder zerstörte Mangrovensysteme (z.B. Garnelenzucht in Ecuador) anzuführen.

Eine mögliche Lösung für die Aquakultur 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 dezimieren.

Der erste Schritt der Wasseraufbereitung ist die Entfernung von Feststoffen aus dem Wasser, nach einer **Feststoffseparation** wird in **anaeroben biologischen Filtern** das toxische Stoffwechselprodukt Ammoniak (durch Nitrifikation) abgebaut. In nachfolgenden Schritten werden im Hauptwasserstrom die Sauerstoffsättigung, der pH-Wert, Temperatur und Salzgehalt eingestellt, bevor das Wasser zurück in die Kulturbecken läuft.

Die bestehenden **landgestützten Kreislaufanlagen** nutzen weitgehend individuell entworfene Technologie, die komponentenweise aus anderen Anwendungen übertragen wird (BMBF 2003). Sie wird im laufenden Betrieb verbessert und angepasst. Die in Deutschland verwendete Technik ist nur bedingt für den Einsatz in anderen Klimazonen geeignet. Gefordert sind aber keine neuartigen Funktionsprinzipien, sondern vielmehr einfache, robuste Anlagen statt hochkomplexe und im Betrieb anfällige Technik. Ein Markt für derartige Anlagentechnologie hat sich in Deutschland noch nicht herausgebildet. Der Weg zur Lösung führt über die Entwicklung der **Kreislauftechnologie**; einer Technologie, die es in Deutschland in Grundzügen durchaus schon gibt, die aber technisch noch angepasst werden müsste.

Im Rahmen des Forschungs-Verbundprojektes „Aqualno“ soll eine **modulare Produktionsanlage** im Bereich des freien Gewässers geschaffen werden. Die Anlage muss sowohl im Durchlauf (das Wasser wird nach Bedarf gefördert und nach Gebrauch wieder gereinigt in das umgebende Gewässer entlassen), als auch im Kreislauf, d.h. das gesamte Brauchwasser wird durch eine spezielle Klärtechnik aufbereitet und in das System zurückgeführt, arbeiten können. Die Umsetzung der Forschungsergebnisse erfolgt schon durch den Bau sowie den Praxistest von Prototypen. Die Entwicklung zur Marktreife ist so geplant, dass der unmittelbare Transfer der neuen Technologie in die Wirtschaft partiell bereits zur Projektzeit (bis 2009) erfolgen kann. Dieses Anlagenkonzept soll der inländischen Aquakultur einen positiven Impuls versetzen und ihre Konkurrenzfähigkeit vor allem gegenüber den so genannten Niedriglohn-Ländern steigern.

Weltweit erfahren Aquakulturen derzeit einen langfristigen Wachstumstrend und sind das schnellstwachsende Segment der Lebensmittelindustrie. Der Aquakultursektor hat sich in Bezug auf Produktionsmenge und -wert innerhalb von 10 Jahren mehr als verdoppelt (1986 bis 1996). Dieser ständig wachsende Wirtschaftszweig wird oft als die „Blaue Revolution“ bezeichnet (AWI 2002). Eine Potentialanalyse des Ministeriums für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr des Landes Schleswig-Holsteins zeigt, dass Deutschland für Aquakulturen im Jahr 2003 einen Umsatz von rund 120 Mio. € erzielt hat und weltweit rund 25 Mrd. € im Jahr 2005 umgesetzt wurden. Für 2010 werden 30 Mrd. € Umsatz weltweit prognostiziert (potentialanalyse 2006). Zu konstatieren ist jedoch, dass der derzeitige Umsatz in Deutschland nicht dem Technologie- und Wirtschaftspotential im Bereich der marinen Aquakulturen entspricht. Dieser Sektor bietet demnach einiges an ausbaufähigem Entwicklungspotential, welches konsequenter von deutschen Unternehmen auszuschöpfen ist.

- Aufbereitung 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. Dabei kann es sich um kleine Fische, Benthos- und Planktonorganismen oder auch pathogene Keime handeln, die wieder freigesetzt werden, wenn Ballastwasser abgelassen wird. Mit dem schneller werdenden Schiffsverkehr nahm die Wahrscheinlichkeit zu, dass die „blinden Passagiere“ die Passage im Ballastwasser überleben. Mittlerweile haben sich auf diese Weise bereits 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.

Im Februar 2004 wurde deshalb im Rahmen einer Diplomatischen Konferenz bei der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation das „Ballastwasserübereinkommen“ verabschiedet. Um die Verschleppung von Organismen zwischen Meeresgebieten abzuwenden, fordert die Konvention für alle ab 2009 gebauten Schiffe, spätestens jedoch bis 2016, ein Ballastwasser-Management, das weitgehend auf den bislang üblichen unkontrollierten Wasseraustausch bei Aufnahme und Ablassen von Ballastwasser verzichtet. Stattdessen muss das Ballastwasser an Bord behandelt werden.

Eine Chance, die Zahl der Organismen im Ballastwasser zu minimieren, wäre der **Wasserwechsel auf hoher See** (Richtlinie der Internationalen Schifffahrtsorganisation). Dies stellt aber eine starke Belastung für den Schiffsrumpf dar. 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 erfährt deshalb notwendigerweise vor der Rückführung ins Meer eine Aufbereitung (Öl-/Wasser-Trenner, Kondensattechnik), welche entweder auf dem Schiff selbst oder an Land stattfinden muss. Ein Teil der Verschmutzung der Meere erfolgt hingegen durch ein unsachgemäßes Auspumpen von Ballastwasser aus Treibstofftanks der Schiffe.

Parallel laufen überall auf der Welt Versuche, die Organismen gezielt zu töten: Man arbeitet mit **UV-Licht, Ultraschall und Ozonisierung des Wassers** und erzielt damit bereits recht zufrieden stellende Ergebnisse. Auch eine Reihe deutscher Unternehmen hat sich mit dem Thema „Aufbereitung von Ballastwasser“ beschäftigt. Das Unternehmen ELGA Berkefeld in Celle hat zusammen mit seinem Tochterunternehmen RWO Marine Water Technology ein zukunftsweisendes System zur Aufbereitung von Ballastwasser auf Schiffen entwickelt. Die Anlage mit dem Namen „**CleanBallast**“ entfernt Kleinstlebewesen aus den Ballastwassertanks der Schiffe. Der Vorteil: Das System funktioniert ohne additive Zugabe von Chemikalien an Bord und ist damit besonders umweltverträglich und wirtschaftlich. Der in Celle gebaute Prototyp wird derzeit im Hafen von Bremerhaven unter realen Bedingungen eingehend getestet (Innovation Niedersachsen 2007).

Die Heraeus GmbH entwickelte für das Verfahren der UV-Bestrahlung eine leistungsstarke **UV-Mitteldruck-Lampe**, die eine sehr hohe UV-Dosis ermöglicht. Ultraviolettes Licht hat eine intensive bakterizide Wirkung, so dass die Viren und Bakterien ohne den Zusatz von

Chemikalien inaktiviert werden können. Die Entkeimungsanlagen können so bei extrem hohen Durchflussraten sehr kompakt gebaut werden. Erste Pilotanlagen mit integrierten UV-Mitteldrucklampen sind von verschiedenen Anlagenbauern bereits realisiert worden und befinden sich derzeit im Testbetrieb (InnoRep 2006d). Auch die Siemens AG arbeitet an der Entwicklung von Technologien zur Aufbereitung von verschmutztem Wasser auf Schiffen und der Trennung von Wasser und Öl aus dem Schiffsbetrieb.

Da jährlich rund 10 Mrd. Tonnen Ballastwasser anfallen und das Ballastwasserübereinkommen vorsieht, dass bis 2016 alle großen Schiffe ein solches System an Bord führen müssen, um zu verhindern, dass weiterhin Flora und Fauna über das Ballastwasser in Regionen verschleppt werden, wo sie heimische Ökosysteme „durcheinander“ bringen, tut sich ein neuer Markt für Onboard-Wasseraufbereitungsanlagen mit großen Wachstumschancen (zumindest für einige Jahre, evtl. nur bis 2016) auf.

Naturnahe Gewässergestaltung, „Renaturierung“

Unter naturnaher Gewässergestaltung versteht man die technische Zurichtung eines Gewässers nach ökologischen und naturräumlichen Kriterien. Renaturierung bezeichnet dabei unscharf die Überführung eines massiv (technisch) überformten Gewässers in ein naturnahes. Es geht demnach um die Wiederherstellung von naturnahen Gewässerläufen, Gewässerstrukturen, Strömungsbedingungen und Lebensräumen aus z.B. begradigten Flüssen. Über eine Verlängerung von Gewässerläufen werden Strömungsgeschwindigkeiten verringert, durch Aufweitung der Fließgewässer Überflutungsflächen geschaffen und damit schädlichen Hochwassern begegnet. Durch eine naturnahe Gewässerstruktur und Fließdynamik werden Artenreichtum und ökologische Funktionen befördert. Dementsprechend führt eine Renaturierung von Gewässern meist gleichzeitig zu einer erheblichen Verbesserung der Wasserqualität (Nach langjährigen Erfahrungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe: um durchschnittlich eine Gewässergüteklasse).

Naturnahe Gewässergestaltung zielt dabei sowohl auf die Wahrnehmung direkter gesellschaftlicher Funktionen (wie z. B. Trinkwasserversorgung, Hochwasserschutz, Freizeit und Tourismus) als auch auf indirekte gesellschaftliche und ökonatürliche Funktionen (stabile Ökosysteme, Stärkung ökosystemarer Funktionen, wie z.B. Grundwasseranreicherung etc.). Mit der Ausrichtung auf naturräumliche und ökologische Aspekte am Gewässer steht beim Naturnahen Wasserbau im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeit die Bewahrung der Existenzgrundlage einer Gesellschaft im Mittelpunkt.¹³ In dieser Ausrichtung treten direkte Nutzungsformen der Gewässer (bspw. Transport, Stromerzeugung oder die Nutzung gewässernaher Flächen) mitunter im Abwägungsfall in den Hintergrund. Naturnahe Gewässergestaltung lässt sich als Konglomerat vieler zum Großteil reifer Techniken und technischer Verfahren auffassen und ist vielmehr als Technikstil oder -konzept, denn als monolithische Technologie zu sehen. Technische Komponenten dieses Konglomerats sind bspw. naturnahe Ufersicherung und -gestaltung, Geschiebemanagement, Bauteile wie Rampen, Störsteine, Fischtrepfen und -unterstände, etc.

¹³ Darüber hinaus werden mit der naturnahen und ökologischen Gestaltung mitunter auch Ziele jenseits eines erweiterten Anthropozentrismus verfolgt, nämlich die Achtung und Inwertsetzung von Lebewesen und Naturdingen um ihrer selbst Willen.

Großes Gewicht liegt im Naturnahen Wasserbau auf der kognitiven – weniger auf der physischen – Kontrolle von Gewässern. Simulationen und Modellierungen von Gewässerläufen und Ereignissen bilden ein zentrales und notwendiges Element der Gestaltung. Allgemein gilt, die meist als Lowtech ausgeführte naturnahe Gewässergestaltung bedarf zu ihrer Realisierung der „High-Science“, der tiefgreifenden, interdisziplinären Forschung als auch erheblicher Hightech-Forschungsinstrumentarien (wie IuK-Techniken, Messinstrumente, Software, etc.). In der Anwendung naturnaher Gewässergestaltung erfordert diese – als an Natur- und Lebensräume sowie zivilisatorische Bedingungen angepasste Technik – immer auch die orts- und situationsbezogenen Forschung. Schwierigkeiten in der Umsetzung naturnaher Gestaltung liegen weniger in der technischen Machbarkeit oder einer teuren Technik, als vielmehr in der Überwindung bestehender Interessen und Bedürfnisse am Gewässer.

Für die Forschung (und Lehre) eines Naturnahen Wasserbaus sollte es ein Ziel sein, dessen (wissenschaftlich-disziplinäres) Sensorium über technische und ökologische Belange im Weiteren auch für kulturelle Aspekte zu öffnen, um so eine umfassende und vernünftige Technikgestaltung im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung voranzutreiben (vgl. Parodi 2008, Kap. 6).

Weitere Aspekte naturnaher Gewässergestaltung werden im Abschnitt 8.3.1 des Kapitels „Biodiversität und Naturschutz“ vorgestellt.

Hochwasser

Sintflutartige Regenfälle und Überflutungen, die wir bisher lediglich aus „sicherer Entfernung“ aus Ländern wie z.B. Bangladesch, Mosambik kannten, erleben wir nun in Deutschland, Österreich, Tschechien sowie anderen Teilen Europas. Während der letzten Jahre wurde eine Vielzahl extremer Hochwasserereignisse verzeichnet, die fast alle Flussgebiete Deutschlands, wie den Rhein, 1993 und 1995, die Saale und die Bode, 1994, die Oder, 1997, die Donau, 1999 und 2002, 2006 und die Elbe, 2002 und 2006 betrafen. Auch international gab es eine Reihe extremer, teilweise katastrophaler Hochwasserereignisse.

Neben der gestiegenen Anzahl von Hochwasserereignissen ist eine noch wesentlich dramatischere Zunahme der wirtschaftlichen Kosten durch Hochwasserschäden zu beobachten. Während sich die Kosten zur Beseitigung der Hochwasserfolgen bis 1990 auf ca. 20 bis 30 Mrd. Euro pro Dekade beliefen, hat sich diese Summe für die Dekade 1990 bis 2000 nahezu verzehnfacht (Kron 2003). Für diese Entwicklung ist aber nicht nur das Klima oder die Entwicklung des Klimas verantwortlich; es spielen vor allem anthropogene Eingriffe in die Natur wie z.B. die Intensivierung der Landwirtschaft oder die Erschließung von Siedlungsräumen eine wesentliche Rolle. Hinzu kommt, dass sich heutzutage in den überflutungsgefährdeten Gebieten höhere Sachwerte befinden. Im Gegensatz zu den Zeiten vor dem 2. Weltkrieg, in denen Überflutungsgebiete gar nicht bebaut waren, sind inzwischen zum Beispiel Flussauen attraktive Standorte für Industrie- und Gewerbebetriebe. Darüber hinaus werden heute höherwertige und empfindlichere Güter der Überflutungsfahr ausgesetzt wie bspw. Computer, Waschmaschinen, zentrale Heizungsanlagen (Jörissen et al. 2005, 157).

Derartige Hochwasserschäden haben in den letzten Jahren neue Dimensionen erreicht. Hinzu kommt, dass das Hochwasserrisiko und damit einhergehend die Schäden sich noch erhöhen werden. So führt die Klimaänderung beispielsweise zu einem höheren Wassergehalt

der Atmosphäre, intensiveren Niederschlägen sowie innerjährlichen Verschiebungen des Niederschlags. Weitere nicht unerhebliche Faktoren sind: Landnutzungsänderungen (Urbanisierung, Abholzung, Versiegelung) oder Flussregulierungen (Kanalisation, Einuferung). Aufgrund dieser Entwicklungen 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 aller Wahrscheinlichkeit nach räumlich begrenzt, müssen andererseits aber in Langfristplanungen berücksichtigt werden.

Beim Hochwasserschutz kann es sich um **technische Maßnahmen, natürlichen Rückhalt und Maßnahmen der weitergehenden Vorsorge** handeln (Drei-Säulen-Strategie):

Der *technische Hochwasserschutz* setzt sich insbesondere für Fließgewässer im Schwerpunkt aus dem Bereich Rückhaltung und Objektschutz zusammen. Denkbare Instrumente für Rückhaltung sind **Rückhaltebecken** verschiedener Bauarten sowie **Polder**. Diese speichern größere Wassermengen und sind somit in der Lage die Abflussspitze von Hochwasserwellen zu vermindern. Maßnahmen zum Objektschutz sind **lineare Bauwerke** entlang des Gewässers, die verhindern, dass Hochwässer beim Ausuferen in gefährdete Bereiche wie etwa Siedlungen, Infrastruktur, Industriegebiet o.ä. eindringen. Hierzu zählen **Deiche** und **Schutzmauern** als stationäre bauliche Anlagen, aber auch **mobile Elemente**, die im Falle einer Hochwasserwarnung installiert werden. Außerdem können **Wasserkraftwerke** derart angelegt werden, dass sie durch ihr Rückstauvermögen einen Hochwasserschutz bieten. Mobile Hochwasserschutzkonstruktionen gewinnen zunehmend an Bedeutung, da nur ein Teil der Risiken mittels permanenter Vorkehrungen gemindert werden können und stationäre Hochwasserschutzmaßnahmen Raum erfordern und mit anderen Interessen wie Tourismus, Landschaftsbild oder Ästhetik während der meist hochwasserfreien Zeiten kollidieren. Ein Lösung für dieses Dilemma scheinen eben mobile Hochwasserschutzsysteme zu bieten. Zu den ortsunabhängigen Systemen gehören **Dambalken** (z.B. Bauer-IBS-Barrier der Bauer GmbH), **Sandsäcke** (z.B. Tandem-Sandsack der Firma König Innovationstechnik GmbH), **Tafeln, Böcke, wasser- oder sandgefüllte Becken, wasser- oder luftgefüllte Schläuche** (z.B. der Mobildeich von Dr.-Ing. Walter Wagenhuber) und **Dämme** (z.B. Aqua-Stop der Aquastop Hochwasser GmbH), aber auch **Pumpen, Dichtungen, Rückstausicherungen** u.v.m. Hinzukommen **Instrumente zur Messung von Flüssigkeits-(Regenwasser-) ständen und -flüssen** und anderen wetterrelevanten Parametern sowie **Geräte bzw. Sonden zur Messung chemisch-biologischer Parameter**. Diese erlauben es, im Falle von Extremwetterereignissen, nach Übermittlung und Verarbeitung der gewonnenen Daten die Regen- und Schmutzwasserflüsse so zu steuern, dass ökologische und gesundheitliche Gefahren weitgehend abgewendet werden können (BMU/UBA 2007).

Der *natürliche Rückhalt* ist in der Vergangenheit in den Hintergrund getreten, während im Gegenteil menschliche Landnutzung und Gewässerausbau noch zu einer Verschärfung der Hochwassersituation durch Erhöhung des Oberflächenabflusses geführt haben. Durch Anreizmechanismen wie landwirtschaftliche Förderung für extensivere Nutzungskonzepte, Maßnahmen zur Entsiegelung von Flächen, dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten und die Förderung der natürlichen Gewässerentwicklung, z. B. Flussrückbau und Auenvernetzung, wird versucht, dieser Verschärfung entgegenzuwirken. Derartige Anreizmechanismen sind aber zu schwach und werden deswegen als einziges Mittel

nicht ausreichen: es müssen im *vorbeugenden Hochwasserschutz* bspw. klare Bauverbote in überschwemmungsgefährdeten Gebieten ausgesprochen werden. Bei Lösungsstrategien in der Hochwasservorsorge steht demnach die Raumplanung im Mittelpunkt.

Weitergehend kommen im Hochwasserschutz die Einrichtung von **Hochwasserwarnzentralen**, die **Aufstellung von Notfall- und Katastrophenplänen und Frühwarn- und Messsysteme** zur Vorhersage sowie die Aufklärung und Bewusstseinsbildung für Hochwassergefahren zum Tragen. Die Zukunft der **ozeanischen Frühwarnsysteme** liegt nach Meinung von Experten in der **Erdbeobachtung über Satelliten** (BMU/UBA 2007).

Generell werden die negativen Auswirkungen des Klimawandels einen „positiven“ Nebeneffekt auf den Markt für „Hochwasserschutz-Technologien“ haben, dessen Potential sich mit zunehmender Klimaveränderung weiter steigern wird. Die Nachfrage wird aber sehr stark von der Wahrnehmung des Problems in der Öffentlichkeit abhängen (Nachfrage meist erst nach Katastrophen). Bedingt durch die hohe Marktattraktivität und das möglicherweise (kumulativ) ansteigende Marktpotential, wird der Wettbewerb im Bereich Hochwasserschutz stark zunehmen, dort gilt es für deutsche Unternehmen zügig eine gute Position einzunehmen und sich zu etablieren („first mover“). Die Märkte werden sich regional auf Länder mit Küstenzonen wie z.B. Ost- und Westeuropa beschränken, wobei die Auswirkung der Gletscherschmelze z.B. in den Alpen auf Wasserstände in Flüssen ebenfalls nicht zu unterschätzen und zu vergessen ist.

Küstenzonenmanagement

Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt nicht weiter als 50 km von der Küste entfernt. Dieser Anteil wird in Zukunft stark zunehmen und damit auch die Nutzungskonflikte. Raumansprüche unterschiedlicher Nutzergruppen werden immer stärker miteinander konkurrieren.

Intensiviert wird dieses Dilemma noch durch einen immer schneller steigenden Meeresspiegel. Diese zunehmende Nachfrage nach Küstenressourcen hat jedoch deren Degradation zur Folge (Verschlechterung der Wasserqualität, Verringerung der Wasservorräte, Beschleunigung der Erosion, zunehmende Verschmutzung, Rückgang der Fischereiressourcen usw.). Siedlungs- und Nutzungsflächen müssen durch Küstenschutzmaßnahmen gesichert werden. Die Integration des Küstenschutzes in **Nutzungskonzepte** wird in Zukunft eine wichtige Rolle spielen, wobei der klassische Küstenschutz an Bedeutung verlieren wird. Folglich wird es zu einem **flexibleren Küstenschutz** kommen, der die natürlichen aber auch die sozioökonomischen Veränderungen und Adaptationen an die neuen Bedingungen berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein wirtschaftliches Potential, einerseits direkt für Planungs- und Bauunternehmen, andererseits aber auch für die volkswirtschaftliche Entwicklungen aufgrund **intelligenter Schadensprävention** oder -minimierung bei Naturgewalten (Beispiel Tsunami in Südostasien). Das Küstenzonenmanagement stellt keine pauschale Lösung dar, es handelt sich vielmehr um einen kontinuierlichen, nachhaltigen und dynamischen Prozess.

Moderne Verfahren des Küstenmanagements machen sich natürliche Prozesse zunutze, statt gegen sie zu arbeiten. In der Vergangenheit hatten die meisten Versuche zur Folge, dass sich die Probleme der Küstenzonen eher zugespitzt als verbessert haben (Beschleunigung der Erosion von benachbarten Küstenstreifen), da sie z.B. die örtlichen Gezeitenströme unterbrechen, die in der Planungsphase nicht gebührend berücksichtigt worden waren. Zahl-

reiche Maßnahmen, die in der Folge zum Schutz der Küste ergriffen wurden (d.h. der Bau von Küstenschutzanlagen aus Beton und Stahl), konnten die Situation nicht berichtigen. Derzeit ist man bemüht, harte Küstenschutzanlagen zurückzubauen und stattdessen auf **alternative Maßnahmen** (wie z. B. die **Wiederbepflanzung von Sanddünen**, die die Energie des Meeres auf natürliche Weise aufnehmen) zurückzugreifen.

Zusammenfassende Darstellung der **Technologien** des Problemfelds „Eingriffe in die Gewässerstrukturen“:

Lösungsansatz		Märkte
Meeresschutz	Erwärmung und Versauerung der Meere: →Technologien aus den Handlungsfeldern „Bodenschutz“ (Kap. 5.), „Klimaschutz“ (Kap. 2), „Luftreinhaltung“ (Kap. 3) und „Abfallwirtschaft“ (Kap. 7)	weltweit
	Aquakulturen: Open Ocean Aquakulturen und Landgestützte Aquakulturen: Kreislauftechniken für die Aufbereitung und Wiederverwendung des Wassers	weltweit
	Aufbereitung von Ballastwasser: Hydrozyklonmechanismus, Wasserwechsel auf hoher See, Öl/Wasser-Trenner, Kondensattechnik, UV-Licht (neue Lampen z.B. UV-Mitteldrucklampen), Ultraschall, Ozonierung, CleanBallast	weltweit
Renaturierung	→Technologien aus dem Handlungsfeld „Biodiversität und Naturschutz“ (Kap. 8)	weltweit
Hochwasserschutz	Rückhaltebecken, Polder, lineare Bauwerke (Deiche, Schutzmauern), Hochwasserwarnzentralen, ozeanische Frühwarnsysteme (Erdbeobachtung über Satelliten), mobile Hochwasserschutzkonstruktionen, Instrumente zur Messung von Flüssigkeits-(Regenwasser-)ständen und -flüssen, Geräte bzw. Sonden zur Messung chem.-biolog. Parameter	z.B. Länder mit Küstenzonen
Küstenzonenmanagement	Bau von Küstenschutzanlagen (Abkehr von „harten“ Anlagen aus Beton und Stahl hin zu alternativen Maßnahmen wie z.B. Wiederbepflanzung von Sanddünen, die die Energie des Meeres auf natürliche Weise aufnehmen können)	Länder mit Küstenzonen

4.4 Potentielle Zukunftsmärkte

Für die deutsche Wasserwirtschaft bestehen einige Win-Win-Potentiale durch folgende globale Herausforderungen und die aktuelle und zukünftige „Wasser“-Situation:

- 6,5 Mrd. Menschen brauchen Trinkwasser,
- 1,1 Mrd. sind ohne angemessene Wasserversorgung,
- Ein Drittel hat keinen Zugang zu sanitären Einrichtungen,
- Wasserverluste im Netz weltweit 50%,
- 95% der Städte ohne geregelte Abwasserentsorgung,

- Industrielle Landwirtschaft und Produktion haben den höchsten Anteil am Wasserverbrauch,
- Verschmutzung und Vergeudung sind Kennzeichen im Umgang mit dem knappen Gut „Wasser“ weltweit,
- UN-Millenniumsziele 2015: Halbierung der Zahl der Menschen ohne Zugang zu Wasserver- und Abwasserentsorgung.

Allein zur Erfüllung der Ziele aus der UN-Millenniumsdeklaration (PROWADI 2007, 7):

- sind mehr als 50 Mrd. € pro Jahr in den nächsten Jahren nötig,
- müssen jeden Tag 275.000 Menschen an ein Wassernetz angeschlossen werden,
- müssen jeden Tag 600.000 Menschen an ein Kanalnetz angeschlossen werden.

So verfügen beispielsweise über 60% aller chinesischen Städte nicht über Kläranlagen; in den ländlichen Regionen findet praktisch gar keine Abwasserbehandlung statt. In Indien sollen 70% der Flüsse kontaminiert und etwa zwei Drittel aller Krankheitsfälle ursächlich auf Wasserverschmutzung zurückzuführen sein (fairs&more 2005, 7).

Reduziert man den Ausschnitt der Betrachtung auf die zukünftige Entwicklung in Europa bis 2030 (Abb. 9), zeigen sich schnell eine Vielzahl von wasserkritischen Regionen.

Aufgrund dieser weltweiten Herausforderungen gibt es und wird es zukünftig einen großen globalen Markt der Wasserver- und Abwasserentsorgung geben. Er wird gegenwärtig auf 250 Mrd. € geschätzt (BMU 2006c), demnach ist der Wassersektor wirtschaftlich „unglaublich attraktiv“ (SIWI 2007). Das SIWI hat 2007 eine Studie vorgestellt, nach der jeder in die Wasserversorgung investierte Dollar zwischen 3 und 34 Dollar Gewinn einbringt (SIWI 2007).

Obwohl sich die deutsche Wirtschaft insgesamt bisher überwiegend auf den Binnenmarkt konzentriert hat, ist die deutsche Wasserver- und entsorgungsstruktur auch im europäischen Vergleich sehr gut aufgestellt. Dennoch sind deutsche Hersteller aber in den letzten Jahren trotz hoher technologischer Kompetenz auf ausländischen Märkten ins Hintertreffen geraten. Gründe sind u.a. die traditionell eher regionale Ausrichtung der Unternehmen sowie die mittelständische Struktur der Hersteller – im Gegensatz etwa zu Frankreich mit seinen wenigen großen Unternehmen, die erfolgreich vor allem konventionelle, zentralistische Wasser- und Abwasserinfrastrukturen weltweit in die Regionen wirtschaftlicher Entwicklung exportieren. Diese Technologie ist an die dortigen Gegebenheiten häufig jedoch schlecht adaptiert. In diese Lücke muss die deutsche Wirtschaft vorstossen. Durch Bündelung des technologischen und organisatorischen Know-hows deutscher Anbieter gibt es die große Chance für die deutsche Wasserwirtschaft, nachhaltige und an die spezifischen Anforderungen angepasste Systemlösungen zu entwickeln und anzubieten (Export von Dienstleistungen im Verbund mit Technologien). Zukünftig wird der Markt für Komplett Dienstleistungen und integrierte Leistungen stark ansteigen.

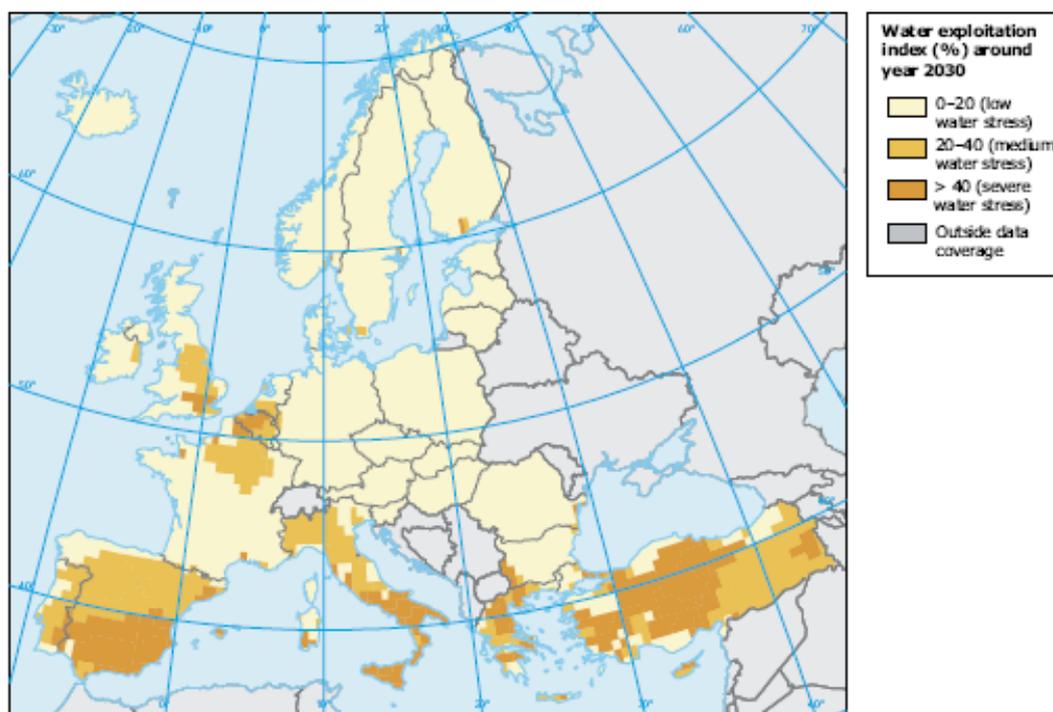


Abbildung 9: Wasserstress-Regionen im Jahr 2030 (Quelle: EEA 2005)

Dies wird durch die Einschätzung vom VDMA-Fachverband Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate bestätigt. Er vertritt die Überzeugung, dass besonders in den Megastädten der Dritten Welt ganzheitlichen Lösungen gefragt sind. „Während sich die Abwasserbeseitigung bisher vorwiegend am Gewässerschutz orientierte, werden künftig mehr und mehr Techniken zur Wiederverwendung des gereinigten Abwassers zum Einsatz kommen“ (Handelsblatt 2007).

Eine Schlüsseltechnologie könnte die Membrantechnik werden. Ähnlich wie Filter trennen dabei Schichten aus bestimmten Materialien die Stoffe eines Wassergemischs. Nach Angaben der Effizienz-Agentur Nordrhein-Westfalen wächst der Membrantechnik-Markt jährlich um zehn Prozent (Handelsblatt 2007). Nach einer von BMU und UBA herausgegebenen Studie (BMU/UBA 2007) werden für die Membrantechnologien für das 2020 ein Umsatz von 3,3 Mrd. € prognostiziert. Die sehr Platz sparende und modulare Bauweise der Membrantechnik prädestiniert diese Technologie, um Abwasserprobleme in Schwellen- und besonders in Entwicklungsländern anzugehen und sie wird in zunehmendem Maße auch in der Trinkwasseraufbereitung zum Einsatz kommen. Ein weiterer Vorteil der Membrantechnologie ist ihre Flexibilität; sie kann in kleinen, dezentralen und zentralen Anlagen eingesetzt werden. Die heute auf dem Markt befindlichen Membranen bieten aber keinen 100%igen Schutz (Lebensdauer, Anfälligkeit), so dass weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. In den sich stark entwickelnden Ländern China und Indien wird durch die demographische Entwicklung und die schnell fortschreitende Industrialisierung ein steigender Bedarf für Membranen sein, so dass sich besonders in diesen Ländern neue Absatzmärkte auf tun werden.

Großes Potential wird auch für dezentrale Abwasserbehandlungstechnologien prognostiziert. Kleinkläranlagen werden an Bedeutung gewinnen. Der Weltmarkt für Lösungen zum dezentralen Wassermanagement machte 2005 bereits rund 7 Mrd. Euro aus, das ist ein EU-weiter Marktanteil von 65%. Für das Jahr 2020 wird ein Marktvolumen von rund 35 Mrd. Euro erwartet (BMU/UBA 2007, 3). Bislang ist Europa der Schwerpunktmarkt für dezentrale Lösungen der Abwasserbeseitigung. Langfristig gesehen werden sich wegen der Notwendigkeit einer nachhaltigen, effizienteren Wassernutzung Märkte in Regionen eröffnen, die fehlende oder keine Wasserinfrastruktur haben wie z.B. aride Regionen wie Asien, Afrika, im Nahen Osten aber auch in Australien und den USA. Für Technologien zur dezentralen Einsparung und Nutzung verschiedener Wasserquellen ist die politische Regulierung oft noch das Markthemmnis (BMU/UBA 2007, 181). In Deutschland ist in diesem Zusammenhang zum Beispiel die Trinkwasserverordnung und der Anschluss- und Benutzungszwang zu nennen, da diese die Nutzung alternativer Wasserquellen verbieten oder beschränken.

Zukünftig wird es desgleichen für flexible Lösungen weltweite Potentiale für Technologien (Produkte und Dienstleistungen) in den Bereichen

- Flussgebietsmanagement
- Prozessleittechnik
- Wasserverlustmanagement (nach einer Studie von Booz & Allen (Rudolph 2004) sind in den nächsten 25 Jahren 40 Billionen US-Dollar notwendig, um die Infrastruktur von Städten instand zu halten)
- Abwasser- und Schlammbehandlung
- Nachhaltige effizientere Wassernutzung („precision irrigation“ und wassersparende Installationen wie Toiletten und Duschen)
- Meerwasserentsalzung (aufgrund der zunehmenden Wasserknappheit trotz hoher Investitionskosten zukünftig elementar) und für
- Geografische Informationssysteme

geben.

Die Schwerpunkte werden global in der Bewässerung sowie der sanitären „Entsorgung“ und der Wasserversorgung der Städte liegen, wobei Strukturen wie Flexibilität, Dezentralität und Adaption für spezifische Randbedingungen gefragt sein werden. Dabei werden in der Instandhaltung und dem Ausbau des Wasser- und Abwassernetzes die größten Potentiale gesehen. Booz & Allen (Rudolph 2004) geben für Deutschland eine Spanne von 60 bis 110 Mrd. Euro an.

Der künftige Markt der Wasserver- und Abwasserentsorgung für das Jahr 2010 wird für die EU auf ein Volumen von 400 Mrd. Euro geschätzt (Fraunhofer 2005; BMU 2006). Für den einheimischen Markt sind die Potentiale zukünftig als eher gering einzustufen, da sich der Markt vorwiegend durch die Substitution schon bestehender Anlagen konstituiert.

Absatzmärkte werden Märkte mit starkem Wachstum wie China und Indien, aber auch Osteuropa und Russland sein, die Bedeutung Westeuropas als Absatzmarkt wird in fast allen Technologiebereichen zurückgehen.

4.5 Akteure und Netzwerke

In Deutschland ist die Wasserwirtschaft durch die dichten, rechtlichen Rahmenbedingungen und traditionellen Pflichtaufgaben, bis hin in die Kommunen, sehr stark zerstückelt und kleinteilig. Ein Vorteil einer derartigen mehrschichtigen Struktur liegt jedoch darin, dass sie alle Träger von Interessen und Wissen einbeziehen kann. Bedingt durch diese kleinteilige Struktur und die dezentrale Entscheidungsfindung ist Deutschland wohl das Land mit der größten Vielfalt an unterschiedlichen Organisationsformen. In der folgenden Enumeration sind einige Akteure der nationalen und internationalen Wasserwirtschaft aufgeführt, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

Fachverbände/ Vereine

AKWasser	Arbeitskreis Wasser des Bundesverbandes der Bürgerinitiativen	www.akwasser.de
BGW	Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft	www.bgw.de
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau	www.bwk-bund.de
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie	www.dechema.de
DGL	Deutsche Gesellschaft für Limnologie	www.dgl-ev.de
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.	www.dvgw.de
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	www.dwa.de
EWA	European Water Association	www.ewaonline.de
fbr	Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung	www.fbr.de
Figawa	Firmen im Gas- und Wasserfach	www.figawa.de
	German Water	www.germanwater.de
KWB	Kompetenzzentrum Wasser Berlin	www.kompetenz-wasser.de
RBV	Rohrleitungsbauverband	www.rbv-koeln.de
RSV	Rohrleitungssanierungsverband	www.rsv.ev.de
TZW	Technologiezentrum Wasser	www.tzw.de
VDG	Vereinigung Deutscher Gewässerschutz	www.vdg.online.de
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	www.vdi.de
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.	www.vdma.de
Vedewa	Kommunale Vereinig. F. Wasser-, Abfall- u. Energiewirtschaft	www.vedewa.de
VfW	Verein zur Förderung des Wasserwesens	www.vfw-berlin.de
Vku	Verband kommunaler Unternehmen	www.vku.de
WaBoLu	Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene	www.wabolu.de

(Projekt)Netzwerke/Informationsdienste

((EUWID))	Europäischer Wirtschaftsdienst	www.euwid.de
FSP-WIP	Forschungsschwerpunkt: Wasser in Ballungsräumen	www.fsp-wib.tu-berlin.de
GWP	German Water Partnership	
IngNet	Ingenieur-Netzwerk für Wasser-Abwasser-Umwelt	www.ingenieur-netzwerk.de
MBR	Fachbereich: Membran-Bioreaktor-Technologie	www.mbr-network.eu
NWZ	Norddeutsches Wasserzentrum	www.water-click.de
Techneau	Technology Enabled Universal Access to Safe Water	www.techneau.org
WaterPN	Water Partners Network Berlin-Brandenburg	www.waterpn.de
WWI	Wasserwirtschaftsinitiative Nordrhein-Westfalen	http://wasser.nrw.de

Universitätsinstitute im Bereich Wasser/Abwasser

GH Kassel	Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft	www.uni-kassel.de/fb14/siwawi/Welcome.html
RU Bochum		www.ruhr-uni-bochum.de/siwawi
RWTH	Institut für Siedlungswasserwirtschaft (I-SA)	www.isa.rwth-aachen.de
TU Berlin	Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik (ifvt)	www2.tu-berlin.de/~ifvt/uvt/uvt.html
TU Berlin	Institut für technischen Umweltschutz (itu)	www2.tu-berlin.de/fb6/itu/index.html
TU Braunschweig	Institut für Siedlungswasserwirtschaft	www.tu-braunschweig.de/isww
TU Cottbus	Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau	www.tu-cottbus.de/w-tech/startseite.php
TU Darmstadt		www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de
TU Dresden	Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft	www.tu-dresden.de/fgghisi/src/index.php?id=1&language=de&user=0&sortby=1
TU Hamburg-Harburg	Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz	www.tu-harburg.de/aww/index.html
TU München	Institut für Wasserwesen	www.wga.bv.tum.de
Uni Bremen	Institut für Umweltverfahrenstechnik (IUV)	www.iuv.uni-bremen.de
Uni d. Bundeswehr München		
Uni Duisburg-Essen	Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft	www.uni-due.de/abfall/abfalltechnik-essen.shtml
Uni Hannover	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik	www.isah.uni-hannover.de
Uni Kaiserslautern		http://gandalf.arubi.uni-kl.de
Uni Karlsruhe	Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung Institut für Wasserchemie	www.isww.uni-karlsruhe.de http://www.wasserchemie.uni-karlsruhe.de/
Uni Leipzig	Grundbau und Wasserbau	www.uni-leipzig.de/~grw/siwawi/
Uni Paderborn	Techn. Chemie und Verfahrenstechnik	http://chemie.uni-paderborn.de/fachgebiete/tc
Uni Rostock	Institut für Umweltingenieurwesen	www.auf.uni-rostock.de/UIW
Uni Siegen	Forschungsinstitut Wasser und Umwelt	www.uni-siegen.de/fb10/fwu
Uni Stuttgart	Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft	www.iswa.uni-stuttgart.de
Uni Weimar	Professur Siedlungswasserwirtschaft	www.uni-weimar.de/Bauing/siwawi
Uni Wuppertal	Lehrstuhl für Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft	www.bauing.uni-wuppertal.de/siewawi

Staatliche Einrichtungen/ Behörden

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau	www.baw.de
BfaG	Bundesanstalt für Gewässerkunde	www.bafg.de
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	www.bgr.de
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	www.bmbf.de
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	www.bmu.de
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	www.bmwi.de
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit	www.bmz.de

BMG	Bundesministerium für Gesundheit	www.bmg.bund.de
LAWA	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser	www.lawa.de
UBA	Umweltbundesamt	www.umweltbundesamt.de
Sonstige		
IWW	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH und Institut für Wasserforschung	www.iww-online.net
Internationale Institutionen		
Eawag	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasser- reinigung und Gewässerschutz	www.eawag.ch
IHP	International Hydrological Programme of UNESCO	www.unesco.org/water/ihp/
HWRP	Hydrological and Water Resources Programme of WMO	www.wmo.ch/pages/prog/hwrp/index_en.html
SIWI	Stockholm International Water Institute	www.siw.org
WWAP	World Water Assessment Programme of UNESCO	www.unesco.org/water/wwap/
WSSCC	Water Supply & Sanitation Collaborative Council	www.wsscc.org
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development	www.wbcsd.org

4.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es gibt alternative Quellen für Energie.
Es gibt aber keine Alternativen zu Wasser.

Deutsche Technik ist in allen Branchen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung international präsent. Mit Umsätzen von rund 10 Mrd. Euro jährlich deckt die deutsche Exportwirtschaft fast 20% des Exports der OECD ab (BMU/UBA 2007). Damit ist Deutschland Marktführer im Export von Technologien aus Sektoren, die der „Wassertechnik“ zugeordnet werden können. Im vergangenen Jahr setzten deutsche Hersteller von Systemen zur Wasseraufbereitung, Abwasser- und Schlammbehandlung rund 1,1 Mrd. Euro um (Handelsblatt 2007). Doch ungeachtet der positiven Zahlen, des hohen Qualitäts- und Technikstandards und der beachtlichen Exportleistungen ist die Wasserwirtschaft überwiegend auf den Binnenmarkt konzentriert. Abgesehen von dem ständigen Sanierungsbedarf der Rohrnetze, ist der Binnenmarkt aber weitgehend gesättigt.

Auf einen Grund der schlechten internationalen Marktöffnung weist der so genannte Briscoe-Report für die Weltbank hin, der das hohe Preisniveau und die nach Meinung der Weltbank wenig effizienten Strukturen in Deutschland anmahnt: „Wiederholt waren wir stark überrascht von dem, was wir als ungenügendes Kostenbewusstsein in der deutschen Wasserwirtschaft empfanden und was auf vielerlei Weise zutage trat“ (Briscoe 1995). Wie Händler in Interviews berichten, kaufen die Kunden i.d.R. die jeweils günstigsten Produkte. Nur wenige Importeure handeln mit Technologie „made in Germany“. Sie seien jedoch nach eigenen Angaben erstaunt von den hohen Standards der deutschen Waren. Selbst Produkte von kaum bekannten mittelständischen Unternehmen überträfen ihre amerikanischen Wettbewerber qualitativ um ein Vielfaches. Doch importiert werden die Produkte der amerikanischen und japanischen Konkurrenz (fairs&more 2005, 19).

Ein weiterer Grund liegt in der immer schlechteren globalen Vermarktbarkeit von Spitzentechnologien ohne Dienstleistungen. Erträge und Kundenbindung etc. werden künftig zunehmend mit Dienstleistungen rund um entwickelte Produkte und Verfahren erzielt, so genannte „hybride Lösungen“ bei denen Technik und entsprechende „add-on“-Dienstleistungen angeboten werden. Anlagenbauer und Fertigungsunternehmen müssen eine Dienstleistungsumgebung liefern, die die Produkte attraktiver macht. Dienstleistungen können danach zu Treibern des Exports werden. Im Dienstleistungssektor hinkt Deutschland jedoch hinterher, da die Dienstleistungen bisher sehr regional und national bezogen waren. Daher brauchen Dienstleistungen Innovationen. Innovative Dienstleistungen werden eine Adaption an spezifische technische, wirtschaftliche, politische und kulturelle Faktoren gewährleisten können. Für eine stärkere Rolle der Ver- und Entsorger mit ihrem hohen Organisations- und Betreiber-Know-How wären aber politische Weichenstellungen (z.B. staatliche Maßnahmen zur Unterstützung des Außenhandels) erforderlich und es ist von überzogenen Standards und Anlagendimensionen Abstand zu nehmen.

Für den Exporterfolg in Entwicklungsländern sind einfache und verlässliche Technologien zu entwickeln und in einer bilateralen Zusammenarbeit in angepasste, einfache und wirtschaftlich attraktive „ganzheitliche“ Konzepte zu integrieren.

Von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von zukünftigen Märkten ist das Vortreiben der Forschung. Welche Verfahren und Prozesse besonders förderungswürdig sind, ist den einzelnen, in den obigen Abschnitten skizzierten Problemfeldern zu entnehmen. Es sind vor allem „high potential“-Projekte für eine erfolgreiche Einführung in die „Weltmärkte“ zu unterstützen.

Es gibt einige Forschungsbereiche in Deutschland für die ein externer Initiativ-Anschub z.B. durch politische Rahmenbedingungen und Förderung unentbehrlich sein wird. Hierbei ist aber darauf zu achten, dass der Förderungsprozess stark vereinfacht und auf die Marktfähigkeit von zu fördernden Verfahren und Techniken geachtet wird. Im Bereich der Forschung ist beispielsweise die Grundlagenforschung im Abwasserbereich und deren Ausweitung auf biotechnische Verfahren oder die Nanotechnologie zu nennen. Darüber hinaus kommt einer verstärkt monetären Unterstützung von Unternehmen beim Innovationsprozess eine hohe Bedeutung als „Schubkraft“ zu.

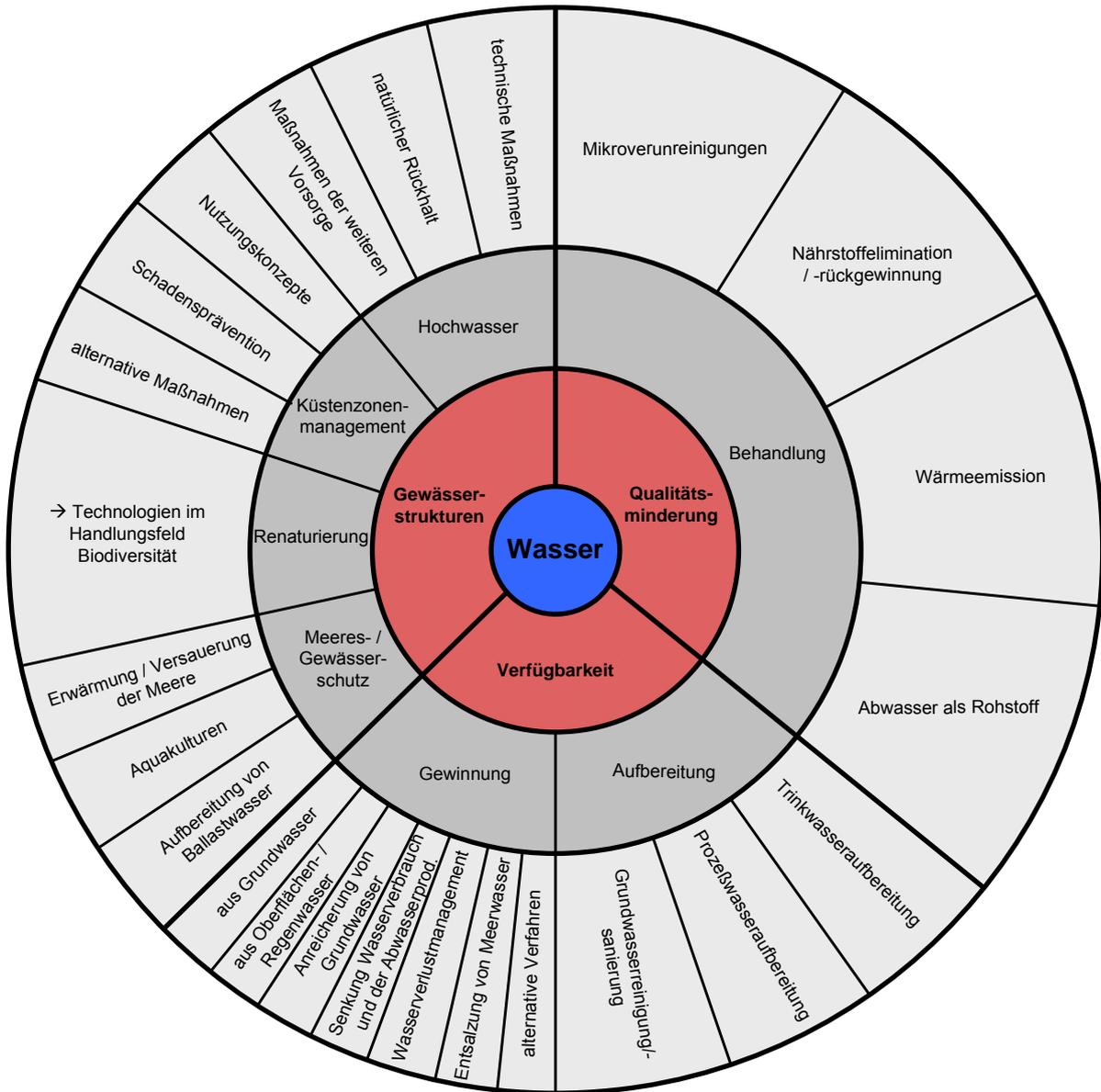
Darausfolgend ergeben sich abschließend nachstehende Handlungsempfehlungen, die zum derzeitigen Stand des Projektes aber lediglich Thesencharakter haben und auch nur haben können:

1. Generell sind zukünftig „Wasser“-Umwelttechnologien essentiell und förderungswürdig, die es erlauben, die Verwendung von umwelt- oder 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 mehr Nutzen schaffen ("creating more value with less impact") zu entwickeln. Dazu gehört auch das öffentliche „Hervorheben“ solcher Technologien als Best-Practice-Beispiele und Honorierung durch Vergabe von „Umweltpreisen“.

Diese Forderung gilt aber selbstverständlich nicht nur für „Wasser“-Technologien, sondern auch für Technologien aus den anderen Handlungsfeldern.

2. In Deutschland sind alle elementaren Technologien und das Know-how vorhanden, um die vorhandene Nachfrage zu befriedigen, der Ausgangspunkt ist denkbar gut: Die deutsche Wasserwirtschaft hat viel zu bieten! Die Potentiale werden gegenwärtig aber viel zu wenig genutzt. Der Initiativ-Anschub muss von außen durch politische Rahmenbedingungen und Strategien (Hightech-Strategie, Innovationspreise) kommen, demnach bedarf es einer neuen Konzeption für einen Einstieg der deutschen Firmen, in die im Abschnitt 4.4 identifizierten potentiellen (internationalen) „Wassermärkte“ mit Zukunftsperspektive.
3. Es werden zukünftig auf dem Weltmarkt keine standardisierten Paketlösungen, sondern anforderungs- und problemkonforme, aber flexible und modularisierte Lösungen mit „add-on“-Dienstleistungen (z.B. Komplettpakete, Betreibermodelle) nachgefragt werden. Der Export von Dienstleistungen ist extrem zu forcieren und eine zielgerichtete Ausrichtung der deutschen Wasserwirtschaft auf Fragestellungen und Probleme der Zielländer von entscheidender Bedeutung. Eine deutlich systematischere Unterstützung von der Politik z.B. beim Außenhandel (Auftritt bei Messen usw.) ist unerlässlich.
4. Da die Hauptschwierigkeiten beim Aufbau der Geschäftsbeziehungen im Umfeld der Finanzierung liegen, wird es im weiteren Ablauf erforderlich sein, die identifizierten innovativen Technologien mit Marktpotential verstärkt bei der Einführung in den Markt zu unterstützen und besonders den Unternehmen unbürokratisch und schnell das notwendige Kapital zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus ist auf eine „neue“ Qualifikation und Internationalität von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern zu drängen.
5. Ausbau von deutschen Botschaften als „Technologiebasen“: Durch die Demonstration können innovative, für den jeweiligen Standort interessante „einsetzbare“ Produkte, Verfahren und Dienstleistungen qualitativ und umfassend propagiert und darüber informiert werden (Signalwirkung im jeweiligen Land für die Technologie, das Verfahren oder die Dienstleistung).
6. Überdenken des traditionellen „Anschluss- und Benutzungszwangs“ für leitungsgebundene Einrichtungen (Abwasserbeseitigung, Wasserversorgung) in Deutschland als Hemmnis z.B. für den Einsatz von neuartigen, nachhaltigen und differenzierenden dezentralen und semidezentralen abwassertechnischen Konzepten.
7. Kritische Betrachtung des UN-Millenniumziels „jeden Tag 600.000 Haushalte an ein Kanalnetz anzuschließen“: Ist dieses Ziel mit Blick auf die künftige Entwicklung hin zu einer dezentralen Wasserver- und Abwasserentsorgung überhaupt noch erstrebenswert und sinnvoll?
8. Nach Liesefeld und Paul (2006) sind in den kommenden 10 Jahren in allen EU-Beitrittsländern erhebliche Investitionen und organisatorische Maßnahmen notwendig, um die Wasser- und Abwasserinfrastruktur den EU-Standards anzugleichen. Aus dieser Tatsache können sich auch für kleine und mittlere Unternehmen der deutschen Wasserwirtschaft neue Exportmärkte auftun. Eine mögliche Konsequenz wäre, (in stärkerer Weise) sich selbst tragende Netzwerke von Unternehmen der Wasserwirtschaft zu initiieren. Z.B. können durch die Zusammenarbeit Internationalisierungserfahrener Hersteller mit kleinbetrieblichen (Dienstleistungs)unternehmen beide Seiten gewinnen.

9. Wie auch die Vergangenheit bereits deutlich gezeigt hat, kommt klaren politischen Zielsetzungen eine entscheidende Bedeutung zu, um alternative und umweltverträgliche Produkte verstärkt in den Markt zu bringen und Innovationsleistungen zu initiieren.
10. Auswirkungen des Klimawandels: Die Lösungsansätze müssen aus den anderen Handlungsfeldern als Vorsorgemaßnahmen kommen und es werden eher regulatorische Elemente, wie die Einrichtung eines globalen Netzwerkes von Schutzgebieten oder eine Bewirtschaftung der Meeresressourcen nach einem „ökosystemaren“ Ansatz, elementare Faktoren sein. Interdisziplinäre Forschung, die das Verständnis der Zusammenhänge zwischen anthropogenen Störungen, biologischer Vielfalt und Resilienz mariner Ökosysteme verbessert, ist zu fördern.
11. Förderungswürdige- und entwicklungsfähige Umwelttechnologien der deutschen Wasserwirtschaft:
 - ⇒ Technologien zur Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser, besonders Membrantechnologien, die auch in der Trinkwasseraufbereitung zum Einsatz kommen und verstärkt kommen werden
 - ⇒ Nutzung und Kreislaufführung von Wasser aller Art (bspw. Abwasser und Regenwasser), Innovative Filtertechniken (Membranfilter, Umkehrosmose, UV-Bestrahlung) und deren Weiterentwicklung (kostengünstiger, leistungsfähiger, wartungsärmer)
 - ⇒ Wasserverlustmanagement (Technologien zur Überwachung und Sanierung von Leitungsnetzen)
 - ⇒ Nachhaltige Bewässerungssysteme
 - ⇒ aufgrund der zunehmenden Wasserknappheit trotz hoher Investitionskosten nehmen auch Meerwasserentsalzungsanlagen (RO-Anlagen, thermische Entsalzung mit Sonnenkollektoren und windkraftgetriebene Anlagen) an Bedeutung zu, besonders Anlagen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden
 - ⇒ wassersparende Installationen wie Toiletten und Duschen, berührungslos schaltende Sanitärarmaturen
 - ⇒ Hochwasserschutztechnologien
 - ⇒ Flussgebietsmanagement
 - ⇒ Wassergewinnungstechnologien (innovative Brunnenbohr- und -ausbautechniken, neue Bohrverfahren)
 - ⇒ Geografische Informationssysteme



Technologiekompas zum Handlungsfeld „Wasserschutz“ (Entwurf)

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
- aqua-society (2007): AquaMission – Wassergewinnung aus der Luft. <http://www.aqua-society.com/projects/aqua-miss.html>
- ASK (Access to Sustainable Knowledge) (2007): Nachhaltige Klärschlammverwertung – Energie- und Nährstoffrückgewinnung mit dem Seaborne-Verfahren in Gifhorn, ASK – Access to sustainable knowledge, http://www.ask-eu.de/default.asp?Menu=1000&cmd=VIEW_ARTIKEL9658&AnbieterID=, Stand 07.11.2007
- AWI (2002): Berichte zur Polar und Meeresforschung, Alfred-Wegener-Institut Open Ocean Aquaculture und Offshore Windparks. Eine Machbarkeitsstudie über die multifunktionale Nutzung von Offshore-Windparks und Offshore-Marienkultur im Raum Nordsee, Bericht 412. Bremerhaven <http://epic.awi.de/Publications/BerPolarforsch2002412.pdf>
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2007): Abwasser: Pilotversuch zur Beseitigung von Mikroverunreinigungen. Schweiz. <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/in-dex.html?lang=de&msg-id=13588>, Stand 07.11.2007
- Bayer (2007): Volles Rohr saniert, Bayer AG. <http://www.bayer.de/de/volles-rohr-saniert.aspx>, Stand 07.11.2007
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2003): Nachhaltige Marine Aquakulturtechnologie. http://www.bmbf.de/pub/nachhaltige_marine_aqua-kulturtechnologie.pdf
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2005): Vorstellungen zu den Thematischen Prioritäten im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm. http://www.rp6.de/inhalte/rp7/Download/dat_fil_1051, Stand 10.09.2007
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2006): Die Hightech-Strategie für Deutschland
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2006a): Bundesumweltministerium fördert innovatives Verfahren zur Klärschlammbehandlung, BMU-Pressedienst, Meldung Nr. 209/06 vom 22.08.2006, http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/pdf/37696.pdf, Stand 10.11.2007
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2006b): Fördernehmer: Zweckverband Gruppenkläranlage Schozachtal, BMU-Pressedienst, http://www.bmu.de/foerderprogramme/pilotprojekte_inland/doc/37693.php, Stand 10.11.2007
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2006c): Ökologische Industriepolitik. Memorandum für einen "New-Deal" von Wirtschaft, Umwelt und Beschäftigung. 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, Online-Quelle: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3337.pdf>, Stand: 14.03.2008
- BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Österreich) (2004): Wasser ist Leben – Verantwortung und Chancen der deutschen Wirtschaft in Entwicklungsländern. Dokumentation der Konferenz des BMWA in Zusammenarbeit mit Berlinwasser International, Gelsenwasser und Siemens in Berlin, 9. Dezember 2004, BMWA-Dokumentation Nr. 549

- BMZ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) (2006): Sektorkonzept Wasser, BMZ-Konzepte 143. <http://www.bmz.de/de/service/infothek/fach/konzepte/Konzepte143.pdf>, Stand 11.09.2007
- Briscoe, J. (1995): Der Sektor Wasser und Abwasser in Deutschland, Qualität seiner Arbeit, Bedeutung für Entwicklungsländer. In: *gwf Wasser Abwasser*, Jhg. 136, Nr. 8, S. 422-432
- BWB (Berliner Wasserbetriebe) (2007): Nachbehandlung von gereinigtem Abwasser mit Oxidationsverfahren. <http://www.bwb.de/content/language1/html/1510.php>, Stand 17.09.2007
- BWT (Best Water Technology) (2007): <http://www.bwt-group.com/DE/Lebenselixir-Wasser/Themen/Globale-Herausforderung/>
- 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
- Chemnitz (2007): So werden selbst Wüsten zum Blühen gebracht. Pressestelle TU Chemnitz. <http://www.tu-chemnitz.de/tu/presse/2007/06.11-13.49.html>, Stand 07.11.2007
- Cornel, P. (2002): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammaschen. *Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie, Geo- und Wassertechnologie*, 1. Jhg., Nr. 3, 102-114. http://www.fzk.de/fzk/groups/itc-wgt/documents/internetdokument/id_036507.pdf, Stand 10.11.2007
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser. DBU, BWP, A-SEW, IEI (Hrsg.), <http://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/101106090257290.pdf?PHPSESSID=9255c19a777f8970c2a19a68064cbde8>, Stand 11.11.2007
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008): Biotechnologische Kupferrückgewinnung aus Industrieabwasser. http://www.dbu.de/123artikel1960_341.html, Stand 15.02.2008
- DME (Deutsche Meerwasser Entsalzung e.V.) (2007a): Solare Meerwasser-Entsalzungsanlage mit mehrstufiger Wärmerückgewinnung. http://www.dme-ev.de/Forschung_und_Entwicklung.asp, Stand 07.11.2007
- DME (Deutsche Meerwasser Entsalzung e.V.) (2007b): Zukunftsmarkt Meerwasserentsalzung, Pressemeldung vom 18.09.2007, http://www.dme-ev.de/global/downloads/Pressemeldungen/2007/ThyssenKrupp-Zukunftsmarkt_Meerwasserentsalzung.pdf
- dradio (Deutschlandfunk) (2004): Uferfiltration, Beitrag vom 18.06.2004, <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/umwelt/278115/>, Stand 11.12.2007
- DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.) (2006): Forschungsprogramm Wasser. Prioritäten, Top-Themen und Ansprechpartner. <http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/organisation/forschungwasser.pdf>, Stand 11.09.2007
- Elga (ELGA Berkefeld GmbH) (2007): Mobile Brackwasser Entsalzungsanlage. <http://www.elga-berkefeld.de/lib/elgaberkefeld/1/E543k881Ug3I93Lw0ukAMUE4.pdf>, Stand 07.11.2007
- Elster (Elster Messtechnik GmbH) (2006): Wo die Wasserverluste zum Problem werden, zeigen die Elster Produkte ihre ganze Stärke. http://www.elstermesstechnik.com/prodtraining_files/P1303_0806.pdf, Stand 07.11.2007
- EnBW (Energie Baden-Württemberg AG) (2004): Innovative Sensortechnik ortet Leckagen im Leitungsnetz – Automatisierte Wassernetzüberwachung in Dürmentingen. http://www.enbw.com/content/de/presse/pressemitteilungen/2004/10/pm_20041020_reg_03/index.jsp;jsessionid=C99E4C9654195D06AB1BD0EF4AB418D0.nbw04, Stand 07.11.2007
- EEA (European Environment Agency) (2005): Climate change and river flooding in Europe. Briefing 1/2005. Kopenhagen
- EWO (2008): Referenzen. <http://www.wasservitalis.de/referenzen.html>, Stand 08.12.2007

- 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
- fbr (Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V.) (2007): Einführung in die Regenwassernutzung. <http://www.fbr.de/regenwassernutzung.html>, Stand 23.10.2007
- Felgentreu, M. (2007): Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm, Process, Portal für Chemie und Pharmatechnik. http://www.process.vogel.de/management_und_it/forschung_entwicklung/articles/88728/, Stand 09.11.2007
- FONA (Forschung für Nachhaltigkeit) (2005): Forschungsprojekt: Künstliche Grundwasseranreicherung gegen Wasserknappheit. http://www.fona.de/eng/4_services/news/index.php?we_objectID=2472&n=051220_Forschungsprojekt_Kuenstliche_Grundwasseranreicherung_gegen_Wasserknappheit, Stand 23.10.2007
- FONA (Forschung für Nachhaltigkeit) (2006): Durstige Welt. http://www.fona.de/de/4_serviceangebote/nachrichten/index.php?we_objectID=4268&n=060828_Durstige_Welt, 07.11.2007
- Fraunhofer (Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Hrsg.) (2005): AKWA 2100 – Alternativen der kommunalen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Stuttgart
- Frei, M. (2001): Solare Oxidation und Entfernung von Arsen aus Trinkwasser: das SORAS-Projekt. EAWAG. <http://www.eawag.ch/news/arsen/oxidation.html>, Stand 07.11.2007
- Glade, H. und T. Peters (2006): Meerwasserentsalzung – Stand der Technik und Perspektiven. *Chemie Ingenieur Technik* 2006, 78, S. 1213. <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/112777-770/PDFSTART>, Stand 13.09.2007
- GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) (2005): Verbesserte Exportchancen durch Ecosan, <http://www.gtz.de/de/doku-mente/de-verbesserte-exportchancen-durch-ecosan-2005.pdf>
- GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) (2006): ecosan newsletter Nr. 21, 08/2006. <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/eco-san/nl/de-ecosan-nl21-2006.pdf>, Stand 10.11.2007
- Handelsblatt (2007): Anlagenbauer entwickeln Umwelttechnik für Lima. http://www.handelsblatt.com/News/printpage.aspx?_p=203116&_t=ftprint&_b=1333382
- 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
- IDW (Informationsdienst Wissenschaft) (2000): Ferndiagnose von Wasserleitungen spart Reparaturkosten. Mitteilung vom 29.11.2000. <http://idw-online.de/pages/de/news27690>, Stand 07.11.2007
- IDW (Informationsdienst Wissenschaft) (2007): Bayreuther Hydrologen untersuchen Abbau-Prozesse von Pharmaka im Wasser. Mitteilung vom 30.11. 2007. <http://idw-online.de/pages/de/news238268>, Stand 07.02.2008
- InnoNet (Förderung von innovativen Netzwerken) (2007): Wärmetauscherplatte in Abwasserkanälen in Verbindung mit Innensanierung (Heatliner). http://www.vdivde-it.de/innonet/projekte/in_pp152_heatliner.pdf, Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2000): Ultraschall zerkleinert Klärschlamm. Forum Innovationsreport, Meldung vom 06.06.2000. http://www.innovations-report.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-204.html, Stand 08.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2003): Neues Adsorptionsverfahren zur Arsen-Abtrennung aus dem Trinkwasser. Meldung vom 11.12.2003, http://www.innovations-report.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-24157.html, Stand 10.11.2007

- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2004): Abwasser der Kanalisation als Energiequelle. Forum Innovationsreport, Meldung vom 22.01.2004. http://www.innovations-report.de/html/berichte/energie_elektrotechnik/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, 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.innovations-report.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
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2006c): Millionen Menschen trinken täglich Arsen, Meldung vom 13.11.2006, http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/bericht-73881.html, Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2006d): Kompakte UV-Mitteldrucklampen schonen das ökologische Gleichgewicht in Ozeanen, Mitteilung vom 24.10.2006, http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/bericht-72651.html, Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2007a): Phosphor-Rückgewinnung aus industriellen Prozesswässern sowie aus Nebenströmen der kommunalen Abwasserbehandlung. Forum Innovationsreport, Meldung vom 19.03.2007. <http://www.innovations-report.de/html/berichte/technologieangebote/bericht-81063.html>, Stand 10.11.2007
- InnoRep (Forum Innovationsreport) (2007b): Mit Silber veredelte Textilien halten Flüssigkeiten keimfrei. <http://www.innovations-report.de/html/berichte/verfahrenstechnologie/bericht-85638.html>, Stand: 11.06.07
- Innovation Niedersachsen (2007): Zukunftweisendes System zur Aufbereitung von Ballastwasser auf Schiffen entwickelt. http://www.innovation.niedersachsen.de/138.98.html?&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=2800&tx_ttnews%5BbackPid%5D=1, Stand 18.06.2007
- intewa (INTEWA GmbH) (2007): Grundwissen Regenwasserversickerung. <http://regenwasserversickerung.intewa.de>, Stand 29.10.2007
- Jörissen, J.; Coenen, R.; Stelzer, V. (2005): Zukunftsfähiges Wohnen und Bauen - Herausforderungen, Defizite, Strategien. In: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland, Bd. 7. Berlin
- Kipp (Kipp Umwelttechnik GmbH) (2007): Leitungen orten und Leckagen identifizieren. <http://www.kipp-umwelttechnik.de/deutsch/leckage+ortung/index.htm>, Stand 07.11.2007
- Kopinke, F.-D.; Mackenzie, K.; Köhler, R.; Georgi, A.; Weiß, H. und U. Roland (2003): Konzepte der Grundwasserreinigung. Chemie Ingenieur Technik (75), 4/2003, 329-339. <http://www.ufz.de/data/GW36618.pdf>
- Kron, W. (2003): Überschwemmungsschäden und Versicherung. In: Wasserwirtschaft 10/2003, S. 8 - 13
- Liesenfeld, J. und G. Paul (2006): Dienstleistungsexport der deutschen Wasserwirtschaft. Ergebnisse der Unternehmensbefragung (Langfassung), im Rahmen des Förderschwerpunktes: Exportfähigkeit und Internationalisierung von Dienstleistungen, Duisburg
- MWVLW (Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz) (2005): In der grabenlosen Kanalsanierung liegt die Zukunft. <http://www.mwvlw.rlp.de/internet/sub-/d50/d5060a15-9933-b701-a7c5-abe3742f2293,,aaaaaaaa-aaaa-aaaa-bbbb-000000000008.htm>, Stand 07.11.2007

- Nickel, K. und U. Neis (2003): Klärschlamm-Integration – Überblick über verschiedene Verfahren. http://www.stark-consult.de/pdf/Ultrawaves_Klaerschlammdesintegration_Ueberblick.pdf, Stand 10.11.2007
- NRW (2007): 4 Millionen Euro für neue Technologie zur Nährstoffrückgewinnung aus Klärschlamm – weltweit erste Anlage in Gifhorn. Umweltministerium NRW, Pressemitteilung Nr. 121/2007. <http://www.umwelt.niedersachsen.de/master.jsp?C=41742161&I=598&L=20> (Stand 10.11.2007)
- Parodi, O. (2008): Technik am Fluss. Philosophische und kulturwissenschaftliche Betrachtungen zum Wasserbau als kulturelle Unternehmung. München (im Erscheinen)
- Pinnekamp, J.; Montag, D.; Gethke, K.; Goebel, S.; Herbst, H. (2007): Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers "Magnesiumammoniumphosphat – MAP" aus Abwasser und Klärschlamm. Texte 25|07, Umweltbundesamt. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3256.pdf> (Stand 09.11.2007)
- Potentialanalyse (2007): http://www.schleswig-holstein.de/MJAE/DE/EuropaOstseepolitik/Meerespolitik/Download/potenzialanalyse_templateld=raw,property=publicationFile.pdf
- Pronk, W. (2007): Membrantechnologie. eawag. <http://www.wave21.eawag.ch/arbeitsspaete/Membrantechnologie/index>, Stand 11.11.2007
- Rothenberger, D. (2003): Integrierte Mikrosysteme der Versorgung – Report zur Entwicklung des Versorgungssektors Wasser. Sozial-ökologische Forschung, CIRUS, EAWAG, Kastanienbaum
- PROWADI (2007): Der internationale Wassermarkt aus Sicht der Gelsenwasser. http://www.prowadi.de/images/stories/Dateien/04_tagung_mietrasch.pdf
- Rudolph, K.-U. (2004): Internationale Perspektiven des Grauwasser-Recyclings – Bedarf, Nachfrage, Marktentwicklung. Vortrag am 24.02.2004 Chip-fbr-Veranstaltung "Grauwasser-Recycling – Chancen für die deutsche Wirtschaft"
- RWE (2007): <http://www.rwe.com/generator.aspx/online-special-wasser/wasser-wissen/daten-und-fakten/wasserverlust-europ-vergleich/language=de/id=321056/wasserdargebot.html>
- RWTH (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) (2007a): Optimierte Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen durch ein Hybridverfahren aus Niederdruck-Nassoxidation und Nanofiltration. http://www.isa.rwth-aachen.de/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=208&Itemid=255, Stand 07.11.2007
- RWTH (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) (2007b): Phosphorrückgewinnung aus der Asche von Klärschlamm. <http://www.avt.rwth-aachen.de/AVT/index.php?id=124>, Stand 09.11.2007
- Schavan, A. (2007): Umwelttechnologie und Forschung für die Eine Welt. e.velop das entwicklungs-magazin, 48. <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/EMagazines/velop/048/s1-schavan-bmbf-umwelttechnik.html>
- Schröder, C. (2007): Pilot-Projekt in der Schweiz testet Abwasserreinigung mit Ozonierung. Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH. <http://www.all4engineers.com/index.php;do=show/site=ut/-Ing=de/id=6866/alloc=93/sid=1bf110e391aa087d983255e2dd540e53> (Stand 31.10.2007)
- scinexx (Das Wissensmagazin) (2006): Osteoporose in der Tiefe – Übersäuerung der Meere löst Korallenriffe auf. http://www.scinexx.de/index.php?cmd=focus_detail2&f_id=308&rang=8
- Siegrist, H. (2007): Entfernung von Mikroverunreinigungen aus Abwasser durch Ozonierung. eawag Faktenblatt 3, EAWAG. <http://www.eawag.ch/media/20070709/faktenblatt.pdf>, Stand 07.11.2007
- SIWI (Stockholm International Water Institute) (2007): Progress and Prospects on Water. World Water Week 2007, Synthesis-Report http://www.siwi.org/downloads/WWW-Symp/Synthesis_07_web.pdf
- Sprint (Sprint Sanierung GmbH) (2007): Die Messtechnik. <http://www.sprint.de/fileadmin/upload/download/messtechnik.pdf>, Stand 07.11.2007

- SUSAN (Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery) (2005): Nachhaltige und sichere Nutzung von Klärschlamm mit dem Ziel der Nährstoffrückgewinnung. newsletter 12/2005. <http://www.susan.bam.de>
- Stern-online (2007): Knochenschwund unter Wasser – Ozeanversauerung, E-Booklet: Klima im Wandel. <http://www.stern.de/wissenschaft/natur/592777.html?nv=redir>
- Talsperren-Komitee (2004): http://www.talsperren-komitee.de/weimar2004/pdf/V_18.pdf
- Tidwell, L. (2005): Mehr Wasser aus Meerwasser. Freitag 49, Die Ost-West-Wochenzeitung. <http://www.freitag.de/2005/49/05491801.php>, Stand 07.11.2007
- TÜV Nord (2007): Die vier Elemente, Erde und Luft, Feuer und Wasser. explore: – Das Kundenmagazin der TÜV-Nord Gruppe, Ausgabe Februar 2007. <http://www.tuev-nord.de/downloads/explore2007-01.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz - Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation, Forschungsprojekt durchgeführt von: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Berlin), Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Karlsruhe), Roland Berger Strategy Consultants.Dessau, München, Berlin
- 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
- Wasser NRW (2002): Anwendung des Flutungsverfahrens zur integralen Sanierung von Abwasserkanälen. http://wasser.nrw.de/fileadmin/Mediendatenbank/Dokumente/Forschung_Entwicklung/Entsorgung/Projekt212.pdf
- Wasser_NRW (2007): Naturnahe Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung. http://wasser.nrw.de/Naturnahe_Verfahren_zur_Trinkwasseraufbe.714.0.html
- wasserwissen (2007): Elektrolytische Desinfektion. Institut für Umweltverfahrenstechnik, Universität Bremen. <http://www.wasser-wissen.de/lexikon/e/elektrolytischedesinfektion.htm>, Stand 31.10.2007
- Weideler, A. (2007): Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen. Universität Stuttgart. http://www.iswa.uni-stuttgart.de/awt/forschung/forschung_phosphor.html, Stand 08.11.2007
- Weigert, B.D. (2007): Pilotox – Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativ-biologischen Behandlung von Klärwerksabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion. Kompetenzzentrum Wasser Berlin GmbH. http://www.kompetenz-wasser.de/fileadmin/user_upload/pdf/downloads/Band5_Schriftenreihe_KWB_web.pdf, Stand 07.11.2007
- ZDF-mediathek (2007): Meerwasserentsalzungsanlage in Spanien. Beitrag der Sendung Abenteuer Wissen vom 30.08.2007, <http://www.zdf.de/ZDFmediathek/content/222172?inPopup=true>, Stand 11.12.2007

5 Bodenschutz

5.1 Charakterisierung des Handlungsfeldes

Boden ist eines der kostbarsten Güter der Menschheit.
(Europäische Bodencharta 1972)

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 auch einen Produktionsfaktor für Nahrungsmittel und nachwachsende Rohstoffe dar. Er ist daneben ein Archiv der Natur- und Kulturgeschichte. Wegen seiner vielfältigen lebenswichtigen Funktionen und vor allem wegen seiner Unvermehrbarkeit muss der Boden genau wie Luft und Wasser mit höchster Priorität geschützt werden. Dies ist nicht zuletzt auch ein volkswirtschaftliches Anliegen, aber vor allem ein bedeutendes umweltpolitisches Ziel.

Der Boden als elementares Element unserer Existenz wird in seinen wesentlichen Funktionen (§2 Abs. 2 BBodSchG) durch die Folgen aktueller und zurückliegender menschlicher Aktivitäten gefährdet und ist zum Teil bereits zerstört. Stoffeinträge in Böden, Untergrund und Grundwasser aus Ablagerungen und Altstandorten, aus luftverfrachteten Schadstoffen und anderen Quellen stehen längst nicht mehr im Gleichgewicht mit den Filter-, Puffer-, und Regelungsfunktionen des Umweltmediums.

In Betrieb befindliche Anlagen trugen und tragen weiterhin, wenn auch in viel geringerem Maße, 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 oder werden versiegelt und überbaut und 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 (WGBU 1994 in: Oldemann 1997)

Aus den aufgezeigten Gefährdungen für essentielle Bodenfunktionen ergeben sich die Problembereiche des Handlungsfelds „Bodenschutz“, die global betrachtet kein marginales Umweltproblem mehr sind, sondern eine Tragweite erreicht haben, die ebenso bedrohlich ist wie der globale Klimawandel oder der fortschreitende Verlust der Biodiversität (WGBU 1994). Diese identifizierten Problemfelder sind zum einen der Ausgangspunkt der ab Abschnitt 5.3 folgenden Darstellung ausgewählter State-of-the-Art-Technologien aus dem Sektor Bodenschutz; sie geben andererseits auch die Struktur des Kapitels vor.

5.2 Meilensteine

Boden wurde lange Zeit nicht als eigenständiges Politikfeld wahrgenommen, er ist nach einer Verlautbarung des UBA aus dem Jahr 2005 eines der „Stiefkinder“ der Umweltpolitik (Bückmann 2005). Man ging lange Zeit davon aus, dass Gewässerschutz, Luftreinhaltung, und Naturschutz ausreichende Instrumente seien auch den Schutz des Bodens zu gewährleisten.

Die Folge war, dass der Schutz des Bodens nicht spezialrechtlich geregelt wurde, sondern erst einmal in andere Gesetze integriert war. Anzuführen sind beispielsweise das Abfallgesetz, das Immissionsschutzgesetz, das Baugesetzbuch, die Klärschlammverordnung, das Bundesberggesetz, das Naturschutzgesetz und nicht zuletzt das Chemikaliengesetz. Diese Vielzahl von Regelungen in anderen Rechtsbereichen hat sich bei der Schaffung einer „lex specialis Bodenschutz“ als sehr hinderlich erwiesen. So wurden erst Mitte der 80iger Jahre verschiedene konzeptionelle Ansätze und gesetzliche Regelungen zum Bodenschutz in Deutschland entwickelt. Rechtliche Rahmenbedingungen im Bereich des „Wassers“ gab es hingegen schon seit den 60iger Jahren (Wasserhaushaltsgesetz (WHG) 1957). In der folgenden Enumeration ist die Entwicklung des deutschen Bodenschutzrechts (weiss markiert) Aktivitäten innerhalb der internationalen Bodenschutzpolitik (graue Markierung) gegenübergestellt. Auf internationaler Ebene gab es seit Anfang der 60iger Jahre politische Bemühungen, doch sind die Deklarationen und Abkommen in überwiegender Zahl nicht völkerrechtlich bindend.

In Deutschland wurde das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundesbodenschutzgesetz, BBodSchG) am 17. März 1998 verabschiedet. Dieses Gesetz gilt als *Meilenstein* in der Umweltpolitik, da nun auch endlich, wenn auch mit großer Verspätung, der Boden neben den Medien Wasser und Luft in einem eigenständigen Gesetz geschützt wurde. Auch der Erlass der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung 1999 bedeutete für den Bodenschutz einen großen Sprung nach vorne.

1960: Gründung der International Soil Conservation Organisation (ISOC)
1966: Gründung des Weltdaten(referenz)zentrums für Böden des International Soil Reference and Information Centre (ISRIC-WDC)
1972: Verabschiedung der Europäischen Bodencharta als erstes politisches Instrument zum Bodenschutz
1977: UN-Konferenz über Desertifikation in Nairobi. Der verabschiedete Aktionsplan scheiterte an finanziellen und konzeptionellen Mängeln
1980: Gründung der European Society for Soil Conservation (ESSC)
1981: Verabschiedung der Weltbodencharta unter der Schirmherrschaft der FAO (Food and Agriculture Organisation der UN)
1982: Der Bodenschutz wird in der „World Charter for Nature“ aufgegriffen
1985: Veröffentlichung der Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung
1988: Internationale Konferenz „Bodenschutzpolitiken in der europäischen Union, veranstaltet von der EU-Kommission, des Bundesumweltministeriums (BMU) und des Umweltbundesamtes (UBA): Verfassung des „Bonner Memorandum“ zum Bodenschutz in Europa
1990: Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) zur Altlastenproblematik. Empfehlung zur Einrichtung eines Wissenschaftlichen Beirates Bodenschutz (WBB)
1992: Die Agenda 21, das Handlungsprogramm der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in

Rio de Janeiro, greift das Problem der Bodendegradation und -zerstörung in mehreren Kapiteln auf 1992: Empfehlung R(92)8 des Europarates als Aufforderung an die Regierungen zur Einhaltung einer Reihe von Prinzipien zum Schutz der Böden
1994: Jahresgutachten 1994 des Wissenschaftlichen Beirates Globale Umweltveränderung (WBGU). Welt im Wandel – Gefährdung der Böden 1994: WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung) empfiehlt die Schaffung einer globalen Bodenkonvention 1994: Konvention zur Bekämpfung der Desertifikation („Wüstenkonvention“)
1996: Verabschiedung des Aktionsprogramms für den Umgang mit Wäldern durch das Zwischenstaatliche Wälderforum der UN (IPF). Böden und Bodenschutz werden im Zusammenhang mit Planwirtschaft und empfindlichen Ökosystemen behandelt 1996: die „UN-Konvention zur Bekämpfung der Wüstenbildung“ (UNCCD), Schutz der Böden in Trockengebieten tritt in Kraft
1997: Die Evangelische Akademie Tutzing reagiert auf die Empfehlung des WBGU zur Erstellung einer globalen Bodenkonvention und führte eine Konferenz mit Beteiligung international führender Umweltwissenschaftler durch. 1998 wurde ein erster mehrsprachiger Entwurf vorgelegt
1998: Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) zum Grundwasserschutz 1998: Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“. Umfangreiche Auseinandersetzung mit speziellen Themenbereichen des Bodenschutzes wie Bodenversauerung und Flächeninanspruchnahme 17. März 1998: Verabschiedung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) durch den Deutschen Bundestag
12. Juli 1999: Erlass der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) durch die Bundesregierung 1999: Erste Sitzung des europäischen Bodenforums: Forderung nach global ausgerichteten Strategien und der Erstellung eines internationalen Basiskatalogs von Indikatoren
19.06.2002: Verabschiedung des Bodenschutzberichtes der Bundesregierung für die 14. Legislaturperiode durch das Bundeskabinett (Bundesregierung 2002) 2002: Gründung des Vereins „European Land and Soil Alliance“ (ELSA) zur Umsetzung des im Jahr 2000 verabschiedeten Manifest des Boden-Bündnisses europäischer Städte und Gemeinden 2002: IUSS-WG on International Actions for Sustainable Use of Soil – A Worlds Soils Agenda
2004: Berufung der Kommission „Bodenschutz“ 2004: EU-Initiative Thematic Strategy for Soil Protection
2005: DFG-Gedenkschrift: Perspektiven der agrarwissenschaftlichen Forschung
September 2006: EU-Bodenstrategie der Europäischen Kommission
Mai 2007: Einführung des Umweltschadengesetzes (USchadG)

Der Schutz des Bodens ist ein fach- und ressortübergreifendes Thema und so haben das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das BMU, das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) und andere Ministerien das Thema „Boden“ als diverse **Förderschwerpunkte** in ihre Förderprogramme aufgenommen. Eine Liste der Akteure und ihre Förderprogramme/-schwerpunkte sind in der unten aufgeführten Tabelle aufgezeigt.

Tabelle: 4: Forschungspolitik – Akteure und ihre Förderschwerpunkte und –programme

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung	
	Globaler Wandel
	Wirtschaftsbezogene Nachhaltigkeit, integrierte Umwelttechnik
	Geowissenschaften
	KMU-innovativ: Biotechnologie – BioChance (Förderrichtlinie 2007)
	KMU-innovativ: Nanotechnologie - NanoChance (Förderrichtlinie 2007)
	FONA: Forschung für Nachhaltigkeit
	Kompetenznetze in der Agrar- und Ernährungsforschung im Rahmenprogramm „Biotechnologie – Chancen nutzen und gestalten“
+DFG	Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN (Förderrichtlinie über die Nutzung des Untergrundes zur CO ₂ -Speicherung für globale Klimaschutzziele)
BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz	
	Landwirtschaft: Hauptziel 2: „Nachhaltige Land-, Gartenbau-, Forst-, Fischerei- und Ernährungswirtschaft Hauptziel 3: „Perspektiven für ländliche Räume“ Hauptziel 4: Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel“
	Programm zur Innovationsförderung
	F+E-Vorhaben sowie Maßnahmen zum Technologie- und Wissenstransfer im ökologischen Landbau
	FER-BMELV: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Agrarbereich für Umweltschutz
BMW i – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	
	PRO INNO II: Förderung der Erhöhung der Innovationskompetenz mittelständischer Unternehmen
BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
	Greentech-Umwelttechnologieatlas für Deutschland
	Beitrag der Abfallwirtschaft und des Bodenschutzes zum Klimaschutz (national und international)
	Verstärkte Biomassenutzung/CO ₂ -Effizienz; Flächeneffizienz.
	Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte 2007
UBA- Umweltbundesamt	
	Umweltinnovationsprogramm – Demonstrationsvorhaben zur Verminderung von Umweltbelastungen

5.3 Reife Technologien und technologische Entwicklungen

5.3.1 Problemfeld „Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Versiegelung“

Die Funktionsfähigkeit der Böden ist eine unmittelbare Voraussetzung für die Sicherung der menschlichen Existenz. Gleichzeitig werden an den Boden vielfältige und konkurrierende Nutzungsansprüche gestellt. Insbesondere die Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr stellte eine große Belastung der Böden dar. Nach neuesten Daten des Statistischen Bundesamts liegt die tägliche Flächeninanspruchnahme in Deutschland derzeit bei etwa 105 ha/Tag (StaBa 2007). Im Vergleich zu den Werten in den Vorjahren, die bei ca. 130 ha/Tag lagen, konnte damit ein leichter Rückgang verzeichnet werden. Allerdings lässt sich dies wohl weniger auf einen prinzipiell veränderten Umgang mit der Ressource „Fläche“ sowie auf die Wirkung entsprechender Programme und Maßnahmen zurückführen, als vielmehr auf den Einbruch der Konjunktur, die sich in einem deutlichen Rückgang der Bauinvestitionen ab 2001 widerspiegeln. Bei einem wirtschaftlichen Aufschwung ist eher wieder mit einem entsprechenden Anstieg der Flächeninanspruchnahme zu rechnen. Von einer Trendwende kann deshalb bisher nicht gesprochen werden.

Die Expansion der Siedlungs- und Verkehrsfläche erfolgt in erster Linie auf Kosten der Landwirtschaft. Dies bedeutet einen Verlust an fruchtbaren Kulturböden und bewirkt tief greifende Störungen der ökologischen Bodenfunktionen, die wiederum Rückwirkungen auf den gesamten Naturhaushalt haben. Beeinträchtigt werden die Filter- und Pufferkapazität des Bodens, der Wasserhaushalt, der Austausch der Erdoberfläche mit der Atmosphäre sowie die Lebensräume für Flora und Fauna. Von der insgesamt für Siedlungs- und Verkehrszwecke in Anspruch genommene Fläche ist im Durchschnitt knapp die Hälfte versiegelt. Die Versiegelung verringert die natürliche Verdunstung und verhindert die Versickerung von Regenwasser, was zu einem schnellen Abfluss des Regenwassers in die Kanalisation führt. Die Folgen davon sind verstärkte Hochwasserereignisse, eine Verringerung der Grundwasserneubildung und eine Verschlechterung des lokalen Klimas. Mit der räumlichen Ausdehnung der Siedlungs- und Verkehrsfläche geht eine Abnahme der Siedlungsdichte einher, d.h. die Flächeninanspruchnahme je Einwohner steigt. Dies führt zu einem Anwachsen der Verkehrsströme und hat für den Einzelnen zur Konsequenz, dass er immer weitere Wege in Kauf nehmen muss, um sich in der freien Natur zu erholen. Berücksichtigt man, dass der Wirkungsraum des Verkehrs weit über die direkt beanspruchten Flächen hinausgeht, etwa durch Zerschneidung und Verinselung ehemals zusammenhängender Freiräume, Verlärmung und Schadstoffbelastungen, so wird deutlich, dass die Flächenstatistik das wahre Ausmaß der Inanspruchnahme nur unzureichend wiedergibt.

In Deutschland hat das Thema Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke insbesondere durch die Nationale Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung an Bedeutung gewonnen. Die darin enthaltene Zielsetzung, die tägliche Neuinanspruchnahme von Fläche für Siedlungs- und Verkehrszwecke in Deutschland bis 2020 auf max. 30 ha/Tag zu reduzieren, hat zahllose z.T. auch kontroverse Diskussionen ausgelöst (dazu siehe ausführlich Jörrissen/Coenen 2007, 52ff). Neben der Fixierung eines Zielwertes werden vor allem Maßnahmen und Instrumente zur quantitativen Reduzierung sowie zur qualitativen Steuerung des Flächenverbrauches diskutiert. Flächenmanagement als ausgeprägte Querschnittsauf-

gabe erfordert einen effektiven, auf die regionalen Bedingungen zugeschnittenen „Policy-Mix“ aus ordnungsrechtlichen, planerischen und ökonomischen Instrumenten, der die Akteure der verschiedenen administrativen Ebenen (Bund, Länder, Regionen, Kommunen) sowie der unterschiedlichen politischen Sektoren (u.a. Raumordnung, Naturschutz, Wirtschaft und Verkehr) einbindet (EU-Bodenschutzstrategie 2004).

Um das Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsfläche einzudämmen, kommen unterschiedliche strategische Ansätze in Betracht:

- Vorrang der Innenentwicklung vor der Außenentwicklung,
- Mobilisierung vorhandener Baulandreserven (Schließung von Baulücken,
- Ausschöpfung vorhandener Nutzungspotenziale im Bestand (Nachverdichtung: Ausbau von Dachgeschossen, Aufstockung von Gebäuden, Überbauung von Verkehrsflächen);
- Erhöhung der Flächenproduktivität (flächensparende Bauweisen, höhere Bebauungsdichte, mehrgeschossige Gewerbebauten)
- Wiedernutzung von Brachflächen und verwertbaren Konversionsflächen (Flächenrecycling),
- Berücksichtigung von Bodenqualitäten bei der Standortwahl,
- Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen (Begrenzung der Neuversiegelung und Nutzung der Entsiegelungspotentiale im Bestand, Sanierung von Altlasten),
- Revitalisierung der Kernstädte/Qualitative Aufwertung der bestehende Bausubstanz und Anpassung an sich wandelnde Nutzerbedürfnisse.
- Schaffung verkehrsarmer Raumstrukturen (Bündelung von Verkehrswegen, Nutzungsmischung, „dezentrale Konzentration“)
- Verbesserung der Zusammenarbeit der für Bodenschutz, Bauleitplanung, Landschaftsplanung und Raumordnung zuständigen Behörden auf der Ebene von Bund, Ländern und Kommunen

Potentiale zur Reduzierung des Flächenverbrauchs bietet sich desgleichen durch die **Nutzung des Untergrunds in Städten** als Verkehrs- und Wirtschaftsraum. Beispiele sind untertägige Kaufhäuser in Japan oder die Verlagerung des Stuttgarter Bahnhofs in den Untergrund. Durch die Tieferlegung werden im Zentrum von Stuttgart 110ha an Gleisanlagen für Folgenutzungen frei (Stribrny 2002). Hierzu sind detaillierte Kenntnisse sowie die Erfassung des geologischen Untergrundes mit zerstörungsfreien und kostengünstigen Methoden (Ground Penetrating Radar, Ambient Vibration) eine elementare Voraussetzung. Dreidimensionale Bilder etc. werden zu einer effektiveren Nutzung und damit sparsameren Umgang mit der Fläche beitragen. Derartige Methoden wie bspw. „Geotechnologien für die Welt von morgen“ untersucht zurzeit z.B. das Gemeinschaftsprojekt „HADU“ der Universitäten Hamburg und Potsdam¹⁴ exemplarisch für die Stadt Hamburg untersucht (Geotechnologien 2007). Doch nicht nur der Untergrund lässt sich zur Reduktion des Flächenverbrauchs nutzen, die „Erschließung des Himmels“ durch die Vision einer „**Vertikalen Stadt**“ bietet zusätzliches Bauland. Diese Idee ist nicht neu; bereits aus dem Jahr 1906 stammt der Plan des Architekten Theodore Starrett ein „100 Stockwerke hohes Gebäude zu bauen, das alle 20 Etagen von einer öffentlichen Zone unterbrochen werden soll“ (Maak 2001). All das, was sich in einer normalen horizontalen Stadt über eine große Fläche von mehreren Kilometern erstreckt,

¹⁴ Weitere Informationen unter <http://www.geotechnologien.de/forschung/forsch2.11k.html>

ist in einem einzigen Gebäude untergebracht. Einer Ausuferung der Städte in die Horizontale könnte so entgegengewirkt und damit die Flächeninanspruchnahme reduziert werden.

Eine Reduktion der Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrszwecke bedarf in erster Linie des Einsatzes effizienter politischer, planerischer und ökonomischer Instrumente. Umwelttechnologien kommen lediglich in Beziehung mit Flächenrecycling und Entsiegelung ins Spiel. Beim Flächenrecycling finden die im Problemfeld „Altlasten“ angesprochenen Technologien (s. Abschnitt 5.3.3) 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 einer *Entsiegelung* von Flächen geht es vor allem um den Einsatz von „Materialien“, zum Beispiel um **durchlässige Oberflächenbefestigungen wie Schotterrasen, Fugenpflaster, Rasengittersteine, Rasenfugensteine, Porensteine und Kies- bzw. Splittdecken oder Aquasick**. Darüber hinaus können durch **Holz- und Natursteinpflaster** durch entsprechende Verlegung, weitgehend durchlässige Oberflächebefestigungen erstellt werden. Alternative zu den herkömmlichen Befestigungen bietet z.B. die **ACO-Rasenwabe**¹⁵. Die Rasenwabe besteht aus einer Kunststoffzellwand, die mit Substrat (oder Splitt) gefüllt wird. Im Vergleich mit einem Beton-Gitterstein ist mit der Rasenwabe etwa 30% mehr Begrünungsfläche erzielbar.

Die Folge der Versiegelung ist, wie bereits angesprochen, neben einer Verringerung der Grundwasserneubildung und einer Verschlechterung des lokalen Klimas, das verstärkte Auftreten von Hochwassern. Das eigentliche Problem ist jedoch nicht die Versiegelung der Fläche an sich, sondern das vollständige und schnelle Ableiten des Regenwassers durch Kanalisation und Gräben in die Gewässer. An dieser Stelle ist ein Paradigmenwechsel erforderlich. Es gibt jetzt eine allgemein anwendbare Alternative zur konventionellen Regenwasserableitung, die als „Stand der Technik“ nach §7a WHG gelten kann: Das „System der **Dezentralen Regenwasser-Bewirtschaftung**“ (DRB-System). Für die Versickerung von Regenwasser, welches von versiegelten Flächen (z.B. Parkplätze) abfließt, gibt es mannigfache Funktionskombinationen. Je nach den verfügbaren Flächen, der Durchlässigkeit des Untergrundes und den Grundwasserverhältnissen ist die jeweilige optimale Versickerungsmethode auszuwählen. Voraussetzung für eine gezielte Versickerung von Regenwasser sind sandige kiesige Böden. Zur Auswahl stehen **Flächenversickerung** (z.B. Grasflächen, Pflanzstreifen, Rasengitterflächen, Versickerung+Verdunstung), **Muldenversickerung** (flache, begrünte Bodenvertiefungen, Versickerung+oberirdischer Rückhalt), **Schachtversickerung** (Schacht aus Brunnenringen, die mit einer Sandschicht als Filterzone versehen werden), die **Mulden-Rigolen-Systeme** (Versickerung +ober- und unterirdischer Rückhalt+gedrosselte Ableitung) und die **Rohrversickerung** (unterirdisch verlegte und perforierte Rohrstränge). Die Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH hat eine Alternative zu dieser konventionellen Ableitungspraxis geschaffen, das **Tiefbeet-Rigolensystem INNO-DRAIN®**. Der Straßenabfluss wird einer begrünten Versickerungsfläche, Mulde oder Tiefbeet genannt (Tiefbeet = „Grüner Gully“), zugeführt. Das Wasser versickert durch die Oberbodenschicht in eine darunter liegende Rigole und wird durch die Bodenpassage weitgehend gereinigt. Die aus hochporigem

¹⁵ Weitere Informationen unter www.aco-hochbau.de

Material wie grobem Kies, Lavagranulat oder Kunststoff-Gitterwerk bestehende Rigole hat die Aufgabe, das Wasser unterirdisch zu speichern und weitestgehend in den anstehenden Boden zu versickern. Die nicht versickerbaren Anteile werden als Restabflüsse über ein Dränrohrnetz abgeleitet. Durch den Einsatz von Reglern ist die Anwendung des Systems von den vorliegenden Bodenverhältnissen unabhängig. Der Flächenbedarf für das Tiefbeet beträgt nur 3-5% der angeschlossenen abflusswirksamen Flächen (DBU 2008a).

Zusammenfassende Darstellung der **Technologien** im Problemfeld „Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Versiegelung“:

Lösungsansatz		Märkte
Flächenrecycling	– Technologien aus dem Problemfeld Altlasten (Abschnitt 5.3.3)	Industrie- und Schwellenländer
	– Technologien und Verfahren aus der Rekultivierung	Industrie- und Schwellenländer
Entsiegelung	– Durchlässige Oberflächenbefestigungen: z.B. Fugenpflaster, Schotterrasen, Rasengittersteine, Holz- und Natursteinpflaster, ACO-Rasenwabe	weltweit
	– Regenwasserversickerung: z.B. Flächen- Mulden-, Schacht- und Rohrversickerung, Tiefbeet-Rigolensystem	weltweit

5.3.2 Problemfeld „Eintrag von Schad- und Nährstoffen“

Aufgrund der Vielzahl von Quellen, der Eintragspfade und den Auswirkungen auf Böden, Pflanzen, Bodenorganismen und vor allem das Grundwasser stellen Stoffeinträge ein komplexes Umweltproblem dar. Zahlreiche Stoffe und Stoffgruppen sind dabei von Bedeutung, die über unterschiedliche Eintragspfade punktuell oder diffus auf dem Boden deponiert oder in ihn eingebracht werden. Diese können als Einmalapplikation in periodischen Abständen (Pflanzenschutzmittelanwendung) bzw. als kontinuierliche Belastung (luftgetragene Schadstoffe) in den Boden gelangen. Stoffe, die als Nährstoffe aufgebracht werden, können ab einer bestimmten Konzentration als Schadstoff wirken oder Schadstoffe mit enthalten.

Quellen für Stoffeinträge umfassen beispielsweise Wirtschaftsdünger, Mineraldünger, Pestizide, Klärschlamm und Kompost (Einträge aus der landwirtschaftlichen Nutzung) sowie industrie- und verkehrsbedingte Immissionen (Einträge in Folge nasser und trockener Deposition, Niederschlag und Staubeintrag von Säuren, Nährstoffen, Schwermetallen, Radionukliden und/oder organischen Schadstoffen) und Altlasten (Einträge aus lokalen Kontaminationsquellen). Auf die Altlastenproblematik wird an späterer Stelle in diesem Kapitel (Abschnitt 5.3.3) detailliert eingegangen.

Erfassung und Bewertung des stofflichen Bodenzustandes

Zur Erfassung und Bewertung des stofflichen Ist-Zustandes und der langfristigen Entwicklung von Stoffinventaren und -konzentrationen gibt es in Deutschland ein Dauermonitoringnetz, mit dessen Hilfe auch die Größenordnung des Eintrags überwacht wird (in Deutschland: Bodendauerbeobachtungsprogramm der Bundesländer und die Bodenzustandserhebung im Wald). Zur Erkundung und Erfassung der raumkonkreten Stoffbelastungen (Kartie-

rung) kommen verschiedenste Technologien zur Anwendung, z.B.: Methoden der aktiven und passiven **Fernerkundung** („ground-truth“-Messungen, Luftbilder, so genannte Profiler, Radiometer, SODAR z.B. vom Deutschen Wetterdienst www.dwr.de), **Geräte bzw. Sonden zur Messung von meteorologischen** (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Luftfeuchtigkeit), **chemischen** (Schwermetalle, organische Schadstoffe, pH-Wert usw.), **physikalischen und biologischen Parametern (z.B. pH-Meter, Saugkerzen, TDR-Sonden, Lysimeter), Geoelektrik und Geomagnetik**. Die standortgebundenen Messstellen werden zum Teil solarbetrieben und die Daten über Modem abgerufen. Zur direkten und umfassenden Beurteilung des Umweltgefährdungspotentials von Proben steht seit Neuestem auch ein so genannter **Algentest** als kostengünstiges, automatisiertes Testsystem zur Verfügung (DBU 2008b).

Zur **mobilen Erfassung** von Flächen und Bodenprobenpositionen bieten sich **Hardware/Softwareprodukte** wie das GISPAD der Firma conterra an. Innovativ zur Entnahme von Bodenproben sind im Gegensatz zu den **Standard-Bohr- und -Entnahmeverfahren mobile Bodenprobemaschinen**. Alle aufgenommenen Daten werden in **Atmosphärische Umweltsimulationen** und/oder **Stofftransportmodelle** (z.B. Sickerwasserprognose) eingespeist. Diese Modelle und Anwendungssysteme dienen zur Berechnung der Ausbreitung von Luftbeimengungen und ihrer Ablagerung am Boden und zur Vorhersage des Transportverhaltens von Schad- und Nährstoffen bei der Passage durch die ungesättigte Bodenzone.

Reduktion bzw. Vermeidung von Immissionen

Zum Schutz vor Überdüngung auf landwirtschaftlichen Flächen werden **Bedarfskalkulationen** für Mineral- und organische Dünger durchgeführt. Neben der Bemessung der Stickstoffgaben, der **Wahl der geeigneten Zeitpunkte** und der Düngerform, wird die Auswaschungsrate von Stickstoff durch entsprechende **Anbauverfahren** (z.B. Pflanzenwahl, Zwischenfruchtanbau, hoher Bedeckungsgrad, Abfahren von Ernterückständen) bestimmt (Lowis 1998). Fruchtfolgen können so gestaltet werden, dass sie zur verminderten Applikation von Dünge- und Pflanzenmitteln beitragen. Dies geschieht zum einen durch die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit durch den Wechsel von Halm- und Blattfrüchten, Winterungen und Sommerungen, Humuszehrerern und Humusmehrern und Anbau von Früchten mit unterschiedlichen Wachstumszeiten, Wurzelsystemen und Nährstoffansprüchen und zum anderen durch den **Anbau von Pflanzen mit geringen Krankheitsanfälligkeiten**.

Mit neuen **Sensoren, Bordcomputern, elektronisch steuerbaren Bearbeitungsgeräten**, genormten Technikschnittstellen sowie privat und öffentlich verfügbaren Datenbanken zu den Ackerschlägen in Deutschland werden die Voraussetzungen für eine umfassende informationsgeleitete Produktion geschaffen. Eine elementare technische Komponente dafür ist neuerdings „precision farming“. „**Precision farming**“ ist ein Sammelbegriff für neue Produktions- und Managementtechniken im Pflanzenbau, die sich intensiv flächenrepräsentativer und nutzungsbezogener Daten über den jeweiligen Standort und Pflanzenbestand bedienen.

Alternative Bezeichnungen sind im deutschen und internationalen Umfeld mit Teilschlagbewirtschaftung, Computer-Aided Farming (CAF) und lokalem Ressourcenmanagement zu finden. Mit den verfügbaren Techniken zu „precision farming“ wird es erreichbar, Konzepte zur Anpassung der Landbewirtschaftungsmaßnahmen an die Variabilität der Standort- und Bestandsparameter zu entwickeln, also eine teilflächenspezifische, standortangepasste Bewirtschaftung durchzuführen. Den Einsatz von „Precision Farming“ als zentrale inhaltliche

und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung untersucht bspw. das Forschungsverbundprojekt „Pre agro“ bzw. „Pre agro II“ (ZALF 2007).

Die Firma B. Strautmann & Söhne hat in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Osnabrück und zwei weiteren Unternehmen einen **elektronisch gesteuerten Universaldüngerstreuer** entwickelt. Mithilfe modernster Satelliteninformationen des Global Positioning Systems (GPS) und dem Einsatz von Elektronik werden die Bodennährstoffgehalte des Ackers dabei ebenso berücksichtigt wie die Geschwindigkeit des Düngerstreuers. Jede einzelne Ackerfläche erhält damit exakt die Menge an Dünger (Nährstoffen), die für optimales Pflanzenwachstum (maximale Erträge) benötigt wird. Der satellitengesteuerte Düngerstreuer schließt eine Lücke und bezieht die Düngung in das „precision farming“ mit ein (DBU 2008c).

Bestimmend bei dieser angepassten Bewirtschaftung ist, für die Reduzierung und Vermeidung von Stoffeinträgen aus der Landwirtschaft in andere Umweltkompartimente (besonders wichtig im Hinblick auf den Einsatz von Grund- und Oberflächengewässer als Trinkwasserservois), ein **standortspezifischer Applikationsaufwand von Düngern und Pflanzenschutzmitteln**. Folglich wird eine nachhaltige, integrative und umweltschonende Landwirtschaft möglich. Darüber hinaus sind, um die Fracht von Schadstoffen aufgrund der harten Auswirkungen auf das Umweltkompartiment Wasser wie Eutrophierung zu reduzieren, der **Aufbau von „Rückhaltezone“** in Form von Uferstreifen oder biologischen Reinigungsbecken zu entwickeln, anzupassen oder zu optimieren.

Eine neue Möglichkeit den Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln und Herbiziden zur Unkrautbekämpfung zu reduzieren bzw. komplett darauf zu verzichten und damit die Emissionen zu kontrollieren, könnte eine von der Fachhochschule Osnabrück entwickelte **sensorgesteuerte Querhacke** werden. Bisher war es nicht möglich Nutzpflanzen und Unkräuter sensorisch „online“ zu unterscheiden. Realisiert wurde die Technologie mit Hilfe einer speziellen Sensorik (Multisensorsystem) und Mechanik (Zykloidenhacke). Sowohl die sensorischen als auch die mechanischen Systeme und deren Kombination sind weltweit innovativ. Zur Entwicklung eines marktfähigen Gerätes bedarf es aber weiterer produktnaher Erprobungsarbeiten (DBU 2008d).

Durch die zunehmende Biomasseproduktion rechnen die Forscher auch mit einem wieder ansteigenden Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und damit mit einer steigenden Pestizidbelastung: „Der verstärkte Anbau von Energiepflanzen wird die Gewässer negativ beeinflussen“ (UFZ 2007a). Um dem Entstehen ökologischer Probleme vorzubeugen, sind bereits im Vorfeld Maßnahmen zu ergreifen, um die Problemstellung bzw. -verschärfung zu verhindern (z.B. precision farming, Verbot des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln).

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht zu flächenrepräsentativen Bodenzustandsbewertungen und Schadstofftransferbeziehungen. Zusätzlich sind existierende Methoden zur Erfassung von Frachten sowie die Verteilung der Schadstoffe zu analysieren, um die Wirkung von angepassten Kontrollmaßnahmen charakterisieren zu können (Projekt AQUISAFE). Zusätzlich sind Technologien aus den Bereichen „Luftreinhaltung“, „Abfallwirtschaft“ und „Altlastensanierung“ (Bundesregierung 2002) derart weiterzuentwickeln, dass die Immissionen noch weiter und damit die Beeinflussung der Umweltkompartimente Boden und Wasser reduziert werden kann.

Zusammenfassende Darstellung der **Technologien** im Problemfeld „Eintrag von Schad- und Nährstoffen“:

Lösungsansatz		Märkte
Erfassung und Erkundung	Fernerkundung (Luftbilder, „ground-truth“-Messungen)	Europa, Schwellenländer
	Geräte und Sonden zur Messung von meteorologischen, chemischen, physikalischen und biologischen Parametern	weltweit
	solarbetriebene Messstellen	weltweit
	Mobile Bodenprobemaschinen	weltweit (standortabhängig – Relief etc.)
	Geoelektrik, Geomagnetik	weltweit
Vermeidung von Immissionen	– Technologien aus dem Handlungsfeld „Luftreinhaltung“ (s. Kapitel 3)	siehe Handlungsfeld
	– Technologien aus dem Handlungsfeld „Abfallwirtschaft“ (s. Kapitel 7)	siehe Handlungsfeld
	– Technologien aus dem Problemfeld „Altlasten“ (s. Abschnitt 5.3.3)	siehe Handlungsfeld
	„precision farming“ (standortangepasste Düngemittelapplikation)	Industrie- und Schwellenländer
	„mobile farming“	Industrie- und Schwellenländer
	Elektronisch gesteuerter Universaldüngerstreuer	Industrie- und Schwellenländer
	Sensorgesteuerte Querhacke	Industrie- und Schwellenländer
	Nachhaltige Landwirtschaft (konservierende Bodenbewirtschaftung – Wahl des Düngzeitpunkts, Anbauverfahren - z.B. Pflanzenwahl, Zwischenfruchtanbau, hoher Bedeckungsgrad, Abfahren von Ernterückständen)	weltweit

5.3.3 Problemfeld „Altlasten“

„Alte“ Lasten“ - Problem für „neue“ Generationen?

Wie brennend das Thema Altlasten ist, ergibt sich allein aus der Vielzahl der kontaminierten Flächen – diese wird auf 750.000 größere Standorte in Europa geschätzt. In Deutschland sind es alleine über 360.000 altlastverdächtige Flächen (hypersoil 2007). Nur wenige Länder haben bisher mehr als zwei Drittel des vermuteten Gesamtumfangs an Verdachtsflächen lokalisiert.

Die Hauptquellen für Altlasten sind:

- unsachgemäße oder nicht genehmigte Entsorgung
- unvorschriftsmäßiger Umgang mit gefährlichen Substanzen (d.h. Handhabungsverluste, unsachgemäße Lagerung)
- Stilllegung von Industrie-, Militär- und Bergbaustandorten
- Unfälle

Die systematische Altlastenbearbeitung ist in der Regel ein mehrstufiger Prozess, der sich in die aufeinander aufbauenden Arbeitsschritte Erfassung, Gefährdungsabschätzung, Sanierungsuntersuchung, Sanierung und Nachsorge gliedert.

Erfassung und Gefährdungsabschätzung

Bevor kontaminierte Standorte gesichert oder saniert werden können, ist es notwendig zu wissen, wo die Schadstoffquellen sind, welches Schadstoffinventar vorliegt und wie die räumliche Schadstoffverteilung in den einzelnen Umweltkompartimenten ist - sprich, den Untergrund genau zu kennen. In diesem Bereich können verschiedenste Erkundungs-, Probenahme- und Analysetechnologien zum Einsatz kommen. Konventionelle Erkundungsmethoden sind bei der Entnahme von

- *Bodenproben* zur Eingrenzung des Schadstoffinventars z.B. Pürckhauer, Schlaghämmer, Rammkernsonden, Sondiertrauben, Bagger (für Baggerschürfe),
- *Bodenluftproben* zur Ermittlung von leichtflüchtigen Schadstoffen z.B. Bodenluftsonden oder Gaswarner, mit einphasigen oder zweiphasigen Verfahren (die Luft wird je nach Vorgehensweise auf Aktivkohle adsorbiert oder in Gasmaus oder Airbag gespeichert) und bei der Entnahme von
- *Grundwasserproben* durch die Errichtung von permanenten Grundwasser(GW)-Messstellen z.B. verschiedenste Bohr- und Ausbaurverfahren mit Tauchpumpen, Schöpfapparaten, Watertrap und/oder Durchflusszellen.

Die Proben werden großteils im Schnelltestverfahren meist vor Ort mit **Geräten bzw. Sonden zur Messung von chemischen** (Temperatur, elektr. Leitfähigkeit, pH-Wert, ggf. Redox-Potential und Sauerstoffgehalt, mobile GC-MS-Geräte uvm.), **biologischen Parametern** (Biotestsysteme) **und zur Detektion von Schadstoffen** (z.B. TNT-Schnelltest) analysiert. Die Analytikstrategie orientiert sich an der Historie des Verdachtsstandortes und am branchentypischen Schadstoffspektrum.

Die konventionellen Verfahren zur Erkundung und Bewertung von Altlastverdachtsstandorten sind zum Teil sehr aufwändig und teuer. Deswegen geht der Trend zu einer **Kombination** von so genannten **Direct-Push(DP)-Technologien** mit **geophysikalischen Erkundungsmethoden** und **chemischer Analytik**. Kennzeichen von Direct-Push-Verfahren ist die direkte Messung von geologischen und umweltchemischen Parametern während des kleinräumigen Vortriebs eines Sondiergestänges in den Untergrund. Durch diese geschickte Kombination kann der Untergrund wesentlich schneller, detaillierter und preiswerter als mit herkömmlicher Erkundungstechnik erkundet werden. Im Bereich der DP-Technologien gibt es eine Vielzahl von Methoden zur Probennahme wie beispielsweise das **Continuos Multi-**

channel Tubing (CMT), Gore Surveys (Gassammler), Keramik-Dosimeter, Multilevellost-Pump Systeme und das **Waterloo System**. Die Fa. GEOPROBE hat die so genannte **MIP-Sonde (Membrane Interface Probe)** zur Erkundung der Lage und Mächtigkeit von LHKW (leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoff)-Fahnen entwickelt. Das MIP-System besteht aus einer Sonde, an deren Mantel eine semipermeable Membran angebracht ist, welche nur für gasförmige, nicht aber für Flüssigkeiten durchlässig ist (Dymek 2002). Welches Verfahren eingesetzt wird, richtet sich nach den Standortbedingungen und dem lokalen bzw. punktuellen Schadstoffinventar.

In einem DBU-Verbundvorhaben „Hightech-Methoden zur Untergrundsondierung“ wurde ein **konventionelles Kleinrammbohrgerät mit sensorischen Elementen** ausgestattet. Durch eine drahtlose Datenübertragung können bereits bei Erkundungsarbeiten Schadstoffe wie flüchtige organische Substanzen (VOC), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) oder auch polzyklische Kohlenwasserstoffe (PAK) im Boden, in der Bodenluft oder im Grundwasser In-Situ bestimmt werden. Hierzu wurde die modular aufgebaute Sensorik miniaturisiert (DBU 2007). Mit der **elektronischen Drucksondierung** verfügt man endlich über ein System, das in der Lage ist, Kontaminationen des Bodens und des Grundwassers auch in größeren Tiefen zentimetergenau zu lokalisieren und deren Mächtigkeit zu ermitteln. Bei der schnellen und exakten Darstellung von Kontaminationsprofilen wird zur Erkundung von Treibstoff-, Mineralöl- oder Teerölkontaminationen (Verunreinigungen mit PAK), das **ROST™ (Rapid Optical Screening Tool)-LIF (laserinduzierte Fluoreszenz)-System** eingesetzt¹⁶. Ferner hat die Firma BLZ Geotechnik GmbH mittels innovativer Bohrtechnologie eine neue Probenahmetechnik entwickelt. Bei diesem Verfahren nimmt die Messung weniger Zeit in Anspruch und es kommt zu keiner Verunreinigung der Proben mehr. Die dafür entwickelte Bohranlage ist elektronisch gesteuert und aufgrund frei programmierbarer Einheiten dazu in der Lage, den Bohrprozess (**Hohlschneckenbohrverfahren**) jeweils auf die spezifischen Bodenverhältnisse abzustimmen (DBU 2008e).

Die im Bedarfsfall zu kombinierenden geophysikalischen Messungen beruhen auf **seismischen** (z.B. Geophone), **magnetischen** und **elektromagnetischen** (wie Metalldetektoren, Georadar) **Methoden** (UFZ 2007b). Empfohlen werden geomagnetische Verfahren (z.B. Protonen-Magnetometer, Förster-Sonde) zum Nachweis von Materialien mit starker Magnetisierung in Tiefen bis zu 3m oder der Einsatz von Bodenradar zum Orten von metallischen und nichtmetallischen Objekten in Tiefen bis ca. 3 m. Insbesondere können die Verfahren zum Lokalisieren von

- unterirdischen Tanks, vergrabenen Fässern und anderen Behältnissen,
- Hohlräumen,
- Wasser- und Abwasserleitungen und
- Munitionsvergrabungen

eingesetzt werden. Wesentliche Vorteile dieser Verfahren bestehen darin, dass sie berührungsfrei und zerstörungsfrei arbeiten und dass sie sich besonders bei der Untersuchung größerer Flächen oft kostengünstig (unerlässlicher Faktor für die Einsetzbarkeit in Schwellen- und Entwicklungsländern) einsetzen lassen. Als Nachteil ist zu nennen, dass die auf

¹⁶ detaillierte Informationen unter www.fugro.de

Altlastverdachtsstandorten oft vorhandenen Betonreste (mit umfangreicher Stahlbewehrung) gleiche Messsignale erzeugen. Eine Trennung bzw. Identifizierung von zwischen bzw. nahe diesen Resten liegenden Gegenständen ist oft erst durch Nachgraben realisierbar.

Zur zügigen Bestandsaufnahme, integrierenden Erfassung und Dokumentation aller altlastenrelevanten Daten hat die Volkswagen AG ein **Altlastenexpertensystem** (AES) auf Basis der Datenbank Microsoft ACCESS und dem Geografischen Informationssystem (GIS) ArcView der Fa. ESRI entwickelt. In diesem System fließen alle altlastenrelevanten Informationen des Standortes, die in der konventionellen Verfahrensweise in verschiedenen Gutachten und Berichten verteilt vorliegen, zusammen und können miteinander kombiniert, nach verschiedenen Kriterien geordnet und abgefragt werden.

Sanierung

Für die Altlastensanierung wurden in den zurückliegenden Jahren vielfältige Methoden und Verfahren entwickelt, die zu einem hohen technologischen Standard in diesem Bereich geführt haben. Zur Auswahl des geeigneten Sanierungsverfahrens sind Kriterien wie

- Erreichbarkeit der Sanierungsziele,
- Eignung für die vorliegenden Schadstoffe (bspw. Schwermetalle, MKW, BTEX, PAK, Phenole, PCB, LCKW, FCKW, Pestizide, Cyanide, Dioxine, Furane und/oder TNT),
- Eignung für den betreffenden Boden bzw. Untergrundverhältnisse und
- Einsatz am Standort möglich

heranzuziehen.

Da Schadstoffe sich in Böden ausbreiten und sich dabei auch ein Teil davon im Boden anreichert, geht von diesen ein hohes Gefährdungspotential aus, das oft schnelles Handeln erfordert. Lange Zeit blieb nur der Weg, die Kontaminationspfade mit **hydrologischen Maßnahmen oder Abdichtung** zu unterbrechen (→ **Sicherungsmaßnahmen**). Diese Techniken dienen lediglich zur Unterbrechung der Kontaminationswege und stellen damit nur eine Verlagerung des Problems in Raum und Zeit dar und sind im Sinne von „sustainability“ keine anzustrebende Lösung. Sie sollten nur als „Zwischenstufe/-lösung“ implementiert werden.

Im Vergleich zu den hoch entwickelten, erprobten Techniken zur Abluft- und Abwassertechnik sowie zur Abfallbehandlung steckte die Sanierung von kontaminierten Böden Anfang der 90iger noch in den Anfängen. Der Altlastensanierungsbedarf, durch das BBodSchG und die BBodSchV forciert, 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 (Bodenluftabsaugung, Deponieentgasung) und –aufbereitung, sowie thermische, chemisch-physikalische und biologische Reinigung** zur Verfügung (siehe Übersicht). Diese Verfahren wurden bereits umfänglich angewendet und sind nun seit Jahren in Deutschland marktgängig.

Sanierung	
<i>Sanierungsmaßnahmen:</i> Dekontaminationen	Mikrobiologische Verfahren: In-Situ: z.B. Pflügen, Verrieselung, Immobilisierung, In-Situ-Stripping, In-Situ-Flushing, hydraulische Sicherung Ex Situ: z.B. Landfarming, Wende-, Mieten-, Reaktorverfahren und Immobilisierung
	Thermische Verfahren: Drehrohrofen oder Wirbelschichtofen-Verfahren durch Pyrolyse, Verbrennung oder Dampfextraktion (Niederdruckverfahren)
	Wasch-/Extraktionsverfahren: Bodenwäsche durch den Eintrag von mechanischer Energie (z.B. Hochdruck-Wasserstrahl, Trommel, Attritionszellen, pulsierende Extraktorteller und -schnecken und den zusätzlichen Einsatz einer Waschflüssigkeit (Wasser ohne oder mit Additiven wie z.B. Tenside, Säuren, Laugen)
	Aktive pneumatische Verfahren: z.B. Bodenluftabsaugung, Deponieentgasung mit anschließender Bodenluftsanierung, die technische Umsetzung eines Bodenluftabsaugsystems ist relativ einfach und besteht aus Vakuumbrunnen, Wasserabscheider, Verdichter und Filtertechnik, die Filtertechnik auf Aktivkohlebasis ist infolge des regelmäßigen Aktivkohleaustausches und dessen Entsorgung kostenintensiv.
<i>Sicherungsmaßnahmen</i>	Oberflächenabdichtung: z.B. Kunststoffdichtungsbahnen, Geotextilien mit Flächendränage und Rekultivierungsschicht, bindigem Erdmaterial, Asphalt, Bentonit oder ähnlichen Materialien sowie aus Kombinationen
	Oberflächenabdeckung: Schicht aus z.B. Erdmaterial, Reststoffen oder Recyclingmaterialien, ggf. auch Folien
	Dichtwände: z.B. Schlitzwände im Einphasen und/oder Zweiphasenverfahren, Spundwände
	Passive hydraulische Verfahren: Reaktive Wände, Adsorptionswände als Funnel & Gate-System (mit Leitwänden und Fenstern) oder als volldurchströmte Wände
	Passive pneumatische Verfahren: Fassung von Gasphasen in Gasdränagen und Ableitung über Gasbrunnen
	Immobilisierung: physikalische (Verfestigung) und/oder chemische Immobilisierung (z.B. Fällung, Oxidation, Reduktion)
<i>Sonstige Maßnahmen</i>	z.B.: Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen

Mit der vorliegenden Vielfalt der zur Verfügung stehenden reifen Technologien bestehen gute Voraussetzungen, um in Bezug auf die jeweiligen Standortverhältnisse die Verfahrensauslegungen variabel zu gestalten und die bestmögliche Sanierungskonzeption zu identifizieren.

Das Portfolio der präsenten biologischen Verfahren ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Die Mikrobiologischen Verfahren avancierten schnell zu einer starken Konkurrenz für Bodenwäsche und thermische Bodenbehandlung, da sie zum einen kostengünstiger waren und zum anderen die behandelten Böden auch „einfacher“ wieder einsetzbar/einbaubar sind.

In den meisten Fällen handelt es sich bei Altlasten um den „Kontaminationspfad Boden-Grundwasser“, so dass es eine immense Anzahl von technologischen Lösungen zur Grundwasserreinigung (z.B. **vertikales/horizontales Spülverfahren, Grundwasserzirkulationsbrunnen, In-Situ-Strippen, Wellpoint-Verfahren, Oxidations-/Reduktions-, Membran-, Ozonverfahren, Pump&Treat, Reaktive Wände, Funnel & Gate System**) existieren. Weltweit, insbesondere in Nordamerika und Westeuropa, hat man den Reinigungswandtechnologien (auch Reaktive Wände, **Permeable Reactive Barriers (PRB)** oder Treatment Zones genannt) Zukunftschancen eingeräumt, da sie als passive In-Situ-Verfahren z.B. gegenüber den herkömmlichen aktiven Pump-and-Treat-Methoden deutliche Vorteile besitzen: Der Energieverbrauch ist extrem geringfügig, es erfolgt kein massiver Eingriff in das Grundwasserregime und die Sanierungsmaßnahme findet direkt im Untergrund im kontaminierten Grundwasserleiter statt, d.h. eine aufwändige Anlagentechnik ist a priori weder einzurichten, zu betreiben noch auf längere Zeit zu unterhalten oder vorzuhalten (Birke et al. 2000).

Seit einigen Jahren besteht im Altlastensektor ein gesteigertes Interesse, die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse im Untergrund bei der Sanierung von Altlasten zu berücksichtigen und zu nutzen (die Menge, Toxizität, Mobilität, das Volumen oder die Konzentration von Schadstoffen verringert sich ohne äußere Eingriffe in den Umweltmedien), um Sanierungsaufwendungen und damit Kosten zu reduzieren. Hierzu gehört das Verfahren der „**natural attenuation (NA)**“ oder „**enhanced natural attenuation (ENA)**“ (Unterstützung des natürlichen Abbaus durch kostengünstige Verfahren). Zu Beginn als „kontrolliertes Nichtstun und Liegenlassen“ kritisiert, wird das Verfahren gegenwärtig in der alltäglichen Sanierungspraxis eingesetzt.

Es gibt heutzutage ein großes Spektrum von innovativen Verfahren zur Dekontamination von Altlasten. Fast alle Verfahren sind In-Situ-Methoden, beispielsweise

- **Radiofrequenz-Erwärmung:** Gezieltes Aufheizen des Bodens mittels Radiowellen; Schadstoffaustrag über Bodenluft oder Beschleunigung biologischer Abbauprozesse
- „**Constructed Wetlands**“: Abbau von Schadstoffen durch natürliche Prozesse (durch Aufnahme von Pflanzen: Phytoremediation und/oder Mikroorganismen)
- **Treatment Train:** Sequenz mobiler Einheiten zur Abwasserreinigung
- **MOSAM:** Mobilisierung von Schadstoffen in Boden und Grundwasser durch Wasserdampf
- **Direkte Gasinjektion:** Aktivierung natürlich vorkommender Mikroorganismen
- **Unterirdische Enteisung**
- **ISCO:** chemische In-Situ-Oxidation; die In-Situ-Behandlung stark kontaminierter Schadenszentren ist unter gewissen hydrogeochemischen Bedingungen ebenso durch die Zugabe starker Oxidationsmittel möglich. In der technischen Umsetzung wird ein relativ enges Raster aus speziellen Injektionsbrunnen am Standort installiert.
- **Hydro-Airlift:** Grundwasserzirkulationsbrunnen.

Ein Blick auf die „Evolution“ und die Art der verwendeten Dekontaminationsverfahren dokumentiert, dass ein ausgeprägter Paradigmenwechsel stattgefunden hat. Am Anfang der Altlastengeschichte wurden vielfach nur Sicherungsmaßnahmen und so genannte harte, invasive, aktive Sanierungstechniken offsite oder Ex Situ eingesetzt, die mit hohen Kosten (allein durch den Transport des Bodenmaterials) und der Aufwendung von Chemikalien gepaart waren. In den letzten Jahren wurden dann konkurrenzfähige sanfte, eher passive In-Situ-Verfahren entwickelt, die in den Bodenkörper kaum eingreifen.

Rund um den Jahrtausendwechsel kam es zu einem Innovationsstillstand im Bereich der Altlastensanierung. Innovative Techniklösungen wurden oftmals nicht mehr angewendet, weil sie durch Billigentsorgung und -verwertung von Abfällen unterlaufen wurden. Besonders die Ankündigung, dass ab 1. April 2005 keine unbehandelten Abfälle mehr deponiert werden durften (TA Siedlungsabfall), führte dazu, dass viele Deponiebetreiber vorher mit „Dumpingpreisen“ versuchten noch ihre Deponien zu füllen. Das macht deutlich, wie bedeutsam ein integratives Vorgehen aller beteiligten Akteure ist; Wechselbeziehungen mit anderen Politikfeldern müssen von vornherein einkalkuliert werden.

Ein neuer Weg beispielsweise PAK- und PCB-belastete Böden zu sanieren, bietet die Sanierung mittels **Mikroemulsionen**. Derart belastete Böden sind, wegen der starken Adsorption dieser Schadstoffe an Boden und Bodenpartikel, schwer zu sanieren. Die so genannten Mikroemulsionen, transparente oder lichtdurchlässige Flüssigkeiten bestehen aus drei Komponenten: oberflächenaktiven Substanzen, Öl und Wasser. Mit Hilfe der Mikroemulsionen lassen sich die Sanierungseffizienz kontaminierter Böden steigern, die zu behandelnden Volumina verringern und die Trennung in eine tensidreiche, wässrige und in eine organische, schadstoffbelastete Phase durch Temperaturveränderungen vereinfachen.

Zurzeit forschen Projekte im Bereich „**selektive Erwärmung von Adsorbentien und Katalysatoren**“, „Erwärmung kontaminierter fester Medien mit Hilfe elektrischer Energie zur Optimierung verschiedener Sanierungsmethoden“, „**Bodenerwärmung mit Radiowellen**“ und „**Oxidation von CKW**“. Daneben geht es um die „Schöpfung“ von neuartigen und individuellen Lösungsstrategien, bei Verfahren der Phytoremediation um eine optimierte Auswahl der für die Anforderungen geeigneten funktionellen Pflanzen, Adaption der Pflanzen an die projektbezogenen Bedingungen und nicht zuletzt um die verfahrenstechnische Optimierung mikrobieller Prozesse.

Auch im Gebiet der Nanotechnologie wird geforscht. Zwei Forschungsprojekte untersuchen den Einsatz von „**Nano-Iron**“ (AAV 2007) und von „**kolloidaler Aktivkohle**“ (UFZ 2007c). Im „Carbolron-Projekt“ pumpten die Sanierer drei Tonnen Eisenpartikel in den Boden. Davon eine Tonne hoch reaktives Nanoeisen. Durch die katalytische Wirkung der winzigen Eisenpartikel können bisher chemisch stabile Moleküle aufgebrochen werden und es entstehen unbedenkliche d.h. nichttoxische Verbindungen. Der innovative Gedanke des Projekts „Kolloidale Aktivkohle“ liegt darin, Aktivkohle in feinstkörniger, kolloidaler Form einzusetzen. Der Aktivkohle wird dadurch eine uneingeschränkt neue Eigenschaft verliehen: Sie wird in Wasser quasi löslich und kann dadurch als Adsorber direkt im Aquifer eingesetzt werden. Die Forscher haben sich Carbolron inzwischen auch patentieren lassen.

Nachsorge

Überwachung und Nachsorge von sanierten Altlasten sind im BBodSchG und in der BBodSchV konkretisiert. Die Nachsorge und Überwachung nach erfolgten Dekontaminations- oder Sicherungsmaßnahmen bei Altlasten sind hauptsächlich Betrieb, Erhaltung und Funktionskontrolle von Bauwerken und Anlagen sowie das Überwachen der Wirkungspfade zur Kontrolle der dauerhaften Einhaltung der festgelegten Sanierungsziele und des wirksamen Schutzes der betroffenen Schutzgüter.

Im Rahmen der Nachsorge und Überwachung kommen alle messtechnischen Maßnahmen zum Einsatz, die bei der Erkundung von Altlastverdachtsstandorten und bei der Erfassung und Bewertung von Schadstoffeinträgen vorgestellt worden sind.

Zusammenfassende Darstellung der **Technologien** im Problemfeld „Altlasten“:

Lösungsansatz		Märkte
Erkundungsmethoden	z.B. Georadar	Industrie- und Schwellenländer
	Bohrverfahren	Industrie- und Schwellenländer
	Vor-Ort-Analytik (schnelle Analytik)	weltweit
	→ Erkundungs- und Bewertungstechnologien aus dem Problemfeld „Eintrag von Schad- und Nährstoffen“ (s. Abschnitt 5.3.2)	weltweit
Dekontaminationsmethoden	Mikrobiologische Verfahren	weltweit
	Thermische Verfahren	Industrie- und Schwellenländer
	Wasch-/Extraktionsverfahren	Industrie- und Schwellenländer
	Aktive/Passive pneumatische Verfahren	weltweit
	Aktive/Passive hydraulische Verfahren	weltweit
	„sanfte“ Dekontaminationsverfahren z.B.: Phytoremediation	weltweit
Nachsorge	Monitoringsysteme	weltweit
Sicherungsmaßnahmen	Oberflächenabdeckung	weltweit
	Dichtwände	weltweit
	Immobilisierung	weltweit

5.3.4 Problemfeld „Bodenerosion, Desertifikation, Versalzung“

Bodenerosion

Bodenerosion ist ein weit reichendes, global gesehen eines der bedeutendsten Umweltprobleme. Umweltbeeinträchtigungen durch langfristigen, erosionsbedingten Verlust von Böden bzw. Bodenkomponenten wirken sich – im Gegensatz zu Schadstoffeinträgen – oftmals ursachennah aus (On-site-Effekte). Dies hat zur Folge, dass der hauptverursachende Sektor Landwirtschaft langfristig meist auch Empfänger erosionsbedingter Risiken ist. Die Gründe

hierfür liegen in ungeeigneten Landnutzungsstrategien und Bewirtschaftungsmaßnahmen (periodische, in der Regel jährliche Bodenbearbeitung) und in einer Landwirtschaft mit fehlender Windschutzvegetation (Hecken) und (periodisch) geringer Bodenbedeckung. Aber auch auf Grünland und im Wald bzw. Forst sind erhebliche Bodenabträge zu beobachten, vor allem dann, wenn die Nutzung nicht standortgerecht erfolgt. Ferner treten Bodenabträge in nennenswertem Ausmaß auch auf Baustellenflächen auf, die ihrer schützenden Vegetationsdecke beraubt und sehr hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind.

Erosion von Böden und dadurch erhöhter Sedimenteintrag kann zu Wasserverschmutzung und Eutrophierung der Gewässer führen. Erosionsbedingte Phosphoreinträge in Oberflächengewässer stellen eine wesentliche Ursache für eine unzureichende Gewässerqualität dar. Daneben kann es durch den Verlust der Speicherfähigkeit der Böden zu erhöhtem Oberflächenabfluss kommen. Als vorrangiges Problem stellt sich der Verlust der Bodenfruchtbarkeit durch den Abtrag wertvollen nährstoffreichen Bodenmaterials.

International nimmt die Bodenerosion weiter zu. Etwa 115 Mio. Hektar sind durch Wassererosion und 42 Mio. Hektar durch Winderosion gefährdet (Choudhury et al. 2001). Vor allem in abgelegenen Gebieten intensiviert sich die Bodenerosion durch die Aufgabe landwirtschaftlicher Nutzflächen und durch Waldbrände. In Europa ist der Mittelmeerraum historisch gesehen das am stärksten von der Erosion betroffene Gebiet - erste Angaben über Bodenerosion im Mittelmeerraum wurden bereits vor 3000 Jahren gemacht -, aber auch in anderen Teilen Europas (etwa in Österreich, der Tschechischen Republik und dem Lössgürtel Nordfrankreichs und Belgiens) gibt es zunehmend Anzeichen für eine signifikante Erosion. Die Bodenerosion kann somit, wenn auch in ungleicher Ausprägung, als europaweites Problem betrachtet werden.

In Deutschland gehört die Bodenerosion ebenso zu den zentralen Problembereichen, die mittlere Bodenerosionsrate beläuft sich im Jahr auf 8 bis 10 t/ha und übertrifft damit die durchschnittliche jährliche Bodenbildungsrate von etwa 2 t/ha um das fünffache (Choudhury 2001). Es bestehen Hinweise, dass die Bodenerosion in den letzten Jahrzehnten tendenziell zugenommen hat. Dies hängt einerseits mit häufigeren Starkregenereignissen zusammen und ist andererseits auf Veränderungen bei der Landnutzung zurückzuführen. So werden viele ehemalige Grünlandflächen heute als Acker genutzt (Umweltschutzbericht 2006). Wind- und Wassererosion werden sich zukünftig aufgrund des prognostizierten Klimawandels durch Extremwetterereignisse noch verstärken (Kneip 1997).

Wie bei der Bodenschadverdichtung gibt es außer der „guten fachlichen Praxis“ (BBodSchG) keine konkreten gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Erosionsvorsorge. Minderungsmaßnahmen oder Lösungsansätze für das Erosionsproblem lassen sich in der konservierenden Bodenbewirtschaftung und aufgrund der Wechselwirkung zur Schadverdichtung (s. Abschnitt 5.3.5) in angepassten Technologien (leichte Maschinen und Transportfahrzeuge) finden. Eine auf den Ackerflächen durchgeführte dauerhafte **konservierende Bodenbearbeitung in Kombination mit Mulchsaat und Zwischenfruchtanbau** führt zu einer großflächig wirksamen erheblichen Reduzierung von linien- und/oder punktförmig auftretender Bodenerosion (Bodenschutzbrief 2006).

Die konservierende Bodenbearbeitung umfasst im Allgemeinen jedes Verfahren, welches die Eingriffsintensität verringert oder nahezu völlig auf sie verzichtet. Das geht von der **intensi-**

tätsreduzierten Bearbeitung (Verzicht auf wendende und intensiv mischende Bodenbearbeitungsverfahren) bis hin zur **Umstellung der Fruchtfolgen** mit dem Anbau von Zwischenfrüchten (Herbstansaat, Untersaat oder Blanksaat). Diese erhöhen die Perioden der Bodenbedeckung und den Bodenbedeckungsgrad und bieten Schutz vor erosionswirksamen Starkniederschlägen (hohe Wahrscheinlichkeit von Mai bis September). Die Veränderung der Bewirtschaftung mit der Einführung der Direktsaat, der Bearbeitung quer zur Hangneigung, der Anlage von Windschutzpflanzungen (Hecken) und Schutzstreifen in Hanglagen erhöht die Versickerungsmöglichkeit und verringert den oberflächlichen Abfluss. **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.

Bei sehr ausgeprägter standörtlicher Erosionsgefährdung kann der Erosionsgefahr durchweg auch nicht mit den besten ackerbaulichen Erosionsschutzmaßnahmen entgegengewirkt werden. Bei solchen Gefahrenlagen ist ein vollständiger **Nutzungswandel** von Acker zu Grünland oder anderen Dauervegetationsformen zu erwägen.

Im alltäglichen Vollzug werden stärker als bisher unumgängliche präventive Maßnahmen eingesetzt. Hierzu ist die frühzeitige Diagnose bzw. Kontrolle möglicher Bodenveränderungen erforderlich, um rechtzeitig geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen zu können. Entsprechende Daten bzw. Datenprodukte sollten wegen der räumlichen Dimension der Problemsphäre flächenhaft erhoben werden. Vor diesem Hintergrund ist ausdrücklich das Anwendungspotential **fernerkundungsbasierter Verfahren** zur Bereitstellung geeigneter Bodeninformationen für die Beurteilung von Erosionsrisiken ausgewählter Verdachtsflächen zu durchleuchten. Neben sensortechnischen Optionen sind hier auch Strategien zur Verarbeitung der fernkundlich erhobenen Rohdaten zu entwickeln. Durch die flächendeckende Datenerhebung ist auch eine Verifikation von Erfolgen eingeleiteter Aktionen und ihrer Überwachung erreichbar.

Darüber hinaus ist und bleibt die Beratung der Landwirte ein Schwerpunkt der Maßnahmen zur Erosionsminderung. Bei dieser Beratung arbeiten Geologische Dienste, Landwirtschafts- und Umweltverwaltungen interdisziplinär zusammen. Einen wichtigen Schritt zur Verbesserung der Beratung stellt die Einführung einer **GIS-gestützten Erosionsschutzberatung** mit EMIL (Erosionsmanagement in der Landwirtschaft) dar. Mithilfe von EMIL können Landwirte schlagbezogen über die Erosionsanfälligkeit ihrer Flächen informiert und geeignete Erosionsminderungsmaßnahmen identifiziert werden (Umweltschutzbericht 2006).

In der neuesten Praxis kann mit Hilfe von Erosionsschutzgeweben, so genannten **Geotextilien**, ein oberflächiger Schutz im Bereich besonders steiler Böschungen oder erosionsanfälliger Substrate verstärkt und unterstützt werden (z.B. **Tensar-Mat**). Gräsersaat oder Bepflanzung mit Stauden und Gehölzen können den Boden nicht sofort schützen. Hier hilft ein bodenbindig aufgelegtes Gewebe oder eine Matte, Erosionsschäden so lange zu verhindern, bis die Vegetation den Schutz übernehmen kann. Die speziellen Gewebe und Vliese aus Naturfaser und Kunststoffen können von Pflanzen durchwachsen und durchwurzelt werden. Bei der Sicherung und Begrünung von Extremflächen hat sich ebenfalls die Nassansaat (auch: Anspritzbegrünung oder **Hydroseeding**) als besonders effektives und wirtschaftliches

Verfahren bewährt. Saatgut und verschiedenste Zuschlagstoffe können in einem Arbeitsgang auf die zu begrünende Fläche aufgesprüht werden (Bender 2007; Tensar 2007).

In Entwicklungs- und Schwellenländer geht die Bodenerosion mit der Gefährdung der Ernährungssicherung einher. Doch in einigen Entwicklungsländern gibt es bereits erfolgreich durchgeführte Gegenmaßnahmen. In Nepal beispielsweise erfolgt der Anbau landwirtschaftlicher Produkte auf **ebenen Terrassen**, um die Erosion zu minimieren. Dabei wurden geneigte Terrassen entweder aufgegeben oder verbessert. Um die Degradation zu verringern und Erträge zu steigern, wurden **Agroforstpraktiken** intensiviert (Form der Landnutzung in tropischen und subtropischen Ländern, bei der auf gleicher Fläche Forstwirtschaft, Ackerbau und/oder Weidewirtschaft kombiniert sind). Außerdem wurden das Entstehen von Auswaschungen bekämpft, gefährdetes Land stabilisiert und Wasserkanäle gebaut. Ferner wurden Reihenpflanzungen, Mulch, Dünger, Kompost und Gründüngung zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit eingesetzt (Paudel; Thapa 2001). Diese Maßnahmen können als „Leuchttürme“ kommuniziert und somit in andere Länder weitergetragen werden.

Lösungsansatz		Märkte
konservierende Bodenbearbeitung	kaum Einsatz von wendenden Verfahren etc.	weltweit
angepasste Maschinen und Transportfahrzeuge	→ Technologien aus dem Problemfeld „Bodenschadverdichtung“ (s. Abschnitt 5.3.5)	Industrie- und Schwellenländer
Anbaumaßnahmen	Mulchsaat, Direktsaat und/oder Zwischenfruchtanbau (Herbstansaat, Untersaat, Blanksaat)	weltweit
Windschutzpflanzungen		weltweit
Reduzierung des Einflusses auf angrenzende Land- und Wasserflächen	Filterstreifen, Änderung der Wegeführung	weltweit
Nutzungswandel	Acker zu Grünland oder andere Dauervegetationsform	weltweit
Geotextilien		weltweit
Hydroseeder	Anspritzbegrünung (Nassansaat)+Geotextilien	weltweit
Agroforestry	Kombination von Forst- und Landwirtschaft auf gleicher Fläche	Tropische und subtropische Länder

Versalzung

Böden arider und semiarider Gebiete, bei denen geringfügige oder keine Auswaschung erfolgt, weisen vielfach Alkalisierung auf. Dies beruht im Wesentlichen darauf, dass durch Niederschläge zugeführte Natriumverbindungen als alkalisch reagierendes Natriumcarbonat (Na_2CO_3) im Boden verbleiben. Die Versalzung von Böden kann nach Art und Weise der Anreicherung von Salzen wie folgt unterschieden werden: *Niederschlagsversalzung*, *Grundwasserversalzung* und *künstliche Versalzung*. Im vorliegenden Bericht wird nur die künstliche, anthropogen verursachte Versalzung von Böden durch Bewässerung tiefer durchleuchtet.

Die künstliche Versalzung kann - ganz allgemein - verschiedene Ursachen haben. Da sind zum einen der Anstieg des Grundwasserspiegels, Düngung, die winterlichen Streumaßnahmen und zum anderen die übermäßige oder falsche Bewässerung von wasserintensiven Anbaupflanzen anzuführen.

Bei einer Bewässerung mit salzarmen bis salzhaltigem Wasser wird der Salzgehalt im Boden erhöht, wenn kein ausreichender Vorfluter und/oder eine fehlende Dränage (= fehlende Durchwaschung des Bodens) vorliegen, allerdings kommt dies - aufgrund der abwärtsgerichteten Bodenwasserströmung - nicht in humiden Klimaten vor. Waldrodungen begünstigen die Versalzung, da sich nach Rodung flachwurzelnde Gräser ansiedeln, die weniger Wasser verdunsten und die Niederschläge schneller versickern lassen. Bei Trockenheit entstehen durch die hohen Salzkonzentrationen steinharte Stollen, die Wasseraufnahme wird stark verringert, das Porenwasser reagiert alkalisch und eine landwirtschaftliche Nutzung wird nahezu unmöglich (Beeinträchtigung und Verminderung des Pflanzenwuchses).

Weite Gebiete in Indien, Pakistan, im Irak, in Ägypten und in den USA sind durch Versalzung infolge falscher Bewässerung völlig unproduktiv geworden (Köplin 2003).

Standorte versalzter Böden sollen den Anforderungen, die an sie gestellt werden, gerecht werden und den landwirtschaftlichen Ertrag sichern. Es gibt eine Reihe von Maßnahmen zur Bekämpfung und Vermeidung von Versalzung. Einige dieser Gegenmaßnahmen sind nur als kurzfristige Lösung einzustufen, da sie dauerhaft kaum erfolgreich sind. Es gibt aber durchaus Methoden, die nachhaltig sind.

Eine Erkenntnis bei einer notwendigen Bewässerung ist die Verwendung salzarmen Wassers. So einfach diese Lösung auch klingen mag, viele Landwirte, besonders in armen (ariden) Regionen haben nicht fortgesetzt die Möglichkeit an salzarmes Bewässerungswasser zu kommen. Zudem hat selbst Bewässerung mit relativ salzarmen Wasser über viele Jahre hinweg letztendlich doch eine Versalzung zur Folge, wenn sie intensiv erfolgt.

Ein anderer Ausweg wäre bei beginnender Versalzung, die oberste, salzreiche Schicht tief einzupflügen oder sogar vollständig zu entfernen. In Verbindung mit Chemikalien (z.B. Gips) würde sich eine kurzfristige Absenkung des Salzgehaltes einstellen. Aber diese Maßnahmen sind ebenfalls wenig nachhaltig, da hierbei zwar die Auswirkung einer Versalzung gestoppt wird, die Ursachen jedoch nicht beseitigt sind und es darüber hinaus zu einer unerwünschten Sekundärbelastung mit Chemikalien kommt.

Eine dauerhafte **Melioration**, mit dem Ziel das Salz aus dem Boden zu entfernen, ist eine Maßnahme, die aus vielen Zwischenschritten besteht. Ziel der Melioration ist es, Wasserbewegungen und Wasserspeicherung im Boden zu verbessern. Die Melioration eines Standortes umfasst neben bodenverbessernden Maßnahmen in vielen Fällen auch Flurneuordnungen, Wirtschaftswegebau, Gewässerausbau, Landschaftspflegerische Begleitmaßnahmen, infrastrukturelle Maßnahmen sowie Dorferneuerungen (Kuntze 1994). Grundformen der Bodenverbesserungen sind **Hydro-, Profil- und Gefügemelioration** sowie **Chemomelioration**. Bei der Hydromelioration in versalzungsgefährdeten Regionen (semiarid, arid) ist nicht nur der Wasserbedarf der Pflanzen zu sichern, auch der Bedarf an Wasser zur Auswaschung von Salzen muss gedeckt werden. Die Wassermenge richtet sich nach dem Wasser-

bedarf der Pflanzen, dem Salzgehalt des Bewässerungswassers und des Bodens sowie der Salztoleranz der zu bewässernden Pflanzen (Kuntze 1994).

Um die Versalzung bei der Bewässerung zu vermeiden, muss immer parallel auch eine entsprechende nachhaltige Entwässerung gewährleistet werden. Bei einer nachhaltigen Entwässerung müssen viele Standort- und Bewirtschaftungseigenschaften berücksichtigt werden, um keine negativen Effekte wie Staunässe, Anstieg des Grundwasserspiegels oder additive Versalzung zuzulassen. Dazu werden **Drainagetechniken** herangezogen. Bewässerung und Entwässerung müssen aufeinander abgestimmt werden. Da die Installation von Drainagen eine ziemlich kostspielige Angelegenheit ist, wird es in ärmeren Regionen eher schwierig werden, solche Systeme aufzubauen.

Eine **nachhaltige Landbewirtschaftung** kann viel zur Versalzungsvermeidung beitragen. Man kann z.B. die **Fruchtfolge** verändern und eher tiefwurzelnde Pflanzen wie beispielsweise Luzerne oder durch die Beimischung verschiedene *Atriplex*-Arten (Gänsefußgewächse), um den Grundwasserspiegel zu senken und dadurch die Gefahr einer Versalzung durch in Bodenkapillaren aufsteigendes Wasser zu verringern, bzw. neue angepasste Pflanzensorten anbauen (Gemüse, Obst und Hackfrüchte sind z.B. besonders bewässerungsbedürftig). Im Bereich der standortangepassten (genetisch veränderten) **salzresistenten Pflanzensorten** Bereich kommt die heute vielerseits in der Diskussion stehende grüne Biotechnologie zum Tragen.

Eine gewichtige Rolle spielt auch der **Maschineneinsatz bei der Bewirtschaftung** der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Das Bodengefüge wird durch schwere Landmaschinen verdichtet, wodurch die Versickerungs- und Auswaschungsrate herabgesetzt wird (siehe Technologien im Problemfeld „Bodenschadverdichtung“, Abschnitt 5.3.5).

Nachhaltige Maßnahmen sind darüber hinaus veränderte Bewässerungspraktiken z.B. **Unterflurbewässerung** eventuell in Verbindung mit Folienabdeckungen, welche die Wasserverdunstung unterbindet oder reduziert. Zur Verringerung einer Alkalisierung dienen auch kontrollierte Bewässerungsmaßnahmen wie **Tropfbewässerung**. Tropfbewässerung ist das sparsamste aller Bewässerungsverfahren, da hierfür nur geringe Wassermengen aufgebracht werden. Das Wasser wird durch ober- oder unterirdisch verlegte Schlauch- bzw. Rohrleitungen und durch die an den Pflanzen installierten so genannten Tropfer direkt dem Wurzelbereich der Pflanze zugeführt. Es werden kontinuierlich geringe Wassermengen aus den Tropfern (auch computergesteuert betreibbar → Erhöhung der Effizienz mit simultaner Herabsetzung des Wassereinsatzes), exakt dem Bedarf der Pflanze entsprechend, abgegeben. Durch die zielgerichtete Befeuchtung des engen Bereiches um die Pflanze bzw. des Wurzelraumes, kann kein überschüssiges Wasser im übrigen Boden versickern oder verdunsten. Daneben existieren Sondermethoden wie die **Bewässerung mit ablaufendem Niederschlagswasser und mit Tau**, die aufbauend auf traditionellen Anbauverfahren weiter projiziert wurden. Hierbei wurden einige Verfahren entwickelt, um Felder mit dem Ablaufwasser zu versorgen. Jedes davon ist individuellen Geländeformen, Klimabedingungen und Kulturpflanzen angepasst.

Seit Neuestem werden in Deutschland „**precision irrigation**“-Systeme (oder „site-specific irrigation“) mit **Datenfernübertragung** eingesetzt. Es werden vor Ort Daten wie Bodenfeuchte, Bodenleitfähigkeit, Regenmenge etc. mobil aufgenommen, die gespeicherten Daten per

Modem weitergegeben und anhand dieser Ausgangsdaten die Bewässerung gesteuert. So kann eine **Teilflächenspezifische Bewässerung** durchgeführt werden.

Ein innovatives Verfahren ist die vom Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) entwickelte **wassersparende Bewässerungsmatte**. Zwischen zwei vernähten Vliesmatten aus nicht verrottenden Kunstfasern werden perforierte Schläuche eingearbeitet, welche wiederum mit Vlies ummantelt sind. Unter dem Rasen sorgen die wasserdurchflossenen Schläuche dafür, dass die Matte die Feuchtigkeit gleichmäßig und ohne hohe Verluste durch Verdunstung verteilt. Dieses kostengünstigere Prinzip eignet sich durch Wassereinsparungen von bis zu 70% auch für die Bewässerung heißer Klimazonen (Genios 2007; baulinks 2007 und Technologien aus Abschnitt 5.3.4 „Versalzung“). **GEOhumus** ist ein neues Produkt, welches 2007 mit dem Umweltpreis ausgezeichnet wurde und besonders in Entwicklungsländern kostengünstig einsetzbar ist. Es handelt sich um ein auf Basis der Nanotechnologie hergestelltes, patentiertes Hybridmaterial, für das die Eigenschaften eines Superabsorbers mit Gesteinsmehlen kombiniert wurden. Gleichmäßig in den Boden eingebracht gelingt es, die Versickerung von Wasser zu reduzieren und mehr pflanzenverfügbares Wasser im Boden zu speichern. Wasser kann dadurch wesentlich effizienter genutzt werden. Bewässerungsintervalle können verlängert werden, Wasser wird gespart. Dieser neuartige Bodenhilfsstoff ist bedenkenlos einsetzbar (enthält keine Giftstoffe) und baut sich nach 3-5 Jahren im Boden biologisch ab (nähere Informationen unter www.geohumus.com).

Von großer Bedeutung ist die Einführung eines **Monitoringsystems** zur Früherkennung von Versalzung z.B. durch Fernerkundung (s. Erkundungsmethoden aus Abschnitt 5.3.2). Auf diese Weise könnte einer Versalzung bereits im Anfangsstadium durch verbesserte Bewässerung, Drainage und ackerbauliche Praktiken entgegengearbeitet werden.

Lösungsansatz		Märkte
Nachhaltige Bewässerungssysteme	Unterflurbewässerung, Tropfbewässerung	Europa, aride und semiaride Regionen
	Bewässerungsmatten	Europa, aride und semiaride Regionen
	Be- und Entwässerungssysteme	Europa, aride und semiaride Regionen
	„Precision irrigation“ (mobile Maschinen und Geräte)	Europa, aride und semiaride Regionen
Landschaftsplanung und -pflege		Europa, semiaride und aride Regionen
Deckung des Wasserbedarfs	→Handlungsfeld „Wasserschutz“ (s. Kapitel 4)	semiaride und aride Regionen
nachhaltige Bewirtschaftung	Einsatz neuartiger landwirtschaftlicher Maschinen, Veränderung der Fruchtfolgen	Europa, semiaride und aride Regionen
Monitoringsysteme	Fernerkundungstechnologien etc. (s. Technologien aus dem Problemfeld „Eintrag von Schad- und Nährstoffen“, Abschnitt 5.3.2)	Europa
Nanotechnologie	Geohumus	weltweit
„grüne“ Biotechnologie	(angepasste) Pflanzenarten: „Salzpflanzen“	aride und semiaride Regionen

Desertifikation

Desertifikation (Wüstenbildung) ist nicht gleich Dürre und auch nicht einfach Ausbreitung der Wüsten. Desertifikation bedeutet die Ausbreitung wüstenähnlicher Verhältnisse in Gebiete hinein, in denen sie aufgrund der klimatischen Bedingungen eigentlich nicht existieren sollten. Sie ist nicht auf Afrika begrenzt, sondern stellt ein weltweites Problem dar, denn ausnahmslos alle Kontinente sind - allerdings in unterschiedlichem Ausmaße - von diesem Phänomen betroffen. Wüstenbildung gibt es nicht nur in extrem trockenen und heißen Gebieten, sondern zum Beispiel auch in der Elfenbeinküste, wo die jährlichen Niederschläge höher liegen als in Deutschland. Es ist aber zu konstatieren, dass Desertifikation nicht wie Dürre allein durch das Klima verursacht wird. Trockenheit ist zwar einer der Gründe für Desertifikation und intensiviert sie, hauptsächlich wird Desertifikation aber durch den Menschen verursacht, indem er seine Umwelt rücksichtslos ausbeutet. Man spricht daher von „man-made-desert“. Durch den Begriff Desertifikation, der dem lateinischen "desertus facere" (= Wüstmachen, Verwüsten) entnommen ist, soll der Vorgang des ‚Wüstmachens‘ und damit das Handeln des Menschen als Ursache „fühlbare“ werden.

Die Menschen sind gleichzeitig Verursacher und Opfer. Zur Sicherstellung der Ernährung werden die landwirtschaftlichen Anbauflächen auf nicht geeignete Flächen ausgedehnt, Monokulturen wie „cash-crop“-Anbau betrieben oder das natürliche Grasland durch die Aufstockung der Tierzahlen überweidet. Durch die Überweidung kommt es zu einem langfristigen Verlust der Pflanzendecke und damit einhergehend die Abnahme der Artenvielfalt der Pflanzen – und in der Folge auch der Tiere (s. Handlungsfeld „Naturschutz und Biodiversität“, Kapitel 8). Der Einschlag von Holz als Hauptenergiequelle lässt baumlose Graslandschaften entstehen. Regen und Wind tragen die ohnehin nur dünne Krume schnell ab. Auch mangelhafte, nicht an die lokalen Verhältnisse angepasste oder nur auf kurzfristigen Gewinn ausgerichtete Bodenbewirtschaftung, kann zur Degradierung von Böden führen. Beispiele sind eine Verkürzung der Brachezeiten (wodurch der Boden ausgelaugt wird, also die Nährstoffe zu rasch aufgebraucht werden), die Verwendung mechanischer Anbautechniken, die eine Erosion des Bodens begünstigen (z.B. das Pflügen in Richtung des Hanggefälles, was die Abschwemmung von Bodenmaterial verstärkt) oder die Verwendung mangelhafter Bewässerungstechniken (Folge: Bodenversalzung). Hierdurch kann es zu Nährstoffverlusten und ungünstigen Bodenveränderungen kommen, die unter den ariden Klimabedingungen kaum reversibel sind.

Bei der Bekämpfung der Desertifikation ist das Durchbrechen der angesprochenen Teufelskreise die tatsächliche Herausforderung.

Die ausgedehntesten Desertifikationsgebiete der Erde befinden sich in den ariden Klimazonen. Die Desertifikation war vermutlich das erste Umweltproblem, dessen weltweite Bedeutung erkannt wurde. 1977 führte dieses Erkenntnis zur Einberufung einer Konferenz der Vereinten Nationen (UNO) über die Probleme der Desertifikation in Nairobi. Seitdem hat man mit dem United Nations Environment Programme (UNEP, UN-Umweltprogramm) versucht, durch Initiierung und Koordination globaler Maßnahmen den Folgen der Desertifikation entgegenzuwirken. Desertifikationserscheinungen sind inzwischen in 70 Prozent aller Trockengebiete festzustellen. Betroffen sind gegenwärtig 25% der Erdoberfläche, eine Fläche dreieinhalb Mal so groß wie Europa. 900 Millionen Menschen sind weltweit mehr oder weniger

von Desertifikation bedroht. In Afrika leben 40% der Gesamtbevölkerung in Gebieten, die von Desertifikation bedroht sind, in Asien 39% und in Südamerika 30% (WGBU 1994).

Es sind speziell die Entwicklungsländer, die hauptsächlich unter der Zerstörung von Land und Ressourcen leiden: Die 50 am wenigsten entwickelten Länder sind besonders stark von der Desertifikation betroffen. In diesen Ländern nehmen Trockengebiete rund zwei Drittel der Landesfläche ein (BMZ 2005). In China sind z.B. über 3,3 Mio. km² in 13 Provinzen von Desertifikation betroffen (GTZ 2007). Desertifikation ist aber nicht ein klares Umweltproblem, es ist vor allem ein soziales Problem: Landflucht, zunehmende Verarmung der Bevölkerung, schlechter Ernährungszustand und hohes Krankheitsrisiko verstärken sich.

Wenn man an Wüste und Desertifikation denkt, kommen einem zumeist die Sahara und das Sahelgebiet, die asiatische Wüste Gobi oder die Kalahari in Südafrika in den Sinn. Aber auch in Industrieländern entstehen vorwiegend selbstverschuldete Wüsten. Große Teile des Mittelmeerraums, die ursprünglich von dichten Eichenwäldern bedeckt waren, sind akut von Desertifikation bedroht. Heute findet man rund ums Mittelmeer nur noch niedrige Buschwälder. Das Thema der Desertifikation wird aber in den Staaten des Nordens, insbesondere auch in Deutschland noch nicht mit dem notwendigen Ernst wahrgenommen. Die Industrieländer vertreten immer noch mehrheitlich die Position, Desertifikation sei in erster Linie ein regionales, weit entferntes Problem mit regionalen Ursachen. Es darf aber nicht aus den Augen verloren werden, dass einerseits Desertifikation eben ein weltweites Problem mit globalen Ursachen ist und andererseits Deutschland das Problem der Wüstenbildung mehr oder minder mit z.B. Italien und Spanien direkt vor der Haustür hat. Auch in Deutschland müssen Bauern beobachten, dass eine schonungslose industrielle Landnutzung nahezu sterile Böden hinterlässt – eine Vorstufe der Verwüstung.

Bei der Suche nach Lösungsstrategien für die Problematik Desertifikation hat man lange Zeit zu sehr auf technische Lösungen gesetzt, ohne die Fragen der demographischen Entwicklung und die jeweiligem (sich dadurch dynamisch verändernden) sozialen, ökonomischen und politischen Randbedingungen zu berücksichtigen. Bei der Inangriffnahme der Bekämpfung von Wüstenbildung entstanden mehrfach „Grüngürtel“-Projekte, in denen Baumreihen gepflanzt wurden, um das Vordringen der Wüste aufzuhalten und hat bei den Projekten die Komponenten Kooperation und Koordination vergessen. Inzwischen haben die Verantwortlichen aus den früheren Fehlern gelernt. Statt Monokulturen lassen sie Mischwälder pflanzen, und haben in einigen Gegenden am Wüstenrand unter anderem Obstplantagen angelegt. Doch auch dieser rein technologische Strategieansatz wird nie nachhaltig funktionieren. Die Bekämpfung der Desertifikation war und ist immer ein Kampf auf politischer, wirtschaftlicher, sozialer und technologischer Ebene! Zur Bekämpfung von Desertifikation reicht es demnach nicht aus, deren Ursachen allein naturwissenschaftlich aufzuklären und die Symptome zu beseitigen; in weitreichenderen Dimensionen müssen vielmehr die ökonomischen Triebkräfte und deren soziokulturelle Hintergründe bei lokalen, regionalen und globalen Vermeidungs- und Sanierungsstrategien bedacht und mit einbezogen werden.

Ausgangspunkt einer Strategie können **agrarforstliche Maßnahmen** sein. Dabei werden auf Ackerflächen Bäume gepflanzt, diese bremsen einerseits die Erosionswirkung des Windes und andererseits mindern sie aufgrund ihrer Schattenwirkung die Verdunstungsverluste und steuern so der Aridifizierung des Bodens d.h. einer raschen und nachhaltigen Austrocknung

der Bodendecke entgegen. Damit einhergehen müssen veränderte Anbaumethoden, die mit sparsamer Bewässerung und ohne den Einsatz von Pflügen auskommen und die Aussaat von besonders für den Trockenanbau gezüchteter Getreidesorten (Einsatz von grüner Biotechnologie). Diese Strategieansätze lassen sich aber nur dann nachhaltig umsetzen, wenn in der lokalen Bevölkerung einerseits ein Problembewusstsein und andererseits eine Alternative zum Feuerholz existiert. Hierzu werden **Sensibilisierungskampagnen** für Ursachen und Folgen der Desertifikation und Aus- und Fortbildungen („**capacity building**“) zu Themen wie Bodenkonservierung durchgeführt. Im Kontext der Wüstenbildung sind ebenso Fragen des lokalen Bevölkerungswachstums und der Verstädterung entscheidend, da sie derartige Alternativen oft unmöglich machen können.

Als Maßnahme gegen die Desertifikation werden traditionell oft **Stein- oder Lehmwälle** errichtet, um das geringe Aufkommen an Niederschlägen aufzustauen. Dabei reicht es aus 30 bis 40 cm hohe Anlagen zu errichten. Jedoch muss die Bevölkerung so geschult und aufgeklärt werden, dass sie die vorhandenen Dämme pflegt, ansonsten würde das Wasser, wie vor der Errichtung des Dammes, unkontrolliert versickern. Eine frühzeitige Einbindung der Menschen ist unerlässlich, Hilfe zur Selbsthilfe ist uneingeschränkt erstrebenswert. Dieses Beispiel zeigt wie entscheidend, dass perfekte Zusammenspiel von technischer Lösung (in diesem Fall eine „no-tech“-Strategie) und regional koordinierter Entwicklungsplanung ist.

Technische Strategien wie **zukunftsweisende Landnutzungskonzepte**, ein **angepasstes Wassermanagement** z.B. verbessertes Management grenzüberschreitender Wassereinzugsgebiete und **nachhaltige Landwirtschaft** für sich, werden nicht die Lösung für eine wirkungsvolle Bekämpfung der Desertifikation sein. Eine nachhaltige und funktionierende Bekämpfung der Desertifikation wird es lediglich geben, wenn auch die ökonomischen und politischen Probleme (**strukturbildende Maßnahmen**) der betroffenen Länder angegangen und gelöst und die Strategien gemäß dem „bottom up“-Prinzip partizipativ formuliert und implementiert werden. Das Problem muss aber nicht nur in den betroffenen Ländern angegangen werden, ausschlaggebend wird außerdem eine veränderte Wirtschaftspolitik der reichen Industrienationen (z.B. gewandeltes Konsumverhalten, Abbau des ökologischen Rucksacks) sein.

Lösungsansatz		Märkte
agroforstliche Maßnahmen		Trockengebiete
zukunftsweisende Landnutzung	Beratung (Wissenstransfer)	Trockengebiete
angepasstes Wassermanagement	→ Handlungsfeld „Wasserschutz“ (s. Kapitel 4)	Trockengebiete
veränderte Wirtschaftspolitik	Konsumverhalten, Produkte	Industrieländer
Stein- oder Lehmwälle		Schwellen- und Entwicklungsländer
capacity building	Dienstleistungen	Schwellen- und Entwicklungsländer
„grüne“ Biotechnologie	angepasste Pflanzen (gezüchtet oder Sortenwahl)	Trockengebiete
konservierende Bodenbewirtschaftung	→ Technologien aus dem Bereich „Bodenerosion“ (s. Abschnitt 5.3.4, S. 181 f.)	Trockengebiete

5.3.5 Problemfeld „Bodenschadverdichtung“

Als eine der Erosion gleichwertige Gefährdung des Bodens ist die Bodenschadverdichtung zu nennen. Sie entsteht meist durch das Zusammenwirken von mehreren Faktoren, wie zum Beispiel durch häufiges Befahren zu feuchter Böden mit schweren Maschinen. Die Grundsätze zur Vermeidung von Bodenschadverdichtung sind im §17 BBodSchG aufgeführt und sehen unter anderem vor, dass die Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung grundsätzlich standortangepasst zu erfolgen hat (Würfel et. al 2002).

Die Effekte der Erosion und der Bodenschadverdichtung beeinflussen sich zum Teil gegenseitig. Dabei können beispielsweise Niederschläge durch Bodenschadverdichtungen nicht mehr schnell genug einsickern und fließen oberflächlich ab, wodurch dann wiederum der vorbeugende Hochwasserschutz behindert wird und das Risiko der Wassererosion steigt. Bodenbelastungen entstehen vor allem durch die Grundbodenbearbeitung, insbesondere durch Pflügen, wenn dabei in der Furche gefahren wird (Pflugsohlenverdichtungen). Pfluglose Verfahren schneiden diesbezüglich besser ab. Hohe Belastungen können außerdem bei der Ernte und bei der Ausbringung von Stallmist und Gülle auftreten. Strategien gegen mögliche Bodenschadverdichtungen sollten an solchen Belastungsschwerpunkten ansetzen.

Der Verdichtung der Böden in Land- und Forstwirtschaft kann durch technische und organisatorische Maßnahmen und/oder einer Kombination dieser Strategien entgegengewirkt werden, die nachstehend skizziert sind:

Verwendung von Spezialreifen

Die Vergrößerung der Radaufstandsfläche, früher durch Gitter- und Zwillingsräder, heute eleganter mit **Breit- und Terrareifen**, hat bei gleicher Radlast die Verringerung des Kontaktflächendrucks zur Folge. Dies führt zu einem geringeren Bodendruck speziell in der Ackerkrume. Mit **Druckregelanlagen bei Radialreifen** ist eine Anpassung des Reifeninnendrucks an Straßen- und Ackerverhältnisse möglich, wobei auf dem Ackerboden ein möglichst niedriger Reifeninnendruck anzustreben ist. Niedriger Kontaktflächendruck und eine größere Reifenaufstandsfläche bewirken flachere Spuren, es sollten moderne, **bodenschonende Reifen** zum Einsatz kommen. An der Fachhochschule Südwestfalen, im Fachbereich Agrarwirtschaft läuft aktuell ein Forschungsvorhaben, in dem die Entwicklung einer Reifendruckregelanlage für landwirtschaftliche Traktoren und Fahrzeuge angestrebt wird (DBU 2008f).

Wahl des optimalen Zeitpunkts

Die Verdichtungsneigung des Bodens steigt mit zunehmendem Bodenwassergehalt stark an. Auch das Bundes-Bodenschutzgesetz fordert daher, dass es zur „guten fachlichen Praxis“ gehört, die Bodenbearbeitung grundsätzlich standortangepasst unter Berücksichtigung der Witterung durchzuführen ist. Dies bedeutet, dass das Befahren des Bodens in Abhängigkeit des von der Witterung beeinflussten Bodenwassergehaltes zu erfolgen hat (Petelkau 1998). Auf Standorten, auf denen gepflügt wird, ist demnach über den **Bewirtschaftungszeitpunkt** nachzudenken. Um die dann erhaltene Struktur zu konservieren, ist der Anbau von **Zwischenfrüchten** (siehe oben, Pflanzenbauliche Maßnahmen wie z.B. Fruchtfolgenwahl) sinnvoll. Diese schützen zusätzlich die Bodenoberfläche vor Verschlammung bzw. Erosion und unterdrücken ebenfalls Unkräuter.

„reduced-till farming“ (minimales Pflügen)

Hierbei handelt es sich um eine indirekte Maßnahme durch konservierende Bodenbearbeitung. Die konservierende Bodenbearbeitung zeichnet sich gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung vor allem durch den Verzicht auf die wendende Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug aus. Darüber hinaus wird die übliche Intensität des mechanischen Eingriffs durch die Bodenbearbeitung nach Art, Tiefe und Häufigkeit reduziert. Wenn der Boden gelockert werden muss, so erfolgt die Bodenlockerung nur oberflächennah, bei ausreichend abgetrockneten Bodenbedingungen und nicht nach jeder Fruchtart, sondern fruchtfolgenspezifisch. Der Boden wird so tragfähiger.

Die neuesten Pflüge verfügen über Vorrichtungen, die sowohl das Fahren in der Furche, und auch außerhalb der Furche erlauben. Wird außerhalb der Furche (**Onland-Pflügen**) gefahren, so kommt es zu einer geringeren Beanspruchung des Unterbodens; Onland-Pflügen mit ultraschallgesteuerter Pflugnachführung, sog. **Furchenscouts**: Nach dem Fledermaus-Prinzip tasten Sensoren den Pflugfurchenbereich ab. Auf der Basis der Messwerte richtet die Elektronik den Pflug automatisch entlang der Furchenkante aus. Der Fahrer muss dann mehr oder weniger nur noch in gewissen Grenzen geradeaus fahren.

Veränderte Fuhrparks

Da die Verdichtung des Bodens mit der Achs- und Radlast bei sonst gleich bleibenden Randbedingungen verstärkt wird, ist eine sehr effektive Maßnahme die Reduzierung bzw. Begrenzung der Radlast. Aus diesem Grund wird eine Begrenzung der Radlast von Schleppern, Erntemaschinen und Transportmittel auf maximal 3 t (einschließlich Zuladung) als Grenzwert für die Belastung von Ackerböden gefordert (Akkermann 2004). Bei Neuanschaffungen von Fahrzeugen und Geräten soll nach der Faustformel „So leicht wie möglich und nur so schwer wie nötig“ vorgegangen werden und die Einsatzmöglichkeit von „**low-ground-pressure**“ Fahrzeugen geprüft werden. Weitere Entwicklungen sind **Gummibandlaufwerke, Dreispurfahrzeuge und Fahrwerke mit Knickgelenk**. Diese verteilen die Gesamtlast auf eine breite Aufstandsfläche bzw. auf mehrere Terra-Reifen über die gesamte Fahrzeugbreite. Weitere Möglichkeiten zur Verringerung der Bodenbelastungen sind der Einsatz von **Aufsattel-** anstatt von **Anbaugeräten**, die Verwendung von Anhängegeräten (z.B. **Anhängespritze**) zur Reduzierung der Hinterachslast des Traktors, sowie Allradantrieb.

Außerdem schon eine geringere Überrollhäufigkeit den Boden und hinterlässt eine plane Ackeroberfläche mit positiven Folgen für eine sich anschließende Bestellung. Leistungsstarke Schlepper mit ausreichender Hubkraft ermöglichen die Einsparung von Arbeitsgängen durch Gerätekopplung (z.B. **Bodenbearbeitung und Aussaat in einem Arbeitsschritt**). Bei nichtlandwirtschaftlichen Maschinen werden zum Teil auch unterstützende Matten auf die Fahrwege gelegt.

Pflanzenbauliche Maßnahmen

Die Wahl der Kultur und die Gestaltung der Fruchtfolge inklusive des Anbaus von Zwischenfrüchten und der Gründüngung nehmen Einfluss auf die Bodenstruktur. Tiefwurzelnde Zwischenfrüchte fördern z.B. die Aggregatstabilität des Bodens ohne einen mechanischen Eingriff. Auch durch Verringerung des Anteils von Kulturen mit besonders bodenbelastenden Bodenbearbeitungs- und Ernteverfahren in der Fruchtfolge kann die Verdichtung des Bodens

kontrolliert werden. Aber nicht nur auf landwirtschaftlich genutzten Flächen kann es zu schadhafte Bodenverdichtungen kommen, sondern ebenso auf Grünland. Naturbedingt findet sich Dauergrünland häufig auf Standorten, die aufgrund ihrer Feuchtigkeit ackerbaulich nicht nutzbar sind. Insbesondere feuchte und nasse Standorte reagieren jedoch sehr sensibel auf Druckbelastung. Bei Grünland sind die Möglichkeiten der Beseitigung bereits eingetretener Verdichtungsschäden im Vergleich zum Ackerbau sehr begrenzt. Demnach kommt bei Dauervegetationsflächen der Wahl des richtigen Befahrungszeitpunktes (Unterlassung bei hohem Bodenwassergehalt) und der Technik (Maschinen, Reifen) eine herausragende Bedeutung zu.

Zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen ist eine den Bodenschutz **integrierende Planung bei der Wahl des Bodennutzungs- und Anbausystems sowie der Fruchtfolgegestaltung**, der Arten- und Sortenwahl und anderer pflanzenbaulicher Maßnahmen notwendig, wobei die klimatischen und bodenspezifischen Gegebenheiten und die ökonomischen Bedingungen den Rahmen hierfür setzen. Eine derartige integrierende Planung stellt damit eine Querschnittsaufgabe der verschiedenen Disziplinen wie Landtechnik, Bodenkunde und Landwirtschaft dar.

Lösungsansatz		Märkte
Spezialreifen	Breit- und Terrareifen, Reifendruckregler bei Radialreifen	Industrie- und Schwellenländer
Konservierende Bodenbearbeitung	Befahrungszeitpunkt	weltweit
"reduced-till farming"	z.B. Onland-Pflügen mit Furchenscout	Industrie- und Schwellenländer
	Fahrgassensysteme	Industrie- und Schwellenländer
Neue Maschinen und Geräte	z.B. Dreispurfahrzeuge	Industrie- und Schwellenländer
Pflanzenbauliche Maßnahmen	Wahl der Kultur und die Gestaltung der Fruchtfolge einschließlich des Anbaus von Zwischenfrüchten und der Gründüngung	weltweit
Alternative Maßnahmen	Schutzmatten	weltweit

5.4 Potentielle Zukunftsmärkte oder Probleme ohne Märkte

Im Bereich des Handlungsfeldes Bodenschutz ist eine Identifizierung der potentiellen Zukunftsmärkte in der derzeitigen Phase des Projektes und durch mangelnde veröffentlichte Marktstudien wie z.B. von Roland Berger Strategy Consultants (BMU/UBA 2007; UBA/BMU 2007) im Handlungsfeld Wasserschutz großteils nur argumentativ und ohne greifbare Abschätzung und Angabe von Marktzahlen und -potentialen erreichbar. Ansatzpunkt für eine Argumentation sind, sich auch in Zukunft abzeichnende und noch zu lösende Umweltprobleme aus der Sicht eines nachhaltigen Bodenschutzes. Dabei muss Augenmerk auf regionalspezifische Unterschiede der ökologischen und sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen von Industrie-, Schwellen- und besonders Entwicklungsländern gelegt werden.

Deutschland und EU

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 zufriedengeben. Die heutige Bevölkerung und zukünftige Generationen werden die Fehler der Vergangenheit auch weiterhin beschäftigen und diese zu bewältigen haben. Bezogen auf die im Projekt für den Bodenschutz determinierten Problemfelder, werden das zukünftig in den Industrieländern primär die „Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Versiegelung“, die „Altlasten“ und der „Eintrag von Schad- und Nährstoffen“ sein. Marktgängige Technologien und Strategien und Konzepte gibt es für alle Bereiche, aber sie werden noch viel zu wenig ein- und umgesetzt, da es noch zu oft ökonomische Hemmnisse (Verfahren, Maschinen und Geräte zu kostenintensiv) gibt.

Der aktuelle Stand im Problemfeld „Flächenkonkurrenzen“ kann mit „Die Konzepte sind da, der Weg ist klar“, *aber ...*“ beschrieben werden. 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“. Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung kommt in seiner Wohnungsprognose 2015 für die Nachfrageentwicklung zu dem Ergebnis, dass in den nächsten 15 Jahren mit einem Zuwachs der Wohnflächennachfrage um 12,4% zu rechnen ist. Diese Steigerung ist im Wesentlichen auf eine Zunahme beim Wohneigentum zurückzuführen. In diesem Sektor steigt die Flächennachfrage um gut 21%. Die wachsende Nachfrage im Eigentumsbereich sollte jedoch mit einer geringeren täglichen Flächeninanspruchnahme, also durch eine Umlenkung der Investitionen vom Neubau in den Bestand, befriedigt werden. 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 anderer politischer Handlungsebenen bleibt.

Die Lösung des Altlastenproblems ist und bleibt eine der großen und kostspieligen Aufgaben der nächsten Jahrzehnte. Um die monetäre Dimension und damit das Marktpotential im Altlastenbereich zu verdeutlichen einige Zahlen aus Baden-Württemberg. Das Land hat seit Ende der 80iger Jahre über 650 Mio. € für die Erkundung und Sanierung von Altlasten ausgegeben und wird in den nächsten 10-20 Jahren für die Aufarbeitung der verbliebenen Altlasten weitere 1-2 Mrd. Euro zur Verfügung stellen müssen. In den west- und zentraleuropäischen und einigen südosteuropäischen Ländern wurden nach dem Bericht der EEA (European Environment Agency) annähernd 3 Mio. Flächen geschätzt, die durch bodenverschmutzende Aktivitäten beeinflusst sind. Untersuchungen haben für 2005 über 1,8 Mio. potentiell kontaminierte Flächen identifiziert, wovon 240.000 saniert werden müssen (EEA 2007). Für die Umwelttechnik ergibt sich hieraus ein Auftrag, dessen Bearbeitung viele Jahrzehnte dauern wird. Besonders als Beitrag zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme wird künftig ein wichtiger Schwerpunkt auf der Untersuchung und Sanierung industrieller und gewerblicher Altlasten in innerstädtischen Bereichen liegen. Die Wiedernutzbarmachung solcher Flächen ist in vielen Fällen eine zwingende Voraussetzung für die künftige wirtschaftliche und städtebauliche Entwicklung und trägt zu einem schonenden Umgang mit der Ressource Bo-

den bei. Weiterhin werden die so genannten „Megasites“ ein Schwerpunkt bleiben und sogar noch stärker ins Blickfeld rücken müssen. Die Megasites sind stofflich äußerst komplex und so großräumig kontaminiert, dass sie durch den Einsatz herkömmlicher Sanierungsmethoden meist nicht zu bewältigen sind. Megasites sind schon Thema einiger Forschungsprojekte z.B. des Projektverbunds „Safira“.¹⁷ 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 (NUS) ist beispielsweise derzeit in bestimmten Gebieten eine schwere Bodendegradation festzustellen, verursacht durch Schwermetallkontaminationen, schwer abbaubare organische Schadstoffe und Dioxine im Umkreis von Industriestandorten und städtischen Ballungsräumen, durch Ölleckagen und Kontaminationen durch Radionuklide (EUA 2002). Europa und besonders Osteuropa (viele Rüstungsaltslasten, „Teerseen“ und Schwerindustrie etc.) werden sich allein aufgrund der Vielzahl von kontaminierten Flächen künftig mit ihren Altlasten „beschäftigen“ müssen und sich dadurch als zukünftige Märkte für deutsche Sanierungstechnologien auf tun. Der Weltmarkt für Sanierungstechnologien machte nach einer Studie der Business Communication Company Research (BCC Research 2006a) im Jahr 2005 bereits rund 10,7 Mrd. US-\$ aus und stieg 2006 auf 11,4 Mrd. US-\$ an. Für das Jahr 2011 wird ein Marktvolumen von 16,6 Mrd. US-\$ mit einer jährlichen Wachstumsrate von 7,8% prognostiziert (ebd). 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 ansteigender Bedürfnisse an Erträge usw. Schadstoff- und übermäßige Nährstoffeinträge (effizienterer Düngereinsatz) weiter verringert bzw. eingegrenzt werden müssen, um negative Effekte wie Versauerung, Eutrophierung und Schadstoffakkumulation der Böden zu vermeiden. Ebenfalls sollte die Bodenerosion auf ein vertretbares Maß zurückgeschraubt werden, um schleichende Bodenverluste oder Schäden bei angrenzenden Objekten (so genannte Off Site-Schäden), wie z. B. die Verlandung und Eutrophierung von Gewässern, zu vermeiden. Maßnahmen wie reduzierte Bodenbearbeitung oder die ganzjährige Bodenbedeckung sind weiter auszubauen. Die Möglichkeit vertraglicher Regelungen zum Erosionsschutz soll verstärkt Anwendung finden. Mit verdichtungsarmen Bewirtschaftungsverfahren soll die landwirtschaftliche Nutzbarkeit verbessert bzw. erhalten werden. Global ist allumfassend zu bedenken: Bodenschutz ist eine langfristige Aufgabe, die keine schnellen Lösungen erwarten lässt.

Zur indirekten Abschätzung von zukünftigen Märkten in Europa über die Aufdeckung möglicher Problemregionen in den identifizierten Problemfeldern Versiegelung, Erosion, lokale und diffuse Kontaminationen (Altlasten), können die Karten der EEA von 2002 herangezogen werden.

¹⁷ Projektdarstellung unter www.safira.ufz.de

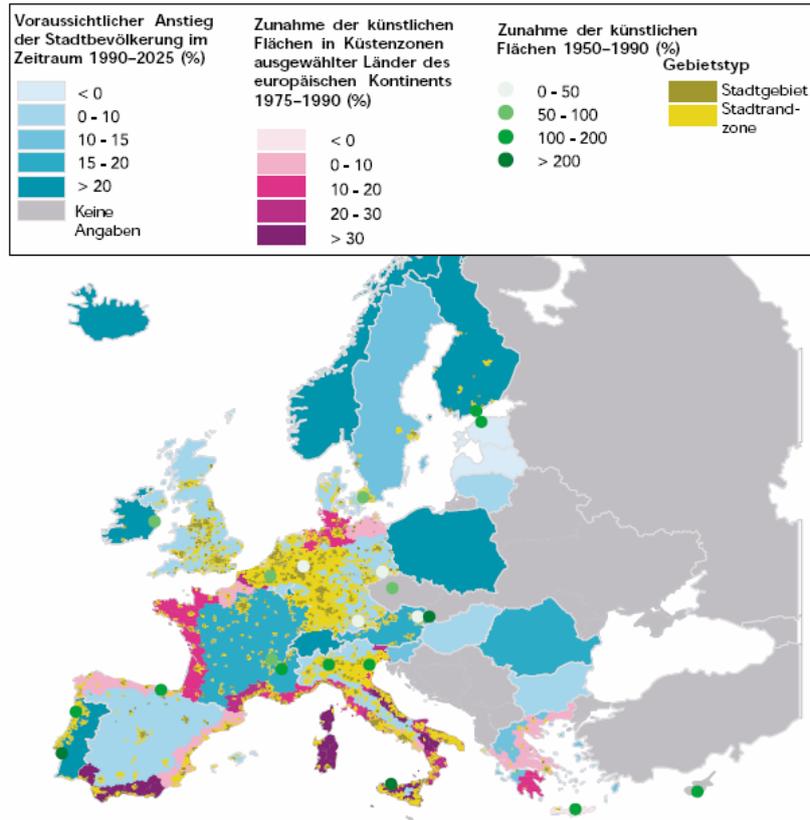


Abbildung 10: Mögliche Problemgebiete aufgrund von Bodenversiegelung in Europa (Quelle: EEA 2002)

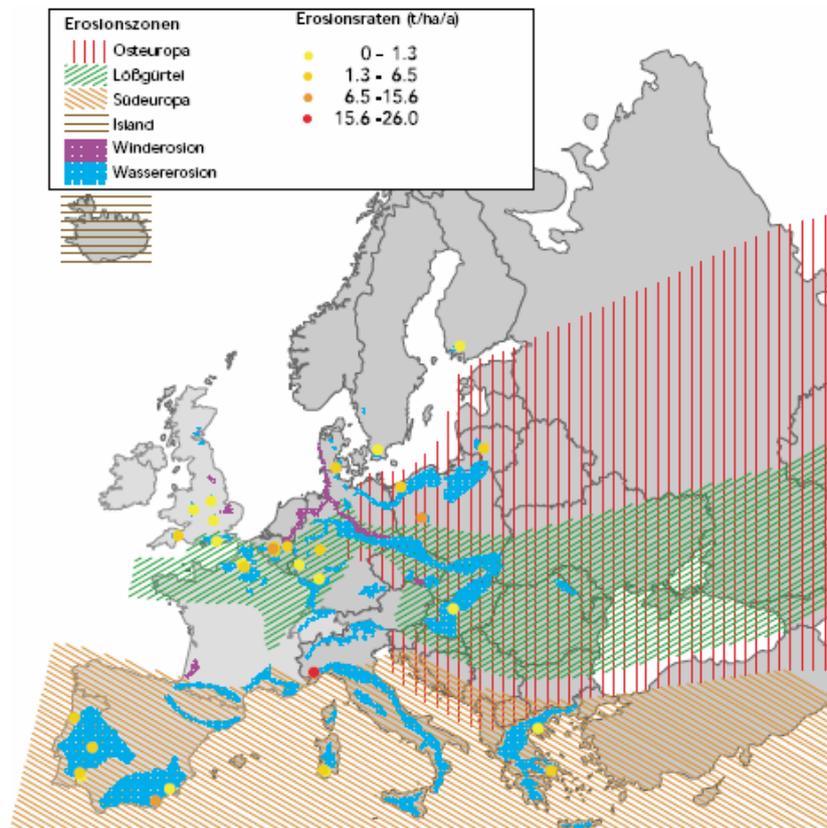


Abbildung 11: Mögliche Problemgebiete aufgrund von Bodenerosion in Europa (Quelle: EEA 2002)

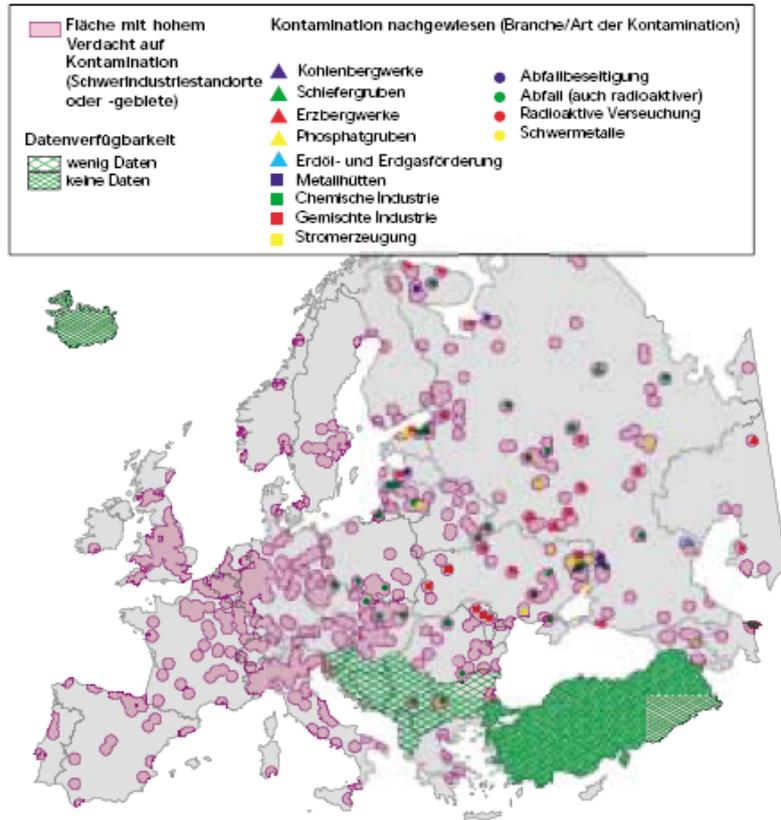


Abbildung 12: Mögliche Problemgebiete aufgrund lokaler Kontaminationen in Europa (Quelle: EEA 2002)

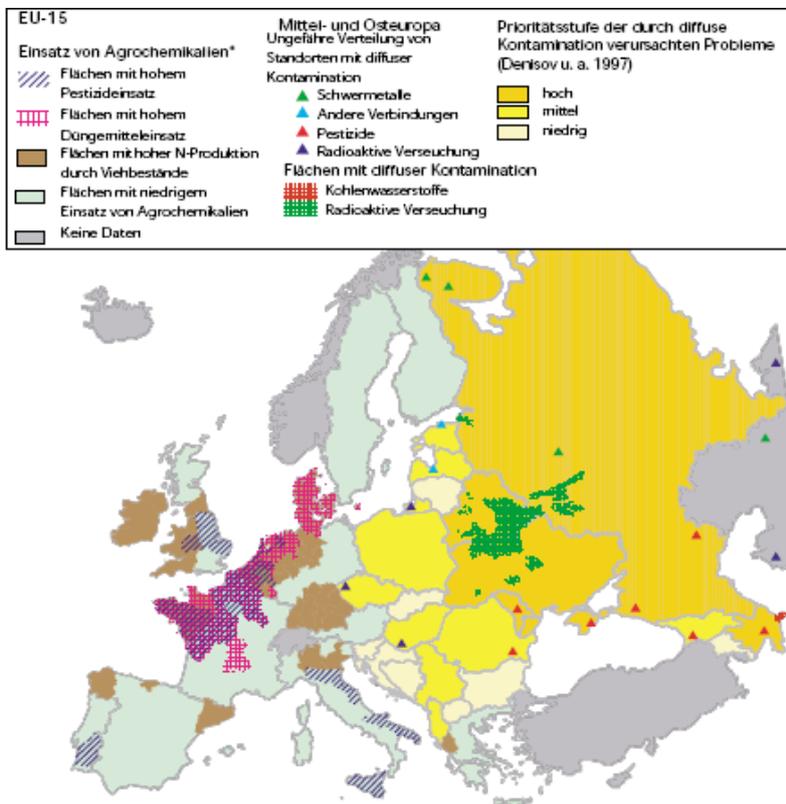


Abbildung 13: Mögliche Problemgebiete aufgrund diffuser Kontamination in Europa (Quelle: EEA 2002)

Speziell für den Bereich Nanotechnologie existiert eine Studie, die Hinweise zu Marktpotentialen geben kann. Die eher konservative Marktstudie des BCC Research beziffert den Umsatz nanotechnologischer Anwendungen im Umweltbereich im Jahr 2005 mit 374,9 Millionen US-\$ und prognostiziert ein Wachstum von 75,2% auf mehr als 6 Milliarden US-\$ für das Jahr 2010 (BCC Research 2006b). Hierbei werden nanotechnologischen Verfahren zur Bodensanierung hohe Potentiale eingeräumt mit Wachstumsraten von über 100% auf einen Umsatz von 2,3 Mrd. US-\$ im Jahr 2010.

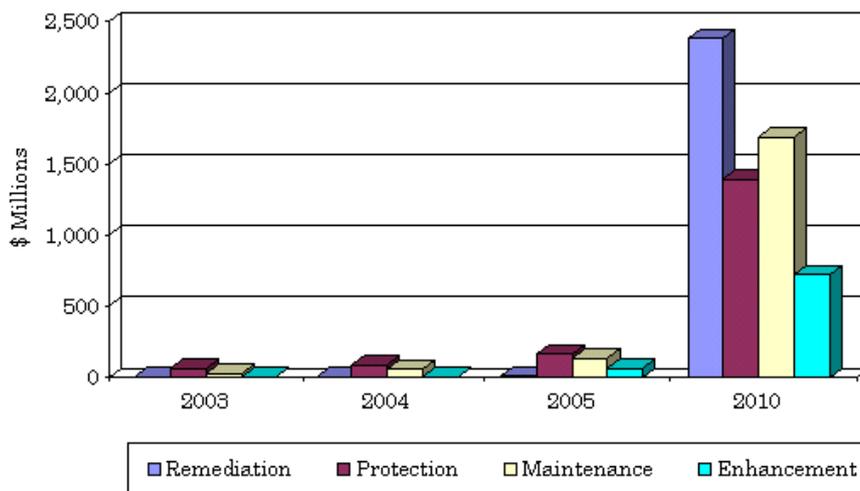


Abbildung 14: Mögliche Problemgebiete aufgrund diffuser Kontamination in Europa (Quelle: EEA 2002)

Es wird dabei zu Grunde gelegt, dass Nanotechnologien bei der Sanierung von Boden das Potential haben, herkömmliche Verfahren zu verdrängen. Intensive Forschungen zu Umweltfolgen der Nanotechnologie und den hieraus zu ziehenden Schlüssen und Konsequenzen, werden langfristig deren breite Marktanwendung mitbestimmen.

Schwellen- und Entwicklungsländer

Im Grunde kann hinter keines der im Bodenschutz determinierten 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 allein aufgrund wirtschaftlicher, sozialer und kultureller Gegebenheiten nicht angegangen werden (Commander 1989). Dies birgt zum einen großes Potential für den Export von „Wissen“, Dienstleistungen und Technologien, zeigt aber zum anderen auch, dass sich die notwendigen Prioritäten im globalen Umweltschutz ändern müssen.

Die Technologien und das Wissen zur Reduzierung und zum Teil auch zur Bewältigung der dringendsten Bodenprobleme sind in den Industrieländern vorhanden. Im Technologiebereich besteht in Entwicklungsländern aber eher Bedarf an angepassten reifen Technologien und Lowtech- bzw. no-tech-Lösungsstrategien und damit hohes Exportpotential für derartige

technologische Entwicklungsstufen aus allen im Kapitel Bodenschutz dargestellten „Problemfeldern“.

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, ressourcenverschwendenden Wirtschaftsweise überspringt, um gleich zu einer zumindest weitgehend 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 zu erreichen (WGBU 2005).

In den Schwellen- und 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, bei denen Technik und entsprechende „addon“-Dienstleistungen angeboten werden, handeln. 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.

Sonderling „Problemfeld Bodenerosion, Desertifikation und Versalzung“

Das Problemfeld „Bodenerosion, Desertifikation und Versalzung“ ist getrennt zu betrachten und zu behandeln, da es *weltweit* als potentieller Zukunftsmarkt für die entsprechenden Technologien einzustufen ist. Die verschiedenen Formen der Bodengefährdung sind aber nicht alle gleichermaßen ausgeprägt und gravierend. Wenn man an Desertifikation (Trockengebiete) und Versalzung (aride und semiaride Gebiete) denkt, haben die Symptome teilweise einen stark regionalen bzw. auch nur lokalen Bezug. Dennoch besteht in diesen Bereichen starker Handlungsbedarf, besonders im Blick auf einen progressiven Bedarf an Nahrungsmitteln.

Technologien werden aber nie die alleinige Lösung für derartige Bodengefährdungen sein, da sich Desertifikation und Versalzung auf naturräumliche und sowie sozioökonomische Veränderungen zurückführen lassen. Entscheidend in diesem Problemfeld ist das Zusammenwirken von technologischer Lösung und optimalen inneren und äußeren 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 (WGBU 1994). Schaut man auf das Datum der Veröffentlichung (1994), dann sieht man, dass es die erforderlichen Erkenntnisse schon sehr lange gibt, aber diese bisher arglos nicht, nur sehr ungenügend oder sehr lokal begrenzt umgesetzt wurden.

Exkurs: Boden und Klimawandel (s. auch Abschnitt 2.3.6)

Die Wechselwirkung zwischen Klimaänderung und Veränderungen in der Bodenqualität ist komplexer Natur und wird noch nicht in ihrem vollen Ausmaß erkannt. Bewertungen der Auswirkungen von Klimaänderungen auf Eigenschaften und Verhalten des Bodens sowie Erkenntnisse zum Einfluss des Bodens auf globale Klimaänderungen beruhen zumeist auf hypothetischen Szenarien und Daten, die unter kontrollierten Bedingungen gewonnen wurden. Somit sind die Voraussagen eher qualitativ als quantitativ definiert und könnten beachtliche systematische Fehler enthalten (EUA 2002).

Weltweit befindet sich so viel Kohlenstoff in den Böden, dass sich bei seiner plötzlichen Freisetzung der Gehalt an Kohlendioxid 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 – chemische Reaktionen verlaufen bei höheren Temperaturen schneller – zusätzliche Mengen an Kohlendioxid 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 neuerdings auch als CO₂-Senke (C-Sequestration) in der Diskussion steht, muss man sich die Fragen stellen, was diese Nutzung für Folgen haben wird und welche Konflikte durch die konkurrierenden Nutzungsansprüche entstehen werden. Zum einen speichern Böden in Form von Kohlenstoff gewaltige Mengen an CO₂ im Humus, zum anderen weiß man nur wenig über die Eigenschaften und die Umsetzungsprozesse des Humus. Das Potential von Böden als Senken für CO₂ ist begrenzt, weil langfristig nur wenig neuer Humus entsteht. 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. Ein von Greenpeace veröffentlichter Report zeigt auf, dass „sie bis zu einem Drittel der weltweiten Treibhausgase erzeugt – unter anderem durch die Überdüngung der Äcker mit Stickstoff“ (scinexx 2008). Die Landwirtschaft ist klimafreundlich umzugestalten (z.B. Kunststoffdünger-Einsatz verringern, brachliegende Böden vermeiden). 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 Natürdung, 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 aber auch die Tau- und Wiedergefriervorgänge von Permafrost. 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 auch 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. Es fehlt die zusammenfassende komplexe Darstellung und Analyse aller mit den Klimaänderungen in Zusammenhang stehenden Sachverhalte zum Bodenschutz und eine darauf aufbauende Ableitung/Empfehlung geeigneter Methoden- und Anpassungsstrategien. Somit besteht zum einen großer Bedarf in der Förderung von Forschungsprojekten (Folgen des Klimawandels auf die Böden, Einfluss des Bodens auf das Klimageschehen) und zum anderen an der interdisziplinären Erarbeitung von Maßnahmen bzw. Anpassungsstrategien durch einem „Akteurskonglomerat“ aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

5.5 Akteure und Netzwerke

Dass Bodenschutz eine komplexe Querschnittsaufgabe ist, zeigt sich bei der Zusammenstellung einer Auswahl von globalen, europäischen und nationalen Akteuren. Allein die Vielzahl von staatlichen Institutionen macht deutlich, dass Bodenschutz Bestandteil vieler umweltrelevanter Politikfelder ist. Der Bodenschutz ist auf allen Ebenen bis hin zu Verbänden vielschichtig und prominent vertreten und vernetzt. Auch die Grundlagen- und die Angewandte Bodenforschung sind breit aufgestellt, so dass eine stete und gute Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern, -ingenieuren etc. realisiert werden kann, die international einen sehr guten Ruf genießt. Die Forschung bildet die Grundlage dazu, dass dasjenige Wissen generiert wird, das erforderlich ist um die Rechtsgrundlagen für einen vorsorgenden Bodenschutz zu schaffen. Bodenforschung wird in einer großen Anzahl von Disziplinen betrieben, wobei in der folgenden Enumeration nur die wichtigsten Institutionen aufgeführt werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Mehrzahl der Akteure des Bodenschutzes sehr eng miteinander kooperiert, Es gibt darüber hinaus aber einzelne communities, die sich deutlich voneinander abgrenzen.

Globale Institutionen

CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research	www.cgiar.org/#CGIAR
CIESIN	Centre for International Earth Science Information Network	www.ciesin.org
FAO	Food and Agricultural Organisation of the United Nations (Welternährungsorganisation)	www.fao.org
GAIM	Global Analysis, Integration and Modelling	http://gaim.unh.edu/
GCTE	Global Change and Terrestrial Ecosystems	www.gcte.org
GV	Geologische Vereinigung e.V.	www.g-v.de
ICRI-SAT	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics	www.icrisat.org
IFOAM	International Federation of Organic Agriculture Movements	www.ifoam.org
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry	www.igac.noaa.gov
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme	www.igbp.kva.se
IHSS	International Humic Substances Society	www.ihss.gatech.edu/
INQUA	International Union for Quaternary Research	www.inqua.tcd.ie
IPA	International Permafrost Association	www.ipa-permafrost.org
IPCC	International Panel of Climate Change	www.ipcc.ch

IRRI	International Rice Research Institute	www.irri.org
ISO FAR	International Society of Organic Agricultural Research	www.isofar.org
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre	www.isric.org
IUSS	International Union of Soil Sciences	www.iuss.org
NOAA	Paläoklimatologie-Programm der National Oceanic and Atmospheric Administration	www.ncdc.noaa.gov/paleo/index.html
OECD	Food, Agriculture and Fisheries	www.oecd.org/department/0,3355,en_2649_33727_1_1_1_1_1,00.html
UNEP	United Nations Environment Programme	www.unep.org
WMO	World Meteorology Organisation	www.wmo.ch/pages/index_en.html
WWF	World Wide Fund for Nature	www.wwf.de

Europäische Institutionen

EC	European Commission, Bodenschutzpolitik der Europäischen Union	http://ec.europa.eu/environment/soil/
ECSSS	European Confederation of Soil Sciences Societies	www.ecss.net/web/frontend/view.php?MENUID=230
EEA	Europäische Umweltagentur	www.eea.europa.eu/themes/soil
ESB	European Soil Bureau	
Übersicht	Europäische geowissenschaftliche Institute	www.uni-mainz.de/FB/Geo/Geologie/GeoInst/Europa.html
UNEP	Regionalbüro für Europa	www.unep.ch

Staatliche Einrichtungen/Behörden

BfN	Bundesamt für Naturschutz	www.bfn.de
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	www.bmbf.de
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Grundsätze der guten fachlichen Praxis, Agrarumweltmaßnahmen zur Förderung besonders umweltgerechter Wirtschaftsweisen nach dem Grundsatz der markt- und standortangepassten Landbewirtschaftung)	www.bmelv.de
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	www.bmu.de
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Fragen der Raumordnung, der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung, des Flächenverbrauchs und der Versiegelung)	www.bmvbs.de
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung (bei Bodenfragen im Zusammenhang mit militärischen Liegenschaften)	www.bmvg.de
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (bodenrelevante Fragen des Bergbaus sowie des Produktumweltschutzes)	www.bmwi.de
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	www.bmz.de
UBA	Umweltbundesamt	www.uba.de

Institutionen/Institute und Bund-/Länderarbeitsgruppen

BGR	Bodenkunde in der Bundesanstalt für Geo-	www.bgr.bund.de/cln_030/nn_462814/
-----	--	--

	wissenschaften und Rohstoffe	DE/Themen/Boden/boden__node.html __nnn=true
BLAG NE	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Nachhaltige Entwicklung	www.blak-ne.de
BLAC	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Chemikalien-sicherheit	www.blac.de
DBG	Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft	www.dbges.de
DGG	Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften	www.dgg.de
DRL	Deutscher Rat für Landespflege	www.landespflege.de
GEOMAR	Leibniz-Institut für Meereswissenschaften	www.ifm-geomar.de
GFZ	GeoForschungszentrum	www.gfz-potsdam.de
GUG	Gesellschaft für Umweltgeowissenschaften	www.gug.org
GTZ	Gesellschaft für technische Zusammenarbeit Max-Planck-Institut für Biogeochemie	www.gtz.de www.bgc-jena.mpg.de
LABO	Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz	www.labo-deutschland.de
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall	www.laga-online.de
LAI	Länderausschuss für Immissionsschutz	www.lai-immissionsschutz.de
LANA	Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz	www.la-na.de
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser	www.lawa.de
SRU	Rat von Sachverständigen für Umweltfragen	www.umweltrat.de
WBB	Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz	
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Global Umweltfragen	www.wbgu.de
ZALF	Zentrum für Agrarlandforschung	www.zalf.de

Verbände

AGÖL	Arbeitsgemeinschaft ökologischer Landbau Altlastenforum Baden-Württemberg	www.altlastenforum-bw.de
BÖLW	Bund ökologische Lebensmittelwirtschaft	www.boelw.de
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz	www.bund.net
BVBA	Dachverband – Bundesvereinigung Boden und Altlasten	
BVB	Bundesverband Boden	www.bvboden.de
DBV	Deutscher Bauernverband	www.bauernverband.de
ITVA	Ingenieurtechnischer Verband Altlasten	www.itv-altlasten.de
VHE	Verbände der Humus- und Erdenwirtschaft	www.vhe.de
VgöD	Verband für Geoökologie in Deutschland	www.geoökologie.de

Netzwerke

Agranet	Informationsportal führender, deutscher Institutionen	www.agranet.de
BAIKUM	Umwelttechnologie Netzwerk	www.baikum.de
boden)hoch 4	Corporate Soil Competence (noch kein Inter- nettauftritt, geplant bis Ende 2007)	
CONTUREC	Kompetenznetzwerk Stadtökologie	www.conturec.de
DESERT *Net	German Competence Network for Research to Combat	www.desernet.de
ELSA	Europäisches Boden-Bündnis ELSA e.V.	www.bodenbuendnis.org
InnoLausitz	Unternehmensnetzwerk Boden Bauen Umwelt	
Kompetenzwerk	Umwelttechnik Rheinland-Pfalz	www.umwelttechnik.rlp.de
SNOWMAN	Europäisches Netzwerk für grenzüberschrei-	www.snowman-era.net

tende Forschungsprojekte

Universitäten/Forschungszentren		
Aachen	Geographie	www.geographie.rwth-aachen.de/
Bayreuth	Bodenkunde	www.geo.uni-bayreuth.de/bodenkunde/
	Bodenphysik	www.bayceer.uni-bayreuth.de/bophy/
	BITÖK	www.bitok.uni-bayreuth.de
Bamberg	Physische Geographie	http://web.uni-bamberg.de/~ba5gg1/home.html
Berlin	TU - Bodenkunde	www2.tu-berlin.de/fb7/ioeb/bodenkunde/index.html
Bochum	Bodenkunde	www.geographie.ruhr-uni-bochum.de/institut/sites/forschung/physische/bodenkunde.html
	Geowissenschaften	www.ruhr-uni-bochum.de/geo-fak/
Bonn	Bodenwissenschaften	www.boden.uni-bonn.de
	Landwirtschaft	www.lwf.uni-bonn.de
Braunschweig	Geoökologie	www.tu-braunschweig.de/geoekologie
Bremen	Bodenkunde	www.bodenkunde.uni-bremen.de
Bremerhaven	AWI (Alfred-Wegener-Institut)	www.awi.de/de/
Cottbus	Bodenschutz und Rekultivierung	www.tu-cottbus.de/bodenschutz/deutsch/index_de.htm
Dresden	Institut für Bodenkunde und Standortlehre	http://boku.forst.tu-dresden.de
Duisburg	Abteilung Angewandte Bodenkunde	www.uni-due.de/biologie/bodenkunde/
Erlangen	Geologie	www.geol.uni-erlangen.de
	Geographie	www.geographie.uni-erlangen.de
Essen	Abteilg. Angewandte Bodenkunde	www.uni-due.de/biologie/bodenkunde/
Frankfurt a.M.	Physische Geographie	www.geo.uni-frankfurt.de/ipg/
Freiberg	FG Bodenkunde und Gewässerschutz	www.web-jschmidt.de
	Mineralogie	www.tu-freiberg.de/studium/mineralogie.html
Freising-Weihenstephan	TU München, Bodenkunde	www.wzw.tum.de/bk/
Gießen	Bodenkunde und Bodenerhaltung	www.uni-giessen.de/bodenkunde/
Göttingen	Agrarwissenschaften	www.uni-goettingen.de/de/sh/5855.html
	FZ Walökosysteme	http://wwwuser.gwdg.de/~fzw/
	Bodenkunde und Waldernährung	http://wwwuser.gwdg.de/~ibw/
	Geowissenschaften und Geographie	www.uni-goettingen.de/de/18521.html
	Abteilung Geochemie	www.uni-geochem.gwdg.de
Greifswald	Geographie und Geologie	www.uni-greifswald.de/~geograph/
Halle	Bodenkunde und Pflanzenernährung	http://bk.landw.uni-halle.de
Hamburg	Bodenkunde	www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/index.htm
	Bibliothek Geowissenschaften	www.sub.uni-hamburg.de/informationen/rrz/biblio/FB15.html
Hannover	Bodenkunde	www.unics.uni-hannover.de/bodenkunde/
Jena	Geochemie	www.igw.uni-jena.de/inhalt/fachb/geochem/geochem.html

Jülich	Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre	www.fz-juelich.de/portal/uk_icg
Karlsruhe	Geographie und Geoökologie	www.bio-geo.uni-karlsruhe.de
Kassel	Bodenkunde Witzenhsn. FG Landschaftsökologie/Bodenkunde	www.wiz.uni-kassel.de/bok/index.html www.uni-kassel.de/fb13/fgloebo/
Kiel	Pflanzenernährung und Bodenkunde	www.uni-kiel.de/plantnutrition_soilscience/
Mainz	Institut für Geowissenschaften Geographie	www.geowiss.uni-mainz.de www.geo1.uni-mainz.de
München	TU – Bodenkunde GSF Institut für Bodenökologie	www.wzw.tum.de/bk/ www.gsf.de/neu/Forschung/Institute/iboe_intro.php
Münster	Geowissenschaften Institut für Geoinformatik	http://fb14web.uni-muenster.de http://ifgi.uni-muenster.de/deutsch/
Oldenburg	Bodenkunde	www.uni-oldenburg.de/bodenkunde/
Osnabrück	Bodennutzung und Bodenkunde	www.al.fh-osnabrueck.de/ms-boden.html
Potsdam	Landschaftsökologie und Bodenkunde Bodenlandschaftsforschung	www.uni-potsdam.de/u/Geoökologie/institut/bodenkunde/lehrstuhl.html www.uni-potsdam.de/u/Geoökologie/institut/bodenlandschaft/lehrstuhl.html
Regensburg	Geographie Institut für Geographie	www.uni-potsdam.de/Geographie/ www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/phil_Fak_III/Geographie/
Rostock	Bodenkunde	www.auf.uni-rostock.de/ibp/en/index.html
Stuttgart	Bodenkunde	www.uni-hohenheim.de/1597.html?state=wsearchv&search=13&einrichtung.eid=56
Trier	Bodenkunde	http://boden.uni-trier.de
Tübingen	Geowissenschaften	www.uni-tuebingen.de/geo/
Wiesbaden	Bodenkunde und Pflanzenernährung	www.campus-geisenheim.de/Bodenkunde-und-Pflanzenernaehrung.609.0.html
Würzburg	Geographie	www.geographie.uni-wuerzburg.de

5.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

„Boden ist Lebensraum für Menschen, Tiere und Pflanzen und kann in vielerlei Hinsicht als Grundlage menschlichen Handelns sowie sozialer und gesellschaftlicher Organisation angesehen werden. Aus der Sicht des Individuums kommen dem Boden grundlegende Funktionen zu. Er ist unverzichtbare Grundlage der Ernährung, Grundlage für die Einrichtung von Wohn-, Arbeits- und Freizeitstätten, Grundlage für Bedürfnisse nach Kontrolle über Raum und Besitz“ (WBGU 1994, 7). Als Standort für höhere Pflanzen ist Boden Grundlage für pflanzliche Primärproduktion durch Photosynthese und bildet den Ausgangspunkt für die Nahrungskette. Er ist damit Lebensgrundlage für alle Lebewesen auf der Erde (Beese 1997, 18). Darüber hinaus erfüllt Boden vielfältige Funktionen, die für die Existenz und Entwicklung menschlicher Gesellschaften essentiell sind, z.B. bei der Trinkwasserversorgung, als Bau-

stoff und Lieferant von Rohstoffen, als Lagerstätte fossiler Energieträger, als natur- und kulturhistorisches Archiv, aber auch als Bezugspunkt im für Bodenständigkeit und Heimat.

Der Boden als wesentliches Element unserer Existenz wird in seinen wesentlichen Funktionen (§2 Abs. 2 BBodSchG) durch die Folgen aktueller und zurückliegender menschlicher Aktivitäten gefährdet und ist zum Teil bereits zerstört. Stoffeinträge in Böden, Untergrund und Grundwasser aus Altablagerungen und Altstandorten, aus luftverfrachteten Schadstoffen und anderen Quellen stehen längst nicht mehr im Gleichgewicht mit den Filter-, Puffer-, und Regelungsfunktionen des Umweltmediums. Auch in Betrieb befindliche Anlagen tragen und tragen auch weiterhin, besonders in Schwellen- und Entwicklungsländern, zum Problem der Bodenkontaminationen bei, da die Kette von Produktion und Konsum nicht hermetisch abgeriegelt ist. Abfälle und Emissionen werden weiterhin unvermeidbar sein. Ferner erwächst eine neue Herausforderung rund um die explosionsartig wachsenden urbanen Megazentren. Das Ausmaß der globalen Bodendegradation ist alarmierend. Tagtäglich gehen große Flächen durch Erosion verloren oder werden versiegelt und überbaut und 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 (WGBU 1994 in: Oldemann 1997).

Die aufgezeigten Gefährdungen sind global betrachtet kein marginales Umweltproblem mehr, sondern haben eine Tragweite erreicht, die *„ebenso bedrohlich sind wie der globale Klimawandel oder der fortschreitende Verlust der Biodiversität“* (WBGU 1994). Im Gegenteil, die Folgen der Bodendegradation werden in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten den Folgen des Klimawandels *deutlich vorseilen*. Die Bodenprobleme werden noch extremer in Erscheinung treten, wenn sich aufgrund des Klimawandels die Schwankungen der Witterung verstärken und sich Ökozonen großräumig verschieben.

Trotz dieser negativen Zukunftsvisionen findet Bodenschutz in der Öffentlichkeit und im Rahmen aktueller politischer Diskussionen und Strategieentwicklungen wie z.B. in der High-tech-Strategie (BMBF 2006) noch zu wenig Beachtung. Der Boden und die Bodenkunde kommen nicht aus ihrer „Stiefkind“-Rolle heraus. Es darf nicht wieder der Fehler gemacht werden, den Bodenschutz in den Hintergrund zu schieben. Frédéric Albert Fallou erkannte schon 1862 „Eine Nation, die ihren Boden zerstört, zerstört sich selbst.“

Daraus ergeben sich abschließend folgende Handlungsempfehlungen, die zum derzeitigen Stand des Projektes aber lediglich Thesencharakter haben und auch nur haben können und die in der zweiten Projektphase zu evaluieren, zu validieren und im Bedarfsfall anzupassen sind:

1. Der Schutz des Bodens muss stärker und zeitnah in den Blickpunkt rücken, er ist insbesondere auf die intergenerationelle bzw. Langzeit-Dimension abzustimmen. Damit soll die Vorsorge in der „Pflege“ des Bodens einen anderen Stellenwert erhalten.
2. Global statt Regional: Aufgrund der weltweiten Verbreitung, vor allem der Degradation und eines raschen und gründlichen Exports der Bodenprobleme durch die geophysikalische, biochemische und zivilisatorische Fernwirkung im System Erde, erfordern die Bodengefährdungen global koordinierte Gegenmaßnahmen. Diese Faktoren machen eine regionalisierte Betrachtung und Einnordung der Problemfelder unter einem stän-

digen globalen Blick unerlässlich. Die Probleme werden dadurch nicht monokausal betrachtet, sondern in ihren natürlichen und anthropogenen Interaktionen (WGBU 1994). Erst aus dieser Zusammenschau lassen sich geeignete lokal-, regional- und globalspezifische Vermeidungs- und Sanierungsstrategien – „nationale Lösungsansätze“ projektieren.

3. Vorbeugen statt Nachsorgen: Im Vollzug sind präventive Maßnahmen viel stärker als bisher erforderlich. Vorsorgender Bodenschutz stellt erhöhte Anforderungen an die Diagnose faktischer und potentieller Bodenprobleme. Diese wiederum erfordern wirksame und teilweise neuartige Technologien zur frühzeitigen und flächendeckenden Erkennung (potentiell) schädigender Einwirkungen auf den Boden und zur Verifikation von Folgen eingeleiteter Aktionen und ihrer Überwachung
4. Die Bodenschutzgesetzgebung ist zu sehr auf die Altlasten fixiert, zukünftig müssen auch für den Kreislaufgedanken in der Flächennutzung und den vorsorgenden Bodenschutz gesetzliche Rahmenbedingungen geschaffen werden.
5. Da die Erosionsprobleme (weltweit) nicht ausschließlich durch die konservierende Bodenbearbeitung gelöst werden können, sind weitergehende Analyseverfahren und Maßnahmen zu entwickeln und praxistauglich zu machen. Die „Ausstrahlungswirkung“ des Bodenschutzrechts auf andere Rechtsbereiche, insbesondere durch die Berücksichtigung der Vorsorgewerte bei entsprechenden Maßnahmen und Vorschriften, führt in der Folge zu einem verbesserten Schutz der Böden durch die übrigen relevanten Rechtsbereiche.
6. Weiterentwicklung der Bodenwissenschaft sui generis als eigenständiger Wissenschaftsbereich im Verständnis einer „Geopedologie“ und weniger als Teildisziplin anderer Wissenschaften
7. Aufbau von Transferstellen: Beratungsleistungen hinsichtlich globaler Fragen zur Bodenbelastung wie Desertifikation, Bodenverluste durch Erosion, Übernutzung und Kontaminationen
8. In den Schwellen- und Entwicklungsländern wird es vor allem um den Export von Dienstleistungen, den Wissenstransfer und Strukturbildende Maßnahmen gehen; ausgenommen sind die Technologien der Altlastensanierung. 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. Der Zusammenhang von Armut und Bodendegradation ist ein Beispiel dafür wie elementar die entwicklungspolitische Arbeit war, ist und sein wird.
9. Deutschland sollte die Funktion eines „Multiplikators“ übernehmen. Speziell in Entwicklungsländern ist eine Voraussetzung für den Erfolg, dass die Menschen in die Lage versetzt werden, ihre Probleme selbst zu analysieren. Gemeinsam über Beratung, Begleitung ist über das richtige Vorgehen zu entscheiden. Letztendlich wird ein Export von Technologien bzw. Dienstleistungen in den Entwicklungsländern nur funktionieren und erfolgreich sein, wenn die Beteiligten die Sache selbst in die Hand nehmen. Hilfe zur Selbsthilfe ist das A und O. Die Zusammenarbeit sollte Anstöße geben, Wissen

vermitteln, beraten und unterstützen (capacity-building). In diesen Ländern kann aus der Perspektive der Menschen „No-tech“ oder „Lowtech“ zu *ihrer* „Hightech“ werden.

10. Vor allem in Ländern mit unzureichendem Erfahrungspotential bezüglich technologischer Verfahren beispielsweise im Bereich Altlasten ist eine Demonstration der Funktionsfähigkeit der Technologie/des Verfahrens bzw. die Sinnhaftigkeit der Dienstleistung unter landestypischen Rahmenbedingungen unerlässlich. Nur von derartigen Technologiebasen ist eine Signalwirkung im jeweiligen Land für die entsprechende Technologie bzw. das Verfahren zu erwarten.
11. Durchführung von Marktstudien für Umwelttechnologien aus dem Bereich „Bodenschutz“
12. Zukünftige Themen im Bodenschutz:
 - Flächeninanspruchnahme, Rekultivierung und Sanierung
 - Boden und Klima
 - Boden und Landnutzung(sänderung = “local change“)
13. Zu fördernde Forschungsthemen unter dem Aspekt einer intensiveren Vernetzung von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung:
 - Wechselwirkungen zwischen Klimaänderungen und den Veränderungen des Bodenzustandes sind sehr komplexer Natur und noch nicht in ihrer Gesamtheit untersucht. Bisher standen die Vorhersage und Quantifizierung im Vordergrund. Zukünftig ist eine Betrachtung der Gesamtprozesse (Wasserhaushalt, Gehalt an organischer Substanz) und der Wechselwirkungen zwischen Boden, Vegetation, Atmosphäre und Klima notwendig. Es fehlt die zusammenfassende komplexe Darstellung und Analyse aller mit den Klimaänderungen in Zusammenhang stehenden Sachverhalte zum Bodenschutz und eine darauf aufbauende Ableitung/Empfehlung geeigneter Methoden- und Anpassungsstrategien. Zudem muss von der exzessiven CO₂-Dominierung in der Klimadiskussion Abstand genommen und der Boden auch als Quelle und Senke der anderen Klimagase in den Blickpunkt gerückt werden. Betroffene Fachbereiche müssen ressortübergreifend forschen und zusammenarbeiten.
 - Landschaft/Feld: Remote Sensing, Upscaling – Geostatistik, Modellierung – Verifikation, Langzeitversuche
 - Mikroskopisch/molekular/atomar: Molekularbiologische Methoden, Isotopentechniken, Ableitung allgemeingültiger Informationen für die molekulare Interaktion von z.B. organischen Molekülen, wie beeinflussen molekulare Eigenschaften von Substanzen deren Retention im Boden
 - Notwendige neue methodische Ansätze: „bridging the gap“ zwischen den Skalen (räumliche Skalen wie Feld-, Beobachtungs-, Prozess- und Modellskala, zeitliche Skalen) und zwischen Messung und Modell
 - Besseres Prozessverständnis (Verhalten von Chemikalien sowie anthropogenen Substanzen, Erosion, Kohlenstoffdynamik, Effekte von Landnutzungsänderungen)

- Prognosefähige Modelle (Wasser- und Stoffflüsse, z.B. Erosion, Boden-genesemodelle, biogeochemische Modelle)
 - Weiterentwicklung innovativer Messtechnologien (Entwicklung und Integration geophysikalischer und nicht-invasiver Messverfahren für z.B. „precision farming“ und precision irrigation“)
 - Terrestrische Observatoria (integrierte Beobachtung terrestrischer Systeme und Schwerpunkt auf die vadose Zone, Erfassung von Langzeitdaten zur Entwicklung und Validierung von Modellen), weltweiter Ausbau von Bodenmesssystemen (Dauerbeobachtungsflächen), hoher Bedarf an Geoinformationen
 - Bedarf zur Entwicklung moderner, wissensbasierter Bodenmanagementsysteme für die Bereiche Rekultivierung, Flächenrecycling und Landnutzung, bedeutsam ist der internationale Kontext (Vernetzung von prozess- und strukturorientierter Grundlagen- und Anwendungsforschung)
 - Forschung zu Anbausystemen für multifunktionale Bodennutzung (z.B. Biomasse-/Nahrungsproduktion, Agroforestry)
 - Prozessnähere Ansätze im Bereich der Bodenerosion auf Punkt-, Feld und/oder Erzeugungsebene
 - Forschungsbedarf wird auch durch die unbedingt notwendige Erarbeitung weiterer und neuer Vorsorgewerte erzeugt
14. Förderungswürdige und entwicklungsfähige Umwelttechnologien aus dem Bereich des Bodenschutzes:
- Sanierungs- und Rekultivierungstechnologien
 - (geophysikalische und nicht-invasive) Untersuchungsverfahren
 - Analysetechnische Verfahren
 - Technologien zur Gefährungsabschätzung bei kontaminierten Böden und Grundwässern
 - „Precision farming und irrigation“-Systeme
 - Querschnittstechnologien wie beispielsweise aus dem Bereich der Fernerkundung, Bau- und Fundationswirtschaft
 - Technologien und Verfahren der Erosionsbekämpfung
 - Technologien und Verfahren der konservierenden Bodenbewirtschaftung (nachhaltige Nutzungssysteme) im Hinblick auf einen steigenden Bedarf an Agrarprodukten durch eine stetig zunehmende Bevölkerungszahl

Literatur

- AAV (Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband) (2007): AAV und Rhein-Sieg-Kreis sanieren CKW-Altlast in-situ mit Nanotechnik http://www.aav-nrw.de/aav/dokumente/projektinformation/bornheim_ferster.pdf
- Akkermann, M. (2004): Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss, Doktorarbeit, 2004, Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Universität Hannover
- baulinks (2007): Sächsische Bewässerungsmatte bringt selbst Wüsten zum Blühen, BauNachrichten, <http://www.baulinks.de/webplugin/2007/1frame.htm?1381.php4>, Stand 24.08.2007
- BCC Research (Business Communications Company Inc.) (2006a): Global Markets for Hazardous Waste Remediation Technologies. Report ID: ENV007A; April 2006
- BCC Research (Business Communications Company Inc.) (2006b): Nanotechnology in Environmental Applications. Report ID: NAN039A. Mai 2006 <http://www.bccresearch.com/nanotechnology>, Stand 5.10.2007
- BBodSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz) (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17. März 1998. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 16, 502-510. Bonn.
- BBodSchV (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) (1999): Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 12. Juli 1999. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 36, 1554-1582. Bonn.
- Beese, F. (1997): Multitalent. Die vielfältigen Funktionen des Bodens. – Politische Ökologie, 15. Jg., Sonderheft 10 „Bodenlos“: S. 17-22
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2006): Die Hightech-Strategie für Deutschland. 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, Online-Quelle: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3337.pdf>, Stand: 14.03.2008
- Bender (2007): Ingenieurbiologie – Böschungssicherung – Erosionsschutz, http://www.bender-rekultivierungen.de/bender/Ingenieurbiologie-_Erosionsschutz-43-3-3-.html, Stand 5.10.2007
- Birke, V.; Burmeier, H.; Rosenau, D. (2000): Reaktive Wände zur innovativen Altlastensanierung – Vorstellung des BMBF-Verbundvorhabens RUBIN, Gehrden
- Blum, P. (2006): Schadstoffquellenerkundung mit dem Direct-Push-Verfahren, altlasten-forum Info, 1, 2006, S. 47-49
- BMZ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit) (2005): Desertifikationsbekämpfung 2005, BMZ-Materialien Nr. 10
- BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Hrsg.) (2001): Leben in der Unterwelt. BUNDargumente Berlin
- Bundesregierung (2002): Bodenschutzbericht der Bundesregierung für die 14. Legislaturperiode, Berlin, 2002
- Choudhury, K.; Kraemer, R.A.; Hollerbuhl, S.; Nickel D. (2001): Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Anforderungen an den nachhaltigen Bodenschutz: Kriterienentwicklung zur Leistungsfähigkeit von Bodenfunktionen, Endbericht zum Vorhaben 298 73 249 des UBA, Berlin.
- Commander, S. (1989): Structural Adjustment and Agriculture. Theory and Practice in Africa and Latin America. Oxford: Heinemann.

- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2007): High-Tech-Methoden zur Untergrundsondierung, Innovationen für die Umwelt, Ausgabe 19229-03/06, <http://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/10110609025787.pdf>, Stand 5.11.2007
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008a): Dezentraler Hochwasserschutz mit Mulden-Rigolen-System, Projektergebnisse, http://www.dbu.de/123artikel1866_341.html, Stand 10.01.2008
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008b): Algen als Umweltdetektive, Projektergebnisse, http://www.dbu.de/123artikel1957_341.html, Stand 10.01.2008
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008c): Satellitengestützte Düngung, Projektergebnisse, http://www.dbu.de/123artikel27171_341.html, Stand 10.01.2008
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008d): Sensorgesteuerte Querhacke, Projektergebnisse, http://www.dbu.de/123artikel1936_341.html, Stand 10.01.2008
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008e): Bodenerkundung verbessert, Projektergebnisse http://www.dbu.de/123artikel2001_341.html, Stand 10.01.2008
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2008f): Reifenregler für Traktoren, Projektergebnisse, http://www.dbu.de/123artikel26994_341.html, Stand 10.01.2008
- Dräger, T.; Kraemer, R. A. (2004): Zusammenfassung Workshop „Europäische Bodenschutzstrategie“, Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik und Bayrisches Staatsministerium für Gesundheit und Verbrauch, 2004
- Dymek, H.-G. (2002): Neue Wege im Altlastenmanagement bei der Volkswagen AG, Akademie der Geowissenschaften zu Hannover e.V., Veröffentlichung, 20 (2002), S. 20-24
- 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, 2002
- EEA (European Environment Agency) (2007): Europe`s environment – The fourth assessment, Copenhagen, Denmark
- Geotechnologien (2007): HADU – Der dynamische Untergrund Hamburgs, Projektdarstellung, <http://www.geotechnologien.de/forschung/forsch2.11k.html>, Stand 12.11.2007
- Genios (German Business Information) (2007), Technische Textilien, http://www.genios.de/r_profisuche/TETE.htm, Stand 07.09.2007
- GTZ (Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit GmbH) (2007): Regionalprojekt Asien, Projekt im Auftrag des BMZ, <http://www.gtz.de/-de/dokumente/de-desert-regionalprojekte-asien.pdf>
- hypersoil (2007): Hypersoil – Lern- und Arbeitsumgebung zum Themenfeld „Boden“ im Unterricht, <http://hypersoil.uni-muenster.de/>
- IMAK (Interministerieller Arbeitskreis) (2002): Bericht des IMAK “Reduzierung der Flächeninanspruchnahme”, Umweltministerium Baden-Württemberg, <http://www.um.badenwuerttemberg.de/servlet/is/8376/IMAKBerichtEndfassung.pdf?command=downloadContent&filename=IMAKBerichtEndfassung.pdf>
- IDW (Informationsdienst Wissenschaft) (2007): Leipziger Umweltforscher erkunden Altlasten in Rumänien, Pressemitteilung vom 28.08.2007, <http://idw-online.de/pages/de/news223231>
- Jörissen, J.; Coenen, R. (2007): Sparsame und schonende Flächennutzung. Entwicklung und Steuerbarkeit des Flächenverbrauchs. Studie des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Bd. 20, edition sigma, Berlin
- Kneip, W. D. (1997): Fachliche Eckpunkte zur Regelung der Vorsorge und der Gefahrenabwehr bei Bodenveränderungen durch Bodenerosion.“ Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 83, S. 71-74

- KOM (2002): Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie an den Ausschuss der Regionen, „Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie, Kommission der europäischen Gemeinschaften, Brüssel, 2002
- Köplin, N. (2003): Bewässerung und was dann? – Problemfeld Versalzung, Hausarbeit, Wasserwirtschaft und Meliorationswesen WS 02/03, Universität Kiel, http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/seminar/ws02-03/koeplin_versalzung.pdf
- Kuntze, H.; Roeschmann, G.; Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. ISBN 3800126516
- Maak, N. (2001): Haushoch überlegen, Süddeutsche Zeitung, Artikel vom 12. März 2001
- Oldeman, L. R. (1997): Verlustrechnung – Bodendegradation als Bedrohung der Nahrungsmittelversorgung. In: Kümmerer, K., Schneider, M. und M. Held (Hrsg.): Bodenlos – Zum nachhaltigen Umgang mit Böden. Politische Ökologie 15, Sonderheft 10. München: oekom, S. 23-26.
- Petelkau, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtung. KTBL (Hrsg.), (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für eine gute fachliche Praxis. KTBL Arbeitspapier 266, S. 56-79
- Renn, O. (1996): Ökologisch denken – sozial handeln: Die Realisierbarkeit einer nachhaltigen Entwicklung und die Rolle der Kultur- und Sozialwissenschaften. In: Kastenholz, H.G.; Erdmann, K.-H. und M. Wolff (1996): Nachhaltige Entwicklung – Zukunftschancen für Mensch und Umwelt. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 79-117.
- Schröder, D. (2000): Böden der Erde: Entstehung, Verbreitung, Produktivität, Schädigung und Schutz. In: Geographie und Schule 126, S. 9-18.
- Stribny, B. (2002): Nutzung des geologischen Untergrundes – heute und morgen, Akademie der Geowissenschaften zu Hannover e.V., Veröffentlichung, 21, S. 40-42
- SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2000): Umweltgutachten 2000, Schritte ins nächste Jahrtausend, Drucksache 14/3363, http://www.umweltrat.de/02gutach/download02/umweltg/UG_2000.pdf, Stand 14.03.2000
- Tensar (Tensar International GmbH) (2007): Tensar Produktpalette – Ein- und Zweiaxiale Geogitter und Erosionsschutz, <http://www.tensar.de/Produkte.asp>, Stand 11.12.2007
- UBA (Umweltbundesamt); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz - Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation, Forschungsprojekt durchgeführt von: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Berlin), Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Karlsruhe), Roland Berger Strategy Consultants.Dessau, München, Berlin
- UFZ (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung) (2007a): Weiterentwicklung der Wasserrahmenrichtlinie notwendig, Pressemitteilung vom 14. November, 2007, <http://www.ufz.de/index.php?de=15562>, Stand 14.11.2007
- UFZ (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung) (2007b): Leipziger Umweltforscher erkunden Altlasten in Rumänien, Pressemitteilung vom 28. August 2007, <http://www.ufz.de/index.php?de=14914>, Stand 28.08.2007
- UFZ (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung) (2007c): Carbo-Iron, Fachbereich Biogeochemie/Technologie – Umwelttechnologie, <http://www.ufz.de/index.php?de=7038>, Stand 10.12.2007
- Umweltplan (2007): Umweltplan Baden-Württemberg Fortschreibung 2007, Entwurf zur Anhörung, <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/36055/Umweltplan.pdf?command=downloadContent&filename=Umweltplan.pdf>
- Umweltschutzbericht (2006): Kapitel 6: Boden, Altlasten, Flächenverbrauch, Landesamt für NRW, Düsseldorf.

- WBB (Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz, Hrsg.) (2002): Ohne Boden – bodenlos, Denkschrift zum Bodenbewusstsein, 2002.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Hrsg.) (1994): Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden. Jahresgutachten 1994. Bonn: Economica. Download: www.wbgu.de
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Hrsg.) (2005): Welt im Wandel – Armutsbekämpfung durch Umweltpolitik, Springer-Verlag, Berlin.
- Würfel, T.; Vetter R.; Unterseher, E.; Elsässer, M. (2002): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen, Merkblätter für die umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 25, Baden-Württemberg, Ackerbau-Bodenschutz-Grünland, Dezember. 2002, Ministerium für Ernährung und ländlichen Raum
- ZALF (Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.) (2007): Pre-agro II – Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung www.preagro.de, Projektdetails, http://lis4.zalf.de/programs/zalf_fprojekt/zhome_detail.aspx?fid=624&q=txtblock_link, Stand 12.12.2007

6 Schonung endlicher Ressourcen

6.1 Charakterisierung des Handlungsfelds

Zum Begriff der „endlichen Ressourcen“

Um ein komplexes Themengebiet wie die „Schonung endlicher Ressourcen“ darstellen zu können, ist es zunächst notwendig, die zentralen Begriffe zu definieren. Als „**natürliche Ressourcen**“ im weitesten Sinne gelten sowohl Rohstoffe als auch produktionsbedeutsame Umweltgüter, die zusammen die Basis für die wirtschaftliche Tätigkeit des Menschen bilden. Dazu gehören nach der Definition der Vereinten Nationen (2002) und der EU-Kommission (2003) biotische und abiotische Rohstoffe (Biomasse, Erze, fossile Energieträger etc.), Umweltmedien (Gewässer, Boden, Atmosphäre), strömende Medien (Wind, Geothermie, Gezeiten, Wasserkraft, Sonnenenergie) sowie der physische Raum und die biologische Vielfalt (Abb. 15).

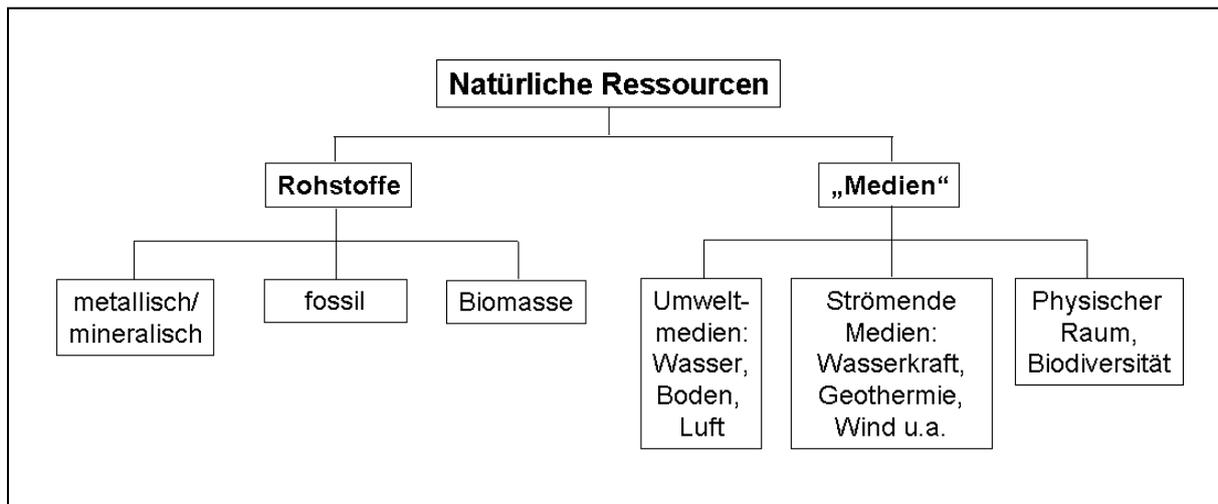


Abbildung 15: Klassifikation der natürlichen Ressourcen nach UN und EU

Dieser Klassifikation der natürlichen Ressourcen hat der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) eine weitere Kategorie von Ressourcen gegenübergestellt, die er als „**anthropogene Ressourcen**“ bezeichnet. Der Begriff umfasst die Gesamtheit der akkumulierten Materialien, die sich im Bestand der derzeit genutzten Güter (Infrastruktur, Bauwerke, Maschinen, Gebrauchsgüter etc.) oder in deponierten Abfällen befinden und die mit heutigen Technologien (wieder)verwertbar sind. Das anthropogene Stofflager wird umso bedeutsamer, je begrenzter die Reichweite der natürlichen Rohstoffe ist. So ist z.B. nach Schätzungen die Menge an Kupfer, die in den Industrieländern in anthropogenen Artefakten gespeichert ist (ca. 230-460 Mio.t), in etwa vergleichbar mit den derzeit geschätzten weltweiten Reserven (SRU 2005, 5). Für die Erschließung des anthropogenen Stofflagers spielt neben der Knappheit und der Preisentwicklung der primären Rohstoffe auch die Verbesserung der Technologien zur Wertstofftrennung und -rückgewinnung eine zentrale Rolle. Es zeichnet sich ab, dass in naher Zukunft nicht nur das Recycling von Abfällen wirtschaftlich rentabel

sein kann, sondern u.U. auch die Wertstoffgewinnung aus Altdeponien. Die erneute Aufbereitung des „tauben Gesteins“ in den Abraumhalden der Mineralgewinnung wird heute bereits in ausgewählten Fällen praktiziert.

Unter „**endlichen Ressourcen**“ versteht man in der Umweltdebatte in der Regel „erschöpfbare“ also „nicht-erneuerbare“ Ressourcen. Dazu gehören mineralische, metallische und fossile Rohstoffe. Das Prinzip der Nachhaltigkeit verlangt, mit solchen Rohstoffen sparsam umzugehen, um künftigen Generationen vergleichbare Nutzungsmöglichkeiten einzuräumen wie sie den heutigen zur Verfügung stehen. Dementsprechend fordert die zweite der grundlegenden Managementregeln zum Umgang mit den natürlichen Ressourcen: „Nicht erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktional gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Ressourcenproduktivität geschaffen wird“ (Enquete-Kommission 1998, 25).

Allerdings handelt es sich, wie schon die erste Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ angemerkt hat, bei der Unterscheidung zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen um eine grobe Vereinfachung eines sehr komplexen Zusammenhangs (Enquete-Kommission 1994, 44). Die Klassifizierung einer Ressource als erneuerbar oder nicht erneuerbar hängt in erster Linie von der Zeitdauer ab, die für ihre Neubildung bzw. Regeneration benötigt wird und die von einer Vegetationsperiode bis zu geologischen Zeiträumen reichen kann. Zu berücksichtigen ist ferner, dass prinzipiell erneuerbare Ressourcen (z.B. Wälder, Grundwasser) zu nicht erneuerbaren Ressourcen werden können, wenn die Bedingungen ihrer Regeneration durch die Art der Inanspruchnahme zerstört werden. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass es sich auch bei erneuerbaren Rohstoffen (Holz, Fette, Öle, Faserstoffe natürlichen Ursprungs) um „endliche“ Ressourcen handelt, mit denen sparsam umzugehen ist und bei deren Nutzung die gleichen Strategien zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität zur Anwendung kommen sollten wie bei den nicht erneuerbaren.

Unter „endlichen Ressourcen“ werden daher hier **erneuerbare und nicht erneuerbare biotische und abiotische Rohstoffe, die als Grundstoffe in der industriellen Produktion eingesetzt werden können**, verstanden. Die Auswahl der Rohstoffe, auf die der thematische Fokus gelegt wird, ergibt sich aus der Betrachtung der Probleme, die mit der Rohstoffnutzung einhergehen. „Medien“ im Sinne von Abbildung 15 sind nicht Gegenstand dieses Kapitels. Die Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft) sowie die Biodiversität werden in anderen Kapiteln des vorliegenden Berichts behandelt. Die sog. „strömenden Medien“ (Geothermie, Wind, Wasserkraft, Sonnenenergie), die in der Regel unter dem Begriff der erneuerbaren Energien zusammengefasst werden, bleiben in dieser Studie ausgenommen.

Probleme bei der Rohstoffnutzung

Wichtige Rohstoffe für die industrielle Produktion werden knapp. Die derzeit bekannten und nutzbaren Ölreserven werden nach Meinung vieler Experten in weniger als 40 Jahren erschöpft sein. Die weltweit geschätzten, förderfähigen Blei- und Zinkvorräte reichen bei heutigem Verbrauch noch 20 Jahre, die Kupfervorräte kaum länger (BMU 2007, 74). Bevölkerungszunahme, Wirtschaftswachstum und steigender Wohlstand, vor allem in den Schwellenländern, haben den Verbrauch erheblich anschwellen lassen. So stieg z.B. der Weltjahresverbrauch an Kupfer zwischen 1995 und 2005 um knapp 40 % (IKB 2006). Analysten

erwarten für den Zeitraum 2020-2025 eine Verdoppelung oder sogar Verdreifachung der Rohstoffnachfrage.

Der wachsende Druck auf die Rohstoffmärkte hat zwischen 2000 und 2007 zu einer Explosion der Preise geführt: So stieg z.B. der Aluminiumpreis um 80 %, der Preis für Eisenerz und Stahlschrott um 200% und der Kupferpreis um 300 % (BMU 2007; Bleischwitz/ Bringezu 2007). Kritisch ist die Situation vor allem bei einigen strategischen Metallen, die als Einsatzstoffe für bestimmte Schlüsseltechnologien auf absehbare Zeit unverzichtbar sind. Dazu gehören etwa Antimon und Indium, die beide einen Preisanstieg von über 1000 % in den letzten fünf Jahren zu verzeichnen hatten. Neben der absoluten Knappheit dieser Materialien ist die Versorgung zugleich mit hohen Risiken verbunden, weil ihre Förderung auf wenige Anbieterländer mit zum Teil instabilen politischen Verhältnissen konzentriert ist (Bleischwitz/ Bringezu 2007). Einschränkend ist jedoch anzumerken, dass die steigende Rohstoffnachfrage der letzten Jahr in eine Phase fiel, in der seitens der Rohstoffherzeuger vergleichsweise wenig neue Investitionen getätigt, so dass produktionsseitig nur geringe zusätzliche Kapazitäten verfügbar wurden. Es ist anzunehmen, dass viele Marktteilnehmer diese vorübergehende Verknappung des Rohstoffangebots auch gezielt zur Erzielung hoher Preise genutzt haben. Inzwischen ist wieder eine erhöhte Investitionstätigkeit (z. B. Erschließung neuer Kupfervorkommen, Zubau weiterer Raffinerie-Kapazitäten) zu beobachten. Dies ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass die Rohstoffe auf lange Sicht zur Neige gehen und sie daher sparsam zu verwenden sind.

Für ein rohstoffarmes Land wie Deutschland, das den Großteil seines Bedarfs über Importe decken muss, ist die angespannte Situation auf den Rohstoffmärkten besonders spürbar. Wegen des wirtschaftlichen Aufschwungs hat die Einfuhr von Rohstoffen in den letzten Jahren sogar noch deutlich zugenommen. Der Höhenflug der Rohstoffpreise belastet vor allem das produzierende Gewerbe. In Deutschland betragen die Materialkosten in diesem Sektor bereits 40 % des Bruttoproduktionswertes, während die Personalkosten lediglich 25% ausmachen. Dennoch liegt der Anstieg der Rohstoffproduktivität mit 75 % im langjährigen Mittel weit unterhalb des Anstiegs der Arbeitsproduktivität mit 270% seit 1960 (Bleischwitz/ Bringezu 2007). Im Vergleich zur Arbeitsproduktivität sind allerdings die Möglichkeiten zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität weit begrenzter, was auch an Defiziten in der Wissensdiffusion von der Forschung in die betriebliche Praxis liegt. Nach Abschätzungen der Deutschen Materialeffizienzagentur (demea) beträgt das Einsparpotential bei den Rohstoffkosten 20% (demea 2006). Vor diesem Hintergrund können innovative Techniken, die darauf ausgerichtet sind, solche Potentiale zu nutzen, in den kommenden Jahren mit erheblichen Wachstumschancen rechnen.

Die Beschleunigung des Rohstoffverbrauchs führt außerdem zu gravierenden Umweltbelastungen. Der Abbau von Rohstoffen ist mit schwerwiegenden Eingriffen in den Naturhaushalt verbunden, verursacht in der Regel einen hohen Verbrauch an Wasser und Energie und kann überdies zur Mobilisierung von Schadstoffen führen, die vorher im Gestein gebunden waren. Bedingt durch die hohe Nachfrage und den Einsatz neuer Technologien werden Vorkommen mit immer geringerem Rohstoffgehalt erschlossen. Dadurch nimmt die Menge der Bergbauabfälle zu, die Eingriffe in den Naturhaushalt werden tiefgreifender und das Bild ganzer Landschaften verändert sich. Der Abtransport der Rohstoffe aus entlegenen Gebieten erfordert darüber hinaus eine umweltintensive Transportinfrastruktur. Hinzu kommt, dass

Erkundung und Abbau von Rohstoffen zunehmend in ökologisch und geologisch höchst sensiblen Gebieten vorgenommen werden, so etwa im Urwald, in Naturschutzgebieten, in der Arktis, sowie in der Tiefsee und an den Kontinentelhängen (Bleischwitz/ Bringezu 2007).

Industriezweige, die durch einen großen Stoffdurchsatz gekennzeichnet sind, verursachen Umweltprobleme infolge hoher Sekundärbelastungen. Branchenvergleichende Untersuchungen zeigen, dass ressourcenintensive Industriezweige, wie etwa die Zement- und Stahlindustrie wegen der dort zum Einsatz kommenden Hochtemperaturprozesse auch in überdurchschnittlichem Maße zur Emission von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen beitragen. Schätzungen zufolge stammen rund 15 % der globalen energiebedingten CO₂-Emissionen aus der Produktion von Zement und Stahl (Bleischwitz/ Bringezu 2007). Das heißt, eine Steigerung der Ressourcenproduktivität könnte auch einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Probleme wirft schließlich die Entsorgung toxischer Industrieabfälle sowie die Nutzung und Entsorgung von Produkten, die toxische Inhaltsstoffe wie Blei, Cadmium, Asbest und persistente organische Verbindung enthalten, auf. Das Recycling oder die thermische Verwertung solcher Reststoffe und Produkte birgt die Gefahr einer Dissipation von Schadstoffen in der Umwelt und stellt eine Herausforderung für eine künftige Kreislaufwirtschaft dar (SRU 2005, 6).

Aus all dem folgt, dass ein effizienter Umgang mit Rohstoffen ein zentrales Element für eine nachhaltige Weltwirtschaft darstellt. Über eine Steigerung der Ressourcenproduktivität könnten die Reichweite der Rohstoffreserven im Interesse kommender Generationen verlängert, die Kosten der Produktion gesenkt und die Umwelt entlastet werden. Dabei lassen sich nach den bisherigen Ausführungen drei verschiedene Motivationen zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität herausarbeiten, die allerdings im Einzelfall nicht unbedingt von einander trennbar sind:

- **Verknappung:** Der Rohstoff ist nur bedingt verfügbar¹⁸. Ursachen hierfür können eine „absolute“ Verknappung (d.h. die Vorkommen gehen zur Neige) oder eine „relative“ Verknappung sein, bei der ein Versorgungsengpass durch ein unzureichendes Angebot oder durch die politisch-ökonomische Instabilität des Lieferlandes entsteht (z.B. Kupfer, Platin, Zink, Antimon, Indium)
- **Schädlichkeit:** Der Rohstoff kann Schädigungen von Mensch und Umwelt verursachen (z.B. Asbest, Cadmium, Blei, Chlor)
- **Hohe Sekundärbelastungen:** Der Rohstoff, ist im Prinzip weder knapp noch verursacht er unmittelbare Schäden, führt aber infolge seines hohen Stoffdurchsatzes zu Belastungen von Mensch und Umwelt, etwa durch Energieverbrauch, Transport, Staubemission u.ä. (z.B. mineralische Rohstoffe).

¹⁸ Die Verfügbarkeit eines Rohstoffes wird durch seine Reserven und Ressourcen bestimmt. **Reserven** sind die Vorräte in erfassten Lagerstätten, die unter derzeitigen Bedingungen technisch und wirtschaftlich abbaubar sind. **Ressourcen** sind die Lagerstätten, deren Abbau bei Fortschritten der Bergbautechnologien und steigenden Preisen rentabel sein wird (Behrendt/Scharp 2007, 13).

Strategien zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität im Lebenszyklus der Rohstoffnutzung

Aus technologischer Sicht kommen vier verschiedene Basisstrategien zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität in Betracht:

- (1) *Substitution*: Der Rohstoff wird durch einen anderen ersetzt, der ein günstigeres Profil aufweist
- (2) *Kreislaufführung*: Der Rohstoff wird erneut genutzt (wieder- oder weiterverwertet).
- (3) *Steigerung der Materialeffizienz*: Der Einsatz eines Rohstoffs pro Produkteinheit wird reduziert.
- (4) *Verlängerung der Nutzungsdauer*: Die Lebensdauer des Produkts, in dem der Rohstoff zum Einsatz kommt, wird erhöht.

Welche der Strategien Anwendung findet, hängt im Wesentlichen vom Charakter des jeweiligen Rohstoffs und den spezifischen Problemen ab, die mit seiner Nutzung verbunden sind. So bietet es sich z.B. an, Rohstoffe mit sehr begrenzter Reichweite¹⁹ durch Rohstoffe mit größerer Reichweite, durch nachwachsende Rohstoffe oder durch Sekundärmaterialien zu substituieren. Ebenso kann die Schonung knapper Rohstoffe durch eine Verringerung des Rohstoffeinsatzes pro Produkteinheit, also durch eine Steigerung der Materialeffizienz erzielt werden. Stoffe, die Schäden für Mensch und Umwelt hervorrufen können, aber nicht substituierbar sind, können beispielsweise in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. In Branchen, die sich durch einen hohen Stoffdurchsatz auszeichnen wie etwa die Bauwirtschaft, können die Strategien „Verlängerung der Lebensdauer von Produkten“ oder „Dematerialisierung“ zur Schonung der Rohstoffvorräte und zur Vermeidung der mit ihrer Nutzung verbundenen Umweltprobleme beitragen.

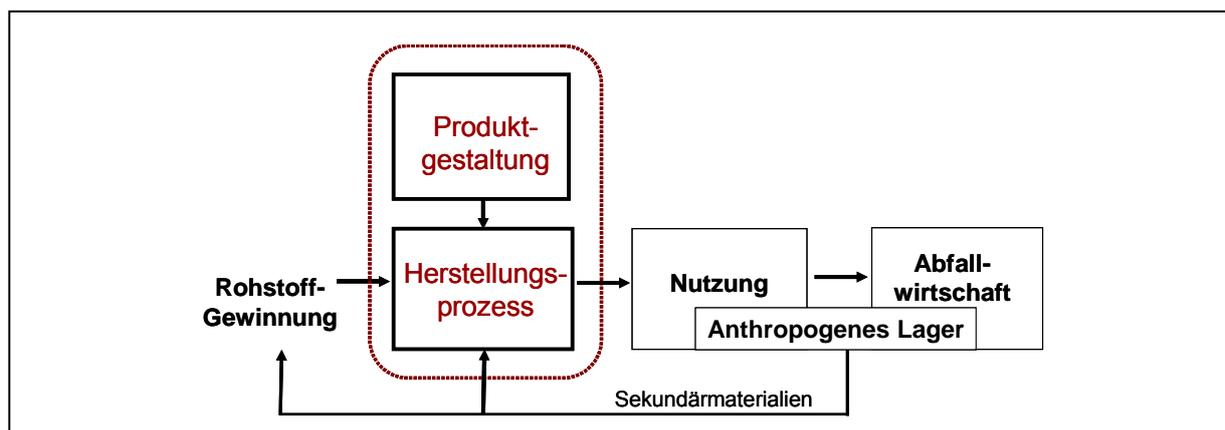


Abbildung 16: Lebenszyklus der Rohstoffnutzung
Der Schwerpunkt der Studie liegt auf der Produktgestaltung und dem Herstellungsprozess (umrandetes Feld).

¹⁹ Hierbei wird häufig zwischen der statischen und der dynamischen Reichweite unterschieden. Die statische Reichweite sagt aus, in wie vielen Jahre die heutigen Reserven auf Basis des derzeitigen Verbrauchs erschöpft sein werden. Die dynamische Reichweite versucht dagegen auch Parameter wie die künftige Entwicklungen der Fördertechniken und Exploration sowie der Nachfrage zu berücksichtigen. Da diese Parameter jedoch schwer abschätzbar sind, wird in der Regel die statische Reichweite unter der Annahme realistischer Wachstumsraten verwendet.

Der Lebenszyklus eines Rohstoffes lässt sich in mehrere Phasen einteilen. Er beginnt mit der Rohstoffgewinnung, der sich der Herstellungsprozess und die Phase der Nutzung anschließen und mündet in die Entsorgung des Produkts als Abfall (Postnutzungsphase) (s. Abb. 16). Die Produktgestaltung wiederum überlagert diese Phasen und kann sich auf den gesamten Produktlebenszyklus auswirken. Strategische Ansätze zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität können in allen Phasen des Rohstoffzyklus zum Tragen kommen.

Im Rahmen der **Rohstoffgewinnung** geht es einerseits darum, neue Verfahren zum Aufschluss und zur Ausbeutung von Rohstoffvorkommen zu entwickeln, die eine höhere Effizienz im Hinblick auf den Ertrag versprechen und gleichzeitig negative Auswirkungen auf die Umwelt möglichst minimieren. Andererseits geht es darum, **alternative Rohstoffquellen** zu erschließen, beispielsweise Rohstoffe, die eine größere Reichweite aufweisen, nachwachsend sind oder aus anthropogenen Lagern gewonnen werden können.

- In Anbetracht der zur Neige gehenden Erdölvorkommen bieten sich Kohle aufgrund ihrer vergleichsweise **höheren Reichweite** als alternative fossile Rohstoffquelle an. Eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass kohlebasierte Prozesse hinsichtlich Ausbeute, Energieeinsatz und Kosten die Konkurrenz zur klassischen Petrochemie bestehen können, ist allerdings die Entwicklung katalytischer Verfahren, insbesondere zum Aufbau höherer Kohlenwasserstoffe aus Methan sowie verfahrenstechnischer Lösungen, welche die mit der Rohstoffumstellung verbundenen Probleme beherrschen. Deutschland bietet hierfür aufgrund seiner führenden Rolle in der Katalysetechnik (für *coal to liquid*) sowie im Bereich innovativer Prozesstechnologien gute Voraussetzungen (SusChem 2006, 18).
- Die verstärkte Nutzung von **nachwachsenden Rohstoffen** stellt eine weitere alternative Rohstoffquelle dar. Ein systematischer und effizienter Einsatz von Biomasse erfordert jedoch eine völlige Neuorientierung der stofflichen Wertschöpfungsketten, den selektiven Um- und Abbau funktioneller Gruppen, die Anwendung verschiedener Katalysevarianten und Synthesestrategien auf unterschiedliche Ausgangsstoffe, wie Fette und Öle, Zucker, Polysaccharide, Lignin, Lignocellulose und Terpene sowie die Entwicklung neuer biotechnologischer, chemischer und verfahrenstechnischer Methoden zum Aufschluss und zur Weiterverarbeitung biogener Rohstoffe (SusChem 2006, 18f.). Neben erheblichen F&E-Aktivitäten setzt eine wirtschaftliche stoffliche Nutzung von Biomasse die Entwicklung neuer Produkte sowie die Erschließung neuer Märkte entlang von alternativen Wertschöpfungsketten auf der Basis nachwachsender Rohstoffe voraus.
- Als dritte alternative Rohstoffquelle rückt mehr und mehr die Erschließung der in langlebigen Gütern, Bauwerken und Infrastrukturen gespeicherten **anthropogenen Rohstoffe** in den Mittelpunkt des Interesses. Eine konsequente Verwertung dieser Ressourcen („urban mining“) könnte zu einer beträchtlichen Reduktion der Gewinnung von Primärrohstoffen und der damit verbundenen Umweltbelastungen beitragen. Wie oben schon erwähnt, hängt die Wirtschaftlichkeit der Nutzung des anthropogenen Stofflagers einerseits von der Preisentwicklung der Primärrohstoffe und andererseits von der Entwicklung verbesserter Verfahren zur Wertstoffrückgewinnung ab.

Die Möglichkeiten zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität in der Phase der Rohstoffgewinnung werden an dieser Stelle nicht weiter vertieft. Technologien zur Erkundung, Erschließung und Ausbeutung von Rohstofflagern werden in der Regel nicht als Umwelttechnologien

betrachtet und sind daher nicht Gegenstand der Studie. Alternativen Rohstoffquellen wie Sekundärrohstoffe und nachwachsende Rohstoffe, werden hingegen in die Betrachtung mit eingeschlossen. Die Technologien zur Gewinnung, Aufbereitung und Nutzung von Sekundärrohstoffen werden in Kapitel 7: „Abfallwirtschaft“ behandelt. Die Technologien zur stofflichen Nutzung von Biomasse in der industriellen Produktion sowie zur Substitution knapper Rohstoffe durch reichlicher vorhandene wird, bezogen auf ausgewählte Produkte, im Abschnitt 6.3.1 dargestellt.

Die **Produktgestaltung** ist von besonderer Bedeutung, da hier weit reichende Festlegungen vor Beginn des eigentlichen Produktionsprozesses getroffen werden. Es geht darum Produkte so zu gestalten, dass sie sich gegenüber Produkten mit gleicher Funktionalität durch eine höhere Ressourcenproduktivität auszeichnen (produktintegrierter Umweltschutz), wobei alle vier der oben genannten Basisstrategien zur Anwendung kommen können. Eine wichtige Rolle in der Entwicklung neuer Produkte spielen Schlüsseltechnologien wie die weiße Biotechnologie, die Bionik und die Nanotechnologie. In vielen Fällen wird das Design neuer rohstoffoptimierter Produkte auch den Einsatz gänzlich anderer oder neuer Produktionsverfahren erfordern. Im Mittelpunkt steht dabei jedoch das Produkt und nicht der Produktionsprozess. Die Strategie der Kreislaufführung von Materialien (Recycling und Einsatz von Sekundärrohstoffen) wird, wie schon erwähnt, in Kapitel 7 „Abfallwirtschaft“ behandelt. Die Ausführungen im Abschnitt 6.3.4 konzentrieren sich daher auf das „Design for Recycling“, also die Vorverlagerung von Überlegungen zur Verbesserung der späteren Wiederverwertbarkeit von Produkten in den Designprozess (z.B. durch Vermeidung von Verbundwerkstoffen, Fernhalten bestimmter gefährlicher Stoffe aus Endprodukten oder Verbesserung der Demontagefähigkeit).

Zahlreiche Ansatzpunkte zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität eröffnen sich im Rahmen der **Herstellungsprozesse**. Dabei geht es darum, den Produktionsprozess für ein gegebenes Produkt unter Ressourcenaspekten zu optimieren (produktionsintegrierter Umweltschutz). Dies kann z.B. durch die Kreislaufführung von Roh-, Betriebs- und Hilfsstoffen, durch die Reduzierung von Verschnitt und Abfall oder durch die Optimierung der Prozesse erreicht werden. Im Herstellungsprozess kommen zum Teil die gleichen Basisstrategien (Kreislaufführung, Substitution, Steigerung der Materialeffizienz) zum Tragen, die auch in der Produktgestaltung eine ausschlaggebende Rolle spielen. Gleichwohl ist der Herstellungsprozess als ein in sich abgeschlossener Schritt im Lebenszyklus anzusehen, der nicht darauf abzielt, das Endprodukt zu verändern, obwohl es als Folge einer Optimierung der Produktionsverfahren auch zu einer Qualitätsverbesserung der Produkte und zur Ausbildung neuer Werkstoffeigenschaften kommen kann. Die Einsparmöglichkeiten im Herstellungsprozess werden daher als ein eigenständiger Pfad zu Erhöhung der Rohstoffproduktivität betrachtet und in einem gesonderten Kapitel dargestellt.

Die **Nutzungsphase** von Produkten bietet ebenfalls Möglichkeiten zur Steigerung der Rohstoffproduktivität. Relevant sind hier vor allem technische Ansätze zur Verlängerung der Lebensdauer von Produkten, wie z.B. Instandhaltung oder Upgrading, die von der Produktgestaltung bis weit in die Nutzungsphase hineinreichen. Der Ausbau von Nutzungsformen wie Sharing, Pooling, Leasing, Contracting, die eher am Verhalten der Nutzer ansetzen, werden allerdings nur am Rande thematisiert. Maßnahmen zur Änderung des Nutzerverhaltens in Richtung auf einen „nachhaltigen Konsum“ sind nicht Gegenstand dieser Studie.

Die Möglichkeit der Erhöhung der Rohstoffproduktivität nach Beendigung der Nutzungsdauer von Produkten (**Postnutzungsphase**) beinhalten das Recycling von Abfällen und die Wiedereinspeisung von Sekundärmaterialien in den Produktionsprozess. Diese Problematik wird in Abschnitt 7.3 und 7.4 des Kapitels „Abfallwirtschaft“ behandelt.

Der Schwerpunkt wird somit in diesem Kapitel auf die **Produktgestaltung und den Herstellungsprozess** (s. Abb. 16) gelegt, da diesen beiden Phasen das größte Potential für umwelttechnologische Innovationen bieten. Um eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität in diesen beiden Phasen zu erreichen, finden die oben dargestellten Basisstrategien (Substitution, Kreislaufführung, Steigerung der Materialeffizienz und Verlängerung der Lebensdauer) Anwendung. Tabelle 5 zeigt die strategischen Ansätze zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität im Überblick und bündelt sie in fünf „Pfade“, auf die in Abschnitt 6.3: „Reife Technologien und technologische Entwicklungen“ ausführlich eingegangen wird.

Tabelle 5: Phasen im Prozess der Rohstoffnutzung, Ziele und strategische Ansätze zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität

PHASEN IM PROZESS DER ROHSTOFFNUTZUNG	ZIELE	STRATEGISCHE ANSÄTZE	
Rohstoffgewinnung	Erschließung alternativer Rohstoffquellen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rohstoffe mit größerer Reichweite ▪ nachwachsende Rohstoffe ▪ Sekundärrohstoffe 	
Produktgestaltung	Ressourcenschonende Produktentwicklung	Substitution knapper und umweltschädlicher Einsatzstoffe	Pfad 1 (6.3.1)
		Steigerung der Materialeffizienz durch: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Miniaturisierung ▪ Leichtbautechnik ▪ Dematerialisierung ▪ Neue Werkstoffe 	Pfad 2 (6.3.2)
		Verlängerung der Lebensdauer von Produkten	Pfad 3 (6.3.3)
		Förderung der Kreislaufwirtschaft: Design for Recycling	Pfad 4 (6.3.4)
Herstellungsprozess	Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsprozesse	Substitution von Rohstoffen, Hilfsstoffen, Betriebsstoffen und Prozessen	Pfad 5 (6.3.5)
		Kreislaufführung von Rohstoffen, Betriebsstoffen und Hilfsstoffen	
		Reduzierung von Verschnitt, Abfall, Ausbeuteverlusten	
		Optimierung der Prozessschritte (z.B. durch Kaskadierung)	
		Dienstleistungen: betriebliche Ökobilanzen, PIUS Check, Ressourcenkostenrechnung	

6.2 Meilensteine

Die Debatte um die Ressourcenfrage begann schon vor über drei Jahrzehnten mit dem Buch von **Meadows** (1972) über die Grenzen des Wachstums, das einen Zusammenhang zwischen Industrieproduktion, Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung beschrieb. Die öffentliche Debatte konzentrierte sich in der Folge auf die als kritisch dargestellte künftige Rohstoffknappheit und verlief nicht zuletzt wegen massiver Kritik am methodischen Ansatz von Meadows (1972) kontrovers.

Die in der Folge des **Brundtland Reportes** (WCED, 1987) begonnene Debatte zur „nachhaltigen Entwicklung“ erweiterte den Themenkreis um die Frage der intra- und intergenerationalen Gerechtigkeit. In dem Bestreben, das Wissen um die Grenzen der Naturnutzung in praktische Handlungsleitlinien umzusetzen, wurden von Pearce and Turner (1990) und von Daly (1990) „Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung“ aufgestellt, sozusagen „ökologische Managementregeln“, die eine Konkretisierung des Umgangs mit der Natur ermöglichen sollten. Diese Regeln fassen die unterschiedlichen Möglichkeiten der Inanspruchnahme der produktiven Funktion der Natur und die Erhaltung der Regel- und Trägerfunktion der Natur ins Auge. Die bekanntesten drei Regeln lauten:

- “Harvesting rates of renewable natural resources should not exceed regeneration rates
- Non-renewable resources should be exploited but at a rate equal to creation of renewable substitutes
- Waste emissions should not exceed the assimilative capacities of the receiving environment.”

Anfang der 1990er-Jahre hat die **Enquete-Kommission** „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des deutschen Bundestages umfassend unter dem Titel „Die Industriegesellschaft gestalten“ die Frage des nachhaltigen Umgangs mit Stoff- und Materialströmen behandelt sowie Vorschläge für eine Stoffstrompolitik erarbeitet (Enquete-Kommission 1994).

Ziel war es, Wege zu finden, um die Bereitstellung, Nutzung und Entsorgung von Stoffen im Rahmen der „Begrenztheit der Ressourcen und der eingeschränkten Belastbarkeit der Umweltmedien“ langfristig wirtschaftlich zu sichern. Dieser zweite große Impuls wirkte durchaus auf verschiedene Politikfelder, geriet aber allmählich ins Stocken.

Während die Fragen der Ressourcenverknappung und der Verteilungsgerechtigkeit umstritten und in ihrer politischen Operationalisierbarkeit undeutlich blieben, war der Zusammenhang von Ressourcennutzung und Umweltbeeinträchtigung unstrittig. Vor allem unter diesem Aspekt und vor dem Hintergrund steigender Rohstoffkosten ist die Ressourcendebatte heute erneut auf der Tagesordnung. Ergänzend gewann der Aspekt der Steigerung der Ressourceneffizienz zunehmend an Bedeutung. In diesem Kontext sind Konzepte des Wuppertal Instituts entwickelt worden, die durch Publikationen wie „**Faktor 4**, doppelter Wohlstand, halbiertes Naturverbrauch“ von v. Weizsäcker et al. (1995) und Schmidt-Bleek (1998) „**Das MIPS-Konzept**. Weniger Naturverbrauch – mehr Lebensqualität durch Faktor 10“ bekannt geworden sind.

Auf EU-Ebene stellt die Ressourcenstrategie der **EU-Kommission** (2003/2005) eine weitere Initiative dar, die ausgehend von den vorhandenen Erfahrungen das komplexe Thema Res-

sourcennutzung zu operationalisieren versuchte (EU Kommission: Thematische Strategie für die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen KOM 572, KOM 670). Als wesentliche Zielsetzung der geplanten EU-Ressourcenstrategie wurde bereits im 6. Umweltaktionsprogramm der EU die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltbelastung gefordert. Das mit der Lissabon-Strategie angestrebte Wirtschaftswachstum sollte ohne Erhöhung der Umweltbelastung erzielt werden. Um Umweltauswirkungen kosteneffizient für alle Beteiligten zu minimieren, sollte das bereits im Rahmen der Integrierten Produktpolitik entwickelte Lebenszyklusdenken von der Rohstoffgewinnung bis zur Abfallphase einen zentralen Punkt in der EU-Ressourcenstrategie darstellen. Die EU-Ressourcenstrategie hat insgesamt einen umfassenden und umweltpolitik-übergreifenden Anspruch erhoben und wurde in einer Stellungnahme des **Sachverständigenrats für Umweltfragen** als Leitlinie für eine zielgerichtete Umweltpolitik vorgeschlagen (SRU 2005).

Im Jahr 2005 beschlossen die EU-Regierungschefs auf ihrem Frühjahrsgipfel, Wachstum und Beschäftigung auch durch „Öko-Innovationen“ und „nachhaltiges Ressourcenmanagement“ anzustreben (Council of the European Union 2005, 5). Damit etablierte sich das Thema Ressourcenmanagement auch im Rahmen der **Wirtschaftsstrategie der EU**. Umweltpolitisch war es zuvor auf dem **UN-Gipfel** in Johannesburg (Vereinte Nationen 2002) und in Publikationen der **OECD** zu einem zentralen Thema erhoben worden.

Die Bundesregierung hat sich im Koalitionsvertrag die Steigerung der Ressourceneffizienz als ein prioritäres Ziel gesetzt und 2006 beschlossen, das **Schwerpunktthema „Schritte zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft“** im Rahmen der Fortschreibung der Nachhaltigkeitsstrategie aufzugreifen. Der Indikatorenbericht 2006 des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2007) stellt zwischen 1994 und 2005 bereits eine Erhöhung der Rohstoffproduktivität um 33,5 % fest. Allerdings ist diese günstige Richtung auf einen Strukturwandel hin zu weniger rohstoffintensiven Branchen zurückzuführen, nicht aber auf einen im Durchschnitt sparsameren Einsatz der Rohstoffe. Um das vorgegebene quantitative Ziel der **Nachhaltigkeitsstrategie** der Bundesregierung von 2002 zu erreichen (Bundesregierung 2002), nämlich die Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 zu verdoppeln, ist eine Steigerung der Ressourceneffizienz einschließlich der Veränderungen von Verhaltensweisen und Konsummustern notwendig.

Der enorme Bedeutungsanstieg der Rohstoffproduktivität hat in der Forschungspolitik einen deutlichen Niederschlag gefunden. So werden im Rahmen der **Hightech Strategie** (BMBF 2006) der Bundesregierung Innovationen für einen nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen vorangetrieben, z.B. im Bereich der Werkstoffforschung, der Biotechnologie, der Nanotechnologie und der Umwelttechnik. Zur Untermauerung der Hightech Strategie der Bundesregierung wird derzeit ein **Masterplan Umwelttechnologie** zur „Rohstoffverfügbarkeit und Materialeffizienz“ erstellt.

Die Erhöhung der Ressourcenproduktivität und die Sicherung der Ressourcenversorgung sind fach- und ressortübergreifende Themen und so haben das BMBF, das BMU, das BMWI und andere Ministerien das Thema der Ressourceneffizienz in Form diverser **Förderschwerpunkte** in ihre Förderprogramme aufgenommen. Allein vom BMBF werden mehr als 50 Mio. € für drei Jahre für die Förderung von Forschungsprojekten zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz bereitgestellt (BMBF 2008). Auch der Rat für Nachhaltige Ent-

wicklung ist inhaltlich in diese Arbeiten eingebunden. Eine Liste der Akteure und ihre Förderprogramme sind in Tabelle 6 aufgezeigt.

Weiterhin sprachen sich auf Initiative Deutschlands die **G8-Länder** in der Gipfelerklärung von Heiligendamm für einen verantwortungsvollen Umgang mit Rohstoffen und mehr Transparenz im Rohstoffsektor aus. Die Umsetzung dieser Ziele wird durch die Einbindung in die nationale Nachhaltigkeitsstrategie bekräftigt. Auf Grundlage der im März 2007 veröffentlichten "**Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung**" soll ferner die Versorgungssicherheit der deutschen Industrie mit metallischen und nichtmetallischen Industrierohstoffen sowie mit nachwachsenden Agrarrohstoffen und Holz verbessert werden (Bundesregierung 2007).

Tabelle 6: Forschungspolitik für eine nachhaltige Rohstoffwirtschaft: Akteure und ihre Förderprogramme

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung	
	FONA: Forschung für Nachhaltigkeit
	BIONA: Bionische Innovation für nachhaltige Produkte und Technologien (Förderrichtlinie 2006)
	Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Rohstoffintensive Produktionsprozesse (Förderrichtlinie 2007)
	KMU-innovativ: Ressourcen und Energieeffizienz (Förderrichtlinie 2007)
	Umsetzung von Marketing Maßnahmen im Technologiefeld Umweltschutz (Förderrichtlinie 2007)
	Ressourcenschonende Oberflächentechnologien (2008)
	Geplantes Innovationsforum zur Rohstoffeffizienz (ggf gekoppelt an FONA evt. Oktober 2008)
	Funktionsintegrierter Leichtbau (Förderschwerpunkt 2006)
	Werkstoffe für Produkte und Verfahren mit hoher Rohstoffeffizienz (Förderschwerpunkt 2005)
	Weitere Maßnahmen: Nanotextil (2007), NanoTecture-Nanotechnologie im Bauwesen (2007), Hochleistungswerkstoffe (2007) u.a.
BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz	
	Aktionsplan stoffliche Biomassennutzung
	Innovative Mehrfachnutzung nachwachsender Rohstoffe
	Nutzung von Holz zur Substitution endlicher Rohstoffe
BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
	GreenTech made in Germany - Umwelttechnologieatlas für Deutschland
	Studie: Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte 2007
	Netzwerk Ressourceneffizienz, Innovationskonferenz, Umweltinnovationsprogramm
	BMU Mittelstandsinitiative nachhaltiges Wirtschaften
BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	
	Transparenz und Korruptionsbekämpfung im Rohstoffsektor
BMW i – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	
	Verbesserung der Materialeffizienz (VerMat); Demea

6.3 Reife Technologien und neue technologische Entwicklungen

Im Folgenden werden ausgewählte bereits vorhandene oder in der Entwicklung befindliche Technologien zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität dargestellt. Wie oben erläutert, konzentriert sich dieses Kapitel auf die Produktgestaltung und den Herstellungsprozess, da diese beiden Phasen das größte Potential für umwelttechnologische Innovationen bieten. Die Einteilung erfolgt dabei weder nach Stoffgruppen (Metalle, mineralische, fossile Rohstoffe, Biomasse) noch nach Branchen, sondern nach den in Abschnitt 6.1 eingeführten **strategischen Pfaden**. Bezogen auf die Produktgestaltung ist jede der vier oben erwähnten Basisstrategien jeweils durch ein eigenes Unterkapitel repräsentiert. Der Produktionsprozess wird als ein sich geschlossener Schritt im Lebenszyklus eines Produkts angesehen und daher in einem separaten Unterkapitel behandelt, obwohl hier zum Teil die gleichen Basisstrategien zur Anwendung kommen wie in der Produktgestaltung. Damit ergeben sich die folgenden fünf strategischen Pfade (siehe auch Tabelle 5):

- Pfad 1:** Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung (6.3.1)
- Pfad 2:** Steigerung der produktbezogenen Materialeffizienz (6.3.2)
- Pfad 3:** Verlängerung der Lebensdauer von Produkten (6.3.3)
- Pfad 4:** Förderung der Kreislaufwirtschaft: Design for Recycling (6.3.4)
- Pfad 5:** Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsprozesse (6.3.5)

6.3.1 Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung (Pfad 1)

Die Auswahl der Einsatzstoffe ist ein zentraler Schritt in der Produktgestaltung, der sowohl die Vorkette, angefangen bei der Rohstoffgewinnung, als auch den weiteren Produktlebenszyklus bis hin zur Entsorgung beeinflusst. Im Hinblick auf das Ziel einer Steigerung der Rohstoffproduktivität kommt dabei einerseits die Substitution nicht erneuerbarer Rohstoffe durch Biomasse, und andererseits die Substitution knapper nicht erneuerbarer Rohstoffe durch ebenfalls nicht erneuerbare, aber reichlicher vorhandene Rohstoffe in Betracht. Mit Blick auf die Belastung von Mensch und Umwelt während der Nutzungsphase eines Produkts und auf die Rückstandsproblematik gehört im Prinzip auch die Substitution umweltschädlicher durch umweltverträglichere Einsatzstoffe zu dieser Strategie, die im Unterkapitel „Design for Recycling“ (Abschnitt 6.3.4) behandelt wird.

Substitution nicht erneuerbarer Rohstoffe durch Biomasse

Biomasse zur stofflichen Nutzung – die energetische Nutzung ist nicht Gegenstand dieser Studie – kann einerseits durch den gezielten Anbau nachwachsender Rohstoffe (stärkehaltige Pflanzen, Ölpflanzen, Zuckerpflanzen, Getreide, Faserpflanzen, Holz- und holzartige Pflanzen) erzeugt werden, andererseits fällt sie in Form von biogenen Reststoffen in den verschiedenen Zweigen des verarbeitenden Gewerbes (Ernterückstände, Waldrestholz, Grünschnitt, Altholz, Schlachtabfälle, Kartoffelschlempe, Melasse, Speiseabfälle, Klärschlamm etc.) an. Für die stoffliche Nutzung von Biomasse gibt es ein breites Spektrum von Einsatzfeldern, an denen die verschiedensten Industriezweige beteiligt sind. Dazu gehören die Holzverarbeitende Industrie, die Textil-, Papier-, Automobil- und Bauindustrie sowie die chemi-

sche Industrie. Biomasse ist komplex aufgebaut und zeichnet sich durch eine große Vielfalt von chemischen Inhaltsstoffen aus: Kohlehydrate (Stärke, Zucker, Cellulose), Lignin, Proteine, Öle und Fette, sowie diverse Sekundärpflanzenstoffe wie Vitamine, Farbstoffe, Pigmente, Geruchs-, Geschmacks- und Wirkstoffe (SRU 2007, 24). Auf der Basis dieser Ausgangsstoffe werden chemische Grund- und Verfahrensstoffe, Kunststoffe, Schmierstoffe, Verpackungsmaterialien, Bau- und Dämmstoffe sowie Pharmaka gewonnen. Tabelle 7 zeigt die Wertschöpfungskette der stofflichen Nutzung biogener Rohstoffe im Überblick.

Tabelle 7: Wertschöpfungskette der stofflichen Nutzung von Biomasse

Nachwachsende Rohstoffe	Primär genutzte Inhaltsstoffe	Zwischenprodukte	Ausgewählte Endprodukte
Kartoffeln, Mais, Weizen, Roggen, Zuckerrübe, Zuckerröhre, Topinambur, Sagopalme	Zucker, Stärke	Saccharose, Glucose, Milchsäure, Zitronensäure, Essigsäure, Lävulinsäure, Ethanol	Chemische Grundstoffe, Polymere/ Kunststoffe, Waschmittel/ Seifen/ Tenside, Farben, Lacke, Kleber, Lösungsmittel
Raps, Leinsamen, Sonnenblumen, Mohn, Oliven, Soja, Kokospalme, Ölpalme	Fette, Öle	Capronsäure, Caprylsäure, Caprinsäure, Laurinsäure, Palmitinsäure, Stearinsäure, Ölsäure, Linolsäure, Linolensäure, Glycerin	Waschmittel, Emulgatoren, Kosmetika, Pharmaka, Schmierstoffe, Hydraulikflüssigkeiten, chemische Grundstoffe, Farben, Harze, Lacke
Sojabohnen, Erbsen, Ackerbohnen, Lupine	Proteine	Aminosäuren	Tenside, technische Polymere, chemische Grundstoffe, Leime, Kleber, Farben, Kosmetika
Holz, holzartige Pflanzen, Stroh, Schilf, Gras	Cellulose, Lignocellulose, Lignin	Celluloseether, Celluloseester, Terpentin, Ethanol, Methanol	Kunststoffe, Zellstoff, Viskose, Modal, Lyocell, Textilien, Baustoffe, Dämmstoffe, Gerbstoffe, Farbstoffe, Harze, Wachse
Hanf, Flachs, Sisal, Ramie, Jute, Agave, Schilf, Baumwolle, Kapok, Kokos, Holzfasern	Fasern		Dämmstoffe, Papier, Pappe, Verpackungen, Textilien/ Bekleidung, Vliese/ Filtermaterialien, Faserverbundstoffe
Ringelblume, Krappwurzel, Färberdistel, Färberknöterich, Arznei- und Gewürzpflanzen	Sekundärpflanzenstoffe	Vitamine, Geruchs- und Geschmacksstoffe, Pigmente	Farben, Kosmetika, Gewürze, Aromastoffe, Gerbstoffe

Quellen: SRU (2007) Abb.2-3; FNR (2006), 274; Oertel (2007), Tab.2

Nach vorläufigen Schätzungen der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) hat der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche und energetische Nutzung im Jahr 2007 eine Fläche von über 2 Mio. ha (ca. 17 % der gesamten Ackerfläche Deutschlands) in Anspruch genommen und damit ein Rekordniveau erreicht. Von den rund 2 Mio. ha Ackerfläche entfielen ca. 1,8 Mio. ha auf den Anbau von Energiepflanzen und nur ein vergleichsweise geringer Anteil von ca. 0,27 Mio. ha auf den Anbau von Industripflanzen. Bei Letzteren stehen stärkehaltige Pflanzen (128.000 ha) an erster Stelle, gefolgt von Ölpflanzen (111.600

ha), Zuckerpflanzen (22.000 ha), Heil- und Färbepflanzen (10.000 ha); der Anbau von Faserpflanzen ist mit 2.000 ha von untergeordneter Bedeutung (FNR 2007). Zur stofflich nutzbaren Biomasse gehört neben den genannten Industriepflanzen auch Holz, das in der holzverarbeitenden Industrie in beträchtlichen Mengen (34 Mio. t/a) eingesetzt wird. In diesem Abschnitt wird Holz jedoch nur im Hinblick auf seinen Bestandteil Lignocellulose berücksichtigt, während die traditionelle Verwendung in der Bau- und Möbelindustrie außerhalb der Betrachtung bleibt.

Die beachtliche Ausweitung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe ist nicht zuletzt das Resultat politischer Weichenstellungen und Förderprogramme, wie:

- Erneuerbares Energien Gesetz (2004)
- Biomasseverordnung des BMU (2005)
- Aktionsplan für Biomasse der EU-Kommission (2005)
- Biomasse- Aktionsplan des Landes Baden-Württemberg (2006)
- Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe des BMELV (2007)
- Markteinführungsprogramm: „Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“ des BMELV (2003)
- Markteinführungsprogramm: „Biogene Treib- und Schmierstoffe“ des BMELV (2000)

Zurzeit liegt der Schwerpunkt der Förderung auf der energetischen Nutzung von Biomasse. Aus Sicht des Sachverständigenrates für Umweltfragen sollte jedoch in einer langfristigen Perspektive die stoffliche Nutzung gegenüber der energetischen bevorzugt oder zumindest nicht schlechter gestellt werden, da biogene Rohstoffe in der stofflichen Nutzung den einzigen Ersatz für fossile Energieträger darstellen, während bei der Energiebereitstellung auf andere erneuerbare Energien zurückgegriffen werden kann (SRU 2007, 19).

Vor allem die chemische Industrie zeigt ein erhebliches Interesse an der stofflichen Verwertung von Biomasse, wofür sich unterschiedliche Motive anführen lassen: Einerseits geht es ihr angesichts der Endlichkeit fossiler Rohstoffe um eine Substitution nicht erneuerbarer Ressourcen und das Erreichen einer größeren Unabhängigkeit von Erdölimporten. Andererseits bieten Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe ein hohes Innovationspotential, sowohl im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren (z.B. weiße Biotechnologie²⁰, Bioraffinerie²¹) als auch im Hinblick auf die spezifischen Eigenschaften der Produk-

²⁰ Unter industrieller oder „weißer Biotechnologie“ versteht man die Herstellung von Grund- und Feinchemikalien, Wirkstoffen, neuen Materialien und Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen unter Einsatz von Biokatalysatoren (stoffwechselaktive Mikroorganismen oder deren Enzyme). Als Querschnittstechnologie integriert die weiße Biotechnologie verschiedene Disziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften, wie z.B. die Mikro- und Molekularbiologie, die Chemie, die Biochemie, die Bioverfahrenstechnik, die Materialwissenschaften und die Bioinformatik. Die weiße Biotechnologie strebt geschlossene Kreisläufe, orientiert am Leitbild der Nachhaltigkeit an (Antranikian 2006)

²¹ Nach dem Vorbild einer konventioneller Raffinerie, in der aus Erdöl Produkte wie Benzin, Dieselöl oder Kunststoffe hergestellt werden, soll die Bioraffinerie nachwachsende Rohstoffe und Biomasseabfälle mithilfe des synergistischen Einsatzes mechanischer, thermischer und biotechnologischer Prozesse in vollem Umfang verwerten. Biotechnologische Verfahren ermöglichen es, aus pflanzlichen Rohstoffen den Grundbaustein Glucose zu gewinnen, aus dem in nachfolgenden Schritten Grundchemikalien wie Ethanol, Methan, Wasserstoff aber auch Feinchemikalien und Wirkstoffvorstufen hergestellt werden können (Antranikian 2006.).

te (z.B. biologische Abbaubarkeit). Zudem lässt sich in vielen Fällen die stoffliche mit einer anschließenden energetischen Nutzung verbinden (Kaskadennutzung). Die Option eines verstärkten Einsatzes von Biomasse in der chemischen Industrie wird jedoch nicht nur unter dem Aspekt der Ressourcenverfügbarkeit diskutiert. Vielmehr rückt die Vision einer ökologisch verträglichen, schadstoffarmen und ressourcenschonenden Versorgung mit Grundchemikalien und daraus hergestellten Produkten mehr und mehr ins Blickfeld (Oertel 2007, 5). Deutschland als führender Chemiestandort (25% der europäischen Chemieproduktion wird von deutschen Unternehmen erbracht) ist besonders gefordert, eine solche „nachhaltige Chemie“ zu entwickeln und umzusetzen (Dubbert 2006).

Derzeit werden ca. 12% der in Deutschland hergestellten Chemikalien auf Basis nachwachsender Rohstoffe erzeugt (SusChem 2006, 19). Das erklärte EU-Ziel ist eine Erhöhung auf 20-25% bis 2020. Von den rund 2,5 Mio.t nachwachsender Rohstoffe, die in der chemischen Industrie eingesetzt werden, sind ca. 2,1 Mio.t pflanzlichen, der Rest tierischen Ursprungs. Etwa 30-40% der verarbeiteten Industriepflanzen stammen aus einheimischem Anbau. Aus dem Ausland werden insbesondere Cellulose auf Eukalyptus- und Pinienbasis, Laurinöl (Kokosnuss, Palmkern) und Sojaöl eingeführt. Der Markt für Industriepflanzen wächst nach Einschätzung von Experten bis 2020 um 4% pro Jahr. Angetrieben durch die weiße Biotechnologie wird für den Markt für Kohlehydrate auf Zuckerbasis eine höhere Wachstumsrate von 10-15% pro Jahr erwartet²². 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, 269).

Große Möglichkeiten zur Herstellung von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen eröffnet die marine Biotechnologie. Algen bieten eine reichhaltige Grundlage für die Produktion von Naturstoffen wie Fettsäuren, Antioxidantien und biologisch aktiven Substanzen mit pharmakologischer Relevanz. Weitere Schwerpunkte der Forschung bilden z.B. Antifouling-Mittel und Klebstoffe, die aus der Meeresfauna gewonnen werden können. Die Märkte dafür sind noch in der Entwicklung.

Bei der wertstofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe kann auf mechanisch-extraktive und chemische Konversions-Technologien zurückgegriffen werden. Zur Konversion der chemischen Inhaltstoffe werden sowohl thermo-katalytische als auch biotechnische Verfahren eingesetzt. Bei den **thermo-katalytischen Verfahren**, die in der Regel unter hohen Temperaturen und Drücken erfolgen, werden Säuren, Laugen, Metalle oder Kombinationen davon zum Aufschluss der Biomasse verwendet. Ausgangs-, Zwischen- und Nebenprodukte dieser Verfahren sind häufig gesundheitsschädlich und/oder umweltgefährdend (FNR 2006, 273).

Biotechnische Verfahren laufen dagegen unter vergleichsweise milden physikalischen Bedingungen, bei niedrigen Temperaturen, Normaldruck und neutralem pH-Wert ab. Als Biokatalysatoren werden Mikroorganismen oder Enzyme eingesetzt. Durch Ganzzellbiotransformationen können Kohlehydrate (Zucker, Stärke, Cellulose) aus nachwachsenden Rohstoffen

zu bedeutenden Intermediaten für den Aufbau industriell relevanter Produktionsstammbäume (Alkohole, Aminosäuren, Essigsäure, Milchsäure, Wasserstoff und Methan) umgesetzt werden, ohne auf Schwermetallkatalysatoren oder aggressive Lösungsmittel angewiesen zu sein. Biokatalysatoren arbeiten zudem in der Regel präziser als chemische Katalysatoren, da sie eine hohe Selektivität aufweisen (Antranikian 2006). Insgesamt zeichnen sich biotechnische Verfahren häufig durch weniger Produktionsschritte, geringeren Rohstoffverbrauch, höhere Energieeffizienz, verminderte Schadstoffemissionen sowie niedrigere Produktionskosten aus und sind dadurch für die chemische Industrie attraktiv (Gartoff 2006). Auf der anderen Seite können mit thermokatalytischen Verfahren oft erheblich höhere Raum-Zeit-Ausbeuten realisiert werden. Ob und in welchem Ausmaß ein biotechnisches Verfahren umweltfreundlicher ist als ein traditionelles chemisches Verfahren, ist daher im Einzelfall zu prüfen (DECHEMA 2004).

Die mit Hilfe biotechnischer Verfahren erzeugten chemischen Produkte haben heute erst einen Marktanteil von ca. 5% weltweit, was einem Umsatz von 55 Mrd. Euro entspricht. Eine Studie von McKinsey (2003) geht davon aus, dass im Jahr 2010 rund 20% aller Chemieprodukte auf biotechnologischem Wege hergestellt sein werden. Dieser Erwartung wird allerdings von Seiten der chemischen Industrie widersprochen mit dem Argument, dass das Wachstum des Chemiemarktes zu einem großen Teil in Asien stattfindet, wo sich überwiegend klassische Chemieanlagen im Bau befänden. Dennoch rechnet auch die chemische Industrie damit, dass der Markt für Produkte der weißen Biotechnologie schneller wachsen wird als der für konventionelle Produkte, nicht zuletzt wegen der zunehmenden Nachfrage nach biobasierten Produkten (Balkenkohl 2006).

Um der industriellen Biotechnologie weitere Impulse zu verleihen, müssten aus Sicht der chemischen Industrie, bestehende Hemmnisse abgebaut werden. So ist z.B. die Verfügbarkeit an effizienten Enzymen noch sehr begrenzt. Als vielversprechender Ansatz, diesem Misstand abzuwehren, wird die Einrichtung einer internationalen Sammlung von Biokatalysatoren (BiocatCollection) betrachtet, die aus einem durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Programm „InnovationsCentrum Biokatalyse“ hervorgegangen ist (www.icbio.de). Forschungsbedarf wird auch hinsichtlich effektiver Produktionsverfahren für Mikroorganismen und deren Enzyme (Bioreaktoren) gesehen. Die Optimierung der Produktaufbereitung (Downstream-Processing), z.B. durch den Einsatz der Membrantechnik (Membranreaktor) ermöglicht die Gewinnung von Fermentationsprodukten mit hohen Ausbeuten (Antranikian 2006). Zu den wichtigsten Herausforderungen wird die Bereitstellung geeigneter Enzymsysteme für den effizienten Aufschluss Lignincellulose-haltiger Biomasse gezählt. Auf diesem Weg könnten auch pflanzliche Abfälle, die in Form von Gras, Stroh und Waldrestholz in großen Mengen anfallen und heute entweder ungenutzt bleiben oder verbrannt werden, einer biotechnologischen Verwertung zugeführt werden. Durch eine verstärkte Nutzung dieser Ausgangsmaterialien könnten nicht nur preiswerte Rohstoffquellen für die industrielle Biotechnologie erschlossen, sondern auch hochwertige Kohlehydrate wie Zucker und Stärke für die Ernährung von Mensch und Tier geschont werden (Dubbert 2006; Balkenkohl 2006).

²² In der weißen Biotechnologie stellt Zucker einen wichtigen Einsatzstoff für häufig verwendete Fermentationsverfahren da. Der Verbrauch von Zucker ist daher stark gestiegen, von 50.000 t im Jahr 1997 auf 240.000 t im Jahr 2004 (FNR 2006, 288).

Als notwendig wird weiterhin eine Verbesserung der Ausbildung von Naturwissenschaftlern betrachtet, sowohl im Hinblick auf die interdisziplinären Anforderungen der biotechnologischen Berufswelt als auch im Hinblick auf die Spezialisierung in den einzelnen Fachgebieten (Mikrobiologie, Molekularbiologie, Biochemie, Verfahrenstechnik, Bioinformatik). Reformbedarf wird schließlich in Bezug auf die politischen Rahmenbedingungen gesehen. Im Gegensatz zum Kraftstoff- und Energiebereich gibt es bisher keine Bestimmungen, die eine stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in vergleichbarer Form begünstigen. Durch die langfristig kalkulierbare Einspeisevergütung für verstromte Bio-Energieträger läßt das „Erneuerbare Energien Gesetz“ oftmals die energetische Nutzung als die attraktivere Option erscheinen (SusChem 2006).

Im Folgenden soll auf ausgewählte Produkte, die auf der Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden, näher eingegangen werden.

Tenside stellen die mengenmäßig bedeutendste Produktgruppe dar, die heute schon in relevantem Umfang auf der Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt wird. Tenside können im Prinzip sowohl aus petrochemischen Grundstoffen (Erdöl) als auch aus oleochemischen Grundstoffen (natürliche Öle und Fette) gewonnen werden, deren Anteil inzwischen auf über 50% angestiegen ist. Für die Herstellung biogener Tenside werden in Deutschland vorwiegend Kokos- und Palmkernöl (ca. 430.000 t/a) verwendet. Um auf heimische Rohstoffe zurückgreifen zu können, wird auch mit Stärke (Mais, Kartoffeln) und Saccharose (Zuckerrübe) experimentiert. Das jüngste Ergebnis dieser Forschung sind Alkylpolyglycosiden (APG), die jedoch mit 50.000 t pro Jahr vorläufig noch eine Nischenproduktion darstellen. Der Großteil der Tenside geht in die Herstellung von Wasch- und Reinigungsmitteln, geringere Anteile in die Produktion von Pharmaka, Kosmetikprodukten, Textilhilfsmitteln und ähnlichem. Sie finden außerdem Anwendung in der Kunststoffindustrie (als Polymere/ Polymerhilfsstoffe) sowie in der Produktion von Farben und Lacken. Zu den Vorteilen der auf Basis nachwachsender Rohstoffe gewonnenen Tenside (und daraus hergestellten Wasch- und Reinigungsmitteln) gehören, dass sie in Abwässern biologisch vollständig abbaubar und zudem hautverträglicher sind als erdölbasierte Tenside. (Oertel 2007,54; FNR 2006, 285f.).

Bioschmierstoffe werden ebenfalls auf Basis natürlicher Fette und Öle hergestellt, wobei aufgrund der besseren Schmiereigenschaften vorwiegend langkettige Fettsäuren (Rapsöl, Sonnenblumenöl oder tierische Fette) eingesetzt werden. Biogene Schmierstoffe und Hydrauliköle zeichnen sich durch hohe biologische Abbaubarkeit, geringe Toxizität und positive technische Eigenschaften aus. Ihre Verwendung bietet sich vor allem in umweltsensiblen Bereichen an, in denen Ölverluste durch Leckagen oder Unfälle zu gravierenden Schäden führen können (z.B. Schleusen, Kläranlagen, Brunnenbohrungen, Tunnelbau, Wasserkraftwerke). Weitere Zielbereiche sind die Baubranche (Betontrennöle), die Land- und Forstwirtschaft (Sägekettenöle, Motoren- und Getriebeöle, Schmierfette), die Schifffahrt und der Schienenverkehr (Weichenschmierfette, Fahrzeugbetriebsstoffe) (Oertel 2007,55). Biogene Schmierstoffe und -öle kommen außerdem in der Metallverarbeitung (z.B. als Umformungsöle) zur Anwendung. Ihr Verbrauch wurde 2005 in Deutschland auf 46.500 t geschätzt, was einem Marktanteil von 4% entspricht. Eine Steigerung des Umsatzes wurde bisher durch höhere Preise und fehlende Akzeptanz behindert. Auch mit Hilfe des seit 2000 bestehenden Markteinführungsprogramms „Biogene Treib- und Schmierstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), das die Preisdifferenz zu

mineralischen Ölen auszugleichen versucht, haben sich Bioschmierstoffe noch nicht auf breiterer Basis durchsetzen können (Oertel 2007, 161f.).

Biokunststoffe sind bisher auf internationaler Ebene nicht eindeutig definiert. Es werden darunter sowohl die auf der Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellten Polymere verstanden als auch Polymere petrochemischen Ursprungs, sofern sie biologisch abbaubar sind (biologisch abbaubare Werkstoffe -BAW-); letztere werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Die Produktion von Biopolymeren kann auf mechanischem und/oder chemischen Wege erfolgen sowie unter Anwendung biotechnologischer Verfahren. Stärke als natürliches Polymer aus Kartoffeln oder Mais ist der wichtigste Ausgangsstoff. Daneben kommen Zucker, Cellulose, Pflanzenöle, Harze, Agrar- und Lebensmittelabfälle zum Einsatz. Relevante aktuelle Produktlinien sind:

- *Thermoplastische Stärke*, bei deren Herstellung natürliche Stärke in verschiedenen Schritten chemisch modifiziert und mit weiteren Additiven wie natürlichen Weichmachern, Pastifizierungsmitteln (Zuckeralkohol, Glycerin) und wasserabweisenden natürlichen Polymeren versetzt wird (sog. Blending). Stärkeblends werden zu Folien, Tragtaschen, kompostierbaren Biomüllsäcken, Mulchfolien, Hygieneartikeln, geschäumten Formteilen, Spielzeug etc. weiterverarbeitet. Als Füllstoff in Autoreifen vermindern sie den Rollwiderstand und tragen so zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei.
- *Polymilchsäure (PLA)* wird in einer Kombination von biotechnologischen Verfahren und chemischer Polymerisation hergestellt. Zunächst wird in einer Fermentation von Stärke oder Glucose durch Mikroorganismen Milchsäure erzeugt, die anschließend mithilfe chemischer Verfahren zu PLA polymerisiert wird. Da Milchsäure bereits aufgrund ihrer Molekülstruktur variable chemische Eigenschaften aufweist, bietet sich durch eine unterschiedliche Verknüpfung der Monomere ein breites Einsatzspektrum. PLA ist ein transparenter Kunststoff, der zu Verpackungsfolien, Joghurt und Trinkbechern, Bestecken sowie zu Produkten für den medizinischen Bereich (Nahtmaterial, Implantate) verarbeitet wird.
- *Polyhydroxyalkanoate (PHA)* werden ebenfalls im Wege der Fermentation von Stärke, Cellulose oder Glucose durch Mikroorganismen erzeugt. Aufgrund der Vielfalt der Monomere ergibt sich in Kombination mit der Verwendung unterschiedlicher Zusatzstoffe eine breite Produktpalette. Sie werden zur Herstellung von Folien, Fasern, Beschichtungen, Klebstoffdispersionen sowie als Additiv für andere Kunststoffe eingesetzt. (vgl. dazu ausf. Oertel 2007, 55ff.; BMU/UBA 2007, 157ff.)

Biokunststoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften (Verarbeitungsfähigkeit, Beständigkeit, Farbe, Transparenz etc.) kaum noch von petrochemischen Produkten. Ein wesentlicher Teil der Biokunststoffentwicklung, der inzwischen auch zur Marktreife gelangt ist, zielt darauf ab, Massenkunststoffe wie Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol in kurzlebigen Anwendungen (z.B. Verpackungen) zu ersetzen (Oertel 2007, 164). Dennoch steckt der Biokunststoffmarkt noch in den Kinderschuhen. Während im Jahr 2004 weltweit 224 Mio. Tonnen Kunststoff produziert wurden, wird die Produktionskapazität für Biokunststoffe global auf rund 300.000 t geschätzt, an der Europa einen Anteil von etwa 50.000 t hat (European Bioplastics). Ausgehend von der noch geringen Größe des Biokunst-

stoffmarktes und der hohen Nachfrage rechnen die Unternehmen mit jährlichen Wachstumsraten von über 20% bis 2015 (BMU/UBA 2007, 162).

Bei der Produktion von stärkebasierten Kunststoffen, die mit 85% derzeit den größten Anteil am Kunststoffmarkt haben, hat Europa die Marktführerschaft, während der Markt für PLA-Kunststoffe von Amerika dominiert wird. Während heute noch die nationalen europäischen Märkte im Vordergrund stehen, erwarten Experten für die Zukunft einen überproportionalen Anstieg der Nachfrage in Asien, vor allem in China. Schätzungen zufolge liegen die Marktanteile europäischer Unternehmen auf der Nachfrageseite bei ca. 50%, während sie auf der Angebotsseite nur etwa 40% des Weltmarktanteils stellen (BMU/UBA 2007, 165). Obwohl die europäischen Unternehmen ihren Anteil am Markt mit wachsender Nachfrage ebenfalls vergrößern werden, wird ihr relativer Anteil am Marktvolumen bis 2020 sinken. Die Gründe dafür liegen in den vergleichsweise geringen Produktionskapazitäten, den hohen Produktionskosten in Europa, der starken Präsenz US-amerikanischer Unternehmen sowie der zunehmenden Konkurrenz durch asiatische Hersteller.

Gegenwärtig findet eine intensive, anwendungsbezogene Entwicklungsarbeit in den Unternehmen statt. Diese betrifft die Erhöhung der Produktvielfalt auf Basis der bisher eingesetzten Rohstoffe z.B. im Hinblick auf Bauteile in der Automobilindustrie sowie die Nutzung alternativer Ausgangsstoffe (z.B. Bioabfälle). Gegenstand der Forschung sind außerdem neue Rezepturen für verschiedene Werkstoffe bezüglich einer Verbesserung der Produkteigenschaften (z.B. Hitzebeständigkeit, Feuchtigkeitsresistenz). Biokunststoff-Zwischenprodukte haben andere Eigenschaften als die auf petrochemischer Basis hergestellten, etwa einen höheren Wassergehalt. Notwendig sind daher Optimierungen der weiteren Verarbeitungsprozesse, etwa im Bereich des Strangpressens oder Spritzgießens. Forschungsbedarf besteht auch im Hinblick auf den Einsatz von biotechnischen Verfahren (z.B. PLA-Kunststoffe). Um die Produktionsmengen zu steigern, werden neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Fermentationsprozesse als notwendig angesehen (BMU/UBA 2007, 160f.).

Als ein wichtiges Hemmnis für die Gewinnung größerer Marktanteile ist der im Vergleich zu herkömmlichen Massenkunststoffen hohe Preis der Biokunststoffe (3.000 – 4.500 Euro/t gegenüber 1.000 – 1.200 Euro/t) zu betrachten (Oertel 2007, 166). Um wirtschaftlich konkurrenzfähig sein zu können, wird daher der Bau größerer Anlagen und eine generelle Ausweitung der Produktionskapazitäten als notwendig angesehen. Unter der Voraussetzung weiter steigender Rohölpreise und einer Ausweitung des Produktionsumfangs bei Biokunststoffen ist davon auszugehen, dass sich die Preise für biogene und erdölbasierte Kunststoffe mittelfristig angleichen werden.

Eine 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 (SusChem 2006, 20). Im Unterschied zu Erdöl, das extraktiv aus der Natur entnommen wird, ist Biomasse schon das Produkt eines Stoffumwandlungsprozesses, der die Syntheseleistung der Natur beinhaltet. Biomasse könnte somit im Verlauf ihres Entstehungsprozesses so modifiziert werden, dass bestimmte gewünschte Bestandteile vorgebildet sind und das Ausgangsmaterial bereits dem Zweck der nachfolgenden Verarbeitung angepasst ist (Oertel 2007, 84). Da bei Bulkchemikalien die Rohstoffkosten eine entscheidende Rolle spielen (bis zu 60% des Endproduktprei-

ses) ist allerdings zu bedenken, dass Deutschland angesichts des Preisgefälles für landwirtschaftliche Rohstoffe zwischen Europa und klimatisch begünstigteren Regionen als Produktionsstandort für Bulkchemikalien nicht prädestiniert erscheint (SusChem 2006, 20).

Naturfaserverstärkte Kunststoffe sind in der Regel Formpressteile aus Kunststoffen, die ihre Stabilität durch eingearbeitete Naturfasern erhalten. Neben Flachs und Hanf werden auch exotische Fasern (Sisal, Jute, Kokosfasern, Kenaf, Abaca) verwendet. Bauteile aus naturfaserverstärkten Kunststoffen zeichnen sich durch hohe Steifigkeit und Festigkeit bei geringer Dichte und damit geringem Gewicht aus und sind heute schon ökonomisch konkurrenzfähig. Haupteinsatzgebiet ist der Innenausbau von Fahrzeugen (z.B. Türinnenverkleidungen, Hutablagen, Kofferraumauskleidungen, Reserveradmulden etc.). In der deutschen Automobilindustrie wurden 2003 ca. 88.000 t Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen verarbeitet. Zu den naturfaserverstärkten Kunststoffen gehören auch Holzfaserwerkstoffe (Wood-Plastic-Composites), die zumeist aus thermoplastischen Kunststoffen, Holzfasern und Additiven bestehen. Sie finden im Bausektor, bei Inneneinrichtungen und im Automobilbau Verwendung. Als weiterer natürlicher Rohstoff spielt Reißbaumwolle aus alten Baumwolltextilien und Produktionsabfällen eine Rolle. Mit Phenolharz gebunden, entsteht daraus ein universell einsetzbarer Kunststoff, der früher für Personenkraftwagen (z.B. im Trabant) und heute noch in LKW-Fahrerkabinen zum Einsatz kommt (FNR 2005).

Der Marktanteil von **Naturdämmstoffen** steigt seit 1995 langsam aber kontinuierlich an. Ursachen dafür dürften das Markteinführungsprogramm des BMELV von 2003, die Änderungen der Energieeinsparverordnung sowie ein generell zunehmendes Verbraucherinteresse sein. Von den rund 26 Mio. m³ Dämmstoffen, die im Jahr 2006 zur Schall- und Wärmedämmung eingesetzt wurden, waren rund 1 Mio. m³ Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe, was einem Marktanteil von ca. 5% entspricht. Den größten Anteil haben Holz- und Cellulosebasierte Dämmstoffe. Nach Abschätzungen der Arbeitsgemeinschaft für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen e.V. könnten Naturdämmstoffe bis 2015 einen Marktanteil von bis zu 10% des Dämmstoffmarktes mit einem Volumen von 5,6 Mio. m³ gewinnen (ADNR). Es wird damit gerechnet, dass der prognostizierte Zuwachs vorwiegend bei den preiswerten Dämmstoffen mit guten Wärmedämmeigenschaften (z.B. aus Altpapier, land- und forstwirtschaftlichen Rückständen) erreicht wird, während die Absatzchancen teurer, auf Basis heimischer Rohstoffe (z.B. Hanf, Flachs, Schafwolle) hergestellter Dämmstoffe eher begrenzt bleiben (Oertel 2007, 171).

Textilfasern werden meist aus Cellulose hergestellt (z.B. Viskose, Modal, Lyncell), aber auch aus Polymilchsäure, die fermentativ auf der Basis von Milchsäure gewonnen wird. Während im Werkstoffbereich eher die Kurzfasern Verwendung finden, sind es in der Textilindustrie die Langfasern. Um bessere Textileigenschaften (Formstabilität, Knitteranfälligkeit, geringe Trockenzeit etc) zu erzielen, werden sie häufig mit synthetischen Fasern oder untereinander zu Mischfasern verarbeitet (Oertel 2007, 60). Obwohl weiterhin mit einem Wachstum des Textilmarktes zu rechnen ist, wird Deutschland von diesem Wachstum kaum profitieren, da die Textilbranche unter dem Druck asiatischer Importe steht und mit weiteren Verlagerungen in diese Region zu rechnen ist (Oertel 2007, 170). Dies gilt vor allem für den Bekleidungssektor, weniger für den Bereich der technischen Textilien.

Fazit

Ein vermehrter stofflicher Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen bietet prinzipiell eine Reihe von Vorteilen: Er kann dazu beitragen, die nicht erneuerbaren Ressourcen zu schonen und eine größere Unabhängigkeit von Erdölimporten zu gewährleisten. Der Ausbau der Rohstoffproduktion könnte zudem zusätzliche Arbeitsplätze schaffen und die Einkommenssituation der Landwirte verbessern. Biogene Produkte sind häufig biologisch abbaubar, biokompatibel und nicht toxisch. Im Hinblick auf die CO₂-Bilanz schneiden sie insofern gut ab, als sich eine energetische Nutzung an die stoffliche anschließen lässt (Kaskadennutzung) und dabei nicht mehr CO₂ frei wird, als die Pflanzen während ihrer Wachstumsperiode aus der Atmosphäre aufgenommen haben.

Dennoch ist die Nutzung von Biomasse keineswegs eine per se nachhaltige Option, sondern kann **gravierende ökologische Probleme** zur Folge haben (dazu ausf. SRU 2007, 43ff.). Zunächst trifft der hohe Flächenbedarf für den Anbau nachwachsender Rohstoffe auf ein begrenztes Flächenangebot, das bereits durch konkurrierende Nutzungen wie die Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie den Siedlungsbau beansprucht wird. Eine Steigerung der Biomasseproduktion führt in der Regel zu einer Intensivierung der konventionellen Landwirtschaft mit verstärktem Dünger- und Pestizideinsatz und den daraus resultierenden Belastungen von Luft, Böden und Gewässern. Aufgrund zusätzlicher Monokulturen (Mais, Raps) ist mit einer weiteren Verringerung sowohl der natürlichen Artenvielfalt als auch der standorttypischen Agrodiversität zu rechnen. Insbesondere die vermehrte Umwandlung von Grünland in Ackerflächen zum Anbau von Industriepflanzen kann den Artenverlust beschleunigen und setzt zunächst in erheblichem Umfang Klimagase frei. Die Ausweitung des Anbaus auf weniger ertragreiche, bisher extensiv genutzte Böden erhöht den Druck auf sensible Regionen und Biotope und kann Zielkonflikte mit dem Naturschutz nach sich ziehen. Auch die Verwertung land- und forstwirtschaftlicher Reststoffe ist nicht unbedingt eine umweltverträgliche Option, da sie Probleme hinsichtlich der Nährstoffkreisläufe (Humusabbau, Verlust an Bodenfruchtbarkeit, Erosion etc.) verursachen kann. Ein vermehrter Import nachwachsender Rohstoffe als Alternative zum heimischen Anbau geht auf Kosten der natürlichen Ressourcen in Drittländern und kann dazu führen, dass schützenswerte Tropenwälder etwa zugunsten von Palmöl-, Zuckerrohr und Eukalyptusplantagen abgeholzt werden. Von großer Bedeutung für eine nachhaltige Nutzung von Biomasse sind daher **global akzeptierte Umwelt- und Sozialstandards** sowie die Einführung von Zertifizierungssystemen.

In Anbetracht der möglichen negativen Folgen einer verstärkten Biomassenutzung fordert der Sachverständigenrat für Umweltfragen eine umfassende Analyse verschiedener Anbau- und Nutzungspfade. Eine Gesamtbewertung der Vor- und Nachteile setzt die Erstellung von **Ökobilanzen für biogene Produkte** unter Einbeziehung der Produktionswege und -prozesse von der Wiege bis zur Bahre voraus. Grundsätzlich hält der Rat jedoch eine nachhaltige Produktion von nachwachsenden Rohstoffen für möglich. So können z.B. ökologische Anbauverfahren mit einer Vielzahl möglicher Pflanzen in einer erweiterten Fruchtfolge zu Synergieeffekten mit dem Naturschutz führen. Die Vielfalt nutzbarer Pflanzen wurde jedoch bisher nur unzureichend ausgeschöpft. Notwendig wäre aus der Sicht des Rates, neben der Erprobung und Anwendung alternativer Anbauverfahren und traditionell verwendeter Sorten auch die **Züchtung neuer Sorten**, die sich durch einen minimalen Pestizid- und Düngerbe-

darf sowie durch positive Eigenschaften im Hinblick auf die stoffliche Nutzung auszeichnen (SRU 2007, 57).

Substitution knapper, nicht erneuerbarer Rohstoffe durch solche mit größerer Reichweite

Da der Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe irreversibel ist, müsste eine nachhaltige Wirtschaftsweise im Prinzip ganz auf ihre Verwendung verzichten. Dennoch wird die Nutzung endlicher Rohstoffe zumindest für einen Übergangszeitraum für akzeptabel gehalten, sofern ihr „Funktionsäquivalent“ ausgeglichen wird, d.h. das Nutzenpotential des verringerten Rohstoffbestands muss mindestens so groß sein wie das Nutzenpotential des ursprünglichen Bestands (Lerch/Nutzinger 1996). Dies soll durch eine entsprechende Effizienzsteigerung bei der Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen (s. Kap. 7.2.3) oder durch eine entsprechende Zunahme der Verwendung erneuerbarer Ressourcen (s. vorhergehender Abschnitt) erreicht werden. Mit der Perspektive eines Zeitgewinns für den Übergang zu regenerierbaren Ressourcen wird auch der Ersatz knapper nicht erneuerbarer Rohstoffe durch ebenfalls nicht erneuerbare, aber reichlicher vorhandene Rohstoffe als zulässig angesehen (Kopfmüller et al. 2001, 229). Die Substitution knapper Rohstoffe durch solche mit größerer Reichweite soll im Folgenden an zwei Beispielen erläutert werden.

Kupfer

Nach einschlägigen Schätzungen hat der Weltkupferverbrauch von 1995 bis 2005 um 40% zugenommen (IKB 2006). Bei einem angenommenen mittleren Wachstum der Weltwirtschaft von 3,6% wäre der globale Kupferbedarf im Jahr 2025 um 55% höher als 2004, was einer jährlichen Steigerungsrate von 2,1% pro Jahr entsprechen würde (RWI/ISI/BGR 2006, 259). Gleichzeitig stellt Kupfer einen relativ knappen Rohstoff dar, dessen Preis zwischen 2003 und 2006 um nahezu das Sechsfache gestiegen ist (ebd., 71). Die statische Reichweite der Kupferreserven wird auf 32 Jahre geschätzt (Behrendt/Scharp 2007, 14). Diese Ausgangssituation erhöht den Druck, innovative technische Lösungen zur Substitution von Kupfer, zur Erhöhung der Materialeffizienz und zur Ausweitung der Sekundärproduktion zu suchen.

In der netzgebundenen Kommunikation lässt sich der Kupfereinsatz durch den weiteren Ausbau der **Netztechnologie auf Glasfaserbasis** reduzieren. Derzeit besteht das Festnetz der Telekom noch zu fast 90% aus Kupfer, was unter anderem mit der Verwendung von Kupfer für den Hausanschluss („die letzte Meile“) begründet wird. In Anbetracht des zunehmenden Bedarfs an hohen Übertragungsraten werden jedoch inzwischen in vielen Städten Glasfaserleitungen bis nahe an die Endkunden heran verlegt. Der Ersatz der bestehenden Leitungen durch Glasfaser eröffnet zudem die Möglichkeit einer Rückgewinnung der Kupferkabel und erschließt damit eine neue Quelle für die Sekundärnutzung (Urban Mining). Neben der netzgebundenen Infrastruktur wurden durch die Mobilfunkanbieter außerdem flächendeckende **Netztechnologien auf Funkbasis** aufgebaut, die genauso leistungsfähig sind wie einfache Breitband-Anschlüsse (DSL). Neue Verfahren wie WiMax sind sogar wesentlich leistungsfähiger und bieten für den Anschluss des Endverbrauchers an das Festnetz eine Alternative zu schnellen Anschlusstechnologien wie ADSL und VDSL. Auch für kleine Computernetze in Unternehmen gibt es inzwischen Möglichkeiten der drahtlosen Kommunikation (W-LAN), so dass auch hier auf eine Kupferverkabelung verzichtet werden kann (Lucas et al. 2007, 14).

Eine weitere Möglichkeit zur Schonung der Kupfervorräte ist die Substitution von Kupfer durch **Aluminium in der Energieübertragung**. Obwohl Aluminium eine um 60% niedrigere elektrische Leitfähigkeit und damit einen um 60% größeren Querschnitt als ein vergleichbares Kupferkabel aufweist, ist es nicht nur deutlich preisgünstiger, sondern auch um 48% leichter. Bei der Stromübertragung in Hochspannungs-Überlandleitungen ist Kupfer bereits nahezu vollständig durch Aluminium verdrängt worden. Auch in allen Bereichen der Nieder- und Mittelspannung setzt sich Aluminium zunehmend durch. Von 1975 bis 1996 stieg der Aluminiumeinsatz in der Kabelproduktion um 81,5% an, während der Kupfereinsatz um 16,5% fiel. Damit ist der Aluminiumanteil in diesem Spannungsbereich von 43% auf 63% angewachsen. Allerdings könnte die Bedeutung von Kupfer für die Stromübertragung durch die unterirdische Verlegung von Leitungen vor allem in Ballungsgebieten wieder zunehmen (Erdmann et al. 2004, 235f.).

Nach der Kabelindustrie (42%) steht der Bausektor mit 27% bezüglich des Kupferverbrauchs in Deutschland an zweiter Stelle (Lucas et al. 2007, 8). Möglichkeiten zur Substitution dieses Materials sind daher auch hier von großer Relevanz. Die Verwendung von Kupfer für die **Installation von Trinkwasserleitungen** in Gebäuden ist seit Anfang der 1990er Jahre rückläufig. Kupferleitungen werden zunehmend durch Kunststoffrohre ersetzt, die sich aufgrund technologischer Verbesserungen beim Werkstoff und bei der Verbindungstechnik heute schnell und kostengünstig verlegen lassen. Während der Anteil von Kupferrohren in der Trinkwasserbereitstellung 1992 noch bei 66% lag, fiel er bis 2004 auf 40% (RWI/ISI/BGR 2006, 253f.). **Offene Kupferanwendung** im Außenbereich von Gebäuden (wie Dächer, Fassadenverkleidungen, Regenrinnen und Regenfallrohre) werden zunehmend als bedenklich angesehen, da Kupferionen durch Regenfälle gelöst und in Gewässer gelangen, wo sie aufgrund ihrer bioziden Wirkungen Wasserorganismen schädigen können. Rohrleitungen, Dächer und Verkleidungen können durch Edelstahl oder Kunststoff ersetzt werden.

Indium

Nach aktuellen Abschätzungen beträgt die statische Reichweite von Indium 6 Jahre (Behrendt/Scharp, 14). Indium kommt als Indiumzinnoxid zur Anwendung, das üblicherweise aus 90% Indium(III)-oxid und 10% Zinn(IV)-oxid besteht. Indiumzinnoxid wird für die Herstellung transparenter Elektroden in Flüssigkristallbildschirmen, organischen Leuchtdioden und Touchscreens eingesetzt und findet außerdem in Dünnschicht-Solarzellen Verwendung. Infolge seiner Eigenschaft als reflektierender Halbleiter der Infrarotstrahlung wird Indiumzinnoxid auch großflächig als Wärmeschutz auf Fenstergläser aufgebracht. Die begrenzte Verfügbarkeit von Indium und sein hoher Preis, der sich in den letzten Jahren vervielfacht hat, schließt eine Massenanwendung beispielsweise in Dünnschicht-Solarzellen bislang aus. Aus diesem Grunde wird intensiv nach Möglichkeiten einer Substitution dieses Stoffes in transparent leitfähigen Beschichtungen gesucht. Aussichtsreiche Alternativen sind:

- mit Fluor dotiertes Zinn(IV)-oxid
- mit Aluminium dotiertes Zinkoxid
- mit Antimon dotiertes Zinn(IV)-oxid

6.3.2 Steigerung der produktbezogenen Materialeffizienz (Pfad 2)

Einer der wichtigsten Hebel zur Schonung endlicher Ressourcen ist die Erhöhung der Materialeffizienz. Unter Materialeffizienz versteht man das Verhältnis von Materialinput zu Produktoutput. Je weniger Material pro Produkteinheit eingesetzt wird, umso höher ist die Materialeffizienz. Strategische Ansatzpunkte zur Verbesserung der Materialeffizienz sind etwa die Miniaturisierung und die multifunktionale Ausgestaltung von Produkten, der Einsatz von Leichtbautechniken, die Entwicklung neuer Werkstoffe sowie die Nutzung bionischer Problemlösungen.

Miniaturisierung

Unter Miniaturisierung (oder Downscaling) wird die Verkleinerung von Bauteilen (z.B. Speicherchips) und Produkten (z.B. Mobiltelefonen, Kameras) bei gleicher Leistung und Funktion verstanden. Der Trend zur Miniaturisierung hält nach Meinung von Experten ungebrochen an und führt im Ergebnis zu erheblichen Rohstoffeinsparungen, auch wenn dies häufig nicht das zentrale Motiv für die Einführung war. So ist z.B. die Miniaturisierung bei Mobiltelefonen eher auf Kundenwünsche zurückzuführen, als auf das Bestreben, den Materialverbrauch zu senken (NIW/ZEW/ISI 2007, 74). Das Gewicht von Mobiltelefonen wurde seit Beginn der 1990er Jahre um mehr als die Hälfte reduziert. Dies wurde neben der Entwicklung leistungsfähiger Batterien vor allem durch die Herstellung immer kleinerer und multifunktionaler Chips ermöglicht, die sich durch gleiche oder sogar größere Rechnerleistungen auszeichnen (Lucas et al. 2007, 15). Als Beispiel lässt sich das umweltfreundliche Handy C1002S von Sony Ericsson anführen, das auf Multifunktionalität, geringes Gewicht (105 g), Vermeidung von Schadstoffen (Blei, halogenfreie Leiterplatten) und Energiesparsamkeit hin konstruiert wurde (NIK 2003:Sony-Ericsson).

Weitere Anwendungsfelder der Miniaturisierung sind:

- Verkleinerung von Dioden, Transistoren, Akkus, integrierten Schaltkreisen, Kondensatoren, Analog-Digital-Wandlern etc. um eine halbe bis eine Größenordnung pro Jahrzehnt. Dadurch ergeben sich kürzere Leiterwege, schnellere Schaltzeiten und Preisvorteile für die Produktion.
- Erhöhung der Speicherkapazität durch die Entwicklung kleinerer und stabilerer elektronischer Speicherelemente. So hatten z.B. die Arbeitsspeicher von Tischrechnern in der 1970er Jahren einige zehntausend Bytes, während heutige PCs Arbeitsspeicher von einigen Gigabyte aufweisen.
- Verkleinerung von Messinstrumenten (z. B. zur Distanzmessung) auf etwa ein Zehntel der ursprünglichen Größe, bzw. auf wenige Prozent bis Promille des ursprünglichen Gewichts. So wog z.B. der GPS-Empfänger „Geodimeter“ (1970) rund 50 kg, während das Gewicht heutiger Geräte unter 100 g bei gleichzeitig um das 10-100 fache schnellerer Messung liegt.
- Entwicklung medizinischer Geräte für Endoskopie, Laser-Chirurgie, Mikrochirurgie.

Die ressourcensparenden Effekte der Miniaturisierung können allerdings durch sog. „Rebound-Effekte“ wieder zunichte gemacht werden. Das bedeutet, dass es als Folge von Preisreduzierungen, steigender Attraktivität des Produkts und Beschleunigung der Innovations-

zyklen zu einer Verringerung der Nutzungsdauer und damit zu einem Wachstum des durchschnittlichen Konsums pro Person kommt. In der Summe führt dies zu einer Erhöhung des Rohstoffverbrauchs (Schauer 2004). Ein weiterer Nachteil der Miniaturisierung besteht darin, dass die zunehmende Integration der Systeme (z.B. durch Anwendung von Mikrosystemtechnik oder auch Nanotechnologie) die stoffliche Trennung der Komponenten erschwert und dadurch deren Wiederverwertung in Frage stellt (K. Steinmüller/A. Steinmüller 2006, 209)

Multifunktionalität

Ein anderer Ansatz zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität ist die technische Zusammenführung unterschiedlicher Anwendungen in einem einzigen Gerät, das dadurch im Prinzip mehrere andere ersetzen kann. Multifunktionalität findet sich beispielsweise bei Mobiltelefonen, die neben der Telefonfunktion noch andere Dienste wie Fotografieren, Internetzugang, E-Mail, Büroanwendungen, Navigation, Spiele, Video und Fernsehen anbieten. Ein anderes Beispiel sind Drucker, die mehrere Aufgaben wie Drucken, Scannen, Kopieren und Faxen integrieren oder PCs, bei denen in jüngster Zeit vor allem neue Kommunikationsformen und Mediennutzungen hinzugekommen sind. Es gibt bisher allerdings keine empirischen Untersuchungen darüber, inwieweit die Multifunktionalität von Geräten in der Praxis tatsächlich zu Einspareffekten führt. Es ist vermutlich eher zu bezweifeln, dass beispielsweise die Möglichkeit, mit dem Mobiltelefon zu fotografieren, den Ankauf eines Fotoapparates verhindert.

Leichtbau

Leichtbau ist eine Konstruktionsphilosophie, die auf eine möglichst große Gewichtsreduktion von Bauteilen abzielt, sowohl unter dem Aspekt der Rohstoffeinsparung als auch, vor allem im Fahrzeugbau und in der Raumfahrt, unter dem Aspekt einer Verminderung der erforderlichen Antriebsleistung. Leichtbau erfordert ein Zusammenspiel von integrierten Konstruktionsprinzipien, optimierter Bauteilauslegung, angepassten Herstellungsverfahren und zweckgerechter Werkstoffauswahl (Oertel/Grunwald 2006,77).

Ein Werkstoff der sich aufgrund seines geringen spezifischen Gewichts und seiner sonstigen positiven technischen Eigenschaften (Formbarkeit, relativ gute elektrische Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit) für den Leichtbau anbietet, ist **Aluminium**, das zunehmend im Fahrzeugbau, in der Bauwirtschaft und in der Lebensmittelindustrie (Getränkedosen, Lebensmittelverpackungen) eingesetzt wird. Aluminium ist das am häufigsten in der Erdkruste auftretende Metall und somit reichlich vorhanden. Selbst wenn der zu seiner Herstellung heute ausschließlich verwendete Rohstoff Bauxit, dessen statische Reichweite knapp 150 Jahre beträgt, erschöpft sein sollte, stehen andere wirtschaftliche Alternativen zur Aluminiumgewinnung zur Verfügung (RWI/ISI/BGR 2006, 73). Aluminium lässt sich zudem gut wiederverwerten. Als gravierender Nachteil ist der zur Aluminiumgewinnung benötigte hohe Energieeinsatz zu betrachten.

Im Automobilbau hat sich der Aluminiumanteil in den letzten fünfzehn Jahren verdoppelt, auf 120 kg pro PKW (ebd., 260f). Im Bereich der Motoren hat Aluminium den klassischen Eisenguss weitgehend verdrängt. Während zunächst nur vereinzelt Leichtmetall-Zylinderköpfe aus Aluminium gefertigt wurden, werden inzwischen mehr Motorblöcke aus Aluminium als aus Gusseisen hergestellt. Selbst bei Kurbelgehäusen hoch belasteter Dieselmotoren kommt das Leichtmetall mittlerweile zum Einsatz. Auch im Karosseriebau steigt die Nachfrage. Für

die Gesamtkarosserie kommt Aluminium bisher nur bei wenigen Modellen zum Einsatz (z.B. Audi A8), bei Hauben, und Anbauteilen sowie im Bereich des Fahrwerks gewinnt es jedoch bei praktisch allen Herstellern immer größere Anteile (Goppelt 2008).

Als eine Alternative zu Aluminium kommt **Magnesium** in Betracht, das bis zu 75% leichter als Stahl und 35% leichter als Aluminium ist. Magnesium weist zudem eine Reihe weiterer positiver Eigenschaften wie hohe gewichtsspezifische Steifigkeit, Festigkeit und Duktilität, geringe thermische Ausdehnung im Vergleich zu Kunststoffen, gute Warmumformbarkeit, und Recyclingfähigkeit auf. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften eignet es sich zur Herstellung ultraleichter Bauteile mit hohen mechanischen Belastungsanforderungen. Im Vergleich zu Aluminium ist Magnesium allerdings teurer und weniger korrosionsbeständig. Die Preise für Magnesium sind in den vergangenen Jahren jedoch gesunken, da das Rohstoffangebot erhöht wurde. Geringere Kosten, das gute Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht sowie die technischen Möglichkeiten zur Herstellung komplexer Magnesiumkomponenten haben zu einem breiteren Einsatz dieses Leichtmetalls in der Automobilindustrie geführt (Kühlein/Bruck 2007). Bei BMW wird Magnesium für Teile des Motors verwendet, bei Porsche gibt es Räder aus Magnesium. Weiterhin werden Getriebegehäuse, Lenkräder, Tankdeckel, Instrumenten- oder Sitzträger aus diesem Material gefertigt (Goppelt 2008). Im Maschinenbau gilt Magnesium aufgrund seiner Leichtigkeit ebenfalls als zukunftssträchtiger Werkstoff für Gussteile, Bleche und Profile (BMBF 2005, 39). Da Magnesium eine geringe Abnutzung aufweist, ist seine Verwendung vor allem für Baukomponenten attraktiv, die schnellen Bewegungen ausgesetzt sind (RWI/ISI/BGR 2006, 280). Magnesium unterliegt der REACH-Regelung, wodurch seine weitere stoffliche Verwendung in Europa gefährdet sein könnte.

Ein innovatives Verfahren, durch das neue Werkstoffeigenschaften erzielt werden, ist das **Thixoforming**, für das auch die englische Bezeichnung Semi-Solid Metal Casting (SSM) gebräuchlich ist. Thixoforming stellt ein Hybridverfahren zur Formgebung von Aluminium- und Magnesiumlegierungen im halbfesten thixotropen Zustand dar, bei dem die hohe Gestaltungsfreiheit und Fertigungsgeschwindigkeit von Druckgießverfahren mit den Qualitätsvorteilen von Schmiedeverfahren verknüpft werden. Semi-solid umgeformte Bauteile zeichnen sich durch eine gute Kombination von Festigkeit und Zähigkeit aus, sie sind wärmebehandelbar, schweißbar, druckdicht und relativ kostengünstig (Uggowitzer/Gullo/Wahlen 2000). Die Anwendung liegt derzeit hauptsächlich im Bereich dünnwandiger Elektronikgehäuse, es werden aber bereits auch Magnesiumbauteile für den Automobilsektor produziert. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Substitution von hochwertigen Schmiedebauteilen durch Aluminiumgussteile, da sich semi-solid umgeformte Bauteile durch geringen Schwund auszeichnen. Sie können daher im Gegensatz zu anderen Gussteilen in bestimmten Fällen ohne zusätzliche mechanische Bearbeitung auskommen. Außerdem ist es beim einstufigen geschlossenen Prozess des Thixogießverfahrens möglich, Legierungszusätze zu verwenden, die in der herkömmlichen Druckgusstechnologie Probleme durch Abbrand, Oxidation oder Seigerungen (Entmischung der Schmelze) verursachen können. Die gemeinsame Verarbeitung von Magnesium und Kunststoffen im Spritzgut bietet das Potential für die Entwicklung neuer Leichtbauwerkstoffe (Eibisch et al. 2005).

Neue Werkstoffe spielen generell eine bedeutende Rolle im Rahmen des Leichtbaus. Neben dem Vorteil der Rohstoffeinsparung zeichnen sie sich häufig durch bessere technische

Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit, leichte Verarbeitbarkeit aus und eröffnen damit neue Konstruktionsmöglichkeiten. Für bestimmte Produktlinien etwa im Fahrzeugbau und im Bausektor geht die Entwicklung zu **maßgeschneiderten Werkstoffen**, die in ihrer speziellen Anwendung erhebliche Einsparpotentiale bieten. Dazu gehört auch die Auswahl der Werkstoffe nach den auftretenden Belastungen oder die kraftflussgerechte Gestaltung von Bauteilen (Kristof 2007, 33).

In den letzten Jahren ist, auch als Antwort der Stahlindustrie auf den zunehmenden Einsatz von Leichtmetallen im Automobilbau, ein breite Palette von **innovativen Stahlprodukten** und Fertigungstechniken entwickelt worden, die neue Möglichkeiten für den Leichtbau eröffnen:

- Neue **hoch- und höchstfeste Stahllegierungen** mit Blechstärken zwischen 0,65 und 2,00 mm sind in der Lage, den Gewichtsachteil gegenüber Leichtmetallen beinahe auszugleichen. Durch ihre hohe Festigkeit bei gleichzeitig guter Verformbarkeit kann der Materialeinsatz verringert werden, ohne die Stabilität zu reduzieren.
- **Stahl-Sandwichbleche** bestehen aus zwei dünnen Stahlblechen, die mit einer Polypropylen-Kunststoffschicht verklebt sind. Dank dieser Technik können Bauteile bis zu 50% leichter ausgeführt werden als mit üblichen Tiefziehstählen.
- **Tailored Blanks** sind Platinen, die mit Hilfe eines neuen Fertigungsverfahrens gezielt für unterschiedliche Beanspruchungen hergestellt werden. Mit diesen Platinen werden spezifische Werkstoffeigenschaften und Blechdicken jeweils dort eingesetzt, wo sie im Bauteil am effizientesten zur Gewichtsreduktion und Steifigkeitsverbesserung beitragen.
- Das Verfahren der **Innhochdruckumformung** von Hohlprofilen erhöht die Maßhaltigkeit des Bauteils und steigert die Festigkeit durch Kaltverformung. Der Einsatz von Stahlrohren, die mit dieser Technik gefertigten wurden, beispielsweise im Dachrahmen eines Automobils, verringert das Gewicht durch die geringe Anzahl von Teilen und den Wegfall der Schweißflansche. Zudem nimmt der Dachrahmen aufgrund der belastungsangepassten Querverläufe die Kräfte so effizient auf, dass bei anderen Karosseriekomponenten auf Material zur Verbesserung der Steifigkeit und Crash-Sicherheit verzichtet werden kann.
- **Neue Fügeverfahren** erlauben leichtere Konstruktionen. So kann z.B. beim Laserschweißen auf die Überlappung von Blechen verzichtet werden. Ebenso stellt der Ersatz von Nietverbindungen durch Klebeverbindungen eine leichtbauwirksame Technik dar.

Diese Techniken wurden bei der Entwicklung einer ultraleichten Stahlkarosserie im Rahmen des ULSAB-AVC-Projekts (**Ultra Light Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts**) eingesetzt, das im Auftrag eines Konsortiums weltweit führender Stahlkonzerne durchgeführt wurde (ULSAB-Broschüre). Wie die Ergebnisse zeigen, konnte das Gewicht der Karosserie gegenüber ausgewählten Referenzmodellen um 25% gesenkt, die Torsions- und Biegesteifigkeit gegenüber den Durchschnittswerten um 80% erhöht und das Crashverhalten verbessert werden. Das Leichtfahrzeug besteht aus nur 96 Hauptbauteilen und ist dadurch gegenüber konventionell gefertigten Karosserien rationeller herzustellen. Aufgrund des geringeren Materialeinsatzes werden zudem bereits im Herstellungsprozess Ressourcen und Energie eingespart (Thyssen Krupp Steel AG 2006).

Große Potentiale für den Einsatz innovativer Stahlprodukte liegen in Anwendungsfeldern, in denen bisher überwiegend einfache Stahlqualitäten eingesetzt wurden, etwa im Baubereich und im Schiffsbau (Ritthoff 2007, 21). Innovationen **wie höherfeste Feinkornbaustähle** sind im Bauwesen besser zu verarbeiten als herkömmliche Stahllarten und erhöhen so die Attraktivität von Stahl als Baustoff für Brücken, Stadien und Hochhäuser. Die neu entwickelten **Davex-Profile** zeichnen sich durch minimales Gewicht bei optimaler Tragfähigkeit aus und eröffnen neue Möglichkeiten für bauliche Stahlkonstruktion in Verbindung mit anderen Werkstoffen wie Beton, Glas oder Holz (ThyssenKrupp Davex 2006). Im Wohnungsbau gewinnen neue dünnwandige Stahlbleche mit optimierten Dämmwerkstoffen an Bedeutung (RWI/ISIBGR 2006, 269).

Im Bereich des Stahlbeton-Baus spielt das bereits vor zwölf Jahren von der Firma Häussler Planung GmbH entwickelte **Bamtec-Verfahren (Bewehrungs-Abbund-Maschinen-Technologie)** eine wichtige Rolle, das inzwischen weltweit immer mehr Anwender findet. Dabei handelt es sich um ein besonders ressourcenschonendes und wirtschaftliches Verfahren zur Planung, Herstellung und Montage von Bewehrungen in Bodenplatten und Decken aus Stahlbeton. Auf der Basis einer Finite-Elemente-Berechnung wird die erforderliche Bewehrung exakt ermittelt und von einem Schweißroboter mit Hilfe von Tragebändern zu einer Montageeinheit zusammengefasst. Die vorgefertigten Einheiten werden auf der Baustelle vom Kran an der richtigen Stelle abgesetzt und ausgerollt. Durch die Anpassung der Bewehrung an die statische Belastung der Stahlbetonplatten können bis zu 40% des Baustahls und durch die Lieferung vorgefertigter Montageeinheiten bis zu 80% der herkömmlichen Verlegezeit eingespart werden (bpz 2007).

Angesichts der gravierenden Umweltprobleme bei der **Zementherstellung** (s. Kap.1) und der weltweiten Bedeutung, die Zement als Baustoff hat, ist ein besonderes Augenmerk auf Technologien zu richten, die den Zementverbrauch senken. Dazu gehören:

- das ebenfalls von der Häussler Planung GmbH entwickelte **Beeplate-System**, mit dem bei gleicher Belastbarkeit bis zu 30% Beton eingespart werden können. Dabei werden auftriebsfreie Hohlkörper in eine zweiachsig tragende Ortbeton-Flachdecke integriert. Die Anordnung der Hohlkörper erfolgt in einem Sechseckraster, das die engstmögliche Packung und damit die größte Gewichtsersparnis ermöglicht. Diese Deckenkonstruktion eignet sich auch für große Spannweiten bis zu 12 m. (<http://www.bamtec.de/beeplate.html>).
- die Verwendung **alkaliresistenter Glasfaserbewehrungen** anstelle der herkömmlichen Stahlbewehrung. Die weltweit erste Betonbrücke mit Endlosglasfäden als Bewehrung, die in ihrer Verlegerichtung der Beanspruchung angepasst werden können, wurde im Park der Landesgartenschau Sachsen errichtet und ist 80% leichter als eine vergleichbare Stahlbetonkonstruktion. Für dieses Verfahren, das in Zusammenarbeit mit der TU Dresden entwickelt wurde, erhielt das Betonwerk Oschatz den Materialeffizienzpreis 2007 (demea 2007).
- die Entwicklung von **neuen zementartigen Bindemitteln**, an denen derzeit im Forschungszentrum Karlsruhe gearbeitet wird. Der sog. „Karlsruher Zement“ spart durch seinen geringeren Calciumanteil und eine niedrigere Herstellungstemperatur sowohl Rohstoffe (Kalkstein) als auch Primärenergie. Nach vorläufigen Schätzungen könnten

mit diesem Zement der Energieaufwand bis zu 50% und die Kohlendioxidemissionen zwischen 30 und 60% reduziert werden.

- die Nutzung von **nanotechnologischen Entwicklungen** im Betonbau. So können z.B. Siliciumdioxid-Nanopartikel in synthetischen Kieselsäuren (Nanosilica) als Zusatzmittel für Spritz- und Hochleistungsbeton zur Verbesserung der Haftzug- und Haftscherfestigkeit zwischen Beton und Bewehrungsstahl beitragen (Oertel/Grunwald 2006, 82)
- die von der Foster Bau GmbH entwickelte **Sandwich-Bauweise**, die vor intensiver radioaktiver Strahlung schützt. Anstelle der herkömmlichen meterdicken Stahlbetonwände werden dünne Außenschalen aus Betonfertigteilen mit einer losen Schüttung aus Gips mit Eisenerz gefüllt. Dank Materialeinsparungen und kurzer Bauzeiten senkt das Verfahren die Kosten bis zu 90% (BMU 2007,78).

Metallschäume sind relativ neue Materialien für den Strukturleichtbau, die in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden können. Ein schon länger am Markt befindlicher Werkstoff ist **Schaumaluminium**, das hohe Festigkeit mit niedrigem spezifischen Gewicht verbindet. Aufgrund seiner guten isolierenden Eigenschaften eignet es sich hervorragend zur Schall-, Vibrations- und Wärmedämmung. Während die Metallschaumtechnologie zunächst auf Aluminium fokussiert war, wird an einer Übertragung der Erkenntnisse auf andere Metalle gearbeitet (RWI/ISI/BGR 2006, 270). So hat z.B. die Firma M-Pore GmbH aus Dresden einen **Stahlschaum** auf den Markt gebracht (BMU 2007, 79). Metallschäume erweitern als Werkstoffe die Möglichkeiten der Formgebung und Konstruktion erheblich, zumal neue Verfahren eine anwendungsnahe Auslegung der Metallschaumkomponenten erlauben. Als besonders erfolgversprechende Anwendungen zeichnen sich Wärmetauscher in Kollektoren und Latentwärmespeichern, Strömungsgleichrichter und Kühlelemente für Fluide ab. Mit der Erschließung neuer potentieller Einsatzgebiete ist das Interesse der Industrie an Metallschäumen in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Deutschland ist im internationalen Vergleich derzeit gut aufgestellt und gehört sowohl in Forschung und Entwicklung als auch unternehmensseitig zur Spitzengruppe (Brand et al. 2007).

Ein wichtiges Forschungsfeld ist die Entwicklung von Schäumen mit höherer Festigkeit. Das **SRSS-Verfahren (Schlicker-Reaktions-Schaum-Sinter-Verfahren)** ist eine neue Technologie zur Herstellung von offenporigen Schäumen als Filter, Katalysatorträger, Wärmetauscher oder mechanisches Dämpfungsmaterial. Dabei wird zunächst ein Gemisch (der sog. Schlicker) aus Metallpulver, Wasser und einem Stabilisator hergestellt. Die Zugabe von Phosphorsäure bewirkt die Bildung von Wasserstoffbläschen, wodurch der Schlicker aufgeschäumt wird. Gleichzeitig entsteht ein Metallphosphat, das die gebildete Porenstruktur verklebt und somit stabilisiert. Zum Schluss wird der Schaum schadstofffrei gesintert (IEHK 2007). Das Verfahren ermöglicht erhebliche Materialeinsparungen und eignet sich sowohl für Metalle, die in großen Mengen eingesetzt werden (Eisen, Stahl, Aluminium, Nickel) als auch für Metalle mit strategischer Bedeutung.

Innovative und sich am Markt verstärkt durchsetzende Werkstoffe sind **Kohlenstoffaser-verbundwerkstoffe (CFK)**, die im Flugzeugbau und in der Raumfahrt bereits seit geraumer Zeit zum Einsatz kommen. Aufgrund ihres Gewichts, das 70% geringer als das von Stahl und 40% geringer als das von Aluminium ist, spielen sie im Flugzeugbau eine immer wichtigere Rolle. Aktuelle Beispiele sind der Airbus A380, bei dem der CFK-Anteil 20% beträgt, sowie der Dreamliner von Boeing, dessen Rumpf und Tragflächen überwiegend aus diesem Mate-

rial bestehen, was das Flugzeuggewicht um 20% reduziert (Brand et al. 2007, 14). Für die nächsten Jahre ist mit einem erheblichen Bedeutungszuwachs von CFK-Werkstoffen zu rechnen, nicht nur im Flugzeugbau, sondern auch in anderen Branchen. Zur Verstärkung von Bauwerken werden schon heute vermehrt Laschen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen anstelle von Stahllaschen eingesetzt. Auch zur Bewehrung von Beton wird das Material bereits erfolgreich genutzt, da sich CFK-verstärkte Träger in vielen Fällen als leistungsfähiger erwiesen haben als vergleichbare Stahlbetonkonstruktionen. Ein Einsatzgebiet von wachsender Bedeutung sind auch Windkraftanlagen. Im Motorsport finden CFK-Werkstoffe aus Gewichtsgründen ebenfalls Verwendung. Die Reparatur dieser Materialien ist allerdings mit wesentlich größerem Aufwand verbunden als die Reparatur von Bauteilen aus Aluminium oder Stahl. Letztere weisen außerdem deutliche Vorteile bezüglich der Wiederverwertbarkeit auf (RWI/ISI/BGR 2006, 262)

Verbundwerkstoffe aus Metallen und Keramikteilchen oder Fasern unterschiedlichster Länge, sog. **Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe**, werden im Feinguss hergestellt. Sie bieten eine Alternative zu konventionellen Leichtmetalllegierungen mit besseren Materialeigenschaften. So ist z.B. ein Verbundwerkstoff aus Aluminium und Siliciumcarbidteilchen für eine Scheibenbremse im Automobilbau besser geeignet als eine Aluminiumlegierung, da er eine höhere Festigkeit (auch bei höheren Temperaturen) aufweist und damit eine geringere Baugröße erlaubt. Als alternative Matrix-Materialien gewinnen in jüngerer Zeit **Aerogelege** zunehmendes Interesse. Aerogelege sind nanoporöse Materialien, die sich durch ein außergewöhnlich niedriges Gewicht, hohe Belastbarkeit und geringe thermische Leitfähigkeit auszeichnen. Im Verbund mit Fasern (Kohlenstoff, Glas, Aramid, Naturstoffen) bieten sie die Möglichkeit zur Herstellung extrem leichter neuer Werkstoffe, die aufgrund ihrer Eigenschaften in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau sowie als Isoliermaterial im Bereich der Wärmedämmung große Bedeutung erlangen können (Brand et al. 2007, 20f.).

Eine wichtige neue Entwicklungslinie im Leichtbau ist die Verwendung von **Nanokompositen**, vor allem im Fahrzeug- und Flugzeugbau, die Gewichtsreduktion, gute Geräuschdämpfung, höhere Korrosionsbeständigkeit und bessere mechanische Eigenschaften versprechen. Bei Strukturkomponenten wie Chassis und Karosserie werden Verbundwerkstoffe aus herkömmlichen Basismaterialien (Aluminium, Magnesium, Edelstahl, Polymeren), die mit Nanopartikeln, Nanofasern oder Nanokristallen verstärkt sind, eingesetzt. Im Antriebssektor wird faserverstärkten Nanopolymeren neben neuartigen Legierungen mittelfristig ein großes Potential zugeschrieben. Durch den Einsatz von nanokeramischen Komposit-Materialien ergeben sich neue Konstruktionsmöglichkeiten für die innere Struktur von Verbrennungsmotoren und die Beschichtung ihrer Komponenten (z.B. verschleißfeste mechanische Teile wie Zylinder, Kolben, Lager durch Carbidbeschichtungen). Eine weitere Innovation sind **Kohlenstoff-Nanoschäume** bis zu deren Anwendungsreife allerdings noch größerer Forschungsbedarf gesehen wird (Brand et al. 2007, 16).

Bionik

Bionik bezeichnet generell den Versuch des „Lernens von der Natur“. Dabei sollen die evolutionsoptimierten Problemlösungen, Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme mit wissenschaftlichen Mitteln analysiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf technische Systeme übertragen bzw. zu deren Verbesserung herangezogen

gen werden (v. Gleich et al 2007, 14ff.; Oertel/Grunwald, 19ff.). Der deutsche Begriff Bionik, der sich aus „Biologie“ und „Technik“ zusammensetzt, bringt dieses Anliegen zum Ausdruck. Grob gesehen, lassen sich in der Bionik drei Hauptentwicklungsstränge unterscheiden, die allerdings in jüngster Zeit aufeinander zulaufen und sich zunehmend vermischen (dazu ausf. v. Gleich et al. 2007, 19ff.):

- Der „**funktionsmorphologische Strang**“ ist der älteste und konzentriert sich auf den Zusammenhang zwischen Formen bzw. Strukturen biologischer Systeme und deren Funktionen. Vor Beginn der wissenschaftlichen Biologie basierten die Anregungen für technische Erfindungen auf unmittelbarer Naturbeobachtung. Eines der ältesten Beispiele ist der Stacheldraht, der von Michael Kelly nach dem Vorbild des Osagedorns entwickelt und 1868 zum Patent angemeldet wurde. Weitere bekannte Beispiele sind der Klettverschluss, der Fallschirm, die Stromlinienform und der Auftrieb erzeugende Flugzeugflügel.
- Der zweite, später einsetzende Entwicklungsstrang befasst sich primär mit der Art der **Signal- und Informationsverarbeitung** in biologischen Systemen und führte insbesondere auf dem Gebiet der Biokybernetik, Sensorik und Robotik zur erfolgreichen technologischen Anwendungen. Aktuelle Beispiele sind etwa dezentrale Steuerung, *parallel computing*, selbstorganisierende Software und neuronale Netze oder pneumatische Aktoren, die menschlichen Muskeln nachempfunden sind.
- Der dritte und jüngste Entwicklungsstrang wird getragen von den Fortschritten im Bereich der Nanotechnologien und ist auf Prozesse der **molekularen Selbstorganisation**, auf die ontogenetische Entwicklung von Zellen und Geweben sowie deren Reaktion auf Beanspruchung (Adaption) und Selbstheilung fokussiert. Diese Entwicklungslinie eröffnet Perspektiven für die Herstellung hierarchisch strukturierter Werkstoffe nach dem Vorbild von Knochen, Zähnen oder Pflanzenhalmen und für die Entwicklung intelligenter Materialien (*smart materials*), die sich unterschiedlichen Belastungen anpassen und sich ggf. selbst heilen können. Es wird angenommen, dass von diesem Entwicklungsstrang mittelfristig die stärkste Dynamik ausgehen wird (v. Gleich et al. 2007, 23).

Neben den drei eher zeitlich gestaffelten Strängen lässt sich die Bionik auch nach der Art der bionischen Grundideen einteilen, die jeweils als Vorbild der Technikentwicklung dienen. Dabei lassen sich mit zunehmendem Abstraktionsgrad wiederum drei Ebenen unterscheiden (dazu ausf. v. Gleich et al. 2007, 25ff.; Oertel/ Grunwald 2006, 29ff.):

- Das „Lernen von den **Ergebnissen** der Evolution“ benutzt die in der Natur vorfindbaren Formen und Strukturen als Model für technische Produkte.
- Das „Lernen von den evolutionären **Prozessen**“ hat den biologischen Steuerungsprozess selbst zum Gegenstand der Forschung und orientiert Technikentwicklung an den Mechanismen, die biologische Leistungen hervorgebracht haben.
- Das „Lernen von den **Erfolgsprinzipien** der Natur“ versucht aus der Analyse der Evolution von Organismen und Ökosystemen allgemeine Funktionsprinzipien abzuleiten und nimmt diese als Leitlinien der Technikentwicklung. Dazu gehören: Ressourceneffizienz und Kaskadennutzung, Modularität und Multifunktionalität, Resilienz, Adaptivität, Diversität und Redundanz, Selbstorganisation und Selbstheilung sowie mehrdimensionale Optimierung.

Bionische Problemlösungen stoßen in der Öffentlichkeit auf eine breite positive Resonanz. Als Erklärung für diese Faszination lässt sich neben der Erwartung, dass bionische Lösungen als Resultate eines evolutionären Optimierungsprozesses von besonderer Qualität sein müssten, die Hoffnung auf eine Versöhnung von Natur und Technik anführen. Bionik verspricht die Entwicklung einer „nachhaltigen Technik“, die angepasste, robuste, risikoärmere und ökologisch verträgliche Lösungen für gesellschaftliche Probleme liefert (Nachtigall 2002). Dieses Versprechen erweist sich jedoch bei näherem Hinsehen als ambivalent. Evolutionäre Optimierungen in der Natur erfolgen nach anderen Kriterien und unter anderen Bedingungen als technische Problemlösungen. Die Übertragung des Wissens, das an biologischen Systemen gewonnen wurde, in einen technischen Kontext kann daher auch zu neuen Risiken und Problemen führen. Bionische Lösungen sind nicht per se risikoärmer oder umweltverträglicher, sondern müssen, wie andere technische Lösungen auch, einem gesellschaftlichen Bewertungsprozess unterzogen werden, in dem Chancen und Risiken im Einzelfall abgewogen werden (Oertel/Grunwald 2006, 26,37).

Im Folgenden werden einige Technologien, die unter dem Aspekt der Ressourcenproduktivität von besonderem Interesse sind, ausführlicher dargestellt. Auch hier handelt es sich u.a. um Leichtbau, neue Werkstoffe oder die belastungsangepasste Gestaltung von Bauteilen, also um strategische Ansätze, die schon behandelt wurden. Das gemeinsame Charakteristikum der hier vorgestellten Techniken ist aber ihr bionischer Ursprung, weshalb sie in einem eignen Abschnitt zusammengefasst werden.

Oberflächentechnik: Eines der bekanntesten Beispiele ist die Übertragung der Beschaffenheit selbstreinigender Pflanzenoberflächen auf technische Produkte. 1995 wurde die Marke **Lotus-Effect®** eingeführt, die Produkte mit mikro- und nanostrukturierten Oberflächen kennzeichnet. Der selbstreinigenden Fassadenfarbe Lotusan, die 1999 als erstes Produkt erfolgreich in den Markt eingeführt wurde und inzwischen weltweit vertrieben wird, folgte 1999 ein Lotus-Effect-Putz (beide von der Firma STO AG); seit 2004 sind selbstreinigende Dachziegel in verschiedenen Farben und Formen (Firma Erlus Baustoffe AG) auf dem Markt. Erhältlich sind außerdem Beschichtungsmittel für Kunststoffe, sowie ein Spray zur Erzeugung temporärer selbstreinigender Eigenschaften auf beliebigen Oberflächen. Selbstreinigende Textilien befinden sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium (Barthlott 2007). Zur Nutzung des Lotus-Effekts sind mittlerweile ca. 200 Patente angemeldet worden (Oertel/Grunwald 2006, 74).

Ein anderes Beispiel sind die am Vorbild der Haifischhaut orientierten **Riblet-Folien**, die den Reibungswiderstand an der Außenhaut von Flugzeugen um ca. 6% vermindern und dadurch eine Treibstoffersparnis von 2% ermöglichen. Um die technischen Probleme bezüglich der Aufbringung und Haltbarkeit der Folien zu lösen, wird zur Zeit an einem neuen Verfahren gearbeitet, bei dem die Rillenstruktur direkt in die Lackschicht eingeprägt und mittels UV-Licht ausgehärtet wird (Hage 2007). In der Entwicklung befinden sich außerdem schadstofffreie **Antifouling-Anstriche** für Schiffe, die den Bewuchs mit Seepocken und Algen verhindern und somit den Strömungswiderstand verringern (Striffler 2007).

Haftsysteme, die feste, aber reversible Verbindungen von Werkstoffen ohne Schweißen oder Kleben ermöglichen: Das biologische Vorbild für **klebefreies Haften** sind Insekten oder Geckos, die dank feinsten Härchen mit extrem hohen Adhäsionskräften an den Fußsohlen in

der Lage sind, selbst kopfüber an glatten Flächen zu laufen (Oertel/Grunwald 2006, 76). Das Stuttgarter Max-Planck-Institut entwickelt derzeit zusammen mit der Gottlieb Binder GmbH in Holzgerlingen ein neuartiges Haftmaterial, das durch Käferfüße inspiriert ist. Eine spezielle Oberflächenstruktur von Mikrohärchen mit Pilzkopf lässt das Material an glatten Wänden klebefrei haften. Es eignet sich daher besonders für die Verbindung glatter Flächen, wie z. B. von Folien mit Gläsern (www.biokon.net).

Leichtbau: Ein Beispiel biologisch inspirierter Leichtbaustrukturen sind neu entwickelte Faserverbundwerkstoffe, die nach dem Sandwichprinzip von Pflanzenhalmen (Winterschachtelhalm und Pfahlrohr) aus Hartschaumstoff und Glasfasergewebe aufgebaut sind. Sie zeichnen sich durch geringes spezifisches Gewicht, hohe Biegesteifigkeit und Knickfestigkeit, ausgeprägte mechanische Belastbarkeit und Dämpfung aus. Als Einsatzbereiche kommen Luft- und Raumfahrttechnik, Fahrzeugbau, Bauwesen, Gerätebau und Medizintechnik (Prothetik) in Betracht (Milwich et al. 2007). Ein anderes Beispiel sind gewichtsreduzierte Autoreifen (BMW), die sich in Bezug auf die Materialverteilung am Vorbild der Kraftübertragung von Katzenpfoten orientieren (Oertel/Grunwald 2006, 78).

Lastgesteuerte Bauteiloptimierung: Ein Mechanismus der Selbstoptimierung in biologischen Systemen ist das lastadaptive Wachstum, bei dem Strukturen dort verstärkt werden, wo sie der höchsten Belastung ausgesetzt sind. Dieses natürliche Wachstumsprinzip wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode in die Technik übertragen. Sie **SKO-Methode (Soft Kill Option)** simuliert Mineralisationsvorgänge in Knochen und dient der Gestaltoptimierung von Maschinenbauteilen. Unter Berücksichtigung konstruktiver Vorgaben wird an nicht tragenden Bauteilen Material entfernt, wodurch die Bauteile bei gleicher Festigkeit leichter werden. Die **CAO-Methode (Computer Aided Optimization)**, die sich am Wachstum von Bäumen orientiert, entfernt Spannungsüberhöhungen durch lokale Materialanlagerung und homogenisiert damit die Spannungsverhältnisse auf der Oberfläche von Bauteilen, deren Lebensdauer dadurch erheblich verlängert werden kann. Die **CAIO-Methode (Computer Aided Internal Optimization)** optimiert die internen Faserverläufe künstlicher Faserverbundstrukturen mit dem Ziel, die Belastbarkeit zu steigern und das Gewicht zu reduzieren (Tesarri/Mattheck 2007).

Biomimetische Werkstoffen: Darunter werden keramische Materialien verstanden, deren Herstellungsprozess (Biomineralisation) und Ergebnis an biologischen Vorbildern ausgerichtet sind. Die biomimetische Materialsynthese beruht auf Selbstorganisationsprozessen im nanoskaligen Bereich. Ein Anwendungsbeispiel ist die derzeit an der Universität Bremen betriebene Herstellung von künstlichem Perlmutter. Perlmutter stellt ein attraktives Material dar, weil es zäher als heutige Industriekeramik und zudem korrosionsresistent gegenüber Salzwasser ist. In dem Forschungsprojekt werden die aus dem Prozess der Biomineralisation abgeleiteten Strukturregeln für die Entwicklung hochzäher Keramiken zur Herstellung von Folien, Membranen, Gerüststrukturen und Beschichtungen genutzt. Aufgrund der besseren Biokompatibilität des neuen Werkstoffs ist auch der Einsatz in der Medizintechnik (Implantatmaterial) denkbar. Viel versprechend sind darüber hinaus Wandfarben als abschiefernde Beschichtungen für die Anwendung im Fassadenschutz (Antigraffiti) und im Schiffsbau (Anti-fouling) (Oertel/Grunwald 2006, 70f.).

Als „**Smart Materials**“ oder „intelligente Werkstoffe“ werden Materialien bezeichnet, welche die Eigenschaft haben sich selbständig an veränderliche Umweltbedingungen anzupassen. Selbstreparatur ist eine der wichtigsten adaptiven Leistungen der Natur, die auf verschiedenen Ebenen vom Molekül (DNA-Reparatur) bis zum Gesamtorganismus (z.B. Kallusbildung bei Knochen) auftritt. Inzwischen gibt es verschiedene Beispiele für die Übertragung dieses Prinzips in die Technik. Die bekanntesten und bereits auf dem Markt erhältlichen Produkte sind **selbstreparierende Autoreifen**, die 2005 von der Firma Kléber eingeführt wurden. Ein Selbstreparaturmechanismus für spröde Polymerverbundmaterialien wurde an der University of Illinois in Urbana-Champaign entwickelt. Dabei werden in das Polymer mikroskopisch kleine Hohlkugeln eingeschlossen, die die Ausgangsmonomere enthalten, während der Katalysator in fester Form in das Polymer eingebettet ist. Sobald ein Mikroriss im Material entsteht, werden die Hohlkugeln zerstört und der darin gespeicherte Ausgangsstoff kommt in Kontakt mit dem Katalysator, wodurch eine Polymerisation ausgelöst wird. Nach dem Vorbild der Wundheilung von Pflanzen (in diesem Falle der Liane) werden derzeit in Zusammenarbeit der Plant Biomechanics Group der Universität Freiburg mit dem Center for Synergetic Structures an der EMPA (Dübendorf, Schweiz) **selbstreparierende Membranen** für pneumatische Strukturen entwickelt (Luchsinger/Speck 2007).

Zu den „intelligenten Werkstoffen“ werden auch Materialien gezählt, die mit Hilfe integrierter aktiver Steuerungselemente gezielt auf äußere Einflüsse reagieren können. Die Aktivierung erfolgt durch mechanische, elektrische, magnetische thermische oder optische Einwirkungen (Brand et al. 2007, 21). Auch hier bietet die Natur Anregungen. Nach dem Vorbild von Nervenimpulsen sind **multifunktionale Verbundwerkstoffe** in der Entwicklung, die z.B. beim Einbau in Fahrzeuge selbständig in der Lage sind, Schwingungen zu dämpfen, den Lärmpegel zu senken und gleichzeitig erheblich zur Gewichtsreduktion beizutragen. Dabei registrieren Sensoren die Schwingung im Material, das Sensorsignal wird von einem Regler verarbeitet, der integrierte Aktuatoren so ansteuert, dass die Bewegung umgehend abgedämpft wird. Verwendet werden dazu mikrometerfeine piezoelektrische Fasern aus Keramik, die mechanische oder thermische Spannungen in elektrische Signale umzusetzen können. Wird umgekehrt eine elektrische Ladung angelegt, können sich die Fasern dehnen oder zusammenziehen. Der komplette Verbundwerkstoff setzt sich schließlich aus passiven und aktiven Einzelschichten zusammen und besitzt sowohl sensorische wie aktuatorische Eigenschaften (Oertel/Grunwald 2006, 73).

Die wissenschaftliche Bionik-Forschung in Deutschland ist thematisch breit angelegt und hat eine gute Ausgangsbasis, da die bearbeiteten Anwendungsfelder weitgehend auf attraktive Märkte im In- und Ausland treffen. Die **Marktpotentiale** lassen sich jedoch schwer abschätzen, da es für bionische Produkte keine eigenen Märkte gibt; vielmehr müssen sie auf bereits bestehenden Märkten mit konventionellen Produkten konkurrieren. Experten gehen davon aus, dass der Anteil der Bionik, gemessen an den Stoffströmen und Marktvolumina der jeweiligen Anwendungsfelder heute noch eher marginal ist (Oertel/Grunwald 2006, 44). 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 (ebd. 54f.)

6.3.3 Verlängerung der Lebensdauer von Produkten (Pfad 3)

Die Lebensdauer, mit der hier die „technische Lebensdauer“ oder Nutzungsdauer gemeint ist, umfasst den Zeitraum, in dem ein Produkt seine bestimmungsgemäßen Funktionen erfüllt, also von der Herstellung bis zu dem Zeitpunkt, da es unbrauchbar wird und ersetzt werden muss. Die Nutzungsdauer ist abhängig von der Beanspruchung, den Materialeigenschaften, der Art und Qualität der Konstruktion sowie der Reparaturfreundlichkeit des Produkts. Die Verlängerung der Produktlebensdauer als Strategie zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität zielt darauf ab, den Materialfluss zu verlangsamen. Je länger ein Rohstoff in nutzbaren Produkten gebunden bleibt, umso höher ist seine Produktivität. Dies gilt allerdings nur für den Rohstoff selbst, nicht zwangsläufig für die Gesamtbilanz eines Produkts. So kann z.B. die Weiternutzung über zwölf Jahre alter Fahrzeuge aus umweltpolitischer Sicht nur bedingt als sinnvoll angesehen werden, da die Verlängerung ihrer Nutzungsdauer die Umweltbelastung erhöht und den Innovationszyklus emissionsärmerer und ressourceneffizienterer Modelle verzögert (Lucas et al. 2007, 30). Ähnliches gilt für andere technische Produkte wie Kühlgeräte oder Waschmaschinen. Auf der anderen Seite sind heute viele Konsumgüter und Hightech-Produkte äußerst kurzlebig, d.h. sie werden lange vor Ende ihrer physischen Lebensdauer ausgetauscht. Maßnahmen die hier ansetzen, also eine Veränderung des Nutzerverhaltens in Richtung auf einen „nachhaltigen Konsum“ anstreben, sind nicht Gegenstand dieser Studie. Als technische Ansatzpunkte zu Verlängerung der Nutzungsdauer kommen der Aufbau entsprechender Strategien und Servicenetze zur Instandhaltung von Produkten, die Verbesserung der Materialeigenschaften und der Reparaturfreundlichkeit sowie, insbesondere bei langlebigen Produkten, die Anpassung an sich wandelnde Nutzerbedürfnisse in Betracht.

Instandsetzung/Instandhaltung

Die Instandsetzung gebrauchter Produkte setzt zunächst die Bereitstellung geeigneter Materialien und Verfahren voraus. Relativ neue Verfahren sind beispielsweise die Entwicklung spezieller Klebetechniken zur Reparatur von Windschutzscheiben, die Technik zur Neu-Emallierung von Badewannen vor Ort und die Natursteinrestaurierung durch Lasertechnik, bei der im Gegensatz zum traditionellen Sandstrahlverfahren kein Altsand entsorgt werden muss. Neben geeigneten Materialien und Techniken erfordert die Instandsetzung gebrauchter Produkte auch den Aufbau entsprechender **Serviceunternehmen und Dienstleistungsnetze**, auf die der Nutzer bei Bedarf zurückgreifen kann.

Vor allem mit Blick auf Industrieunternehmen eröffnet ein professionelles **Instandhaltungsmanagement** Vorteile, die die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in hart umkämpften Märkten entscheidend mitbestimmen. Die Effizienz-Agentur Nordrhein-Westfalen (EFA) hat 2002 im Rahmen des Regionalwettbewerbs „Ökoeffizienz in der Produktion“ unter Leitung des Instituts für Instandhaltung und Korrosionsschutz (IFINKOR) in Iserlohn und der Gesellschaft für Arbeits-, Reorganisations- und ökologische Wirtschaftsberatung (ARÖW) in Duisburg die Verbundinitiative **„Märkisches Netzwerk Instandhaltung“** ins Leben gerufen, an der sich insgesamt zwölf Unternehmen aus der Metallbe- und -verarbeitung sowie der Ober-

flächenbehandlung beteiligen. Im Rahmen der Initiative wurde eine Toolbox entwickelt, die Unternehmen bei der Analyse und Nutzung ihrer Instandhaltungspotentiale unterstützt (EFA 2006).

Besondere Bedeutung hat der Bereich Instandhaltung/Instandsetzung mit Bezug auf den **Bausektor**, der aufgrund seines hohen Stoffdurchsatzes die größten Ressourceneinsparpotentiale bietet. Rund ein Drittel aller direkt und indirekt erzeugten Stoffströme pro Einwohner entstehen in Deutschland im Bedürfnisfeld „Bauen und Wohnen“, wobei die Erstellung neuer Gebäude den höchsten Materialeinsatz erfordert. Auch wenn der Rohstoffverbrauch infolge des konjunkturellen Einbruchs bei den Bauinvestitionen im letzten Jahrzehnt zurückgegangen ist, sind weitere Anstrengungen zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität notwendig.

Innerhalb der Bauwirtschaft kommt dem Wohnungsbau inzwischen die größte Bedeutung zu (ca. 60% der gesamten Bauleistungen). Der Tätigkeitsschwerpunkt im Wohnungsbau wiederum hat sich in den letzten Jahren kontinuierlich zugunsten des Ausbaugewerbes verschoben. Ursache dafür ist die gestiegene Nachfrage nach Bauleistungen im Bestand (insbesondere im Hinblick auf die energetische Sanierung) bei gleichzeitig nachlassender Neubautätigkeit (dazu ausf. Jörissen/Coenen/Stelzer 2005, 72ff.). Die durchschnittliche Lebenserwartung von Wohngebäuden beträgt 80 – 100 Jahre. Innerhalb dieses Zeitraums werden in unterschiedlichen Erneuerungszyklen Gebäudeteile ausgetauscht oder saniert, was einen zusätzlichen Rohstoffeinsatz erfordert. Als Faustregel wird davon ausgegangen, dass der Materialeinsatz während der Nutzungsphase etwa 50% des Materialaufwands für den Rohbau ausmacht (Wallbaum/Kummer 2006). Durch eine **konsequente Nutzung des Gebäudebestandes** anstelle von Neubau könnten ca. zwei Drittel der Rohstoffe (Bau- und Nutzungsphase) eingespart werden (Kaiser et al. 2007, 7).

Die Priorisierung der Bestandsnutzung als Ansatz zur Steigerung der Rohstoffproduktivität erfährt auch keine Korrektur, wenn man den Energiebedarf in die Betrachtung einbezieht. Tendenziell verbrauchen zwar Altbauten, sofern sie nicht nach dem neusten Standard energetisch saniert sind, in der Nutzungsphase deutlich mehr Energie als Neubauten, dafür weisen Baustoffe für Neubauten häufig bei der Herstellung einen höheren Ressourcenverbrauch auf (Kristof 2007, 22). Das Wuppertal-Institut konnte in einem ökologischen Vergleich der lebenszyklusweiten Materialintensitäten von Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern zeigen, dass die Materialwahl für die Gebäudehülle in der Gesamtbilanz, trotz Energieeinsparungen in der Nutzungsphase, ausschlaggebend sein kann (Wallbaum/Kummer 2006, 29). Während im Neubau die Tendenz zu einer verstärkten Nutzung von Systembauweisen mit vorgefertigten Bauteilen besteht, um die Kostenvorteile der industriellen Produktion zu nutzen, bleibt die Bestandssanierung auf manuelle Arbeit angewiesen. Außerdem sind im Bereich der Bestandssanierung überwiegend kleine und mittlere Betriebe aus der Region tätig, während der Neubau durch große überregional agierende Firmen geprägt ist. Das Bauen im Bestand würde somit Arbeitsplätze schaffen und einen Beitrag zur **Stärkung der lokalen Wirtschaft** leisten. Schließlich würde eine Umlenkung der Investitionen vom Neubau in den Bestand zu einer **Reduktion des Flächenverbrauchs** für Siedlungs- und Verkehrszwecke führen und somit den Konkurrenzdruck in der Flächennutzung abschwächen sowie die negativen Folgen des Siedlungsflächenwachstums einschließlich des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs mildern (dazu ausf. Jörissen/Coenen 2007, 33ff.).

Auch bei einer konsequenten Um- und Weiternutzung des Gebäudebestandes wird man auf Neubau nicht gänzlich verzichten können. Zu fordern ist daher, dass bereits bei der Gebäudeplanung dem Kriterium der Rohstoffproduktivität eine zentrale Rolle eingeräumt wird, da mit der Wahl der Bauweise und der Baustoffe im Wesentlichen über die lebenszyklusweite Ressourceneffizienz entschieden wird (Wallbaum/Kummer 2006, 24). Um Bauherren, Architekten und Planern die diesbezüglichen Entscheidungsprozesse zu erleichtern, sind in den letzten Jahren eine Reihe von Instrumenten zur Verfügung gestellt worden. Ein Beispiel ist das Software-Programm **Legep**, das mit finanzieller Unterstützung der DBU, des BMBF und der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe entwickelt wurde. Das Software-Programm enthält neben bauphysikalischen und kostenbezogenen Daten auch Koeffizienten für die lebenszyklusweite Bewertung von Energie- und Stoffflüssen und erlaubt so eine planungsbegleitende Ressourceneffizienzanalyse (www.legoe.de)

Ein anderes Beispiel ist **Artmann-Modular-System** zur exakten dreidimensionalen Erfassung von Fassadenflächen, das 2004 den Materialeffizienzpreis der Deutschen Materialeffizienzagentur (demea) erhielt. Das System ermöglicht ein präzises Aufmaß der Fassadenflächen sowohl beim Rohbau als auch bei der Sanierung und überträgt die Ergebnisse in ein CAD-Programm. Über den Rechner werden dann die Fassadenelemente berechnet und der Verschnitt optimiert sowie die Bestellung der Rohformate gesteuert. Der Einsatz des Systems führt zu erheblichen Materialeinsparungen und zu einer Verbesserung in der gesamten Logistik aller beteiligten Unternehmen (www.artmann-consult.de).

Bessere Materialeigenschaften können die Haltbarkeit eines Produkts erheblich steigern. Dazu wurden im vorangehenden Unterkapitel schon einige Technologiebeispiele genannt. So spart etwa die Nutzung des **Lotus-Effekts** nicht nur Reinigungsmittel ein, sondern schützt Fassaden, Dächer und andere Bauteile vor Witterungseinflüssen und trägt so zur Verlängerung ihrer Lebensdauer bei. Der **Einsatz von Magnesium** zur Herstellung von Gussteilen, Blechen und Profilen reduziert nicht nur das Gewicht, sondern verringert auch die Abnutzung. Demselben Ziel dienen verschleißfeste **Carbidbeschichtungen** im Automobilbau. Die erwähnte **CAO-Methode** (Computer Aided Optimization) erhöht die Lebensdauer von Bauteilen, indem sie die Spannungsverhältnisse auf der Oberfläche homogenisiert. Auch die Übertragung des biologischen Mechanismus der **Selbstreparatur** in die Technikentwicklung dient dazu, die Gebrauchsphase von Produkten zu verlängern. Weitere, noch nicht genannte Technologiebeispiele sind:

- Die Verlängerung der Lebensdauer von Betonbauwerken durch einen speziellen mineralischen **Belag mit katalytischen Eigenschaften** zum Schutz der Stahlbewehrung von Brücken gegen Korrosion. Bei bestehenden Brücken kann die Korrosion durch diese Beschichtung gestoppt werden. Damit ist die Schutzschicht gleichzeitig Reparatur und Imprägnierung. Eine andere Technik zur Verlängerung der physischen Lebensdauer von Stahlbeton ist der **kathodische Korrosionsschutz** der Armierungseisen.
- Der Einsatz von gehärtetem Glas zur Herstellung von Geschirr. Ein Beispiel sind **Arco-pal Teller** aus der Cristallerie d'Arques, die zwei bis dreimal widerstandfähiger sind als herkömmliche Teller.

Verbesserung der Reparaturfreundlichkeit

Ein wichtiger Aspekt der Reparaturfreundlichkeit ist der **modulare Aufbau** von Produkten, der es ermöglicht, defekte Einzelteile auszutauschen und damit die Lebensdauer des Gesamtprodukts zu verlängern. Ein Musterbeispiel ist der Bürostuhl „Picto“ der Firma Wilkhahn, der seit seiner Markteinführung 1992 als Prototyp für die gelungene Verbindung von ergonomischer Funktionalität, moderner Form und umweltverträglicher Konstruktion gilt. Alle Einzelteile sind austauschbar und bestehen zudem zu 95% aus sortenreinen Materialien, die sich problemlos recyceln lassen. Als erster Bürostuhl weltweit erhielt „Picto“ neben zahlreichen anderen Auszeichnungen 1995 den niederländischen Milieukeur (<http://www.wilkhahn.de>).

Eine andere Facette der Reparaturfreundlichkeit ist die Aufrüstbarkeit von Produkten, also die Möglichkeit zum Austausch von Elementen mit dem Ziel der Effizienzverbesserung (Lucas et al. 2007, 13). Dieser auch als „**Upgrading**“ bezeichnete Vorgang betrifft die Integration anderer oder zusätzlicher Funktionen, die bei der ursprünglichen Produktgestaltung nicht vorgesehen waren. Ein Beispiel sind Waschmaschinen, die mit einer elektronischen Steuerung ausgestattet sind, so dass künftige Verbesserungen der Waschprogramme per Software-Update aufgespielt werden können. Da die Vorteile modernen Waschmaschinen (Reduktion des Energie- und Wasserverbrauchs) weniger auf die Konstruktion der Maschine als vielmehr auf die Optimierung der Waschprogramme zurückzuführen sind, ermöglicht das Updating der Software die Nutzung gebrauchter Geräte bis zum Ende ihrer physischen Lebensdauer bei gleichzeitiger Realisierung ökologischer Fortschritte nach dem neuesten Stand der Technik (<http://www.umweltschutz-bw.de>). Weitere Beispiele für die Effizienzverbesserung gebrauchter Geräte sind der Austausch von Steuerungselementen in Werkzeugmaschinen oder die Nutzung von digitalen Zusatzmodulen in Foto-Entwicklungsapparaten. Upgrading erscheint vor allem zur Leistungsverbesserung modular aufgebauter PCs relevant. Trotz der bestehenden Möglichkeiten wird die Lebensdauer von PCs, die bei etwa zehn Jahren liegt, nur zu einem geringen Teil ausgenutzt (Behrendt et al. 2004). Es besteht von daher weiterer Forschungsbedarf, um diesen Ansatz, der insbesondere mit Blick auf hochwertige Konsumgüter ein großes Potential zur Rohstoffeinsparung bietet, konzeptionell in der Produktgestaltung zu verankern und produktspezifisch umzusetzen.

Die **Wiederaufarbeitung** von Produkten, die heute bereits bei Autoersatzteilen, Werkzeugmaschinen, Verkaufsautomaten oder Kopiergeräten in nennenswertem Umfang praktiziert wird, verlängert nicht die Nutzungsdauer des Gesamtprodukts, sondern die seiner Elemente. Dabei werden Produkte, deren technische Lebensdauer abgelaufen ist, in Einzelteile zerlegt, die gereinigt, geprüft und sortiert werden. Bei der Re-montage werden intakte Teile direkt wieder eingebaut, defekte Teile repariert und Verschleißteile ausgetauscht. Das Ergebnis ist ein Produkt, das bei deutlich verringertem Rohstoffeinsatz dieselben Anforderungen erfüllt wie ein Neuprodukt. So benötigt beispielsweise die Aufbereitung eines KFZ-Starters nur ein Elftel der Energie und ein Neuntel der Rohstoffmenge im Vergleich zur Neuproduktion. Da sich die Aufarbeitung nur bedingt automatisieren lässt, werden außerdem neue Arbeitsplätze geschaffen (<http://www.umweltschutz-bw.de>). Dieses Geschäftsfeld haben z.B. Automobilhersteller wie VW für sich erschlossen, die neben dem Ersatzteil- auch den Austauschteil-Sektor erfolgreich bedienen.

Produzenten und Händler leben in erster Linie vom Verkauf ihrer Produkte und haben daher vordergründig kein vorrangiges Interesse an einer Verlängerung der Produktlebenszeit. Das Modell des **Nutzenverkaufs** könnte diese Einstellung ändern. Dabei bleiben die Unternehmen Eigentümer der Produkte und verkaufen nicht das Produkt selbst, sondern den Nießbrauch daran. Sie erzielen auf diese Weise regelmäßige Einnahmen, die umso länger fließen, je langlebiger das Produkt ist. Der Einsatz hochwertiger langlebiger Produkte senkt zudem die Kosten für Reparatur, Serviceleistungen und Austausch defekter Teile. Das Modell des Nutzenverkaufs schafft somit ökonomische Anreize zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität. Das Modell des Nutzenverkaufs mit anschließender Wiederaufarbeitung der Produkte wird heute schon z.B. bei Kopiergeräten praktiziert.

Anpassung an sich wandelnde Nutzerbedürfnisse

Die Anpassung an sich wandelnde Nutzerbedürfnisse spielt vor allem im Hinblick auf langlebige Investitionsgüter eine Rolle. Dazu gehören in erster Linie Wohn- und Gewerbegebäude sowie Einrichtungen der sozialen Infrastruktur, wie Schulen, Theater, Begegnungsstätten, Schwimmbäder und ähnliches. Nach Abschätzungen der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt (1998) existieren gegenwärtig bereits 75% der Bausubstanz, die im Jahre 2020 genutzt werden wird. Vor diesem Hintergrund geht es um ein intelligentes Management des vorhandenen Gebäudebestands, das darauf ausgerichtet sein müsste, einerseits den Wünschen der heutigen Nutzer gerecht zu werden, andererseits bauliche Konzepte zu entwickeln, die sich flexibel an die Bedürfnisse künftiger Generationen anpassen lassen.

Mit dem Projekt „**LBS-Zukunftswerkstatt**“ haben die Landesbausparkassen ein Forum geschaffen, das Trends im Bereich Bauen und Wohnen untersucht und Wohnformen entwickeln soll, die den gewandelten gesellschaftlichen Anforderungen wie Flexibilität und Mobilität der Nutzer entsprechen. Im Mittelpunkt der Initiative stehen generationsübergreifende Wohnmodelle und die Entwicklung von verschiedenen Stadthauskonzepten, die den Wunsch des Nutzes nach Individualität und Privatsphäre mit den politischen Zielen des Stadtumbaus und der städtischen Verdichtung in Einklang bringen sollen (<http://www.lbs.de/micrositepresse/lbs-zukunftswerkstatt>). Aufgrund des demographischen Wandels und der Veränderung der Alterspyramide (bis 2040 wird fast die Hälfte der Bevölkerung das 60. Lebensjahr überschritten haben), werden die Wohnbedürfnisse älterer Menschen zunehmend in den Vordergrund treten. Untersuchungen zeigen, dass die Mobilität älterer Haushalte häufig unterschätzt wird. Die Umzugshäufigkeit steigt nach Überschreiten des 60. Lebensjahres wieder an und zwar bei Eigentümern noch stärker als bei Mietern. Von Jahr zu Jahr wächst die Anzahl älterer Menschen, die ihre Eigenheime den Kindern übergeben oder verkaufen und in eine altengerechte Wohnung umziehen, wobei städtische Standorte zunehmend bevorzugt werden. Die von Walter Stamm-Teske und Klaus Theo Brenner stammenden Entwürfe „**Lofthaus**“ und „**Atriumhaus**“ sind zwei Vorschläge für modernes altengerechtes Wohnen in der City (LBS 2007).

Ein kreatives Beispiel für die Umnutzung leerstehender Fabrikgebäude sind die von den Stuttgarter Architekten Sven Becker und Michael Sauter entwickelten „**Students-Lofts**“. Die in bestehende Gebäude integrierbaren Wohneinheiten sollen es Universitätsstädten mit Wohnungsmangel ermöglichen, günstigen Wohnraum zur Verfügung zu stellen und gleich-

zeitig nicht genutzten Gewerbeimmobilien neue Marktchancen zu eröffnen. Die leicht aufzustellenden Wohnboxen bieten zwanzig Quadratmeter Wohnfläche und sind mit einem Bett, ausziehbaren Stauraumelementen, einer Sitzbank und einem Computerarbeitsplatz möbliert. Lüftungsanlage, Heizung und Brandmelder gehören ebenfalls zur Ausstattung. Sanitär- und Kücheneinrichtungen müssen allerdings separat geplant und gemeinschaftlich genutzt werden (BauNetz 2006).

Auch die bauliche Gestaltung von Bürogebäuden wird sich künftig verstärkt an den sich wandelnden Anforderungen der Nutzer ausrichten müssen. Um eine hohe Nutzungsflexibilität zu gewährleisten, sind **funktionsneutrale, modulare Gebäude** mit offenen Grundrissen und guter informationstechnischer Ausstattung gefragt, die sich problemlos den Bedürfnissen wechselnder Nutzer anpassen lassen. Ein Beispiel für ein flexibles Raumkonzept ist das Projekt „**FlexHaus**“, das von dem Fraunhofer-Institut für sichere Telekooperation (Darmstadt) und dem Institut für Wohnen und Umwelt (Darmstadt) in Kooperation mit mehreren Praxispartnern entwickelt wurde.

6.3.4 Design for Recycling: Am Anfang schon ans Ende denken (Pfad 4)

„Design for Recycling“ oder umfassender „Design for Environment“ (umweltgerechte Produktgestaltung) ermöglicht Optionen zur Umweltentlastung sowohl in der Nachnutzungsphase als auch während des Produktherstellungsprozesses (z. B. durch Vereinfachung von Montagevorgängen, Verringerung der Komponentenzahl bzw. -varianten, Modulaufbau). Das Konzept selbst wird bereits seit längerem diskutiert (z.B. Steinhilper 1993a). Design for Recycling zielt darauf ab, bereits im Produktentstehungsprozess die Weichen für die Verwertung und Entsorgung von Abfällen in Richtung Effizienz und Umweltverträglichkeit zu stellen 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 Hauptansatzpunkte des Designs for Recycling sind die Werkstoffauswahl, die Wahl der Verbindungstechnik und die Produktkonzeption (z. B. Modulbildung).

Zur Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung wurde die ISO 14062 (Leitlinien zur Integration von Umweltaspekten in die Produktgestaltung) erarbeitet. Diese Norm wird von der EU in Zusammenhang mit IPP zur Anwendung empfohlen.

Weitere EU-Richtlinien wie die WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment), die EU-Direktive ELV (End of Life Vehicles) und die EU-Direktive RoHS (Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment) unterstützen den Ansatz der integrierten Produktpolitik:

In den zwei Richtlinien WEEE und ELV fordert die Europäische Union Produzenten und In-Verkehr-Bringer von Elektro(nik)-Geräten und Personenkraftwagen auf, Auskunft über sämtliche behandlungs- und verwertungsrelevanten Daten zu geben und diese den damit beschäftigten Betrieben zur Verfügung zu stellen.

Um das Verwertungspotential zu steigern, ist es weiterhin notwendig, schadstoffarme Produkte zu gestalten, was eine rechtzeitige Ausschleusung von Schadstoffen oder die vorausschauende Konzentration von Wertstoffen beinhaltet. Die **Substitution umweltschädlicher**

durch umweltverträglichere Einsatzstoffe spielt aber vor allem auch während der Nutzungsphase eines Produkts und im Hinblick auf die Rückstandsproblematik eine wichtige Rolle hinsichtlich der Belastung von Mensch und Umwelt. Die RoHS-Richtlinie 2002/95/EG wurde in diesem Kontext erlassen.

Die Substitution problematischer Einsatzstoffe ist nach wie vor ein aktuelles Thema, was sich daran zeigt, dass momentan an einem einheitlichen Rahmen für die Erstellung von Technischen Regeln zur Substitution gearbeitet wird. Zu diesem Zweck wurde ein Arbeitskreis "Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 600 Substitution" zur Erarbeitung einer technischen Regel zur Vorgehensweise bei der Substitutionsprüfung und Substitutionsentscheidung nach Gefahrstoffverordnung eingerichtet. Typische Arbeitsschritte, Hemmnisse, Widerstände, Stimulatoren und Lösungsansätze im Substitutionsprozess sollen in der TRGS konkret beschrieben werden. Die Arbeiten des Arbeitskreises haben die Komplexität von Substitutionsprozessen aufgezeigt und verdeutlichen, dass es in den meisten Fällen nicht allein darum geht, einen Stoff durch einen anderen zu ersetzen, sondern um die Funktion, die die Stoffe erfüllen. Dies bietet Chancen, mit einem integrierten, an der Funktion und nicht nur an den Stoffen orientiertem Konzept auch neue Märkte zu erschließen.

Wichtige Hinweise für die recyclinggerechte Gestaltung von Produkten sind in der VDI-Richtlinie 2243 "Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte" niedergelegt, deren aktuellste Fassung nach mehrfacher Überarbeitung seit 2002 vorliegt. Hier werden Gestaltungsempfehlungen für die Entwicklung und Konstruktion technischer Produkte aus den Anforderungen von Recyclingprozessen abgeleitet und vermittelt.

Um eine Minimierung von Umweltauswirkungen und eine Steigerung der Ressourcenproduktivität zu erreichen, gilt es schon beim Produktdesign den Recyclingvorgang am Ende des Produktlebenszyklus zu erleichtern und bestimmte Strategien zu beachten:

- Auswahl kreislauffähiger Werkstoffe und Werkstoffpaarungen
- Vermeidung von Materialien, die toxische Eigenschaften aufweisen oder deren Gewinnung mit einem hohen technischen Aufwand verbunden ist
- Vermeidung schwer trennbarer Verbunde (z.B. Metall-Kunststoff) und Reduzierung der Materialvielfalt
- Demontagerechte Baustruktur (z.B. modularer Aufbau) und Verwendung lösbarer Verbindungstechniken
- Kennzeichnung von Bauteilen und Werkstoffen hinsichtlich deren Funktion sowie deren Wertstoff- bzw. Gefährdungspotential
- Möglicherweise Erstellung von Recyclingpässen, die alle Recyclinginformationen enthalten

Einsatz kreislauffähiger Werkstoffe

Für ein recyclinggerechtes Produkt sollten ausschließlich leicht verwertbare Materialien eingesetzt werden. Grundvoraussetzung für eine optimale Verwertung ist außerdem die Sortenreinheit von Materialien. Dadurch wird eine Verwertung eines Materials auf hohem Niveau erreicht, d.h. die Qualität des Rezyklats ist gegenüber dem Primärwerkstoff nicht bzw. kaum vermindert und es besteht keine Gefahr von „Down-Cycling“.

Vorzugsweise sollten Eisen- und Nichteisenmetalle sowie Thermoplaste als kreislauffähige Werkstoffe zum Einsatz kommen, da sie sich in der Regel sortenrein oder als Gemisch stofflich verwerten lassen. Allerdings wird für viele Metalle (z.B. Aluminium) ein hoher Energieeinsatz benötigt. Kunststoffe lassen sich dagegen unterschiedlich gut aufbereiten. Thermoplastische Typen sollten generell bevorzugt werden, da man sie aufschmelzen und je nach Sortenreinheit und Zustand wieder zu einem vergleichbaren Kunststoff aufbereiten kann. Duroplaste und Elastomere können nicht wieder aufgeschmolzen werden. Sie können nach Ablauf der Nutzungsdauer derzeit nur gemahlen und als Füllstoff verwendet werden. Sie sind daher nicht für einen Materialkreislauf geeignet. Auch eine Verwertung von Verbundwerkstoffen lässt sich kaum bzw. nur mit erheblich technischem Aufwand durchführen.

Auf dem Gebiet der Recyclingfähigkeit **neuer Materialien** besteht weiterhin Forschungsbedarf (z.B. Flüssigkeitskristalle der Firma Merck). Grundlagenuntersuchungen zu flüssigkeitstragenden Polymerbauteilen, deren Reinigung und Schadstoffentfrachtung sowie zum Verhalten der Materialeigenschaften sind hingegen abgeschlossen. Flüssigkeitstragende Polymerbauteile befinden sich bereits in der Umsetzungsphase für die Herstellung demontagefreundlicherer KFZ-Kunststofftanks.

Vermeidung von Materialien mit toxischen Eigenschaften

Ein Einsatz kreislauffähiger Werkstoffe bedeutet weiterhin auch ein Minimieren des Anteils an nicht verwertbaren, also zu entsorgenden Materialien. Manche Werkstoffe sind aufgrund umweltgefährdender Eigenschaften nicht für ein Recyclingverfahren geeignet. Hierzu zählen toxische Schwermetalle (Blei, Quecksilber,...), polybromierte und polychlorierte Bi- und Terphenyle (PBB, PBT, PCB, PCT) aufgrund hochgiftiger Verbrennungsprodukte sowie Asbest und andere Mikrofaserbildner aufgrund ihrer krebserregenden Wirkung.

Um eine Minimierung von Umweltauswirkungen zu erreichen, zielt das Design for Recycling auf eine Vermeidung von Materialien ab, die toxische Eigenschaften besitzen. Als Technologiebeispiel sei hier die Substitution halogener Kohlenwasserstoffe genannt:

Die in handelsüblichen AFFF-Löschmitteln (aqueous film forming foam) verwendeten halogenierten Kohlenwasserstoffe und deren Abbauprodukte werden inzwischen auf nationaler und internationaler politischer Ebene als sehr bedenklich eingestuft. Da über ein Verwendungsverbot nachgedacht wird, wird der Einsatz unproblematischer Wirksubstanzen erforderlich sein. Es ist daher notwendig, ökotoxikologisch unbedenklich einzustufende wirksame Substanzen zu entwickeln, die die Löschwirkung von Wassernebeln deutlich verbessern und damit als Ersatz für Wirkstoffe wie Fluortenside und Halone infrage kommen. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Entwicklung von neuen halogenfreien Wirkungsprinzipien für Feuerlöschmittel auf Basis von speziellen tensidischen Sulfobetainen sowie Polymer-Tensid-Komplexen mit hoher Grenzflächenaktivität in geeigneten Formulierungen (Löschmitteln), deren Charakterisierung und Prüfung der Löschwirkung.

Im Bereich der Schwermetalle sei an dieser Stelle die Entwicklung quecksilberfreier Leuchtrohren genannt. Die Entwicklungen der letzten Jahre richteten ihr Augenmerk darauf, das umweltschädigende Quecksilber so zu ersetzen, dass andere Eigenschaften einer Lampe, wie die Lebensdauer oder die Effizienz, nicht leiden. Bei Plasmalampen spielen Vorgänge an den Elektroden eine entscheidende Rolle, weshalb der Fokus der Untersuchungen verstärkt

auf das Verständnis der Elektrodenprozesse gerichtet wurde. Mehrere Projekte widmeten sich in den letzten Jahren dieser Frage unter verschiedenen Perspektiven, z. B. für die Optimierung quecksilberfreier HID-Lampen. Auch im Bereich energieeffizienter quecksilberfreier Hochdruck- und Niederdrucklampen haben Technologieentwicklungen stattgefunden. Die einzigartigen Eigenschaften des Arbeitsmittels Plasma, verbunden mit der Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten, sichern der Plasmatechnologie anhaltendes Wachstum. Die aktuelle Entwicklungsdynamik von Hochtechnologiefeldern, wie Nanotechnologie, Biomedizintechnik und Mikrostrukturtechnik, ist eng mit Fortschritten der Plasmatechnologie verknüpft (INP Gleifswald 2004).

Viele Produkte enthalten weiterhin Schadstoffe, die sich nicht substituieren lassen oder die als Spurenelemente unbeabsichtigt im Material enthalten sind. Um über die Zusammensetzung von Inhaltsstoffen eines Werkstoffs informiert zu sein und den Werkstoff qualitätsgesichert einem Recyclingprozess zuführen zu können, ist eine schnelle Analyse der Stör- und Schadstoffe notwendig. Ein Technologiebeispiel in diesem Zusammenhang ist die Schnellanalyse von Schadstoffen in Althölzern mittels Laser-Plasma-Spektrometrie. Gemäß dem bisherigen Ergebnisstand hat die Laser-Plasma-Spektrometrie gute Chancen, sich als Schnellanalysemethode zur Erkennung von anorganischen Schadstoffen in Altholz zu etablieren. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Kalibrierung und Bearbeitung der Auswertesoftware (Förderprojekt der DBU).

Werkstoffvielfalt verringern

Neben dem Einsatz kreislauffähiger Werkstoffe sollte die Recyclingfreundlichkeit weiterhin auch durch eine Minimierung der Werkstoffvielfalt optimiert werden. Die Verringerung führt zu einer geringeren Anzahl von Werkstofffraktionen damit zu einem erheblich kleineren Aufwand bei der Demontage und einer anschließenden Aufbereitung. Als Lösungsansatz bietet sich unter anderem die Bauteil- bzw. Funktionsintegration an.

Verträgliche Werkstoffkombinationen wählen

Für eine recyclinggerechte Aufbereitung von Werkstoffkombinationen muss auf die Verträglichkeit der im Verwertungsprozess entstehenden Materialmischungen geachtet werden, um dort den Aufwand für eine Materialtrennung zu minimieren und damit eine gute Ausgangsbasis für Sekundärrohstoffe zu haben.

Beispielsweise ist es möglich, die Verwertungseigenschaften von Materialfraktionen durch die Zugabe von Verträglichkeitsverbesserern („Compatibilizern“) gezielt zu verbessern.

Für eine Auswahl von verträglichen Werkstoffkombinationen stehen mit Verträglichkeitsmatrizen und Altstoffgruppen-Tabellen zwei Hilfsmittel zur Verfügung, die mittlerweile für die Mehrzahl der technisch üblichen Kunststoffe und für Metalle vorhanden sind.

Vermeidung von Beschichtungen und schwer trennbaren Verbunden

Wenn keine Verträglichkeit eingesetzter Werkstoffkombinationen möglich ist, müssen lösbare Verbindungstechniken bzw. eine geeignete Demontagetechnik angestrebt werden. Problematisch sind beispielsweise Beschichtungen. Sie stellen zusammen mit dem beschichteten Werkstoff ein Mehrstoffverbundsystem dar. Auch wenn sie nur einen kleinen Gewichtsanteil

am Verbundsystem haben, stellen sie bei einem Materialrecycling eine Verunreinigung dar, die zu einer Verminderung der Werkstoffeigenschaften führen kann. Eine Verunreinigung kann ferner durch das Anbringen von Papieraufklebern auf Kunststoffoberflächen verursacht werden, indem Faser- oder Kleberückstände nach dem Entfernen zurückbleiben. Eine Strategie für Design for Recycling ist deshalb die Vermeidung von Beschichtungen und schwer trennbaren Verbunden. Wenn hohe Anforderungen an eine Verschleiß- oder Korrosionsbeständigkeit gestellt werden, kann allerdings die Notwendigkeit von Beschichtungen bestehen. Dann kann eine Beschichtung eine bessere Lösung darstellen als ein Einstoffsystem. Lackierungen von Metallbauteilen lassen sich beispielsweise durch eingefärbte Kunststoffbauteile substituieren (Steinhilper 1993b).

Ist es unter Produktgestaltungsaspekten dennoch sinnvoll, auf Verbundmaterialien zurück zu greifen, so spielt die Wahl einer geeigneten Verbindungstechnik eine relevante Rolle. Um Verbindungen oder Verbundwerkstoffe wieder lösen zu können und damit recyclingsfähig zu machen, gibt es verschiedene Ansätze:

- Smart Materials in der Elektronikbranche (z.B. „snap-fit“ Verbindungen, die sich bei einer bestimmten Trigger-Temperatur verformen und dadurch die Werkstoffverbindung auflösen (<http://www.activedisassembly.com>))
- Industriell anwendbare gezielt lösbare Klebstoffe zum umweltgerechten Recycling von geklebten Verbundwerkstoffen im Baubereich und für den Möbel- und Automobilbau (Förderprojekt DBU 2004)
- Durch die Auswahl von Werkstoffen mit ausreichend unterschiedlicher Dichte lässt sich nach einem Zerkleinerungsprozess eine Trennung über die Dichte erreichen.

Werkstoffe kennzeichnen

Um eine schnelle und möglichst sortenreine Werkstofffraktionierung zu erreichen, ist es erforderlich, dass für ein späteres Materialrecycling alle notwendigen Informationen über die in einem Produkt enthaltenen Werkstoffe verfügbar sind. Als Hilfsmittel für die Identifizierung der einzelnen Werkstoffe ist eine eindeutige Kennzeichnung geeignet. Auf nationaler und internationaler Ebene sind dafür folgende Normen vorgesehen:

- DIN 6120 (Kennzeichnung von Packstoffen und Packmitteln),
- DIN 54840 (Kennzeichnung von Kunststoffen; Einsatz überwiegend im Geräte- und Fahrzeugsektor) sowie
- ISO 11469 (Sortenspezifische Identifizierung und Kennzeichnung von Kunststoff-Formbauteilen).

Problematisch ist die Dokumentation über enthaltene Additive, für die es derzeit noch keine Kennzeichnungsnorm gibt. Durch den Einsatz von Additiven wie z.B. Gleitmittel, Weichmacher oder Antistatika in undefinierten Anteilen kann es zum Beispiel beim Materialrecycling und bei der Alterungsbeständigkeit der Rezyklate zu Problemen kommen. Einige Hersteller geben deshalb neben der Kennzeichnung mit dem Recyclingsymbol den verwendeten Werkstoff mit seinem Handelsnamen an, um eine umfassende Information für ein Materialrecycling zu bieten. Eine Alternative wäre es, wenn möglich nur Werkstoffe einzusetzen, die nicht weiter veredelt werden müssen oder nur umweltverträgliche Additive enthalten.

Die im oberen Abschnitt allgemein gehaltenen Strategien werden im Folgenden zur Veranschaulichung beispielhaft auf die **Automobilbranche** angewendet und konkretisiert. Sicherlich stellt die Automobilbranche die in diesem Bereich fortschrittlichste Branche dar. Anders zeigt sich die Situation beispielsweise in der Elektronikbranche, wo ein Recycling aufgrund immer komplexerer Zusammensetzungen und der Verwendung von zunehmend „exotischeren“ Metallen beispielsweise in Speicherchips erschwert wird. Wurden 1980 12 Elemente bei der Entwicklung von Intel-Computerchips verwendet, so waren es 1990 schon 16 Elemente und im Jahr 2000 schätzungsweise 45 Elemente (Johnson et al. 2007).

Design for Recycling in der Automobilbranche:

- Leichter Zugang zu jenen Bestandteilen, welche aus Umwelt-, Gesundheits- oder Sicherheitsgründen entfernt werden müssen (z.B. Batterien, Reifen und Ölfilter)
- Sicherstellung der schnellen und sicheren Durchführung einer vollständigen Neutralisation der pyrotechnischen Komponenten (Airbag)
- Sicherstellung einer effizienten Entnahme sämtlicher Betriebsflüssigkeiten (Treibstoff, Motoröl, Kühlflüssigkeit)
- Zur effizienten Gestaltung der Wiederverwertung wird eine möglichst geringe Anzahl verschiedener Materialien verwendet und solche, die gemeinsam rezykliert werden können.
- Kennzeichnung aller Kunststoff- und Gummibauteile mit einer entsprechenden Materialbezeichnung nach internationalen Standards, damit sie beim Recycling leicht identifiziert werden können
- Bewertung der Recyclingeignung komplexer Bauteile in Form eines Recyclingpasses (z.B. Firma Continental für komplexe Teile aus dem Kfz-Bremsenbereich)

Im Automobilbau werden große Mengen an Kupfer eingesetzt. Wie in vorangegangenen Kapiteln bereits dargestellt, reichen die Kupfervorräte bei heutigem Verbrauch kaum länger als 20 Jahre (BMU 2007, 74). Analysten erwarten für den Zeitraum 2020 bis 2025 eine Verdoppelung oder sogar Verdreifachung der Rohstoffnachfrage. Der wachsende Druck auf die Rohstoffmärkte hat zwischen 2000 und 2007 zu einem Anstieg des Kupferpreises um 300 % (BMU 2007; Bleischwitz/Bringezu 2007) geführt. Der Einsatz von Kupfer im Automobil erfolgt hauptsächlich aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit. Im Zuge der Klimaproblematik wird der Anteil von Hybrid-Fahrzeugen zunehmen. Der zusätzliche Elektromotor für den Antrieb wird den Kupferanteil im Fahrzeug erheblich erhöhen. Kupfer ist prinzipiell sehr gut rezyklierbar. Daher ist Kupferrecycling wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll. Unterstützt wird das Recycling durch die politische Rahmensetzung wie die Elektroschrottverordnung und die Altfahrzeugverordnung. Auch vor diesem Hintergrund kommt dem Aufbau eines Kupferrecyclingsystems im Automobilbau eine besondere Bedeutung zu. Eine recyclingoptimierte Produktgestaltung ist eine wichtige Voraussetzung für eine umweltverträgliche und wirtschaftliche Verwertung des Kupferanteils zukünftiger Altfahrzeuge. Im Vergleich mit anderen Industrienationen ist der deutsche Recyclingstandard gut.

Abschließend lässt sich anmerken, dass aus technischer Sicht die bereits vorliegenden Konzepte zum Design for Recycling als umsetzbar und praktikabel zu betrachten sind. Mit Blick auf die Produkt- und Stoffströme im Markt zeigt sich jedoch, dass die Auswirkungen des De-

sign for Recycling bisher überschätzt wurden. So wirkt sich Design for Recycling für die Nachnutzungsphase - auf die es im Kern abzielt - mit Ausnahme bei sehr kurzlebigen Produkten (wie z. B. Verpackungen), erst nach Jahren bis Jahrzehnten aus.

Recyclingprozesse müssen sich hinsichtlich Verwendung und Verwertung stets an der "schlechtesten Option" (in diesem Fall ein nicht nach den Regeln des Design for Recycling konzipiertes und hergestelltes Produkt) orientieren. Damit sind die Auswirkungen des Design for Recycling zum einen erst erheblich zeitverzögert und zum anderen durch Mischung mit "nicht recyclingfreundlichen Produkten" oft im betrieblichen Alltag der Aufarbeitungs-/Verwertungsbetriebe kaum messbar.

Dennoch ist Design for Recycling ein sinnvoller Ansatz, da er sich zwangsläufig bereits auf die Produktkonzeption und -herstellung auswirkt. Auch wenn in der Nachnutzungsphase derzeit keine tatsächliche Umweltentlastung bzw. Verbesserung der Kreislauffähigkeit erzielt wird, bewirkt die Berücksichtigung der oben genannten Designprinzipien (z.B. Verwendung weniger Verbindungsstellen, Modularität, Bevorzugung einer Demontagerichtung, Verwendung weniger und einheitlicher Verbindungstechniken/-elemente) eine Vereinfachung der Montage und Reparatur.

Eine Verbesserung der Kreislauffähigkeit von „Design for Recycling-Produkten“ in der Nachnutzungsphase würde man dann erzielen, wenn es gelingen würde, gleichartige Produkte zu größeren Chargen zusammenzustellen, wie es z. B. im Bereich der gewerblichen Elektroaltgeräte (Firmenentsorgung) möglich ist.

6.3.5 Ressourcenschonende und abfallarme Produktionsprozesse (Pfad 5)

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Strategien zur Ressourcenproduktivität vorgestellt, die sich auf die Produktgestaltung beziehen. Der fünfte Pfad beschäftigt sich nun mit der Ressourcenschonung im Produktionsprozess. Innerhalb der Produktionsprozesse kommen unterschiedliche Strategien zur Steigerung der Ressourcenproduktivität – also zur Optimierung des Herstellungsprozesses eines bestimmten Produkts unter Ressourcenaspekten - zum Tragen. Neben einer Steigerung der Ressourcenproduktivität kann ein effizienter Einsatz von Rohstoffen und Energie weiterhin mit einer Optimierung von betrieblichen Abläufen, einer Kostensenkung oder einer gesteigerten Wettbewerbsfähigkeit des Betriebes einhergehen. Diese zusätzlichen Effekte stehen in der hier durchgeführten Betrachtung nicht im Vordergrund, sind für eine Unternehmensführung jedoch von entscheidender Bedeutung.

Die Auswahl eines ressourcenschonenden Produktionsverfahrens muss immer in Zusammenhang mit den Marktgegebenheiten und den Rahmenbedingungen erfolgen. Bei Groß- oder Kleinserien können sich jeweils unterschiedliche Verfahren als ressourceneffizienter erweisen. Aufgrund der Vielzahl von Parametern, die sich auf den Ressourcenverbrauch auswirken können, ist die Beurteilung eines Produktionsprozesses hinsichtlich Ressourcenproduktivität ein komplexes Unterfangen. So ist der Ressourcenverbrauch abhängig von der großen Anzahl von Fertigungsverfahren (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten...), die im Herstellungsprozess zum Einsatz kommen, von der Bandbreite von Werkstoffen, die verarbeitet werden, den angestrebten Lösungen und den Produktionsmengen.

Als mögliche strategische Ansätze zugunsten eines ressourcenschonenden und abfallarmen Produktionsprozesses kommen die in Tabelle 5 bereits angesprochenen Strategien in Frage:

- Reduzierung von Verschnitt, Ausbeuteverlusten und Abfall
- Betriebsinterne Kreislaufführung von Roh-, Betriebs- und Hilfsstoffen
- Hochwertige Verwertung unvermeidbarer Rückstände
- Substitution umweltbelastender oder knapper Hilfs- und Betriebsstoffe
- Optimierung der Prozessführung (z.B. durch Einsatz von Mess-, Steuer- und Regeltechnik)
- Einsatz effizienter und innovativer Verfahren (z.B. Biotechnologie)
- Inanspruchnahme von Dienstleistungen: Betriebliche Ressourcenkostenrechnung, PIUS Check, betriebliche Ökobilanz, Materialfluss-Analyse

Die Strategien können sich auf den **gesamten Produktionsprozess** beziehen oder aber in unterschiedlichen Phasen innerhalb des Produktionsprozesses ansetzen, beispielsweise bei der **Rohstoffaufbereitung**, bei **Reduktions- und Schmelzprozessen** von Metallen, **Ur- und Umformprozessen**, bei der **Veredelung** und **Funktionalisierung** von Rohstoffen und bei der eigentlichen **Produktherstellung**. Im Folgenden wird ausführlicher auf diese Strategien eingegangen und es werden Technologiebeispiele gegeben.

Strategien zur Steigerung der Ressourcenproduktivität in den verschiedenen Phasen des Produktionsprozesses

Wie bereits in der Charakterisierung des Handlungsfeldes erwähnt, sind Technologien zur Erkundung, Erschließung und Ausbeutung von Rohstofflagern zwar notwendig für die **Rohstoffgewinnung**, werden aber in der Regel nicht als „Umwelttechnologien“ eingeordnet und sind daher nicht Gegenstand dieser Studie. Die Analytik und Qualitätssicherung von Rohstoffen in der Phase der Rohstoffgewinnung ist hingegen eine Umwelttechnologie mit der vermieden werden kann, dass wertvolle Rohstoffe von hoher Qualität für Zwecke vergleichsweise geringer Wertschöpfung eingesetzt werden. Analytik und Qualitätssicherung bieten ein Werkzeug zur vollständigen Ausschöpfung der Lagerstätten und zur Überprüfung, ob auf Halden noch abbauwürdige Rohstoffvorkommen enthalten sind. Auch im Bereich sekundärer Metallrohstoffe ist die Identifikation/Qualitätssicherung von Bedeutung. Beispielhaft sei hier die Identifikation von Aluminium-Guss- und Knetlegierungen genannt, die noch immer nicht technisch realisiert werden konnten.

Zu den ersten technischen Schritten der **Aufbereitung** mineralischer Rohstoffe zählen Sortier- und Zerkleinerungsverfahren, da in den Lagerstätten keine reinen Materialien, sondern immer Gemische vorliegen. Die zur Verfügung stehenden Verfahren nutzen die verschiedenen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Mineralien. Unterschiedliches Bruchverhalten bei der Zerkleinerung, Schwereretrennung, Flotation, magnetische oder elektrostatische Trennung, Lösen/Fällen sowie optische Trennung sind Beispiele für derartige Verfahren. Gerade bei der optischen Trennung konnten in jüngerer Zeit Fortschritte erreicht werden (Dehler 2003). Mit Hilfe moderner optischer Sortieranlagen ist es möglich, mineralische Rohstoffe kostengünstig bis zu einer Mindestkorngröße von 3-5 mm anhand der Färbung und Helligkeit zu trennen. Hierdurch wird das Sortieren von Hand oder der selektive Abbau von Lagerstätten unnötig und gleichzeitig eine erhöhte Effektivität der Rohstoffe erreicht. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für Sekundärrohstoffe. Die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen

wird zukünftig im Sinne einer Ressourcenbewirtschaftung erheblich an Bedeutung gewinnen, insbesondere mit Blick auf die aufbereitungstechnische Beherrschbarkeit von Stoffgemischen.

Am Anfang der Verarbeitung metallischer Rohstoffe stehen **Reduktions- und Schmelzprozesse**. Zum Erreichen der hohen Temperaturen, die diese Hochtemperaturprozesse benötigen, sind große Mengen an fossilen Energieträgern erforderlich. Technologien zur Minderung des Energiebedarfs oder der Substitution an Brennstoffen sind somit besonders für die in großen Mengen produzierten Metalle von Bedeutung.

Reduktions- und Schmelzverfahren sind in Deutschland bereits weitestgehend optimiert und entsprechen in der Regel den besten verfügbaren Techniken. Der Verbrauch an Energie und Wasser konnte bei der Herstellung der Rohmetallschmelzen in der Vergangenheit deutlich reduziert werden (Hirth et al. 2007). Beispielsweise sank der Verbrauch an Primärenergie für die Herstellung von Rohstahl zwischen 1993 und 2003 von 19,3 GJ/t um 7% auf 18,1 GJ/t. Der Wasserverbrauch sank von 35,5 m³/t Rohstahl im Jahr 1983 auf 12 m³/t im Jahr 2001. Da diese Techniken bereits ausgereift sind, eignen sie sich für den Export. Dennoch ist es auch in Deutschland sinnvoll, an Verbesserungen weiter zu arbeiten, um durch den Technologievorsprung auch in Zukunft wirtschaftlich produzieren zu können.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Reduktions- und Schmelzprozesse beinhalten:

- Substitution fossiler Energieträger: durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe oder kohlenstoffhaltiger Abfallstoffe (z.B. Kunststoffabfälle, Altöle) als Ersatzbrennstoffe für Hochtemperaturprozesse sowie deren Verwendung als Reduktionsmittel im Hochofenprozess können fossile Energieträger und damit einhergehende CO₂-Emissionen eingespart werden.
- Einsatz von Rohstoffen höherer Reinheit oder Konzentration: durch den Einsatz von Rutil (90-98% Titandioxid) anstelle von Ilmenit (40-60% Titandioxid) können die Abfallmengen bei der Titandioxidherstellung erheblich verringert werden. Dies ist seit längerem Stand der Technik.
- Optimierung von Elektrolyseverfahren: Bei der Aluminiumraffination werden große Mengen an Schmelzsalzen benötigt. Durch eine Optimierung der Salzmischungen könnten Salzrohstoffe eingespart werden. Auch durch eine Optimierung des Elektrodenmaterials würden Verbesserungen im Herstellungsprozess wie z. B. bei der Temperaturführung und der reduzierten Einsatzmenge an Hilfsstoffen erzielt werden.

Nach der Reduktion und dem Schmelzen metallischer Rohstoffe folgt die Phase des Gießens von Urformen. Im Verarbeitungsschritt der **Urformverfahren** können Strategien wie die Effizienzsteigerung und die Prozessoptimierung zum Einsatz kommen. Mit Urformverfahren werden Metalle bzw. Metallschmelzen in eine für die Weiterverarbeitung definierte Form gebracht. Der Umweg der Produktherstellung über Halbzeuge und Zwischenprodukte ist aber aufwändig. Durch „**Near-net-shape**“-Technologien (endkonturnahe Fertigung) können Verfahrensschritte eingespart werden. Near-net-shape ist eine industrielle Produktionstechnik bei der das Werkstück bereits zu Beginn des Herstellungsprozesses nahe an die gewünschte Endform gebracht wird. Sie findet im Bereich der Urformverfahren bei speziellen Gussverfahren und beim Sintern Anwendung. Beim Sintern wird aus metallischen oder mineralischen

Pulvergemischen durch Pressen oder Formen und anschließendem Trocknen ein Grünling hergestellt, der bei hoher Temperatur gesintert wird. Auf diese Weise erhält man in wenigen effizienten Schritten präzise Formteile. Durch Entwicklung neuer Metallpulverzusammensetzungen und Legierungen können bessere Produkteigenschaften erzielt werden und damit z.B. durch eine höhere Materialeffizienz Ressourcen eingespart werden. Weiterhin kann durch eine geringere Korngröße der Metallpulver die Sintertemperatur herabgesetzt oder die Dauer des Sintervorgangs verkürzt werden.

Außer zur Herstellung von metallischen Formteilen ist das Sintern auch in der Keramikindustrie von großer Bedeutung. Für die Herstellung von Keramik gilt, dass durch die Entwicklung von nano- und feinstdispersen Pulvern die Sintertemperatur erniedrigt werden kann und gleichzeitig neue Werkstoffeigenschaften erzielt werden können (Hirth et al. 2007). Der Nutzen liegt hier in einer Steigerung der Lebensdauer des Produkts oder einer Verringerung des Rohstoffbedarfs. Andere Near-Net-Shape-Technologien verwenden Präzisions-Herstellungsmethoden wie das isostatische Pressen, das Gelcasting, das superplastische Formen und den Lanxide-Prozess, um präzise Formteile herzustellen, die eine geringe Nachbearbeitung erfordern.

Technologie-Beispiele im Prozessschritt der Urformverfahren:

- Herstellung dünner Bleche mittels Stranggussverfahren. Durch das Stranggießen entfällt der Schritt des Walzens und die Produktivität wird erhöht. Da Strangguss ein Massenverfahren ist, sind die möglichen Einsparungen enorm. In Deutschland wurden im Jahr 2005 44,5 Mio. t Rohstahl erzeugt, davon 42,9 Mio. t als Strangguss (Stahl-Zentrum 2006). Bei gleichen Produkteigenschaften entfällt ein Verfahrensschritt in der Produktionskette. Auf diese Weise können dünne Drähte aus Stahl und Nichteisen-Metallen durch Gussverfahren hergestellt werden.
- Pressgießen von ADI-Werkstoffen. Durch das Pressgießen von ADI-Werkstoffen (Austempered Ductile Iron = speziell thermisch behandeltes Gusseisen) mit gekoppelter Wärmebehandlung können Prozessschritte wie Schmieden oder mechanische Bearbeitung ersetzt werden. Bei der Wärmebehandlung entsteht eine einzigartige Gefügestruktur, die eine im Vergleich zum normalen Gusseisen mit Kugelgraphit hohe Zugfestigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Härte und gute Dehnungseigenschaften mit sich bringt. ADI ist um den Faktor 2,3 steifer als Aluminium und hat eine um 10% geringere Dichte als Stahl. Im Vergleich zu Stahl wird so ein geringeres Bauteilgewicht erreicht und es muss eine kleinere Menge an Eisen eingesetzt werden. ADI-Werkstoffe werden beispielsweise für Zahnräder oder Kurbelwellen eingesetzt.

Gussverfahren sind in Deutschland an sich Stand der Technik und eignen sich für den Transfer in Entwicklungs- und Schwellenländer. Ausnahme sind die Verfahren des Thixoformings (siehe auch Pfad 2) und solche, bei denen gezielt neue Werkstoffe durch Gussverfahren entwickelt werden sollen. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf in Deutschland. Weiterhin ist es hinsichtlich der optimalen Aufbereitung von nano- und feinstdispersen Pulvern beim Sintern sinnvoll, Technologien zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung (Mischen, Mahlen, Homogenisieren, Wirbelschicht-, Sprühtrocknungs- und Granulationsverfahren) neu und weiter zu entwickeln (Hirth et al. 2007).

Dem Urformen schließt sich im Herstellungsprozess als nächster Prozessschritt das **Umformen** an. Bei den hier typischen Verfahren wie Walzen, Strangziehen oder Tiefziehen spielen vor allem Substitution und Effizienzsteigerung eine wichtige Rolle. Problematisch bei diesen Technologien sind u.a. die Zieh- und Umformöle, da diese in größeren Mengen angewendet werden als theoretisch notwendig ist und sie direkt schädliche Auswirkungen auf die Personen haben können, die an den Maschinen arbeiten. Innovative Verfahren in diesem Bereich sind daher:

- Die Substitution vorhandener Zieh- und Umformöle durch Öle auf der Basis nachwachsender Rohstoffe, die sich durch eine geringere Schädigung auf den Menschen sowie eine bessere biologische Abbaubarkeit auszeichnen sollen.
- Eine Reduzierung des Ölverbrauchs kann mit Hilfe von besseren Verfahren zur Verteilung der Ziehöle auf den Werkstücken erzielt werden.

Sowohl für den Ersatz von Ziehölen als auch bei der Optimierung der Verfahren zur Verteilung auf den Metalloberflächen besteht auch in Deutschland noch Forschungsbedarf.

Vor einer **Oberflächenveredelung** müssen metallische Werkstücke von produktionsbedingten fettigen Anhaftungen, wie Fetten, Schmierölen oder Korrosionsschutzölen befreit werden. Außer für Stahl ist dieser Schritt der Entfettung auch für Produkte aus Buntmetallen, Aluminium, Zink sowie Messing notwendig. Damit kommt der Entfettungstechnologie als vorbereitende Technologie vor einer Oberflächenveredelung metallischer Werkstücke eine Querschnittsaufgabe zu. Die enorme Bedeutung dieser Technologie, die zudem auf die chemischen Eigenschaften der einzelnen Metalle zugeschnitten sein muss, zeigt sich darin, dass auch kleinste produzierende Unternehmen, die Produkte auf der Basis von Stahlblechen etc. verwenden, als vorbereitenden Schritt eine Entfettung durchführen müssen. Mit folgenden Verfahren wird eine Ressourcenschonung innerhalb des Produktionsprozesses erreicht:

- Substitution der Entfettungsmittel durch Heißdampf oder CO₂ ohne eine Beeinträchtigung der Entfettungswirksamkeit
- Kreislaufführung des Entfettungsmittels und des Prozesswassers sowie Wiederverwendung der Fette/Öle

Die Substitution halogener organischer Lösungsmittel durch nicht halogenierte organische Lösungsmittel oder wässrige Lösungen ist aus Gründen der Schädlichkeit für die Umwelt von Bedeutung und kommt auch jenseits der Metallverarbeitung in vielen Branchen zum Einsatz so z.B. bei der Reinigung von Gummibelägen in der Scheibenwischerfertigung, in der Lederindustrie bei der Entfettung von Fellen, in der Textilreinigung oder beim Ersatz leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe durch VOC-freie (VOC = flüchtige organische Verbindungen) hochsiedende Pflanzenölester im Offsetdruck in der Druckindustrie.

Halogenierte organische Verbindungen finden darüber hinaus auch als Biozide beispielsweise bei Konservierungs-, Weiche-, Pickel- und Gerbprozessen in der Lederverarbeitung Anwendung und können dort durch weniger umweltschädliche Bakterizide substituiert werden (UBA 2003).

Als Maßnahmen zur Oberflächenveredelung stehen galvanische Verfahren sowie Beschichtungsverfahren (Lacke, Kunststoffbeschichtung, Aufdampfung) zu Verfügung. Relevante Entwicklungen haben in folgenden Bereichen stattgefunden:

- Substitution gesundheitsschädlicher Beschichtungen aus sechswertigem Chrom (Chromatieren von Zink-Passivschichten) durch weniger problematisches dreiwertiges Chrom (Hülser 2003, Volk 2006). Die Passivschicht aus dreiwertigem Chrom wird als Dickschicht auf das Zink aufgetragen und kann zusätzlich mit einem Überzug aus Siliziumdioxid versehen werden. Hierdurch wird ein sehr guter Korrosionsschutz erreicht.
- Substitution lösungsmittelhaltiger Lacke durch Lacke auf Wasserbasis sowie die UV-Härtung von lösungsmittelfreien Lacken und Farben. Wasserbasierte Lacke verringern den Anteil umweltschädlicher Lösungsmittel um mehr als 60% (BMU 2007). Diese Thematik wird im Handlungsfeld „Luftreinhaltung“ weiter ausgeführt.
- Reduzierung des Overspray-Anteils beim Lackieren durch verbesserte Spritztechnik, z. B. HVLP-Spritztechnik (High Volume Low Pressure) oder die Farbspritzpistole der Firma Metacap. Gegenwärtig werden in Deutschland rund 500.000 Tonnen Lack pro Jahr verbraucht. Neuartige Lacke und Lackiertechniken können den Verbrauch herkömmlicher Lacke signifikant senken. Vollautomatisierte, integrierte Lacksysteme reduzieren den Verbrauch um bis zu 20%. Durch Vermeidung fehlerhafter Lackierungen sinkt die Ausschussquote zwischen 5 bis 35 % (BMU 2007). Auch dieser Aspekt wird im Handlungsfeld „Luftreinhaltung“ besprochen.

Durch die Notwendigkeit, Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Fluorkohlenwasserstoffe zu ersetzen, sind bereits seit längerem Ersatzmittel und Ersatztechnologien zur Entfettung von Metalloberflächen vorhanden. Diese Techniken können ins Ausland transferiert werden.

In Europa ist zum 1. Juli 2007 die EU-Altautoverordnung in Kraft getreten, gemäß der sechswertiges Chrom in Passivschichten nicht mehr verwendet werden darf (Hülser 2003). Die Verfahren, die auf einer Passivierung mit dreiwertigem Chrom als Dickschicht basieren, sind erprobt und eignen sich für einen Technologietransfer. Dennoch ist es sinnvoll, auch hier weiterhin nach umweltverträglichen Mitteln zu Passivierung zu suchen. Ähnliches gilt für die Anwendung von Lacken auf Wasserbasis.

Im Bereich **Veredelung** und **Funktionalisierung** mineralischer Rohstoffe besteht ein hoher Innovationsbedarf, da hier die Grundlage für neue und bessere Materialien gelegt wird, mit deren Hilfe Ressourcen geschont werden können.

Ein Beispiel für die Veredelung der mineralischen Rohstoffe ist der Brennprozess, wie er für die Gewinnung von Zement und Branntkalk erforderlich ist. Zement wird im Allgemeinen aus Kalkstein (CaCO_3), Sand und Ton sowie weiteren Zuschlagstoffen hergestellt. Bedingt durch den Anteil von ca. 60% CaO im Zement werden im Brennprozess pro 1,4 Tonnen an produziertem Zement mindestens 1 Tonne CO_2 freigesetzt ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Weltweit stammen etwa 5% der gesamten CO_2 -Produktion aus der Zementherstellung. Damit stellt der hohe Bedarf an Zement ein weltweites Umweltschutzproblem dar. Ein Großteil des Zements wird in den Ländern mit aufstrebender Industrie verbraucht, allein China stellt 45% des gesamten weltweiten Bedarfs (Rosenthal 2007, 5). Auf den Aspekt der Klimarelevanz des Zementprozesses wird im Kapitel 2 Klimaschutz eingegangen.

In den westlichen Ländern wurde durch verschiedene Maßnahmen der Herstellungsprozess von Zement optimiert:

- Zum Erreichen der hohen Prozesstemperaturen für den Brennprozess können anstelle von fossilen Energieträgern Sekundärbrennstoffe, wie Kunststoffe, Altöle oder Autoreifen verwendet werden. Bei den hohen Temperaturen des Brennprozesses werden selbst stabile und toxische Kohlenwasserstoffe vollständig zerstört, so dass nur sehr geringe Mengen an Dioxinen/Furanen entstehen. Zur Sicherung einer gleich bleibend guten Zementqualität ist eine gleichmäßige Zusammensetzung der Brennstoffe und der Zuschlagsstoffe notwendig. Weitere Technologien zur Luftreinhaltung im Zementprozess werden im Kapitel „Luftreinhaltung“ aufgeführt.
- Des Weiteren kann für bestimmte Zementarten (Kompositzemente) Klinker durch Zuschlagstoffe auf Basis von Sekundärrohstoffen wie z.B. Flugasche oder Hüttensand substituiert werden.

In beiden Beispielen werden endliche natürliche Rohstoffe geschont. Allerdings kann es bei dem Einsatz von Sekundärbrenn- und -rohstoffen, die teilweise einen höheren Schwermetallgehalt aufweisen als natürliche Rohstoffe, zu einer Schwermetallanreicherung im Produkt Zement kommen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf ein sich möglicherweise anschließendes Betonrecycling zu berücksichtigen.

Optimierte Prozessführung

Durch die Optimierung von Herstellungsverfahren, beispielsweise durch eine geeignete Kombination von Prozessschritten oder den Einsatz von Mess-, Steuer- und Regelungstechniken, kann ebenfalls eine Steigerung der Ressourcenproduktivität erzielt werden.

Der Querschnittsbereich der **Mess-, Steuer- und Regeltechnik** (MSR) zielt vor allem auf die Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und die Reduktion des Personaleinsatzes durch automatische Steuerung im Betrieb sowie die Fernwartung im Service ab. Es handelt sich also nicht direkt um eine „Umwelttechnik“, vielmehr steht die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Vordergrund. Dennoch ermöglicht es die MSR-Technik durch eine Optimierung der Prozessführung, bestehende und bislang unterschätzte Potentiale der Anlage aus zu schöpfen und eine Steigerung der Ressourceneffizienz herbei zu führen. Technologietrends bei der MSR-Technik sind Materialverbesserungen, der verstärkte Einsatz von Elektronik sowie die oben genannte Prozessoptimierung beim Zusammenspiel von Anlagenkomponenten. Mechanik und Elektronik werden weiter miniaturisiert und verschmelzen zunehmend miteinander (Mikromechatronik). Zudem wird sich der Trend fortsetzen, analoge Prozesse zunehmend durch digitale zu ersetzen.

Als Technologiebeispiel sei der Einsatz der MSR-Technik in der **Oberflächentechnik** genannt, wo durch eine optimierte und kontrollierte Badführung eine Effizienzsteigerung des (Reinigungs)-Prozesses erzielt werden kann. Ein wichtiger Vorteil einer optimierten Prozessführung in diesem Zusammenhang ist die gesteigerte Prozessqualität, die sich in einem konstanten Reinigungsergebnis ausdrückt und somit auch die spätere Qualität der in diesem Schritt gereinigten Produkte sichert. Bei dem Einsatz von Aufbereitungs- und Wiedergewinnungstechnologien ist es besonders wichtig, die Veränderungen der Badparameter zu überwachen. Dies liegt darin begründet, dass es bei der Aufbereitung der Reiniger- und Spüllö-

sungen zu Veränderungen der Zusammensetzung der Bestandteile und deren Konzentration kommt. Aus dieser Situation heraus besteht ein hoher Bedarf an Sensorik, welche die entscheidenden Parameter sicher erfassen und abbilden kann. Für diesen Bereich des Prozesses besteht Forschungsbedarf zum Einsatz neuer Messmethoden und vor allem deren Einbindung in die Prozessmodelle zur automatisierten Regelung und Überwachung.

Der weltweite Markt für MSR wird einer Umfrage zu folge auf ca. 100 Mrd. € geschätzt, das Wachstum liegt bei 5 % (UBA 2007). Die deutsche MSR-Industrie ist stark exportorientiert. International wächst die Nachfrage vor allem in den Schwellenländern, da gegenwärtig und auch in Zukunft große Investitionen in neue Anlagen und Fabriken getätigt werden. Parallel dazu werden die stärksten Zuwächse in Indien und China erwartet. Der MSR wird eine durchschnittliche Innovationsdynamik zugesprochen, ein sehr hohes Marktpotential und eine gute Wettbewerbsfähigkeit (UBA 2007).

Auch durch eine optimale Kombination von Prozessschritten und neuen Verfahren lässt sich eine möglichst hohe ökologisch-ökonomische Effizienz erreichen. Beispielsweise werden **Membranverfahren wie z.B. die Umkehrosmose** zur Aufbereitung von Prozessmedien und zur Wiedergewinnung von Wert- und Wirkstoffen bereits eingesetzt. Membranverfahren ergänzen und erweitern das Spektrum der Trennverfahren. Neben den klassischen Membrananwendungen – wie bereits im Handlungsfeld Wasser unter anderem in der Meerwasserentsalzung, Wasseraufbereitung und Abwassertechnik erwähnt – werden Membranprozesse immer öfter auch in Kombination mit konventionellen Trennprozessen eingesetzt. Mit solchen hybriden Anlagenkonzepten lassen sich die besonderen Vorteile der jeweiligen Technologien gezielt ausnutzen. Ein typischer Anwendungsbereich ist die Kombination der Pervaporation mit thermischen Trennprozessen zur Trennung von azeotropen Gemischen oder zur gezielten Beeinflussung der Reaktionsgleichgewichte bei der Reaktivdestillation. Innerhalb der Membrantechnologie existiert ein Trend zur Kombination verschiedener Prozesse, solche Lösungen werden als „integrierte Membransysteme“ bezeichnet. In diesem Bereich werden gegenwärtig zukunftsweisende Entwicklungen erwartet (Drioli/Fontananova 2004).

Integrierte Membranprozesse bieten klare Vorteile hinsichtlich Produktqualität, Anlagengröße, Umweltbelastung und Energieverbrauch. Beispiele finden sich in der Lebensmitteltechnologie bei der Aufkonzentrierung von Fruchtsäften. Der beschriebene Trend zur verstärkten Integration verschiedener Prozesse ermöglicht einerseits neue Verfahrensalternativen, führt aber andererseits zu einer größeren Abhängigkeit zwischen den Prozesskomponenten.

Einsatz der weißen Biotechnologie in Produktionsprozessen

Der Begriff weiße Biotechnologie (oder auch industrielle Biotechnologie) umfasst die gezielte industrielle Nutzung von Stoffwechsellleistungen von Mikroorganismen sowie pflanzlicher und tierischer Zellkulturen. Als Biokatalysatoren werden intakte Mikroorganismen (inkl. Hefen und Pilzen), Zellkulturen höherer Organismen (auch pflanzliche), sowie subzelluläre Komponenten (z.B. Enzyme) genutzt. Biotechnologische Verfahren laufen unter vergleichsweise milden physikalischen Bedingungen ab, bei niedrigen Temperaturen, Normaldruck und neutralem pH-Wert. Diese milden Prozessbedingungen bewirken eine Energie- und Ressourceneinsparung, eine Optimierung des Wirkungsgrades, eine Verminderung unerwünschter Nebenprodukte und Abfälle bzw. deren Umwandlung in biologisch abbaubare Substanzen, eine Verbesserung der Produktqualität und auch eine Verkürzung der Prozesszeiten.

Im Abschnitt 7.3.1 „Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung“ wurde bereits ein Überblick über Wirkungsweisen der weißen Biotechnologie gegeben, ihrer Einsatzmöglichkeiten im Zusammenhang mit nachwachsenden Rohstoffen, dem Forschungsbedarf und Marktpotential. Biotechnologische Verfahren ersetzen zunehmend ressourcen- und energieintensive chemische Prozesse. Sie werden bei chemischen Stoffveränderungen eingesetzt, d.h., wenn bestimmte Substanzen abgebaut oder erzeugt werden sollen. Im Folgenden werden nun beispielhaft ein paar erfolgreiche Anwendungen aufgezeigt, die sich auf den Einsatz der Biotechnologie in Produktionsprozessen unterschiedlicher Branchen beziehen.

In der chemischen und pharmazeutischen Industrie werden biotechnologische Verfahren derzeit vor allem bei der Synthese von hochpreisigen Spezial- und Feinchemikalien sowie in der asymmetrischen Synthese von chiralen Substanzen eingesetzt, da biotechnische Verfahren hierbei aufgrund ihrer Eigenschaften Spezifität und Selektivität komparative Vorteile gegenüber chemischen Synthesen aufweisen.

In manchen Bereichen der chemischen Industrie haben Prozesse und Produkte der weißen Biotechnologie eine marktbeherrschende Position erobert. So liegt z.B. der Anteil biotechnologisch hergestellter Aminosäuren (L-Glutaminsäure, L-Lysin), Carbonsäuren (L-Milchsäure, Zitronensäure) oder Vitaminen (Riboflavin/ Vitamin B2, Vitamin C) bei fast 100%. Die Herstellung von Riboflavin auf chemischem Wege bedeutet einen achtstufigen Syntheseprozess, bei dem verschiedene umweltrelevante Chemikalien zum Einsatz kommen. Durch die Produktion des Vitamins mittels eines Pilzes in einem einstufigen Fermentationsprozess, konnten die Herstellungs- und Umweltschutzkosten gegenüber dem chemischen Herstellungsverfahren um 40% reduziert und 75% an fossilen Rohstoffen eingespart werden (OECD 2001).

Bei der Herstellung von 7-Aminocephalosporansäure, einer wichtigen Ausgangssubstanz für die Antibiotikasyntese, wurde von einem chemischen Verfahren auf ein biotechnologisches Verfahren umgestellt. Auch hier konnte auf umweltschädliche Substanzen wie Zinksalze und Chlorkohlenwasserstoffe, die im chemischen Herstellungsprozess erforderlich waren, verzichtet werden (Dubbert 2006).

In der Lebensmittel- und Getränkeherstellung sind biotechnologische Ansätze zwar traditionell weit verbreitet. Durchaus vorhandene Umweltentlastungseffekte sind i. d. R. aber nicht die treibende Motivation zur Etablierung der betreffenden Verfahren gewesen. Vielmehr sind die erzielten Umweltentlastungen meist nur "erwünschte Begleiteffekte" von wirtschaftlicheren Verfahren oder neuartigen Produkten. Biotechnologische Verfahren werden in der Lebensmittelindustrie beispielsweise bei der Süßstoffherstellung, dem Abbau von Trübstoffen und dem Aufschluss von Frucht-Fasern eingesetzt.

In der Papier- und Zellstoffindustrie gibt es mit den Verfahren Biopulping, Biobleaching, enzymatische Entfernung von Störstoffen (Pitch) der Papiererzeugung und enzymatische Altpapierstoffaufbereitung und -modifizierung mehrere praxisreife bzw. praxisnahe biotechnologische Verfahren, die zur Verringerung von Umweltbelastungen beitragen können.

In der Textilherstellung werden biotechnologische Verfahren zum Entschlichten, zum Bleichen, zum Entfernen von Bleichmittelresten sowie in Form von verschiedenen Ausrüstungsverfahren (Biostoning von Jeans, Biopolishing) eingesetzt. Weitere Potentiale liegen in der

Entwicklung von biotechnologischen Verfahren zur Gewinnung von Wertstoffen aus Schlichteabwässern, zur enzymatischen Entfernung von Faserbegleitstoffen, zur enzymatischen Fixierung von Farbstoffen an der Faser und zur Filzfreiausrüstung von Wolle.

In der Lederindustrie liegen Potentiale für den Einsatz biotechnologischer Verfahren in der enzymatischen Enthaarung, der Globulin- und Fettentfernung, der Umwandlung von Abfällen aus der Lederherstellung in Wertstoffe, der biotechnischen Produktion pflanzlicher Gerbstoffe sowie im Lederrecycling (Chromrückgewinnung, Kollagenhydrolyse und -modifikation).

In der Metallindustrie werden biotechnologische Verfahren bei der Reinigung, Entfettung und mikrobiellen Erzlaugung eingesetzt. Die Metalle Kupfer, Gold, Uran, Zink, Cobalt und Nickel können durch mikrobielle Erzlaugung aus sulfidischen Erzen auch bei nur geringen Metallgehalten der Erze gewonnen werden. Die größte Bedeutung hierfür haben die Bakterien *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Sulfid-, Schwefel- und Eisen-oxidierend) und *Acidithiobacillus thiooxidans* (Sulfid- und Schwefel-oxidierend). Die Bakterien oxidieren Sulfid und zweiwertiges Eisen zu Schwefelsäure und dreiwertigem Eisen. Das gebildete dreiwertige Eisen oxidiert wiederum Sulfid aus Metallsulfiden unter Bildung von elementarem Schwefel, wodurch die zu gewinnenden Metalle in Lösung gehen. Sind in den Erzen keine Sulfide oder zweiwertigen Eisenverbindungen vorhanden, so müssen beispielsweise Pyrit (FeS), Schwefel oder Eisen(II)sulfat als Energiequelle für die Bakterien zugegeben werden. Die Verfahren sind umweltfreundlich und Stand der Technik.

Es sollte jedoch auch erwähnt werden, dass biotechnologische Verfahren nicht per se den chemischen Verfahren überlegen sind – weder wirtschaftlich noch ökologisch. In jedem Einzelfall muss geprüft werden, welches Verfahren hinsichtlich Kosten, Energieverbrauch, Ressourcenschonung und Emissionen das bessere ist. Ein Beispiel hierfür ist Indigo, der Farbstoff für „Jeans-Blau“. Die chemische Synthese von Indigo ist auch heute noch biotechnologischen Verfahren wirtschaftlich und ökologisch überlegen (Dubbart 2006).

Nach internationalen Studien beträgt der Anteil biotechnischer Verfahren in der Produktion zurzeit etwa 5 %, in den nächsten Jahren wird ein deutlicher Anstieg auf mittelfristig bis zu 20 % erwartet. Für die Abschätzung der wirtschaftlichen Bedeutung des weißen Biotechnologiebereichs wurden im Sinne einer Obergrenze weltweit 10-20 Mrd. Euro genannt, die auf mit weißen Biotechnologieprozessen erstellte Produkte entfallen könnten (UBA/BMU 2007). Deutsche Chemieunternehmen als potentielle Anwender von weißer Biotechnologie gehören zu den internationalen Schlüsselakteuren in ihrem Bereich.

Das technologische Entwicklungspotential der weißen Biotechnologie wird kurzfristig als eher unterdurchschnittlich eingestuft, langfristig kommen etwas optimistischere Einschätzungen zum Tragen (UBA/BMU 2007). Die systematischere Einbindung "neuer Technologiefelder" wie Nanotechnologie und Biotechnologie in die Entwicklung effizienter Produktionsprozesse stellt eine Herausforderung dar, die nicht nur ein großes Potential hinsichtlich einer Steigerung der Ressourcenproduktivität birgt, sondern auch neue Marktchancen eröffnen kann.

Einsatz von Dienstleistungen zur Optimierung von Produktionsprozessen

Neben den oben genannten Umwelttechnologien bieten auch nicht-technische Instrumente Potential zur Steigerung der Ressourcenproduktivität innerhalb von Produktionsprozessen.

Sie zeichnen sich dadurch aus, dass hier der gesamte Produktionsprozess betrachtet wird. Zu den Instrumenten, die auf nicht-technischem Niveau zu mehr Ressourceneffizienz führen können, gehören Dienstleistungen wie beispielsweise der in unterschiedlicher Form angewendete PIUS-Check, die Ressourcenkostenrechnung, die Material-Fluss-Analyse, die betriebliche Ökobilanz und Design-to-cost oder Zero-Loss-Methoden. Die Einsparpotentiale reichen von 5-30 % der Herstellungskosten (BMU 2007).

Dienstleistungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz spielen auch 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 angepasste Systemlösungen zu entwickeln und anzubieten (Export von Dienstleistungen im Verbund mit Technologien). Zukünftig wird der Markt für KomplettDienstleistungen und integrierte Leistungen stark ansteigen. Um Produkte attraktiver zu machen, sollten Anlagenbauer und Fertigungsunternehmen zukünftig eine Dienstleistungsumgebung mitliefern. Durch Adaption an spezifische technische, wirtschaftliche und politische Gegebenheiten des Auslands sollten die Dienstleistungen noch exportfähiger gemacht werden.

Im Folgenden wird auf einzelne Dienstleistungen im Produktionssektor eingegangen.

PIUS steht für „produktionsintegrierten Umweltschutz“ und ist der auf die Produktion bezogene Teil der integrierten, vorsorgenden Produktpolitik – IPP, die die ökologischen und ökonomischen Merkmale eines Produktes entlang seines gesamten Lebensweges zusammenfügt. Mit dem PIUS-Check werden die relevanten Stoffströme und der Stand der Technik in der Produktion erfasst und es wird aufgezeigt, welche Verbesserungen in der Produktion im Sinne der Ressourceneffizienz möglich sind (siehe auch VDI-Richtlinie 4075 „PIUS“).

PIUS hat ein verbessertes Betriebsergebnis insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zum Ziel. Er soll die Qualität steigern, zu Kostensenkungen und effizientem Gebrauch von Einsatzstoffen führen, zur Optimierung von Prozessabläufen oder Produktionsanlagen beitragen und zu einer deutlichen Verminderung von Umweltbelastungen innerhalb einzelner Produktionsschritte und Teilprozesse führen.

Bei der Analyse des PIUS-Potentials werden größtenteils Strategien herangezogen, die bereits in Tabelle 5 für einen „ressourcenschonenden und abfallarmen Produktionsprozess“ genannt wurden:

- Minimierung des Bedarfs an nachgeschalteten Umweltschutzmaßnahmen (end-of-pipe)
- Minimierung des Einsatzes an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen bei weiterhin optimaler Produktqualität
- Intensivierung der Nutzung von Betriebs- und Hilfsstoffen, z.B. durch Schließung von Stoffkreisläufen in der Produktion oder durch Mehrfachnutzungen
- Substitution von umweltbedenklichen Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen
- Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und regenerativen Energien
- Verbesserung der Energieeffizienz
- Verringerung des Aufwands für Logistik (z.B. Transport, Lagerung)

Die Ressourcenkostenrechnung ist eine umweltorientierte Erweiterung der betrieblichen Kostenrechnung, die die vorhandenen technischen und betriebswirtschaftlichen Prozess(schritt)informationen besser miteinander verknüpft. Sie analysiert Material- und Dienstleistungsprozesse sowie Ursache-Wirkungszusammenhänge innerhalb einer Kostenstelle, ordnet Kosten ihren jeweiligen Verursachern zu und schlüsselt sie nach Verfahrensschritten, Maschinen- und Personaleinsatz sowie dem Einsatz von Roh-, Hilfs-, Betriebsstoffen und Energie auf. Somit wird die Ressourcenkostenrechnung zu einem wirkungsvollen Planungs-, Steuerungs- und Kontrollinstrument, das nicht nur die kaufmännische, sondern auch die technische Seite des Unternehmens mit einbezieht. Daraus ergeben sich für das anwendende Unternehmen u.a. als wichtige Vorteile die Identifizierung von Kostentreibern und das Aufzeigen von Optimierungs- und Kostensenkungspotentialen durch Materialverbrauchs- und Wertschöpfungsanalysen. In diesem Sinne trägt sie zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz bei.

6.4 Akteure und Netzwerke

Das Spektrum an Technologien, die zur Steigerung der Rohstoffproduktivität beitragen können, umfasst Spitzentechnologien wie z.B. die weiße Biotechnologie und die Nanotechnologie, hochwertige Technologien (Anlagenbau, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik) sowie innovative Dienstleistungen (Pius-Check, Zero-Loss-Methode u.ä.). 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. Die meisten Unternehmen sind in Innovationsnetzwerken organisiert, die Kunden, Zulieferer, Hochschulen und öffentliche Forschungseinrichtungen umfassen. Ziele sind neben der Verbesserung des Informationsaustausches, die Entwicklung innovativer Produktideen und die Erschließung neuer Märkte (BMU 2007, 87f.).

In manchen Fällen, z.B. auf dem Gebiet der Biokunststoffe kooperieren sogar Konkurrenten miteinander. Das liegt zum einen daran, dass die Biokunststoffindustrie noch durch eine enge Verzahnung von Forschung und Entwicklung geprägt ist, zum anderen dass es strategische Allianzen gibt, um diesen Markt zu erschließen (UBA/BMU 2007, 166f.). Wichtige deutsche Netzwerke auf dem Gebiet der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe sind das **mitteldeutsche Innovationsnetzwerk** „Biotechnische Werkstoffe –Produkte, Materialien und Verfahren“, dessen Kern das Kunststoff-Zentrum Leipzig ist, das **„Wissens- und Innovationsnetzwerk Polymertechnik“**, in dem zahlreiche kleinere und mittlere Unternehmen mit dem Ziel kooperieren, die Ressourcenproduktivität im betrieblichen Alltag zu erhöhen, sowie das **Abaca-Netzwerk**, in dem sich Unternehmen der Automobilindustrie, Hochschulen und internationalen Organisationen zusammen geschlossen haben, um die Verwendung nachwachsender Rohstoffe in der Industrie zu fördern.

Auch die Entwicklung der Bionik ist derzeit noch eher durch Partnerschaft und Kooperation als durch Konkurrenz und Wettbewerb geprägt. Dies zeigt die zentrale Bündelung der Kompetenzen im **Netzwerk BIONIKON** mit derzeit 28 Mitgliedern und Sitz in Berlin. Das Netzwerk dient als Plattform für den wissenschaftlichen Austausch, bietet fachliche Beratung, organisiert Veranstaltungen und stellt umfassende Informationen zum Thema Bionik zur Verfü-

gung. Zu erwähnen ist außerdem die **Gesellschaft für technische Biologie und Bionik**, der **Verein BIONALE – Lernen von der Natur e.V.** sowie das regionale **Kompetenznetz Biomimetik** in Freiburg, dessen Forschungsschwerpunkt im Bereich der Entwicklung neuer technischer Textilien, der Produktion von smart materials und der Umsetzung pflanzlicher Strukturprinzipien in die Technik liegen (Oertel/Grunwald 2006, 47f.).

Da der Transfer von Technologien zur Steigerung der Rohstoffproduktivität noch der Unterstützung und Förderung durch die Politik bedarf, hat das Bundesumweltministerium das branchenübergreifende **Netzwerk Ressourceneffizienz** initiiert. Ziel ist es, durch die Zusammenführung von Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Gewerkschaften und Wissenschaft einen breiten Erfahrungsaustausch sicherzustellen sowie Hinweise auf Möglichkeiten zur Verbesserung der Rahmenbedingungen, zum Abbau von Hemmnissen und zur Verringerung von Bürokratie zu geben. Das Bundeswirtschaftsministerium hat zudem die **Deutsche Materialeffizienzagentur** (demea) gegründet, welche die Verbesserung der Rohstoffproduktivität vor allem bei kleineren und mittleren Betrieben anstrebt, denen sie Beratung anbietet.

Auch auf europäischer Ebene wurden Netzwerke (z.B. ERA-Net SUSPRISE) und Technologieplattformen (z.B. SUSCHEM) ins Leben gerufen, die die Stärkung der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen verschiedener europäischer Länder vor dem Hintergrund eines nachhaltigen Umgangs mit Ressourcen als Ziel verfolgen.

In der nachfolgenden Tabelle sind relevante Institutionen und Netzwerke aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft, die auf dem Gebiet der Ressourcenproduktiv aktiv sind, angeführt.

Globale Institutionen

GAIM	Global Analysis, Integration and Modelling	http://gaim.unh.edu/
GCTE	Global Chance and Terrestrial Ecosystems	http://www.gcte.org/
GV	Geologische Vereinigung e.V.	http://www.g-v.de/
OECD	Food, Agriculture and Fisheries	http://www.oecd.org/department/
UNEP	United Nations Environment Programme; International panel on sustainable resource management	http://www.unep.org/
IISI	International Iron and Steel Institute, Brüssel	http://www.worldsteel.org/
AISI	American Iron and Steel Institute	http://www.steel.org
BIR	Bureau of International Recycling, Brüssel	http://www.bir.org/

Europäische Institutionen und Plattformen

ETAP	Environmental Technologies Action Plan der European Commission	http://ec.europa.eu/environment/etap/techno_functions_en.htm#5
EEA	Europäische Umweltagentur	http://www.eea.europa.eu/themes/natural
EuMaT	European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies	http://www.eumat.org/
ERA-NETs	SUSPRISE Sustainable Enterprise Woodwisdom-Net MANUNET Manufacturing	http://www.susprise.net/ http://www.woodwisdom.net http://www.manUNET.net
SusProNet	Netzwerk zur Entwicklung von nachhaltigen Produkt-Service Systemen	http://www.suspronet.org
SCORE	Netzwerk "Sustainable Consumption and Production"	www.score-network.org
SUSCHEM	European Technology Platform for Sustainable	http://www.suschem.org/

	Chemistry (Dechema, VCI, GDCh, DIB)	
Europabio	European Association for Bioindustries	http://www.europabio.org
ESTEP	European Steel Technology Platform	http://cordis.europa.eu/estep/home_en.html
	Manufacture Platform	http://www.manufacture.org/
IMA-Europe	Industrial Minerals Association Europe	http://www.ima-eu.org/
EULA	Europäischer Kalkverband (European Lime Association)	http://www.eula.be

Staatliche Einrichtungen/Behörden

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	http://www.bmbf.de/
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz	http://www.bmelv.de/
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	http://www.bmu.de/
	Portal zum Umwelttechnologietransfer; Cleaner Production Germany	http://www.cleaner-production.de/
UBA	Umweltbundesamt	http://www.uba.de/
BfN	Bundesamt für Naturschutz	http://www.bfn.de/
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	http://www.bmw.de/
DEMEA	Deutsche Materialeffizienz Agentur	http://www.demea.de
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	http://www.bam.de
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	http://www.bmz.de
EITI	Extractive Industries Transparency Initiative	

Institutionen/Institute und Bund-/Länderarbeitsgruppen

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	http://www.bgr.bund.de/
BLAG NE	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Nachhaltige Entwicklung	http://www.blak-ne.de
	Der Rat für Nachhaltige Entwicklung	http://www.nachhaltigkeitsrat.de/
DGG	Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften	http://www.dgg.de/
GUG	Gesellschaft für Umweltgeowissenschaften	http://www.gug.org/
GTZ	Gesellschaft für technische Zusammenarbeit	http://www.gtz.de/
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall	http://www.laga-online.de/
SRU	Rat von Sachverständigen für Umweltfragen	http://www.umweltrat.de/
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltfragen	http://www.wbgu.de/
EFA-NRW	Effizienzagentur Nordrhein-Westfalen	http://www.efanrw.de/
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow	http://www.fnr.de
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	www.dbu.de
	Aachener Stiftung Beys; Faktor X	http://www.aachener-stiftung.de/
ITUT	Internationales Transferzentrum für Umwelttechnik, Leipzig	http://www.itut-ev.org/deutsch/index.html
Hessen-Nanotech	Technologie und Wirtschaftsförderung Hessen	http://www.hessen-nanotech.de

Verbände / Vereine im In- und Ausland

BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz	http://www.bund.net/
BDI	Ausschuss „Rohstoffpolitik“ des Bundesverband der deutschen Industrie (BDI)	http://www.bdi-online.de
DIB	Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie	http://www.dib.org/
ECON-SENSE (BDI)	Forum nachhaltige Entwicklung der deutschen Wirtschaft	http://www.econsense.de/
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	http://www.vdi.de
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.	http://www.vdma.de
GDCH	Gesellschaft deutscher Chemiker	http://www.gdch.de/
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie	http://www.dechema.de
SUPER	Fachgemeinschaft "Sustainable Production, Energy and Resources" Initiative der DECHEMA Deutschen Industrievereinigung Biotechnologie des Verbands der Chemischen Industrie e.V. (DIB/VCI), Frankfurt Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM), Düsseldorf Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe Münster	http://www.processnet.org/SUPER
EMPA	Verband „European Bioplastics“, Berlin Materials Science and Technology UFOP: Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen, Berlin	http://www.empa.ch/

Netzwerke

DESERT*Net	German Competence Network for Research to Combat Kompetenznetzwerk Umwelttechnik Rheinland-Pfalz Kompetenznetzwerk Metallverarbeitung & Umwelttechnik Eisenhüttenstadt e.V.	http://www.desertnet.de/ http://www.umwelttechnik.rlp.de/ http://www.kompetenznetzwerk-ehst.de/
LOOP	Entwicklungs- und Demonstrationszentrum „Kreislauffähigkeit neuer Werkstoffe“	http://www.werkstoffkreislauf.de
NIK	Netzwerk innovative Kreislauftechnologien, Fraunhofer IML	http://www.krw-netzwerk.de/
PIUS	PIUS-Netzwerk der Effizienzagentur NRW zur Ressourceneffizienz, Duisburg	www.pius-info.de/de/pnd/index.html
BIOKON	Bionik-Kompetenz-Netz, Berlin Kompetenznetz Biomimetik Baden-Württemberg	www.biokon.net http://www.kompetenznetz-biomimetik.de/

Forschung

FOSTA	Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf
C.A.R.M.E.N.	Centrales-Agrar-Rohstoff-Marketing-und-Entwicklungs-Netzwerk, Straubing (Fachhochschule Weihenstephan) Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Recyclinggerechte Produktgestaltung
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum Leipzig

IE	Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig	http://www.ie-leipzig.de/
IFEU	Institut für Energie und Umwelt, Heidelberg	www.ifeu.org
ISI	Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung	http://www.isi.fraunhofer.de/
WI	Wuppertal Institut: Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung	http://www.ressourcenproduktivitaet.de

6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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 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 Energieverbrauch, Transport, Staubemissionen u.ä.

Zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität kommt ein breites Spektrum an Einzeltechnologien in Betracht, die sich vier verschiedenen Basisstrategien zuordnen lassen: 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. Es ergaben sich fünf strategische Pfade (s. Tab. 5, Abschnitt 6.1), deren wesentliche Ergebnisse im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

Substitution von Einsatzstoffen in der Produktgestaltung (Pfad 1)

Im Rahmen der Substitution gewinnt die stoffliche Nutzung von Biomasse zunehmend an Bedeutung, an der vor allem die chemische Industrie großes Interesse zeigt. 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). Zurzeit stammen ca. 12 % der in Deutschland produzierten Chemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen. 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.

Große Bedeutung kommt diesem Zusammenhang der weißen Biotechnologie zu. Biotechnische Verfahren zeichnen sich häufig durch weniger Produktionsschritte, geringeren Rohstoffverbrauch, höhere Energieeffizienz, verminderte Schadstoffemissionen sowie niedrigere Produktionskosten aus und sind dadurch für die chemische Industrie attraktiv. 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. Große Hoffnungen werden in das Konzept der Bioraffinerie gesetzt, das unter wirtschaftlichen Aspekten in Deutschland prinzipiell realisierbar wäre, wie Beispiele aus der industriellen Praxis (z.B. Zellstoffherstellung) belegen.

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. Als notwendig wird weiterhin eine Verbesserung der Ausbildung von Naturwissenschaftlern betrachtet, sowohl im Hinblick auf die interdisziplinären Anforderungen der biotechnologischen Berufswelt als auch im Hinblick auf die Spezialisierung in den einzelnen Fachgebieten (Mikrobiologie, Molekularbiologie, Biochemie, Verfahrenstechnik, Bioinformatik). Reformbedarf wird schließlich in Bezug auf die politischen Rahmenbedingungen zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe gesehen.

Zu den Produkten, die heute schon in nennenswerten Umfang aus Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden gehören z.B. Tenside, Bioschmierstoffe, Biokunststoffe, naturfaserverstärkte Kunststoffe, Naturdämmstoffe und Textilfasern. Große 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 Unterneh-

men 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. 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

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 schützenswerten Tropenwälder etc.). Um mögliche negativen Auswirkungen zu verhindern werden die Erstellung ganzheitlicher Ökobilanzen für biogene Produkte, die Etablierung global akzeptierter Umwelt- und Sozialstandards sowie die Einführung von Zertifizierungssystemen gefordert.

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.

Erhöhung der produktbezogenen Materialeffizienz (Pfad 2)

Strategische Ansatzpunkte zur Verbesserung der 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 – 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 Herstel-

lung von Werkstoffen nach den in der Praxis auftretenden Belastungen mit Hilfe neuer Fertigungsverfahren große Relevanz zu. Beispiele sind etwa Tailored Blanks im Automobilbau, die SKO-Methode im Maschinenbau oder das Bamtec-Verfahren sowie das Beeplate-System im Bereich des Stahlbetonbaus. Angesichts der gravierenden Umweltprobleme bei der Zementherstellung und der weltweiten Bedeutung, die Zement als Baustoff hat, gilt Technologien, die den Zementverbrauch senken, großes Interesse. Zu nennen sind hier etwa die Verwendung von Glasfaser anstelle der herkömmlichen Stahlbewehrung, die Nutzung nanotechnologischer Entwicklungen im Betonbau sowie die Sandwichbauweise.

Besondere 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 Haftsysteme, 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. 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

Verlängerung der Lebensdauer von Produkten (Pfad 3)

Als technische Ansatzpunkte zur Verlängerung 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-Emallierung 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.

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) eingespart werden. Eine Umlenkung der Investitionen vom Neubau in den Bestand würde außerdem zusätzliche Arbeitsplätze schaffen sowie den Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrszwecke reduzieren und somit den Konkurrenzdruck in der Flächennutzung reduzieren. 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“.

Design for Recycling (Pfad 4)

Design for Recycling zielt darauf ab, bereits im Produktentstehungsprozess die Weichen für die Verwertung und Entsorgung von Abfällen in Richtung Effizienz und Umweltverträglichkeit zu stellen und ist Teil des Konzepts der integrierten Produktpolitik (IPP), bei der der gesamte Lebensweg eines Erzeugnisses, von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung betrachtet wird. Hauptansatzpunkte sind die Werkstoffauswahl, die Wahl der Verbindungstechnik und die Produktkonzeption (z. B. Modulbildung). 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). 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 (z.B. durch lösbare Klebstoffe) besteht weiterhin Handlungsbedarf und Innovationspotential. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass für die Entwicklung innovativer Technologien (beispielsweise in der Elektronikbranche) vermehrt auf „exotischere“ Elemente zurückgegriffen wird und immer komplexere Bauteile Verwendung finden.

Ressourcenschonenden und abfallarmen Produktionsverfahren (Pfad 5)

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 letzten Pfad darum, den Herstellungsprozess für ein gegebenes Produkt unter Ressourcenaspekten zu optimieren (produktionsintegrierter Umweltschutz). Solche Prozessinnovationen können in unterschiedlichen Phasen des Produktionsprozesses ansetzen.

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. Die Aufbereitung mineralischer Rohstoffe lässt sich durch moderne optische Sortieranlagen sowohl kostengünstiger als auch ressourceneffizienter gestalten. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Reduktions- und Schmelzprozesse betreffen die Substitution fossiler Energieträger z.B. durch Kunststoffabfälle und Altöle, den Einsatz von Rohstoffen höherer Reinheit und Konzentration sowie die Optimierung der Elektrolyseverfahren z.B. bei der Aluminiumraffination. Mit Blick auf die Urformverfahren gewinnen sog. 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-Werkstoffen.

Entfettung als vorbereitender Schritt der Oberflächenveredlung von Metallen ist in vielen Zweigen des produzierenden Gewerbes unverzichtbar. Rohstoffsparende Verfahren sind etwa die Kreislaufführung und Mehrfachverwendung der Entfettungsmittel sowie ihre Substitution durch Heißdampf oder CO₂. Durch den Ersatz halogener 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 Reduktion der Umweltbelastung andererseits. 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.

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 (s.oben) werden biotechnologische Verfahren in den Papier- und Zellstoffindustrie, (Biobleaching, enzymati-

sche Entfernung von Störstoffen), in der Lederindustrie (enzymatische Enthaarung, Globolin- und Fettentfernung) sowie in der Metallindustrie (mikrobielle Erzlaugung) eingesetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen chemischen Verfahren sind biotechnologische Verfahren häufig umweltfreundlicher und kostengünstiger.

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 Ökobilanz. Die Einsparpotentiale durch Inanspruchnahme solcher Dienstleistungen werden auf von 5-30 % der Herstellungskosten geschätzt. 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 Komplettendienstleistungen und integrierte Leistungen künftig stark ausweiten wird.

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 sind daher nicht alternativ, sondern komplementär zueinander zu sehen.

Das Spektrum an Technologien, die zur Steigerung der Rohstoffproduktivität beitragen, umfasst Spitzentechnologien wie z.B. die weiße Biotechnologie, hochwertige Technologien (Anlagenbau, Mess-, Steuer- und Regeltechnik) und innovative Dienstleistungen (z.B. Pius-Check, u.a.). Wie bei den Umwelttechnologien insgesamt ist das Feld forschungs- und wissenschaftensintensiv. 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.

Literatur

- ADNR (Arbeitsgemeinschaft für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen e.V.): Marktdata.
<http://www.adnr.info>
- Antranikian, G. (2006): Die industrielle Biotechnologie – gegenwärtiger Stand in Forschung und Technik. 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. 25-34
- 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
- Barthlott, W. (2007): Der Lotus-Effect®: Biologische Grundlagenforschung und die Entwicklung neuer Werkstoffe. In: Brickwede, F.; Erb, R.; Lefèvre, J.; Schwalk, M. (Hrsg.): Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur. 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal. Initiativen zum Umweltschutz, Band. 68, Berlin, S. 28-35
- BauNetz (2006): Students-Loft: Prototyp für Studentisches Wohnen in Stuttgart vorgestellt. Meldungen für Architekten vom 5.1.2006. http://www.baunetz.de/db/news/?news_id=81385
- Behrendt, S.; Henseling, C.; Fichter, K.; Bierter, W. (2004): Chancenpotenziale für nachhaltige Produktnutzungssysteme im Internet. IZT, Berlin
- Behrendt, S.; Scharp, M. (IZT); Kahlenborn, W.; Feil, M.; Dereje, C. (Adelphi Reserach, Berlin); Bleischwitz, R.; Delzeit, R. (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie) (2007): Seltene Metalle. Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. UBA Texte 98/07
- Bleischwitz, R.; Bringezu, S. (2007): Globales Ressourcenmanagement. Konfliktpotenziale und Grundzüge eines Global Governance-Systems. Stiftung Entwicklung und Frieden (Hrsg.), Policy Paper 27, Bonn
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2005): Werkstoffwelten: Entdeckungen im Kosmos der Stoffe. Berlin
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg.) (2006): Hightech-Strategie für Deutschland
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2008): Pressemitteilung 11. März 2008, Staatssekretär Meyer-Krahmer: "Für unsere Position als Exportweltmeister brauchen wir intelligente Produktionsprozesse"
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): GreenTech made in Germany. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. München
- 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, Online-Quelle: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3337.pdf>, Stand: 14.03.2008
- bpz (Deutsche Betonzeitung) vom 15.10.2007: Ressourcen effizient einsetzen
- 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 (2007): Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, März 2007. Siehe auch http://www.bundeskanzlerin.de/nn_5296/Content/DE/Rede/2007/03/2007-03-20-merkel-bdi-rohstoffkongress.html
- Bundesregierung (2001): Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin
- Daly, H.E. (1990): Towards some operational principles of sustainable development. In: Ecological economics 2, S. 1-6.
- DECHEMA (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.) (2004): Weiße Biotechnologie: Chancen für Deutschland. Positionspapier der DECHEMA e.V., Stand: November 2004
- demea (deutsche Materialeffizienzagentur) (2006): VDE dialog, Juli/August 2006
- demea (deutsche Materialeffizienzagentur) (2007): Betonwerk Oschatz GmbH: Der Stoff aus dem Materialeffizienz ist – Textilbewehrte Brücken. <http://www.materialeffizienz.de/forderung/materialeffizienzpreis/preisverleihung-2007/jorg-schiffer-gmbh-co-kg-menden>
- DIN 6120 (Kennzeichnung von Packstoffen und Packmitteln)
- DIN 54840 (Kennzeichnung von Kunststoffen; Einsatz überwiegend im Geräte- und Fahrzeugsektor)
- DIN ISO 11469 (Sortenspezifische Identifizierung und Kennzeichnung von Kunststoff-Formbauteilen)
- DIN ISO 14062 (Leitlinien zur Integration von Umweltaspekten in die Produktgestaltung)
- Drioli, E.; Fontananova, E. (2004): Membrane Technology and Sustainable Growth. Chemical Engineering Research & Design, 82(A12), S.1557-1562
- Dubbert, W. (2006): Umweltentlastung durch biotechnische Verfahren. 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. 35-40
- EFA (Effizienz-Agentur NRW) (2006): Ressourceneffizienz in der Praxis. Ressourcen schonen – Wirtschaft stärken. Duisburg
- Eibisch, H. et al. (2005): Neue Entwicklungen bei Thixospritzgießen von Magnesiumlegierungen. In: Wendler-Kalsch, E. (Hrsg.): Zukunftsorientierter Einsatz von Magnesium im Verkehrswesen. Renningen, S. 74-86
- Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (Hrsg.) (1994): Die Industriegesellschaft gestalten. Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn
- Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltigen zukunftsverträglichen Entwicklung“ (1998): Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung. BT-Drucksache 13/11200 vom 26.06.1998
- European Bioplastics e.V. Berlin: Auf einen Blick. <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=2>
- EU-Kommission (2003): Entwicklung einer thematischen Strategie für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. KOM (2003) 573 endg. Brüssel
- EU-Kommission (2005): Mitteilung der Kommission (...): Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen. KOM(2005) 670: Brüssel, den 21.12.2005
- EU-Richtlinien wie die WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment)
- EU-Direktive ELV (End of Life Vehicles)
- EU-Direktive RoHS (Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment) 2002/95/EG
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) (Hrsg.) (2006): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow

- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) (2007): Entwicklung des Anbaus von Rohstoffpflanzen. http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/fnr/images/daten-und-fakten/Abb02_sw300.jpg
- FNR (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.(Hrsg.)(2005): Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Gülzow, online verfügbar unter: http://www.nova-institut.de/pdf/06-02_FNR-NFK-nova.pdf
- Gartoff, B. (2006): Weiße Biotechnologie – Die Perspektive der Industrie. 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. 15-24
- Goppelt, G. (2008): Leichter ist schwer: Wir lässt sich die Gewichtsspirale umkehren? In: heise Autos: <http://www.heise.de/autos/artikel/s/4605/>
- Hage, W. (2007): Künstliche Haufischhaut auf Flugzeugen. In: Brickwede, F.; Erb, R.; Lefèvre, J.; Schwalk, M. (Hrsg.): Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur. 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal. Initiativen zum Umweltschutz, Band. 68, Berlin, S. 89-97
- Hirth, T., Woidasky, J., Eyerer, P., Nachhaltige rohstoffnahe Produktion. 2007: Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
- Hülser, P., Der richtige Weg: Ersatz von Chrom(VI)-haltigen Passivierungen auf verzinkten Stahlbändern. Metalloberfläche, 2003. 7-8
- IEHK (Institut für Eisenhüttenkunde) der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (2007): Datenblatt Metallschaum: Stahlschaum nach der Schlicker Reaktions Schaum Sinter Verfahren im Vergleich zu Aluminium- und Nickelschaum. Aachen
- IKB (Deutsche Industriebank AG)(2006): Branchenbericht November 2006 – Rohstoffmärkte. Düsseldorf
- INP Greifswald (2004): Jahresbericht 2004 des Instituts für Niedertemperatur-Plasmaphysik e.V. Mitglied der Leibnitz Gemeinschaft
- Jörissen, J.; R. Coenen (2007): Sparsame und schonende Flächennutzung – Entwicklung und Steuerbarkeit des Flächenverbrauchs. Berlin
- Jörissen, J.; Coenen, R.; Stelzer, V. (2005): Zukunftsfähiges Bauen und Wohnen. Herausforderungen, Defizite, Strategien. Edition sigma, Reihe: Global zukunftsfähige Entwicklung, Bd. 7, 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, 1759-1765
- Junge, K. (2003): Forschung aktuell – Bericht aus dem Institut für Ziegelforschung. Zi-Jahrbuch 2003, S. 127-132
- Kopfmüller, J., Brandl, V., Jörissen, J., Paetau, M., Banse, G., Coenen, R. Grunwald, A. (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Berlin
- Kristof, K. (2007): Hot Spots und zentrale Ansatzpunkte zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Juni 2007
- Kühlein, M.; Bruck, F. (2007) Fließpressen von Magnesiumlegierungen jetzt bei Raumtemperatur möglich. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/umformtechnik/maschinen/articles/69033/>
- LBS Zukunftswerkstatt (2007): Schöner Wohnen ab 50. <http://www.lbs.de/microsite-presse/lbs-zukunftswerkstatt/wohnen-ab-50>
- Lerch, A., Nutzinger, H.G. (1996): Nachhaltige Entwicklung aus ökonomischer Sicht. In: Morath, K.(Hrsg.): Welt im Wandel. Wege zu dauerhaft-umweltverträglichem Wirtschaften. Frankfurt am Main, S. 41-58

- Lucas, R.; Röhr, A.; Scharp, M. (IZT) unter Mitarbeit von Bleischwitz, R.(2007): Das Rohstoffsystem Kupfer- Staus Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
- Luchsinger, R.H.; Speck, T. (2007): Selbstopreparende pneumatische Strukturen. In: Brickwede, F.; Erb, R.; Lefèvre, J.; Schwalk, M. (Hrsg.): Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur. 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal. Initiativen zum Umweltschutz, Band. 68, Berlin, S.36-47
- Meadows, D. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.
- Milwich, M.; Speck, T.; Speck, O.; Stegmaier, T. Olanck, H. (2007): Technischer Pflanzenhalm – Biologisch optimierte Faserverbundmaterialien mit Gradientenstruktur. In: Brickwede, F.; Erb, R.; Lefèvre, J.; Schwalk, M. (Hrsg.): Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur. 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal. Initiativen zum Umweltschutz, Band. 68, Berlin, S.125-136
- Nachtigall, W. (2002): Bionik – Grundlagen und Beispiele für Ingenieur und Naturwissenschaftler. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- NIW (Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung); ZEW (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH); ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung): (2006): Zur technologischen Leistungsfähigkeit der deutschen Umweltschutzwirtschaft im internationalen Vergleich. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 20-2007. BMBF (Hrsg.), Berlin
- OECD (2001): The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability
- 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
- Pearce, D.; Turner, R. (1990): Economics of Natural Resources and the Environment. London
- Ritthoff, M. (2007) Der Werkstoff Stahl und seine Anwendungen. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, April 2007
- Rosenthal E. 2007: "The Method is Cleaner, but the Amount of Cement Still Pollutes" Süddeutsche Zeitung vom 13.12.2007, S. 5
- RWI (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung), ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung), BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Essen
- Schauer, Thomas (2004): Der Mythos von der dematerialisierenden Informationstechnologie. Manuskript des auf der Tagung "Produkte und Dienstleistungen von morgen. Wirtschaftlicher Erfolg durch weniger Ressourcenverbrauch?" am 9. November 2004 in Wien gehaltenen Vortrags; online verfügbar unter: <http://www.sustainableeurope.net/docs901104/schauer.pdf>
- Schmidt-Bleek, F.; Bierter, W. (1998): Das MIPS Konzept. Weniger Naturverbrauch, mehr Lebensqualität durch Faktor 10. Droemer Knauer Verlag
- Spath, D.; Hirsch-Kreinsen, H.; Kinkel, S. (2008): Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen - Unternehmenserfahrungen, Forschungs- und Transferbedarfe. Fraunhofer IAO (Hrsg.), Stuttgart 2008
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2005): Auf dem Weg zur Europäischen Ressourcenstrategie: Orientierung durch ein Konzept für eine stoffbezogene Rohstoffpolitik. Stellungnahme, November 2005
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten, Juli 2007, Berlin
- Stahl-Zentrum 2006: Aufgaben, Themen, Fakten 2005/06 Jahresbericht. 2006

- Statistisches Bundesamt Wiesbaden (2007): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht 2006
- Steinhilper, R. 1993a: Erfolgreiches Produktrecycling zur erneuten Verwendung oder Verwertung. RKW (Hrsg.), Eschborn, 1993
- Steinhilper, R. 1993b: Recyclinggerechte Produktentwicklung: Aspekte, Strategien, Konstruktionspraxis. Düsseldorf: VDI Berichte 1089. S. 221-245
- Steinmüller, K.; Steinmüller, A. (2006): Die Zukunft der Technologien. Hamburg
- Striffler, B. (2007): Biologische superhydrophobe Oberflächen – Technische Potenziale für Unterwasseranwendungen. In: Brickwede, F.; Erb, R.; Lefèvre, J.; Schwalk, M. (Hrsg.): Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur. 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal. Initiativen zum Umweltschutz, Band. 68, Berlin, S. 69-75
- SusChem (Europäische Technologieplattform Sustainable Chemistry) (2006): F&E-Strategie Chemie und Biotechnologie für gesellschaftliche Bedürfnisfelder. Implementierungsplan für Deutschland.
- Tesari, I.; Mattheck, C. (2007): Finite-Elemente gestützte bionische Bauteiloptimierung. In: Brickwede, F.; Erb, R.; Lefèvre, J.; Schwalk, M. (Hrsg.): Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur. 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal. Initiativen zum Umweltschutz, Band. 68, Berlin, S.114-115
- Thyssen Krupp Davex (2006): Broschüre Architektur. http://www.davex.de/rootgif/download/de/broschuere_architektur_2006_02.pdf
- ThyssenKrupp Steel AG (2006): ULSAP- AVC gewinnt Energie-Effizienz Preis. http://www.thyssenkrupp-steel.de/auto/de/highlights/highlights_detail.jsp?cid=1001915
- UBA (Umweltbundesamt); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz - Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation, Forschungsprojekt durchgeführt von: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Berlin), Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Karlsruhe), Roland Berger Strategy Consultants. Dessau, München, Berlin
- UBA (Umweltbundesamt) (2003): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung. Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken für die Lederindustrie.
- Uggowitzer, P.J.; Gullo, G.C.; Wahlen, A. (2000): Metallkundliche Aspekte bei der semi-solid Formgebung von Leichtmetallen. Institut für Metallforschung, ETH Zürich
- ULSAB-Broschüre (o.J.). http://www.stahl-info.de/stahl_im_automobil/ultraleicht_stahlkonzepte/ulsab/ulsab-broschuere.pdf
- v. Gleich, A.; Pade, C.; Petschow, U. (2007): Bionik: Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale. Berlin/Bremen
- VDI-Richtlinie 2243: „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“
- VDI Richtlinie 4075: Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS) – Erkenntnisse und Erfahrungen für die praktische Umsetzung. Richtlinienausschuss VDI 4075
- Volk, P. (2006): Echte Alternative: Chrom(III)-haltige Vorbehandlung für Aluminium. Metalloberfläche, Mai 2006
- Vereinte Nationen (2002): Bericht des Wipfels für nachhaltige Entwicklung. Johannesburg (Südafrika), 26. August bis 4. September 2002. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/appllications/pdf/johannesburg_declaration.pdf
- Weizsäcker, E.-U. von, Lovins, A., Lovins L. H. (1995): Faktor vier. Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. München
- WCED (World Commission on Environment and Development) (1987): Our Common Future (Brundtland-Report). Oxford

7 Abfallwirtschaft

7.1 Charakterisierung des Handlungsfeldes

Von der Abfallentsorgung zum „Urban Mining“ (Hüther 2006)

Durch die Summe seiner Handlungen schafft der Mensch anthropogene Ökosysteme, die in erster Linie durch ihren hohen Bedarf an nichtsolare Zusatzenergie und das Aufkommen diverser „Stoffwechselprodukte“ charakterisiert werden (Taube 1988; Baccini/Brunner 1991; Förster 1992). Abfälle sind Teil dieser „Stoffwechselprodukte“ und begleiten die gesamte Menschheitsgeschichte (Hösel 1990); Art und Umfang der Abfälle und deren Wahrnehmung durch den Menschen sind maßgeblich von zivilisatorischen Aspekten bestimmt.

Im Verlauf der Siedlungs- und Stadtentwicklung werden Abfälle primär als ein Problem der **Stadthygiene** wahrgenommen. Bereits aus der Antike sind Maßnahmen zur Abfallerfassung und Abfallbeseitigung bekannt (Hösel 1990). Bis in das beginnende Industriezeitalter hinein wurden die überwiegend organischen Materialien gesammelt und außerhalb der Siedlungen verbracht, wo sie regelmäßig in der Landwirtschaft verwertet werden konnten.

Im Zuge der Industrialisierung veränderte sich die Situation grundlegend (Brüggemeier/Toyka-Seid 1995): Der Anstieg der Bevölkerungsdichte und der veränderte Lebensstandard bewirkten einen rapiden Anstieg des Abfallaufkommens. Die wachsenden Abfallmengen erforderten den Aufbau einer leistungsfähigen Logistik für deren Sammlung und Abtransport. Die industrielle Massenfertigung teilweise neuer Materialien und Güter und der wachsende Konsum veränderten zudem auch die Zusammensetzung der erfassten Abfälle; die traditionelle Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen war nur mehr eingeschränkt möglich. Die Ablagerung der unbehandelten Abfälle auf Müllkippen bzw. Deponien beeinträchtigte die Umwelt und belastet Wasser, Boden und Luft gleichermaßen. Aber erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde dieses Problem der **Umwelthygiene** in der breiten Öffentlichkeit wahrgenommen. Die Antwort der industrialisierten Gesellschaften war die Entwicklung geeigneter Technologien zur Abfallbehandlung und Beseitigung der Abfälle bzw. Behandlungsrückstände sowie zur Kontrolle und Verminderung der durch die Behandlung und Beseitigung selbst verursachten Umweltbelastungen (Hösel 1990).

Erst unter dem Eindruck stetig wachsender Abfallmengen und der Endlichkeit und Verknappung natürlicher Ressourcen reift die Erkenntnis, dass die Behandlung und Beseitigung von Abfällen und Behandlungsrückständen alleine nicht ausreichen, dem **Abfallmengenproblem** einerseits und der **Ressourcenverknappung** andererseits zu begegnen. Die Prinzipien der Abfallvermeidung und der Abfallverwertung nicht vermeidbarer Abfälle werden der Behandlung und Beseitigung von Abfällen übergeordnet. An die Stelle der Hygieneproblematik als primäre Motivation der Abfallbehandlung rückt zunehmend das Problem bzw. die technologische Herausforderung der Erschließung der in Abfällen enthaltenen Rohstoffe. Ergänzend zu den Behandlungs- und Beseitigungstechnologien werden Technologien zur Rückgewinnung der in den Abfällen enthaltenen Rohstoffe entwickelt. Die Abfallentsorgung wandelt sich zunehmend zu einer Kreislauf- bzw. Sekundärrohstoffwirtschaft; das Schlagwort „Urban Mining“, das neben der Prospektion anthropogener Rohstofflager auch die Ausbeutung der in

Abfällen enthaltenen Rohstoffe umfasst, versinnbildlicht diese veränderte Wahrnehmung von Abfällen (Hüther 2006).

Das Ausmaß der abfallbürtigen Probleme bzw. die Größe der damit verbundenen Herausforderungen wird angesichts der Abfallmengen deutlich: Das weltweite Aufkommen an Siedlungsabfällen (Haushaltsabfälle, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Straßenkehricht etc.) im Jahr 2006 wurde auf 2,02 Mrd. t geschätzt (MRC 2007). Das Siedlungsabfallaufkommen in Deutschland betrug im Jahr 2005 rund 46,55 Mio. t, das spezifische Aufkommen an Siedlungsabfällen lag bei 564 kg pro Einwohner und Jahr (Becker et al. 2007). In der EU fielen im Jahr 2002 etwa 241 Mio. t Siedlungsabfälle an (Eurostat 2005); das Siedlungsabfallaufkommen pro Kopf im Jahr 2003 betrug im Mittel (EU25) rund 530 kg, wobei das Aufkommen in den alten Mitgliedsstaaten (EU15) im Mittel mit 577 kg deutlich über dem von 334 kg in den neuen Mitgliedsstaaten lag. Neben Siedlungsabfällen tragen insbesondere Bau- und Abbruchabfälle, aber auch Bergematerialien aus dem Bergbau und industrielle Produktionsabfälle zum gesamten Abfallaufkommen bei.

Das Siedlungsabfallaufkommen ist zunächst vom Grad der Industrialisierung und Urbanisierung eines Staates bzw. einer Region abhängig und korreliert mit dem Bruttoinlandsprodukt einer Volkswirtschaft (EEA 1999). Das spezifische Siedlungsabfallaufkommen (pro Kopf und Jahr) in den OECD-Staaten im Jahr 2005 reicht von 250 kg in Polen bis 760 kg in den USA und Norwegen. (OECD 2007). Das kaufkraftbereinigte Bruttoinlandsprodukt (BIP) in Polen betrug 2005 rund 15.000 \$, in den USA und Norwegen dagegen rund 44.000 \$ pro Kopf. Das Verhältnis von spezifischem Siedlungsabfallaufkommen und BIP ist nahezu identisch. Eine Entkopplung der Entwicklung des Abfallaufkommens von der Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes ist ein Merkmal des Wandels einer Abfallwirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft (Büringer 2007); die Abfallintensität (gesamtes Abfallaufkommen/BIP) in Deutschland betrug 1999 ca. 203 kg/1.000 €, 2005 dagegen nur noch 156 kg/1.000 € (UBA 2007).

Auch bei den sog. Schwellenländern bestehen Unterschiede im spezifischen Siedlungsabfallaufkommen: Für das Jahr 2005 wurde für die urbanen Regionen in China ein Aufkommen pro Kopf und Jahr von 420 – 550 kg prognostiziert (Rissanen/Naarajärvi 2004) (World Bank 2005), für die urbanen Bereiche in Indien dagegen nur rund 145 kg (Hanrahan et al. 2006). Das BIP der durch industrielle Produktion geprägten chinesischen Volkswirtschaft war 2005 mit rund 7.700 \$ pro Kopf in etwa doppelt so hoch wie das der Volkswirtschaft Indiens, die durch Dienstleistungen - insbesondere in den IT-Sparten – dominiert wird.

In den lateinamerikanischen Staaten Mittel- und Südamerikas variiert das spezifische Aufkommen an Siedlungsabfällen im Landesmittel zwischen 135 kg pro Kopf und Jahr in Haiti und 620 kg pro Kopf und Jahr auf Barbados. In Großstädten kann das Aufkommen bis zu 975 kg pro Kopf und Jahr betragen (Bahamas) (PAHO 2005). Maßgeblich für die Unterschiede sind neben dem unterschiedlichen Entwicklungsstand und dem Grad der Urbanisierung auch Faktoren wie Tourismus.

Die Staaten Südostasiens weisen ein sehr unterschiedliches spezifisches Siedlungsabfallaufkommen auf, das in den Jahren 2000 bzw. 2001 im Bereich von 84 kg in Thailand bis 1.425 kg pro Kopf und Jahr im Stadtstaat Singapore lag (Tan 2004).

Das spezifische Siedlungsabfallaufkommen in Entwicklungsländern wird mit 145 bis 220 kg pro Kopf und Jahr angenommen (Blight/Mbande 1996); hohe Anteile organischer und inerter Materialien, ein hoher Wassergehalt, eine hohe spezifische Dichte und eine geringe Teilchengröße werden als wesentliche Merkmale und zugleich Unterschiede zu den Abfällen in industrialisierten Ländern genannt. Technologien, die sich in den Industrieländern entwickelten Technologien im Bereich der Abfallwirtschaft bewährt haben, sind - unter Berücksichtigung des Aspektes der unterschiedlichen Abfalleigenschaften und in Anbetracht der wirtschaftlichen Möglichkeiten – ggf. nur bedingt zur Lösung der abfallwirtschaftlichen Probleme in den Entwicklungs- und Schwellenländern geeignet.

7.2 Meilensteine

Die Entsorgung von Abfällen, d.h. deren Sammlung und Transport, ihre Behandlung oder ggf. Aufbereitung zur nachfolgenden Verwertung und ihre Beseitigung ist mit Kosten verbunden, denen nur in Ausnahmefällen deckende Erlöse gegenüber stehen. Die Motivation zum Umgang mit dem Gros der Abfälle ist daher häufig nicht (markt)wirtschaftlicher Natur, vielmehr sind in diesem Bereich administrative Vorgaben als wesentliche Impulsgeber - auch für technologische Entwicklungen in vielen Bereichen der Abfallentsorgung - anzusprechen. Die historische Entwicklung des administrativen Rahmens in Deutschland spiegelt die veränderte Wahrnehmung von Abfällen durch die Gesellschaft wider.

1893: **Preußisches Kommunalabgabengesetz**. Kommunen werden erstmals ermächtigt, Gebühren für die Abfallbeseitigung zu erheben und einen Anschluss- und Benutzerzwang für Entsorgungsanlagen vorzuschreiben (Kloepfer et al. 1994).

1900: **Reichsseuchengesetz**. Schreibt die Fortschaffung von Abfallstoffen fest (Park 2004); die Abfallbeseitigung dient der Sicherung der Städtehygiene.

1972: **Abfallbeseitigungsgesetz**. Die bundeseinheitliche Neuordnung und Sanierung der Abfallbeseitigung auf bundesrechtlicher Basis mit dem Schwerpunkt der Hausmüllbeseitigung zielt auf die „geordnete“ Erfassung und Beseitigung der unbehandelten Abfälle.

1986: **Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen** (Abfallgesetz - AbfG). Verankert die Grundsätze einer modernen Abfallwirtschaftspolitik: Abfälle sind danach möglichst zu vermeiden, anfallende Abfälle mit Vorrang vor der Abfallbeseitigung zu verwerten und nicht vermeid- oder verwertbare Abfälle sind schadlos zu beseitigen.

1996: **Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz** (KrW-/AbfG). Vollzieht einen Paradigmenwechsel von der Beseitigungswirtschaft zur Kreislaufwirtschaft: Die Abfallwirtschaft wird zur Stoffstromwirtschaft. Im Zentrum der Abfallpolitik steht die Produktverantwortung. Mit dem KrW-/AbfG wird ein neuer, vorsorgeorientierter Abfallbegriff geschaffen: Abfälle sind nicht länger nur Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will, sondern auch solche Stoffe, Rückstände oder Reststoffe, die weder zielgerichtet produziert noch zweckentsprechend eingesetzt werden.

Das erklärte abfallpolitische Ziel, bis spätestens zum Jahr 2020 unter Einhaltung hoher, schutzgutorientierter Standards eine hochwertige und vollständige Verwertung zumindest der Siedlungsabfälle ("Ziel 2020") zu gewährleisten (Verbücheln et al. 2003), stellt den Rahmen für eine konsequente Weiterentwicklung des deutschen Abfallrechts dar.

Auch in der Politik der Europäischen Union nimmt der Umweltschutz eine zunehmend zentrale Stellung ein und nahezu alle Umweltbereiche werden durch das Gemeinschaftsrecht erfasst; dies gilt auch für das Abfallrecht: Die Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle

(**Abfallrahmenrichtlinie**) von 1975 stellte erstmals einen koordinierten Rahmen für die Bewirtschaftung von Abfällen in den Mitgliedstaaten auf. Ziele der mehrfach geänderten Richtlinie waren die Begrenzung des Abfallaufkommens sowie die Organisation der Aufbereitung und Entsorgung der Abfälle. Die Richtlinie 75/442/EWG wurde durch die Richtlinie 2006/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Abfälle ersetzt. In Analogie zum deutschen KrW-/AbfG zielt die Richtlinie 2006/12/EG auf die Errichtung einer Kreislaufwirtschaft ab. Sie dient der Umsetzung einer „Thematischen Strategie für Abfallvermeidung und -recycling“, die auf eine Verringerung der Umweltbelastungen durch Abfälle über deren gesamte Lebensdauer hinweg abzielt. Sie ist Teil einer „Thematischen Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ (EU 2005) im Rahmen der EU-Strategie zur nachhaltigen Entwicklung. Um zukünftig die Verwertung von Abfällen zu stärken soll in der Novelle der Abfallrahmenrichtlinie das Ressourcenschutzziel gleichrangig neben dem Ziel des Umweltschutzes genannt werden; u.a. soll eine 5-stufige Hierarchie (Vermeidung, Wiederverwendung, stoffliche Verwertung, sonstige (energetische) Verwertung, Beseitigung) und der Grundsatz der Produktverantwortung eingeführt werden.

Das deutsche KrW/AbfG und die Abfallrahmenrichtlinie auf EU-Ebene definieren zwar die Ziele im Umgang mit Abfällen, nicht aber den Stand der Technik, der für die Umsetzung dieser Ziele einzusetzen ist. Diese technischen Anforderungen werden im deutschen Abfallrecht durch das sog. untergeordnete Regelwerk festgelegt und in zwei Verwaltungsvorschriften sowie einer Reihe von Verordnungen konkretisiert: Die **Technische Anleitung (TA) Abfall** von 1991 enthält die Anforderungen an die Verwertung und Entsorgung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, die **TA Siedlungsabfall** von 1993 entsprechend die Anforderungen an die Verwertung, Behandlung und Entsorgung von Siedlungsabfällen.

Die TA Siedlungsabfall legt u.a. den technischen Standard für die Errichtung und den Betrieb von Abfalldeponien fest. Die Ablagerung unbehandelter Abfälle war danach nur in Ausnahmen und bis längstens Ende Mai 2005 möglich. Als Stand der Technik zur Behandlung von Abfällen fordert die TA Siedlungsabfall indirekt die Abfallverbrennung. Mit der **Abfallablagerungs-Verordnung** (AbfAbIV) wurde die TA Siedlungsabfall novelliert und ergänzende Kriterien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle festgelegt; sie ist Teil der sog. Artikelverordnung (Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen).

Grundsätzlich sieht auch die europäische Deponierichtlinie eine Behandlung der Abfälle vor der Ablagerung vor, allerdings werden Recycling, Kompostierung, Biogaserzeugung sowie stoffliche und energetische Verwertung als geeignete Maßnahmen genannt. Im Unterschied zur deutschen Regelung fehlen in der Deponierichtlinie konkrete Zuordnungskriterien für die behandelten Abfälle. Stattdessen schreibt die Richtlinie gestaffelte Minderungsziele bzgl. der biologisch abbaubaren Anteile für die Gesamtheit der deponierten Abfälle vor. Der Umsetzung der EU-Deponierichtlinie auf der deutschen nationalen Ebene dient die **Deponie-Verordnung**; sie lässt die weitergehenden Regelungen der TA Siedlungsabfall und der Abfallablagerungs-Verordnung unberührt.

Mit der **TA Luft** von 1986 wurden Anforderungen zur Reinhaltung der Luft, u.a. Emissionsgrenzwerte für Müllverbrennungsanlagen festgelegt. Die Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (**17. BImSchV** oder **Abfallverbrennungs-**

anlagen-Verordnung) von 1990 konkretisierte die Anforderungen bzgl. Errichtung, Beschaffenheit und Betrieb von Müllverbrennungsanlagen und verschärfte die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte. Durch Änderung der 17. BImSchV vom 14. August 2003 wurden auch die Anforderungen und Grenzwerte für die Mitverbrennung von Abfällen in Industrieanlagen und Kraftwerken festgelegt. Sie dient der Umsetzung der EU-Richtlinie 2000/76/EG über die Verbrennung von Abfällen. Die **Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen** (30. BImSchV; Artikel 2 der Artikelverordnung) legt entsprechend die Anforderungen für biologische Abfallbehandlungsanlagen fest.

Eine wachsende Anzahl an zusätzlichen Verordnungen definiert die Anforderungen an die Verwertung, Behandlung und Beseitigung spezifischer Abfälle, u.a. Bioabfälle, Verpackungen, Elektroaltgeräte, Altfahrzeuge, Altholz, Batterien. Der Aspekt der Produktverantwortung ist zwar im KrW/AbfG festgelegt, die praktische Umsetzung wird aber erst in verschiedenen dieser Verordnungen (u.a. Altfahrzeug-, Batterie-, Verpackungs- und Elektroaltgeräte-Verordnung) konkretisiert. Das EU-Umweltrecht wirkt durch eine Reihe weiterer Richtlinien, Verordnungen und Entscheidungen der Kommission auf die nationale Gesetzgebung ein.

Vergleichbare Entwicklungen und Strukturen bzgl. des administrativen Rahmens sind auch außerhalb Europas existent: Der im Jahr 1965 in den Vereinigten Staaten von Amerika erlassene „Solid Waste Disposal Act“ legt den Focus zunächst auf die geordnete Abfallbeseitigung. 1976 wird das Gesetz durch den „Resource Conservation and Recovery Act“ abgelöst. Die Ziele dieses mehrfach novellierten Gesetzes sind der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt vor den möglichen Gefahren der Abfallentsorgung, die Einsparung von Energie und natürlichen Ressourcen, die Verminderung des Abfallaufkommens und die Sicherstellung eines umweltverträglichen Umgangs mit Abfällen. Die technischen Aspekte im Umgang mit Abfällen werden in einer Reihe von Vorschriften konkretisiert (EPA 2008).

Aber auch in den sog. Schwellenländern wurde in den letzten Jahrzehnten der administrative Rahmen für den Umgang mit Abfällen entwickelt. In der Volksrepublik China z.B. wurde 1996 das „Law on Prevention and Control of Environmental Pollution caused by Solid Waste“ erlassen. Im Jahr 2003 folgten mit dem „Law for Promotion of Cleaner Production“ und dem „Law for Environmental Impact Assessment“ weitere Gesetze, die direkt oder indirekt Einfluss auf den Umgang mit Abfällen nehmen. Auch in China werden die technischen Aspekte der Abfallentsorgung durch ein untergeordnetes Regelwerk in Form von Verordnungen, Vorschriften und verbindlichen technischen Standards konkretisiert. In Indien wird der administrative Rahmen für den Umgang mit Abfällen durch den „Environment Protection Act“ von 1986 gegeben. Das Ministerium für Umwelt und Forst hat davon ausgehend Regeln und technische Standards für den Umgang mit Siedlungsabfällen erlassen, die in Form einer Reihe von Plänen umgesetzt werden sollen (Hanrahan et al. 2006). Vergleichbare Entwicklungen gab es in den Staaten Südostasiens (Tan 2004). Auch in den lateinamerikanischen Staaten Mittel- und Südamerikas wurden zwar in den letzten Jahren Umweltgesetze, vereinzelt auch spezifische Abfallgesetze, erlassen, allerdings fehlt es häufig an Regeln und Programmen zum Aufbau einer fortschrittlichen Abfallwirtschaft (PAHO 2005).

Für die Mehrzahl der Entwicklungsländer besteht die Notwendigkeit zur Einführung intelligenter Umweltgesetze und zum Ausbau der Infrastruktur im Bereich der Abfallentsorgung (Zerbock 2003). Einer Studie der UN (IDRC 1999) konnte zeigen, dass die untersuchten Staaten

Schritte zum Aufbau eines Umwelt- bzw. Abfallrecht unternommen haben, dass aber das (wirtschaftliche) Vermögen oder der (politische) Wille fehlen, die Gesetze anzuwenden.

Der Focus der **Forschungspolitik** im Bereich der Abfallwirtschaft hat sich in den letzten Jahren verlagert. Während in der Vergangenheit nachsorgende abfalltechnische Verfahren im Mittelpunkt standen, fließen Umweltschutzaspekte zunehmend bereits in die Entwicklung von Produkten und Prozessen ein; über den gesamten Produktlebenszyklus sollen natürliche Ressourcen effizient genutzt und schädliche Umwelteinflüsse minimiert werden. Die Entwicklung dieser vorsorgenden Umweltschutztechnologien liegt im Fokus der Forschungspolitik des BMBF und wird im Rahmen verschiedener Programme, u.a. „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA) gefördert. Klassische abfallwirtschaftliche und abfalltechnische Themen stellen dagegen einen der Schwerpunkte der Ressortforschung des BMU dar; sie sind z.B. Gegenstand des aktuellen Umwelt-Forschungsplans (UFO-Plan) 2008. Auch das 7. Forschungsrahmenprogramm der EU greift Themen aus dem Bereich der Abfallwirtschaft auf; Beispiele sind die Entwicklung von Abfallmanagement-Technologien zur Verwertung von Haushaltsabfällen, neue Abfallsortiertechniken und die Entwicklung preiswerter, auf die Bedürfnisse von Entwicklungsländern zugeschnittenen Abfallbehandlungstechnologien und -dienstleistungen.

7.3 Reife Technologien und technologische Entwicklungen

Der technologische Aspekt der Abfallentsorgung betrifft die Erfassung nicht vermeidbarer Abfälle, Maßnahmen zu deren Behandlung bzw. Aufbereitung und ggf. nachfolgender Verwertung sowie die Beseitigung von unbehandelten Abfällen und Behandlungsrückständen. Die Abfallvermeidung ist Teilaspekt einer Strategie zur Erhöhung der Rohstoffproduktivität im Rahmen der Produktgestaltung und der Herstellungsprozesse, die im Handlungsfeld 6 behandelt wurde. Dienstleistungen spielen im Bereich der Abfallwirtschaft eine herausragende Rolle.

7.3.1 Abfallerfassung

Der Bereich der Abfallerfassung gliedert sich in die Aspekte der Lagerung am Entstehungsort, der Sammlung und des Transports zu den Entsorgungsanlagen.

Lagerung

Nur in wenigen Ausnahmefällen (z.B. im Bergbau, im Rahmen großer Bauprojekte oder ggf. bei industriellen Produktionsverfahren) rechtfertigen Art und Menge eines Abfalls eine Entsorgung an Ort und Stelle. In den meisten Fällen aber entstehen Abfälle dezentral, in beliebigen Mengen und quasi kontinuierlich. Unter dem Aspekt der Hygiene wäre eine ebenfalls kontinuierliche Erfassung und Entsorgung der Abfälle zwar wünschenswert, aber weder praktikabel noch effizient. Daher werden Abfälle am Ort ihrer Entstehung zwischengelagert und periodisch oder bei Bedarf gesammelt. Für die Lagerung stehen der Art und der Menge der Abfälle angepasste **Behältersysteme** (Folienbeutel, feste Müllbehälter aus Kunststoff oder Metall, Mulden und Container) oder **Lagerbereiche** (z.B. Bunker) in unterschiedlichen Größen und Ausstattungen zur Verfügung. Der parallele Einsatz mehrerer Behältersysteme ermöglicht die getrennte Erfassung und spezifische Entsorgung verschiedener Teilfraktionen

des Abfalls (z.B. Bioabfälle, Leichtverpackungen, Wertstoffe, etc.). Flüssige oder pumpfähige Abfälle werden in Gruben, Fässern oder Tanks gelagert. Größere Gegenstände (Sperrmüll) werden zeitnah zum Sammlungstermin ohne besondere Lagerbehälter am Straßenrand abgestellt. Im gewerblichen Bereich werden größere Mengen sortenreiner Abfälle regelmäßig zu Ballen gepresst und in dieser Form bis zur weitergehenden Entsorgung zwischengelagert.

Sammlung

Bezüglich der Sammlung von Abfälle werden zwei Systeme unterschieden: **Holsysteme** sind im kommunalen Bereich bei der Sammlung von Hausmüll bzw. Restabfall, Bio- und Gartenabfall, Verpackungsabfall, Altpapier oder Sperrmüll üblich und werden auch im gewerblichen Bereich bei solchen Abfällen eingesetzt, die nicht innerhalb der Betriebe entsorgt werden. Die zwischengelagerten Abfälle werden zu festgelegten Terminen oder bei Bedarf mittels geeigneter Sammelfahrzeuge abgefahren. Für lose feste Abfälle werden üblicherweise spezialisierte Müllpressfahrzeuge eingesetzt; das Volumen des gesammelten Abfalls wird reduziert und dadurch die Effizienz der Sammlung erhöht. Mit Mehrkammerfahrzeugen ist das gleichzeitige Abfahren getrennter Abfälle möglich. Die Fahrzeuge können darüber hinaus mit Behältern zum Auffangen von Press- bzw. Sickerwasser sowie mit Filtersystemen zur Entstaubung und Desodorierung der Abluft aus dem Sammelbehälter ausgestattet sein. Das Heranholen und Entleeren der Sammelbehälter erfolgt in einer Abfolge manueller und mechanisierter Arbeitsvorgänge – es sind aber auch Systeme verfügbar, bei denen das Aufnehmen, Entleeren und Abstellen der Behälter vollständig durch ferngesteuerte Greifer erfolgt. Flüssige Abfälle werden aus den Lagerbehältern in Tankfahrzeuge umgepumpt oder mitsamt ihren Lagerbehältern abgefahren. **Bringsysteme** sind dagegen üblich bei der Erfassung von Wertstoffen (Glas, Textilien, u.a.) und Problemstoffen (u.a. Batterien, Kleinmengen gefährlicher Abfälle) sowie Elektroaltgeräten. Diese Materialien werden an ausgewiesenen Plätzen, zu denen sie der Verbraucher hinbringt, gesammelt und dort ggf. in geeigneten Behältersystemen zwischengelagert.

Transport

Der Transport der gesammelten Abfälle zu den jeweiligen Entsorgungsanlagen kann grundsätzlich mittels der Sammelfahrzeuge erfolgen, allerdings sind diese aufgrund begrenzter Ladekapazitäten und der in der Regel mehrköpfigen Besatzung beim Transport zu entfernten Entsorgungsanlagen wenig effizient. In Abhängigkeit von der Struktur des Einzugsgebietes und der Entfernungen zu den Entsorgungseinrichtungen kann das Einrichten einer Umladestation, in der die gesammelten Abfälle auf geeignetere Transportmittel (Schienenfahrzeuge, Fernlaster) umgeladen werden, sinnvoll sein.

7.3.2 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 Abfallteilmengen zu ermöglichen. Verbreitet werden mechanische, chemisch-physikalische, biologische und thermische Verfahren eingesetzt. Verunreinigtes Erdreich wird in speziellen Bodenbehandlungsanlagen dekontaminiert; die Technologien werden im Abschnitt 5.3.3 (Bodenschutz) kurz dargestellt.

Eine direkte Verwertung von Abfällen ohne eine vorausgegangene Behandlung ist ggf. bei solchen Abfällen möglich, die sortenrein und frei von Schadstoffen sind. Beispiele sind unbelasteter Bodenaushub und sortenreine Produktionsreste z.B. aus der Lebensmittelindustrie (hier: Einsatz als Futtermittel).

Mechanische Behandlung

Ziel der mechanischen Behandlung von Abfällen ist die Gewinnung getrennter sowie möglichst homogener und konditionierter Fraktionen, um ihre spezifische Verwertung oder optimierte Weiterbehandlung bzw. 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, Mischvorgänge sowie Zerkleinerungs- und Agglomerationsprozesse. Die Anlagenkonzepte sind von den jeweils zu behandelnden Stoffen, der Aufgabenstellung und den gewünschten Endprodukten abhängig und umfassen meist Kombinationen verschiedener Einzeltechniken. Zusätzlich sind in diesem Zusammenhang die Zwischenlagerung und der Transport der zu behandelnden Stoffe zu betrachten.

Die **Demontage** (automatisiert oder manuell) dient der gezielten Trennung komplexer Materialverbünde und ggf. der Sortierung der Einzelkomponenten entsprechend ihren Eigenschaften. Ziel der Demontage ist entweder die nachfolgende stoffliche Verwertung der sortenreinen Materialien oder die Wiederverwendung von Bauteilen und Aggregaten.

Die **Zerkleinerung** bewirkt eine Reduzierung der Korngrößen und eine Einengung der Korngrößenverteilung, daneben auch eine Trennung von Materialverbänden. Zur trockenen mechanischen Zerkleinerung werden Brecher, Mühlen, Schredder und Scheren eingesetzt. Pulper (Stofflöser) arbeiten dagegen in einer flüssigen Phase. Sie erlauben die selektive Zerkleinerung insbesondere nativ-organischer Abfallmaterialien und das Trennen von Materialverbänden (z.B. Getränkekartons).

Die **Klassierung** dient dazu ein Materialgemisch in seine verschiedenen Korngrößen aufzutrennen. Hierzu werden unterschiedliche Typen von Sieben eingesetzt, die eine Trennung von Materialgemischen entsprechend der Kantenlänge und Geometrie der Körner in den Siebüberlauf und Siebunterlauf erlauben. Häufig verwendete Siebarten sind Trommel-, Vibrations-, Spannwellen- und Sternsiebe.

Windsichter trennen Materialgemische sowohl aufgrund der korngrößenabhängigen Widerstandskräfte (Klassierung), als auch aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften. Die Trennung nach stofflichen Eigenschaften mit dem Ziel der Anreicherung eines bestimmten Stoffes wird als **Sortierung** bezeichnet. Magnetabscheidung, Wirbelstromabscheidung, Elektrosortierung, Dichtesortierung (ballistische Verfahren, Zyklone, Schwimm-Sink-Verfahren, u.a.) und Flotation nutzen ebenfalls die unterschiedlichen stofflichen Eigenschaften und physikalische Gesetzmäßigkeiten zur Sortierung von Materialien aus. Im erweiterten Sinne werden auch beim Waschen und Trocknen Materialgemische getrennt und sortiert.

Die optische Sortierung nutzt Farb- und Reflexionseigenschaften von Materialien zur Trennung von Festkörpern; sie besteht aus einem Detektor-System mit Lichtquelle und Fozelle,

einer MSR(Messen-Steuern-Regeln)-Einheit sowie Vorrichtungen zur Auslenkung der zu trennenden Anteile. Die NIR(nahes Infrarot)-Technologie sowie die Röntgen-Technologie erlaubt die Erkennung von Feststoffen aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften. Die RFID(Radio-Frequenzy-Identification)-Technologie nutzt die auf einem Mikrochip abgelegten Informationen über ein Material bzw. Bauteil für dessen Erkennung. Auch bei diesen Detektorsystemen verarbeiten MSR-Systeme die Informationen und steuern Vorrichtungen zur Auslenkung der zu trennenden Anteile.

Durch die Weiterentwicklung und den verstärkten Einsatz sensorgestützter Sortiertechnik könnten größere Anteile der sortierten Abfälle einer stofflichen Verwertung zugeführt und der Anteil des PVC in den Ersatzbrennstoffen vermindert werden. Vor dem Hintergrund der Leistungsfähigkeit moderner Sortiertechniken werden auch Möglichkeiten einer effizienteren Gestaltung der Abfallerfassung diskutiert, wobei insbesondere die gemeinsame Erfassung von Leichtverpackung und Restmüll oder von Leichtverpackung und stoffgleichen Nichtverpackungen als Alternativen zur getrennten Erfassung in Betracht kommen.

Den vorstehenden, meist vollautomatisch arbeitenden Sortierverfahren steht die manuelle Sortierung gegenüber, die sich der kognitiven und mechanischen Fähigkeiten des Menschen bedient.

Die **Verdichtung** von Materialien erfolgt durch Pressagglomeration (Ballenpresse, Brikettierung, Pelletierpressen) oder Aufbauagglomeration. Aufgrund der Volumenreduktion wird die Handhabbarkeit der Materialien insbesondere bei Lagerung und Transport verbessert und die Energiedichte (z.B. bei Ersatzbrennstoffen) erhöht. Unter Einsatz von Druck und Hitze werden aufbereitete Kunststoffabfälle im Extruder zu marktgängigen Kunststoffgranulaten (Regranulat) weiterverarbeitet.

Die **Lagerung** dient der Pufferung der Input- und Outputströme; sie gewährleistet den kontinuierlichen Betrieb der Aufbereitungsanlage. Für den **Transport** und die **Förderung** von festen Stoffen werden diskontinuierliche Förderer (Kräne, Aufzüge, Bahnen, Radlader) und Stetigförderer (Gurt-, Trogketten-, Kratzketten-, Schwing- oder Schneckenförderer und Schubböden) sowie - bei Fluiden oder pastösen Stoffen - Pumpen und Rohrleitungen eingesetzt.

Chemisch-physikalische Verfahren

Chemisch-physikalische Verfahren werden überwiegend zur Behandlung flüssiger und pastöser Abfälle aus Industrie- und Gewerbebetrieben eingesetzt. In Abhängigkeit der Herkunft und der Schadstoffbelastung der zu behandelnden Abfälle können verschiedene Verfahren und Verfahrenskombinationen eingesetzt werden. Ziel der Behandlung ist, 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: die anorganischen und die organischen Behandlungsverfahren. Weitere Verfahren der chemisch-physikalischen Abfallbehandlung sind Destillation und Elektrolyse.

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. Neben der Gewinnung eines einleitfähigen Abwassers durch Aufkonzentrierung der Schadstoffe in der Schlammphase, kann ein Teil der Behandlung auch auf die Rückgewinnung von Wertstoffen wie z. B. von Edel- oder Buntmetallen mittels Elektrolyse, Ionenaustausch, Kristallisation, Verdampfung u.ä. ausgerichtet sein.

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. Die Öl- und die Schlammphase werden einer thermischen Behandlung bzw. Verwertung zugeführt; die Wasser-Öl-Phase wird in Emulsionsspaltanlage weiter behandelt. Die Wahl des Emulsionsspaltverfahrens hängt von der Art der Emulsion und ihrem Reaktionsverhalten ab und wird häufig mit Hilfe von organischen Spaltmitteln und/oder Säuren durchgeführt. Thermische Emulsionsspaltung und Membranfiltration spielen eine untergeordnete Rolle. Die Schlämme werden entwässert und ggf. durch Mischen mit Zuschlagstoffen für die Beseitigung konditioniert. Von ölhaltigen Schlämmen wird die Ölphase mittels Dichtentrennung und/oder Emulsionsspaltung separiert. Die Wasserphase wird nach einer Vorreinigung in die Kanalisation eingeleitet und mit dem kommunalen Abwasser behandelt.

Die **Destillation** wird zur Rückgewinnung von Lösemitteln und anderen organischen Flüssigkeiten eingesetzt. Die zu behandelnden Stoffe werden nach einer Vorreinigung (z.B. Sedimentation, Filtration) in einer oder mehreren Destillationsstufen gereinigt. Das entstehende Destillat kann als Produkt in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Der Destillationsrückstand wird der thermischen Behandlung oder der Verwertung zugeführt. Unter dem Begriff der Destillationsanlagen werden auch Raffinationsanlagen erfasst, die Abfallstoffe entweder durch sog. Zweitraffination für die Wiederverwertung aufbereiten (z.B. Altöl) oder als Rohstoffersatz im Raffinationsprozess einsetzen.

Die **Elektrolyse** wird überwiegend zur Rückgewinnung von Metallen (z.B. Kupfer, verschiedene Edelmetalle) eingesetzt. Das Verfahrensprinzip beruht auf der Abscheidung von Metallionen an Elektroden aus einer Lösung (Elektrolyt) durch Anlegen einer elektrischen Spannung.

Biologische und Mechanisch-biologische Abfallbehandlung

Die biologische Behandlung umfasst die Kompostierung und Vergärung von getrennt erfassten „Grünabfällen“ und „Bioabfällen“ mit dem Ziel der Erzeugung eines landbaulich verwertbaren Bodenverbesserungsmittels (Kompost). Dagegen werden unter dem Begriff der Mechanisch-Biologischen-Abfallbehandlung (MBA) solche Kombinationen mechanischer Verfahren und biologischer Verfahren zusammengefasst, die der Behandlung von Restabfällen dienen.

Das primäre Ziel der **biologischen Abfallbehandlung** ist die Stabilisierung von Abfällen durch die weitgehende mikrobiologische Mineralisierung der im Abfall enthaltenen organischen Verbindungen. Diese Stabilisierung ermöglicht die Verwertung der Behandlungsrück-

stände als Bodenverbesserungsmittel in der Landwirtschaft. Die beiden prinzipiellen Verfahrensvarianten sind die Kompostierung und die Vergärung. Sowohl bei der Kompostierung als auch bei der Vergärung wird das biologische Verfahren regelmäßig mit mechanischen Verfahren 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 (Abluftverbrennung, thermokatalytische Oxidation) zur Behandlung von gasförmigen Emissionen zum Einsatz. Abwässer aus der biologischen Abfallbehandlung werden mittels biologischer oder chemisch-physikalischer Verfahren behandelt.

Bei der **Kompostierung** werden biologisch abbaubare Substanzen aerob, d.h. unter Verbrauch von Sauerstoff, zu den Produkten Kohlendioxid und Wasser (sowie mikrobielle Biomasse) umgesetzt. Schwer abbaubare Substanzen werden in sog. Huminstoffen überführt, die u.a. maßgeblich für die Qualität des Produktes „Kompost“ als Bodenverbesserungsmittel sind. Charakteristisch für den aeroben Abbau der organischen Substanzen bei der Kompostierung ist die Freisetzung großer Wärmemengen, die zu einer Erwärmung des Kompostgutes führen und z.B. auch dessen Hygienisierung gewährleistet. Struktureiche organische Abfälle sind für die Kompostierung prädestiniert, dagegen sind strukturschwache und sehr feuchte organische Abfälle nicht alleinig, sondern allenfalls in Mischungen mit strukturreichen Abfällen für eine Kompostierung geeignet. Obwohl bei der Kompostierung aerobe Prozesse dominieren, ist dieses Verfahren als ein aerob/anaerober Co-Prozess zu verstehen. Das Auftreten anaerober Stoffwechselprodukte und damit verbundene geruchsintensive Emissionen sind bei der Kompostierung organischer Abfälle systemimmanent.

Verfahrensvarianten der Kompostierung sind die Mietenkompostierung und die Kompostierung in Reaktoren. Die Mietenkompostierung kann „offen“ (d.h. im Freien – ggf. unter einem Schutzdach) oder „geschlossen“ (d.h. in einem Gebäude) ausgeführt sowie „unbelüftet“ (bzw. passiv belüftet) oder „zwangsbelüftet“ betrieben werden. Offene Mieten können auch mit semipermeablen Membranen abgedeckt werden. Eine Spezialform der Mietenkompostierung stellt das sog. „Brikolare-Verfahren“ dar, bei dem aus den Abfällen zunächst Aggregate definierter Form und Größe gepresst werden. Bei den Reaktoren können diverse Bau- und Ausführungsformen unterschieden werden; sie werden als Boxen und Container, Tunnel und Zeilen sowie Trommeln ausgeführt. Alle genannten Bauformen werden mit einer Zwangsbelüftung ausgestattet. Mit Ausnahmen der Zeilenreaktoren werden die Reaktoren hermetisch geschlossen ausgeführt.

Um einen gleichmäßigen Prozessfortschritt zu gewährleisten, muss das Kompostgut in regelmäßigen zeitlichen Abständen aufgenommen, durchmischt, ggf. befeuchtet sowie anschließend wieder aufgesetzt werden. Diese Arbeiten werden mittels universeller Arbeitsmaschinen (z.B. Radlader) oder spezialisierter Aggregate ausgeführt.

Die **Vergärung** ist im Unterschied zur Kompostierung ein strikt anaerober Prozess, in dessen Verlauf biologisch abbaubare Substanzen zu den Endprodukten Kohlendioxid und Methan (und in einem geringen Umfang mikrobielle Biomasse) umgesetzt werden. Schwer abbaubare Substanzen (Lignin, Lignozellulose, Zellulose, Wachse, u.a.) reichern sich im Gärrest an. Durch eine Nachbehandlung (Entwässerung bei „nassen“ Vergärungsverfahren,

Kompostierung) können aus den Gärresten Bodenverbesserungsmittel mit vergleichbaren Eigenschaften wie Kompost erzeugt werden.

Ein Großteil der in den organischen Substanzen chemisch gebundenen Energie bleibt beim anaeroben mikrobiologischen Abbau in Form von Methangas erhalten. Das „Biogas“ kann, ggf. nach einer Aufbereitung energetisch verwertet werden. Im Unterschied zur Kompostierung muss bei der Vergärung zur Einstellung erwünschter Prozesstemperaturen Wärme von Außen zugeführt werden. In Abhängigkeit der Materialeigenschaften der zu behandelnden Abfälle können zwei Varianten von Vergärungsverfahren zum Einsatz kommen: Für die Behandlung strukturreicher organischer Abfälle mit einem hohen Trockensubstanzanteil eignet sich die Trockenvergärung, dagegen stellen strukturschwache und feuchte organische Abfälle den geeigneten Input für die Nassvergärung dar. Stark lignozellulosehaltige Abfälle (z.B. holziges Pflanzenmaterial) sind grundsätzlich nicht für die Vergärung geeignet.

Bei der Vergärung werden immer geschlossene Reaktoren (auch Fermenter genannt) eingesetzt. Bei der Trockenvergärung ähneln die Reaktoren den aus der Kompostierung bekannten Reaktortypen, besondere Einbauten oder Aggregate zum Mischen des Reaktorinhalts sind die Ausnahme. Die Reaktoren für die Nassvergärung sind in der Regel stehende, in Einzelfällen auch liegende Zylinder; sie verfügen häufig über spezielle Aggregate (Rührwerke, Umwälzpumpen, u.a.), um eine vollständige Durchmischung des flüssigen Reaktorinhalts zu gewährleisten. Die Trockenvergärung wird meistens diskontinuierlich im sog. „Batch“-Betrieb gefahren, kontinuierlich betriebene Trockenvergärungsverfahren bilden die Ausnahme. Die „nassen“ Vergärungsverfahren werden dagegen immer kontinuierlich betrieben; pumpfähige Abfälle werden mittels Förderpumpen, ggf. mitzubehandelnde strukturreiche und trockene Abfälle mittels geeigneter Eintragsaggregate oder -vorrichtungen (Förderschnecke, Eintragskolben, Einspülschacht), in den Reaktor befördert. Eine dem Volumen des eingebrachten Materials entsprechende Menge Reaktorinhalt verlässt den Reaktor über einen Überlauf. Das gebildete Biogas wird aus dem Reaktor abgezogen, gespeichert und zur Erzeugung von Strom und/oder Wärme verbrannt.

Mechanisch-biologische Verfahren werden zur **Behandlung von Restabfällen** eingesetzt. Das Ziel der mechanischen Verfahrenskomponente ist die Abscheidung von Wertstoffen und Störstoffen, ggf. die Abscheidung einer hochkalorischen Fraktion sowie die Konditionierung der verbleibenden Abfälle für die nachfolgende Behandlung. Für die biologische Behandlung der Restabfälle bzw. der mechanisch aufbereiteten Teilfraktion werden aerobe Kompostierungs- bzw. Rotteverfahren und anaerobe Vergärungsverfahren eingesetzt. Ziel des biologischen Verfahrensschrittes ist meist die Stabilisierung der Abfallmaterialien durch weitgehenden Abbau der organischen Anteile; der Reststoff soll nach der Ablagerung auf der Deponie keine größeren Mengen an Deponiegas bilden oder zu einer Schadstoffbelastung von Sickerwasser beitragen. Für diese Form der biologischen Stabilisierung ist sowohl die Kompostierung als auch die Vergärung geeignet.

Daneben werden Konzepte verfolgt, bei denen die mechanisch aufbereiteten Restabfälle durch Trocknung stabilisiert werden; dieses „Trockenstabilat“ soll in geeigneten thermischen Verfahren als Ersatzbrennstoff verwertet werden. Die mechanische Aufbereitung dient hierbei in erster Linie der Ausschleusung von Metallen, anderer inerter Materialien und Störstoff-

fen sowie der Homogenisierung/Zerkleinerung des Materials. Die Trocknung kann z.B. im Zuge einer aeroben Rotte erreicht werden.

In Deutschland legt die 30. BImSchV die Anforderungen bzgl. Errichtung, Beschaffenheit und Betrieb von MBA-Anlagen und insbesondere die Erfassung und Minderung von Emissionen fest. Danach müssen ganze Anlagenteile (Annahmehbereiche und Bunker, Aggregate der mechanischen Aufbereitung, zumindest Teile der biologischen Behandlung) gekapselt ausgeführt werden. Für die biologische Behandlung kommen Verfahrensvarianten mit einer Rotte in geschlossen ausgeführten Mieten bzw. einer Rotte oder Vergärung in Reaktoren in Frage. Allenfalls die Nachrotte kann als offene Miete ausgeführt werden.

Die Leistungen von Biofiltern, wie sie aus dem Bereich der Kompostierung und Vergärung von Bioabfällen bekannt sind, reichen nicht zur Einhaltung der geforderten Grenzwerte für die Abgase der MBA aus. Es werden daher regelmäßig auch thermische Verfahren zur Abluftbehandlung (Abluftverbrennung, Regenerative Thermokatalytische Oxidation – RTO –, u.a.) bei der MBA eingesetzt.

Thermische Abfallbehandlung

Die Verbrennung von Abfällen ist eines der ältesten thermischen Verfahren zur Abfallbehandlung. Durch die Verbrennung der organischen Abfallanteile werden die Abfälle inertisiert und hygienisiert, gleichzeitig wird das Abfallvolumen vermindert. Für die Verbrennung von Haushaltsabfällen bzw. Restmüll (d.h. Hausmüll nach Abtrennung von Glas, Papier, Verpackungen und anderen Wertstoffen) ist insbesondere die Rostfeuerung verbreitet. Die Wirbelschichtfeuerung wird häufig zur Verbrennung von Klärschlämmen und anderen kleinteiligen homogenen Materialien eingesetzt. Gefährliche Abfälle aus Industrieunternehmen und Produktionsprozessen insbesondere der chemischen Industrie werden in Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt, in denen Drehrohröfen mit Nachbrennkammer die überwiegend eingesetzte Technologie darstellen.

Bei der **Rostfeuerung** gelangt der Abfall aus dem Aufgabetrichter mit Hilfe eines Stößels auf den Verbrennungsrost. Auf dem Rost laufen nacheinander die einzelnen Stufen einer heterogenen Verbrennung (Trocknung, Entgasung, Vergasung, Verbrennung) ab. Die erforderliche Verbrennungsluft wird primär von unten durch den Rost sowie als Sekundärluft oberhalb des Rostes in den Feuerraum eingeblasen. Schlacke ist der feste Rückstand der Verbrennung; sie wird über Fördereinrichtungen dem Schlackebunker zugeführt.

Die Verbrennungsgase verlassen den Feuerraum nach oben und geben ihre Wärmeenergie im Kessel ab. Der im Kessel erzeugte Dampf wird zur Stromerzeugung genutzt oder in ein Fernwärmnetz abgegeben. 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 quasitrockene 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 Herdofen-

koks in das Rauchgas eingeblasen, der ebenso mit dem Gewebefilter abgetrennt wird. Die Rauchgasreinigung älterer Abfallverbrennungsanlagen kann von diesem Standard abweichen. Aufgrund verschärfter Emissionsgrenzwerte wurden bestehende Anlagen oft mehrfach nachgerüstet. Häufig sind auf diesen Anlagen mehrstufige Wäschersysteme für die Abtrennung saurer Schadstoffe, Sprühtrockner zur Eindampfung der Salzlösungen aus dem Wäschersystem und Elektro- oder Gewebefilter zur Staubabscheidung installiert. Ein hinter das Wäschersystem geschalteter SCR-Reaktor (Selective Catalytic Reduction) erlaubt die Minderung der Stickoxidemissionen, ein Koks-Adsorber dient zur Abscheidung organischer Schadstoffe.

Die wichtigsten Varianten der **Wirbelschichtfeuerung** sind die stationäre und die hochexpandierende (auch zirkulierende) Wirbelschicht. Bei der stationären Wirbelschicht sorgt die mit hoher Geschwindigkeit von unten durch die Feststoffschüttung strömende Verbrennungsluft dafür, dass diese in einen Fließzustand versetzt wird. Mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten wird der Zustand der hochexpandierten Wirbelschicht erreicht, der durch einen Austrag der Feststoffpartikel gekennzeichnet ist. Die mit der Gasströmung ausgetragenen Feststoffpartikel werden mit einem Zyklon aus dem Gasstrom entfernt und in die Wirbelschicht zurückgeführt. Großtechnische Abfallverbrennungsanlagen mit Wirbelschichtfeuerung sind wie Rostfeuerungen für die Hausmüllverbrennung mit einem Kessel und einer nachgeschalteten Rauchgasreinigung ausgerüstet.

Gefährliche Abfälle werden aufgrund der chemischen Zusammensetzung oder der physikalischen Eigenschaften i.d.R. nicht gemeinsam mit Siedlungsabfall entsorgt. Für die Verbrennung als einen möglichen Entsorgungsweg haben sich universell einsetzbare **Drehrohröfen** mit Nachbrennkammer etabliert (Hasberg 1989). Der liegend angeordnete Drehrohröfen verfügt an der Stirnseite über spezielle Aufgabevorrichtungen sowohl Abfälle mit unterschiedlicher Konsistenz als auch für Gebinde. Der vollständige Ausbrand der freigesetzten flüchtigen Bestandteile und der Partikel erfolgt in der Nachbrennkammer. Für die Einhaltung von Mindesttemperaturen und die Durchmischung der Rauchgase sind hier zusätzliche Brenner installiert, die mit flüssigen oder gasförmigen Regelbrennstoffen bzw. flüssigen heizwertreichen Abfällen betrieben werden. Anschließend gelangen die heißen Rauchgase in einen Abhitzeessel zur Energienutzung und danach in die Rauchgasreinigungsanlage.

Neben der klassischen Verbrennung (bei stöchiometrischem oder überstöchiometrischem Sauerstoffangebot) existieren mit der **Vergasung** (Verbrennung bei unterstöchiometrischer Sauerstoffversorgung) und der **Pyrolyse** (thermische Zersetzung organischer Materialien in Abwesenheit von Sauerstoff) zwei weitere thermische Verfahren, die ebenfalls für die Behandlung oder energetische Verwertung von Abfällen eingesetzt werden. Ihre Verbreitung ist allerdings gering und beschränkt sich meist auf sehr spezifische Abfälle und Anwendungen.

Die beschriebenen thermischen Verfahren werden auch zur **energetischen und stofflichen Abfallverwertung** eingesetzt: Müllverbrennungsanlagen (MVA), deren Hauptzweck die Abfallbehandlung ist, besitzen in der Regel nicht den Status einer Abfallverwertung. Insbesondere in Deutschland werden aber nun auch Kraftwerke errichtet, die sog. **Ersatzbrennstoffe** zur Erzeugung von Wärme und/oder Strom einsetzen. Ersatzbrennstoffe sind das Produkt einer meist mechanischen oder mechanisch-biologischen Aufbereitung von Abfällen. Die in diesen Kraftwerken eingesetzte Technologie entspricht in der Regel den bekannten Müll-

verbrennungsanlagen mit Rostfeuerung. Grundsätzlich sind für diese vergleichsweise homogenen Brennstoffe aber auch Wirbelschichtfeuerungen denkbar.

Geeignete Abfälle oder speziell aufbereitete Ersatzbrennstoffe können darüber hinaus in einer Vielzahl thermischer Prozesse als Brennstoff eingesetzt und energetisch verwertet werden: Klärschlämme werden regelmäßig in Kohlekraftwerken mit verbrannt; während bei der Monoverbrennung von Klärschlämmen grundsätzlich die Möglichkeit besteht, den enthaltenen Phosphor mittels geeigneter Verfahren aus der Verbrennungssasche zurück zu gewinnen (siehe Kapitel 4 „Wasserschutz“), ist diese Option bei der Mitverbrennung aufgrund von Verdünnungseffekten nicht gegeben. Große Mengen verschiedener hochkalorischer Abfälle (u.a. Altreifen, Altöle, Kunststoffabfälle) werden in der Zementindustrie als Brennstoff eingesetzt. Kunststoffabfälle werden mitunter in der Eisenhüttenindustrie als Ersatzreduktionsmittel im Hochofen verwertet, wobei diese Variante auch als eine Form der stofflichen Verwertung anzusehen ist. Darüber hinaus werden spezielle thermische Verfahren in der Metallurgie zur Aufbereitung von Metallschrott (z.B. Eisen, Aluminium) eingesetzt.

Verschiedene Ansätze von Vergasungs- und Pyrolyseverfahren konnten sich zwar bei der Entsorgung von Siedlungsabfällen (u.a. das Thermoselect-Verfahren, das Schwel-Brenn-Verfahren von Siemens und das Noell-Konversionsverfahren) nicht am Markt durchsetzen – dennoch werden derzeit Pyrolyseverfahren z.B. für die Aufbereitung von Abfällen (Leiterplatten, Kunststoffgehäuse) aus dem Bereich der Elektro- und Elektronik-Altgeräte (u.a. das Haloclean-Verfahren aus dem Forschungszentrum Karlsruhe) entwickelt.

Spezielle thermische Verfahren werden auch zur Aufbereitung und nachfolgenden stofflichen Verwertung verschiedener Abfälle, u.a. Batterien eingesetzt.

7.3.3 Abfallbeseitigung (Deponie)

Weltweit werden die meisten Abfälle in Form der Ablagerung auf einer **Deponie** beseitigt. Bei der ungeordneten Deponie oder Müllkippe werden die unter dem Motiv der Stadthygiene erfassten Abfälle ohne Berücksichtigung der Aspekte der Umwelthygiene abgelagert. Bei dieser Deponieform – sie ist noch immer in weiten Teilen der Erde, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern verbreitet – werden keine Maßnahmen zur Eindämmung und Kontrolle der von den abgelagerten Abfällen ausgehenden Gefahren für die Umwelt ergriffen. Demgegenüber steht die geordnete Deponie, bei der durch bauliche, technische und betriebliche Maßnahmen auch dem Aspekt der Umwelthygiene Rechnung getragen wird.

Die geordnete Deponie stellt einen großen Reaktor dar (Reaktordeponie), 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 technisches Bauwerk besteht darin, eine Beeinträchtigung der Umwelt durch die abgelagerten Abfälle selbst oder durch die Wechselwirkungsprodukte zu verhindern. Dazu werden durch die Wahl des Standortes, beim Bau und im Betrieb von geordneten Deponien voneinander unabhängige Barrieren, ein sog. Multibarrierensystem realisiert. Der Aufwand ist abhängig von den zu deponierenden Abfällen.

Ein mögliches „Produkt“ der Deponie ist Deponiegas; es kann über ein System aus Gasbrunnen erfasst und kontrolliert abgeleitet werden. Das Deponiegas kann durch Verbrennung

über eine Fackel entsorgt, oder in Gasmotoren energetisch genutzt werden. Dabei wird das enthaltene Methan zu dem weniger klimaschädigenden Kohlendioxid oxidiert. Solche Deponien, in denen ausschließlich die Reststoffe einer vorhergehenden Abfallbehandlung (Verbrennung oder mechanisch-biologischen Abfallbehandlung) abgelagert werden, „produzieren“ nur geringe Mengen Deponiegas. Die Möglichkeit einer mikrobiologischen Oxidation des Methan in der Rekultivierungsschicht wird untersucht (Bardt et al. 2007). Ein weiteres mögliches „Produkt“ ist Sickerwasser, das über ein Drainagesystem erfasst und einer geeigneten Behandlung zugeleitet wird.

7.3.4 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. Zu dieser operativen Ebene gehören auch der 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, d.h. die Organisation der Abfallentsorgung, die Wahrnehmung administrativer Überwachungsauflagen und die Entwicklung von Abfallwirtschaftsplänen. 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. Dieser Bereich ist durch Wirtschaftsverbände, politische Parteien, Umweltorganisationen, Vertreter der Exekutive und wissenschaftliche Institutionen geprägt.

7.4 Märkte

7.4.1 Deutschland

Die Abfallentsorgung in Deutschland hat sich bereits sehr weit in Richtung einer Kreislaufwirtschaft entwickelt. Große Investitionsschübe waren 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 gehen von der als „Ziele 2020“ bezeichneten Strategie für die Zukunft der Siedlungsabfallentsorgung aus (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.

Einen umfassenden Überblick bzgl. der aktuellen Situation der Abfallwirtschaft in Deutschland geben die Daten des Statistischen Bundesamtes (Becker et al. 2007). Danach 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 der erfassten Abfallmenge 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 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 2007). Der Binnenmarkt ist der wichtigste Absatzmarkt für die deutschen Unternehmen im Abfallentsorgungsbereich.

Der 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).

Behandlung

Im Jahr 2005 wurden in über 4.800 mechanischen Abfallbehandlungsanlagen wurden rund 86 Mio. t Abfälle aufbereitet. Alleine 55,3 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle wurden in über 1.900 Bauschutttaufbereitungsanlagen behandelt, weitere 22,2 Mio. t verschiedener Abfälle in rund 900 Anlagen sortiert, fast 8 Mio. t Abfälle (darunter 3,3 Mio. t Eisenmetalle, NE-Metalle und Altfahrzeugkarossen) in 420 Schredderanlagen und verwandten Anlagen mechanisch behandelt. 460.000 t Altfahrzeuge wurden in 1.223 Demontagebetrieben demontiert – und 490.000 t Elektro- und Elektronikaltgeräte in Zerlegeeinrichtungen zerlegt.

In chemisch-physikalischen Abfallbehandlungsanlagen wurden im selben Jahr rund 9,5 Mio. t Abfälle behandelt, darunter 5,75 Mio. t gefährliche Abfälle.

Rund 12,4 Mio. t Abfälle wurden 2005 in 1.682 biologische Abfallbehandlungsanlagen behandelt, darunter 3,7 Mio. t Gartenabfälle, 3,8 Mio. t Abfälle aus der Biotonne, 2,8 Mio. t Abfälle aus der Landwirtschaft und 0,9 Mio. t Klärschlämme. Im Jahr 2003 waren 813 Kompostierungsanlagen mit einer installierten Kapazität von über 10 Mio. Mg/a registriert (Kern/Raussen 2007). Die Anzahl der Vergärungsanlagen im selben Jahr wird mit 75, und ihre Kapazität mit rund 2,4 Mio. Mg jährlich angegeben (Fricke/Bahr 2007). Einen Großteil der biologischen Abfallbehandlungsanlagen stellen Kompostierungsanlagen dar, die bis etwa Mitte/Ende der 1990er Jahre in Betrieb gegangen waren. Die Ersatzinvestitionen in diesem Bereich, die insbesondere auch eine Umrüstung auf eine Vergärung vorsehen könnten, werden auf rund 720 Mio. € geschätzt. Weitere 180 Mio. € wären für die Aufbereitung des Biogases z.B. für die Einspeisung in das Erdgasnetz zu veranschlagen. Die Nachrüstung von Kompostierungsanlagen, die überwiegend Grün- und Gartenabfälle behandeln wird auf 400 Mio. € geschätzt. Die getrennte Erfassung von Bio- und Grünabfällen wird derzeit noch nicht in allen deutschen Kommunen angeboten. Insbesondere in den neuen Bundesländern, aber

auch in Teilen Baden-Württembergs, Bayerns und des Saarlandes entsorgen rund 15 Mio. Einwohner diese Abfälle mit dem sonstigen Hausmüll. Die Schaffung der zusätzlichen Kapazitäten hätte ein Investitionsvolumen von weiteren 200 Mio. € (Knappe/Blazejczak 2007).

Unter dem Einfluss der TA Siedlungsabfall und der Abfallablagerungs-Verordnung wurden die Kapazitäten zur mechanisch-biologische Abfallbehandlung massiv ausgebaut, so dass aktuell an rund 50 Standorten eine Behandlungskapazität von rund 5,5 Mio. t pro Jahr zur Verfügung steht (ASA 2007). Das Konzept der meisten mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen sieht die Beseitigung vergleichsweise großer Mengen eines biologisch stabilisierten Reststoffs auf Deponien vor. Dieses Konzept ist mit dem „Ziel 2020“, d.h. der möglichst vollständigen Verwertung und dem weitgehenden Verzicht auf eine Deponierung, nicht vereinbar. Eine technische Adaption im Sinne einer „Trockenstabilat-Erzeugung“ als Ersatzbrennstoff erscheint zumindest bei aeroben Rotteanlagen technisch möglich.

Aufgrund verschärfter Schadstoffgrenzwerte im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung ist davon auszugehen, dass zukünftig eine stoffliche Verwertung von kommunalen Klärschlämmen in der Landwirtschaft eher die Ausnahme darstellen wird. Kommunale Klärschlämme werden bereits regelmäßig in Kohlekraftwerken und der Zementindustrie energetisch verwertet. Weitere Kapazitäten zur Verwertung der restlichen Menge von rund 1,1 Mio. t (TS=Trockensubstanz) stehen zur Verfügung. Notwendige Investitionen, z.B. für Trocknungsanlagen im Bereich von Steinkohlekraftwerke, belaufen sich auf rund 500 Mio. €. Im Unterschied zu Monoverbrennungsanlagen für Klärschlämme, die eine Rückgewinnung von Phosphat aus der Asche erlauben würden, ist diese Möglichkeit bei der Mitverbrennung in Kraftwerken und Zementanlagen nicht gegeben (Knappe/Blazejczak 2007).

Im Jahr 2005 wurden rund 19,5 Mio. t Abfälle wurden in 155 thermischen Anlagen behandelt; in 108 dieser Anlagen wurden in der Summe 1,8 Mio. t gefährliche Abfälle eingesetzt. In 87 Anlagen wurden rund 12,3 Mio. t Siedlungsabfälle verbrannt. Die Kapazität von Anlagen zur Behandlung oder energetischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen ist begrenzt. Der zusätzliche Bedarf an Ersatzbrennstoffkraftwerken wird auf 7,5 Mio. t, das Investitionsvolumen auf rund 3,4 Mrd. € geschätzt.

Fehlkapazitäten bestehen heute noch bei der (mechanischen) Aufbereitung von hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen; die zukünftig zu entsorgende Menge inklusive der heizwertreichen Fraktion aus den mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen wird auf rund 10 Mio. t jährlich (Knappe/Blazejczak 2007), das Investitionsvolumen für den Ausbau bzw. die technologische Anpassung der Behandlungskapazitäten auf rund 0,7 Mrd. € geschätzt. Das Investitionsvolumen für den notwendigen Ausbau der Kapazitäten im Bereich der Demontage und Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten sowie bei der Aufbereitung von Schredderrückständen wird in der Summe auf 250 Mio. € geschätzt (Knappe/Blazejczak 2007).

Verwertung

Mit rund 160 Mio. t/a lag die Verwertungsquote bei Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2005 bei 87 %. Ein Großteil dieser Materialien (75,1 Mio. t) wurde ohne weitere Behandlung im Bergbau zur Wiederverfüllung und Rekultivierung verwertet. Die in Bauschutt aufbereitungsanlagen eingesetzten Bau- und Abbruchabfälle (55,3 Mio. t) wurden als Recyclate überwie-

gend im Straßen- und Wegebau verwertet; die Verwertungsquote der aufbereiteten Materialien lag bei 96% (53,2 Mio. t). Weitere Bau- und Abbruchabfälle wurden im Rahmen von Deponiebaumaßnahmen verwertet. Ein Entwicklungsziel bzgl. der Verwertung dieser meist unbelasteten Abfälle könnte ihre Qualifizierung als Sekundärrohstoffe für Anwendungen im Hochbau (Verwertung in der Zementindustrie bzw. als Recyclingbeton) sein. Ein weiterer Ansatz betrifft die Wiederverwertung von demontierten Beton-Fertigbauteilen – insbesondere aus dem Rückbau von sog. „Plattenbauten“ in Ostdeutschland (Jörissen et al. 2005).

Rund 30,7 Mio. t Abfälle aus Produktion und Gewerbe sowie rund 28,8 Mio. t Siedlungsabfälle wurden 2005 verwertet (Verwertungsquoten 64 % bzw. 62 %). Dabei dominiert die stoffliche Verwertung – meist nach einer Behandlung der Abfälle. Rund 9,1 Mio. t Abfälle aus Produktion und Gewerbe und weitere 0,43 Mio. t Siedlungsabfälle wurden energetisch verwertet.

Verschiedene Wertstoffe werden in Deutschland getrennt erfasst, aufbereitet und nahezu vollständig verwertet: Aufgrund ihrer Werthaltigkeit werden Metalle - insbesondere Edelmetalle sowie Eisen- und verschiedene Nicht-Eisen(NE)-Metalle - bzw. metallhaltige Abfälle regelmäßig gesondert erfasst, ggf. aufbereitet und verwertet. Autoabgaskatalysatoren werden im Zuge der Altfahrzeugdemontage ausgebaut und einer spezifischen Aufbereitung (pyro- und hydrometallurgische Verfahren) der Edelmetallanteile zugeführt. Auch verbrauchte Industriekatalysatoren werden aufbereitet und die Metalle (insbesondere Edelmetalle – aber auch Nickel, Kobalt, Kupfer und Zink) verwertet. Rund 1 t Platingruppenmetalle, 22 t Silber, 200 t Nickel und 300 t Kobalt werden jährlich durch die Aufbereitung verbrauchter Industriekatalysatoren (Stand: 2000, Hassan 2001), und weitere 2 t Platingruppenmetalle aus der Aufbereitung von Autoabgaskatalysatoren zurückgewonnen (Hagelüken 2005). Auch verbrauchte Batterien werden in speziellen metallurgischen Verfahren aufbereitet.

Eisen- und Stahlabfälle werden als sog. Neuschrott im Bereich der industriellen Produktion, sowie als Altschrott in den sonstigen Aufkommensbereichen getrennt erfasst oder durch Aufbereitung gemischter Abfälle gewonnen (s.u.). Der Einsatz von Stahlschrott betrug 2006 rund 45% der deutschen Rohstahlproduktion (47,2 Mio. t). Vergleichbar ist die Situation bei Kupfer und Aluminium; 2006 konnten rund 53% der deutschen Kupferproduktion (662.000 t) und über 60% der Aluminiumproduktion (1,3 Mio. t) aus sekundären Rohstoffen gedeckt werden. Kabelschrott ist einer der wesentlichen kupferhaltigen Abfälle; um das Isolationsmaterial von den Metallanteilen zu trennen wird der Kabelschrott mechanisch zerkleinert und die Metallfraktion von der Kunststoff(PVC)-Fraktion mittels mechanischer oder thermischer Verfahren getrennt. Kupferhaltiger Platinschrott wird, ggf. nach einer Demontage schadstoffbelasteter Bauteile, zerkleinert und mittels geeigneter metallurgischer Verfahren verwertet.

Die getrennte Erfassung und das Recycling von Glas (Glasverpackungen und Flachglas) sind etabliert und technisch ausgereift. 2005 wurden rund 3,6 Mio. t Glas getrennt erfasst und – ggf. nach einer Aufbereitung - zu nahe 100% verwertet. Weitere Glasmengen wurden im Zuge der Aufbereitung gemischter Abfälle gewonnen.

Etwa 7,9 Mio. t Altpapier wurden 2005 getrennt erfasst und – in der Regel nach einer mechanischen Aufbereitung - zu 99% verwertet. Weitere Mengen Altpapier resultieren aus der Aufbereitung gemischter Abfälle (s.u.). Papier kann nicht unendlich oft recycelt werden, da die Faserlänge immer weiter abnimmt. Bei der Aufbereitung von Altpapier fallen Abfälle an, so genannte Spukstoffe, die aus Papierfasern, Füllstoffen, Kunststofffolien und Metallteilen

(Heftklammern) bestehen. Da eine Deponierung dieser Abfälle inzwischen nicht mehr erlaubt ist, gibt es neue Entwicklungen das Material zu entwässern und zu Ersatzbrennstoffen zu verarbeiten. Daneben besteht aber auch die Möglichkeit die Spuckstoffe mechanisch zu trennen, so dass Kunststoffe, Metalle und Füllstoffe verwertet werden können.

Auch technische Kunststoffe werden getrennt erfasst und zu Sekundärrohstoffen aufbereitet. Für die PVC-Produkte Bodenbeläge, Dachbahnen, Fenster, Rohre und Planen wurden bereits seit Anfang der 90er Jahre Sammelsysteme aufgebaut und Verwertungsanlagen errichtet. Mittels geeigneter mechanischer Aufbereitungstechnik werden aus sortenreinen PVC-Abfällen wiederum PVC-Granulate erzeugt, die in der Produktion neuer Güter verwertet werden. PVC-Verbundmaterialien können unter Verwendung von Lösungsmitteln (Vinyloop-Prozess) aufbereitet werden. 2005 fielen in Deutschland 505.000 t PVC-Abfälle an, von denen rund 180.000 t stofflich verwertet wurden. Ein weiteres Beispiel ist das Recycling von Polyethylenterephthalat (PET): In Deutschland wurden 2006 rund 280.000 t PET-Flaschen überwiegend getrennt erfasst und verwertet. Auch die Aufbereitung von PET basiert auf klassischen mechanischen Verfahren. Aus sortenreinen Abfällen verschiedener Thermoplaste (PE, PP) werden im Extruder sog. Regranulate erzeugt und als Sekundärrohstoff in der kunststoffverarbeitenden Industrie eingesetzt. Insgesamt fielen in Deutschland im Jahr 2005 rund 4,4 Mio. t Kunststoffabfälle an, davon 0,95 Mio. t als Produktionsabfälle und 3,45 Mio. t aus dem post-consumer Bereich. Davon wurden rund 82% verwertet (knapp 2 Mio. t stoffliche Verwertung und rund 1,6 Mio. t energetische Verwertung) und knapp 0,5 Mio. t beseitigt. Einen Großteil der Kunststoffabfälle im post-consumer Bereich stellen Verpackungen dar. Sie werden zusammen mit anderen Verpackungsmaterialien (Papier/Kartonagen, Verbundstoffe) getrennt erfasst. Von den im Jahr 2005 getrennt erfassten 4,6 Mio. t Leichtverpackungen wurden 3,9 Mio. t verwertet.

Von den 22,2 Mio. t in Sortieranlagen behandelten gemischten Abfälle im Jahr 2005 wurden rund 47% (10,4 Mio. t) zu „Sekundärrohstoffen“ aufbereitet. Insgesamt wurden fast 6 Mio. t Altpapier, 1,8 Mio. t Gläser, 317.000 t Eisenmetalle und 85.000 t NE-Metalle als Sekundärrohstoffe gewonnen. Weitere 1,6 Mio. t Altpapier, 287.000 t Gläser, 220.000 t Eisenmetalle und 39.000 t NE-Metalle wurden einer weitergehenden Aufbereitung zugeführt. Rund 41% (9,2 Mio. t) der in Sortieranlagen behandelten Abfälle wurden als „Abfälle zur Verwertung“ einer energetischen Verwertung oder weiterführenden Aufbereitung zugeführt, nur rund 10,5% (2,3 Mio. t) der Abfälle wurden beseitigt. Hohe Chlorgehalte, insbesondere durch PVC-Anteile, verhindern eine effiziente energetische Verwertung in Kohlekraftwerken oder die Mitverbrennung in Zementwerken.

Durch die Weiterentwicklung und den verstärkten Einsatz sensorgestützter Sortiertechnik könnten größere Anteile der sortierten Abfälle einer stofflichen Verwertung zugeführt und der Anteil des PVC in den Ersatzbrennstoffen vermindert werden. Vor dem Hintergrund der Leistungsfähigkeit moderner Sortiertechniken werden auch Möglichkeiten einer effizienteren Gestaltung der Abfallerfassung diskutiert, wobei insbesondere die gemeinsame Erfassung von Leichtverpackung und Restmüll oder von Leichtverpackung und stoffgleichen Nichtverpackungen als Alternativen zur getrennten Erfassung in Betracht kommen.

Im Rahmen der chemisch-physikalischen Abfallbehandlung konnten 22% der behandelten Abfälle (9,55 Mio. t) im Jahr 2005 einer Verwertung bzw. weiterführenden Aufbereitung zuge-

führt werden, 78% der behandelten Abfallmasse wurde als Abwasser einer nachgeschalteten Abwasserreinigung überantwortet.

Rund 53% der in 2005 in den verschiedenen biologischen Verfahren behandelten Abfälle konnten als Bodenverbesserungsmittel in die Landwirtschaft und den Gartenbau abgegeben werden, weitere 6,5% wurden einer weitergehenden Aufbereitung überlassen. Aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung konnte 30% (0,75 Mio. t) der behandelten Abfälle einer Verwertung oder weitergehenden Aufbereitung zugeführt werden.

Die Demontagebetriebe für Altfahrzeuge konnten 2005 rund 7% der Altfahrzeugmasse als Sekundärrohstoffe gewinnen, fast 88% der Altfahrzeugmasse wurden in Form der Altfahrzeug-Rohkarossen einer weitergehenden Aufbereitung in Schredderanlagen zugeführt. Schredderanlagen erzeugten 3,9 Mio. t (49%) Sekundärrohstoffe und weitere 3,5 Mio. t (44%) „Abfälle zur Verwertung“; in der Summe wurden 2,6 Mio. t Stahl und Eisen sowie 190.000 t NE-Metalle in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt. Der Output der Zerlegeanlagen für Elektro- und Elektronikaltgeräte bestand zu 20% aus Sekundärrohstoffen, weitere 73% der Abfälle konnten für eine weitergehende Aufbereitung erschlossen werden. Im Einzelnen konnten 2005 rund 140.000 t Eisenmetalle, 30.000 t NE-Metalle sowie rund 34.000 t Kunststoffe und Gummi direkt oder auf dem Wege einer weiterführenden Aufbereitung zurückgewonnen werden.

Insgesamt 11,1 Mio. t Abfälle (insbesondere aus der Holzverarbeitenden Industrie, daneben Klärschlämme, Ersatzbrennstoffe, u.a.) wurden 2005 in 523 Feuerungsanlagen energetisch verwertet. 2006 wurde die Hälfte des Energieeinsatzes der Zementindustrie durch Sekundärbrennstoffe gedeckt; insgesamt wurden rund 2,6 Mio. t Abfälle in der Zementindustrie energetisch verwertet (vdz 2007). Im Jahr 2005 wurden aus der Schlacke der thermischen Abfallbehandlungsanlagen rund 2% der eingebrachten Abfälle einer stofflichen Verwertung zugeführt, weitere 25% waren für eine weitergehende Aufbereitung geeignet bzw. wurden in spezifischen Anwendungen (z.B. Bergversatz) „verwertet“. Aus der Schlacke von Feuerungsanlagen konnten 3,5% bzw. 5% des Abfallinputs direkt stofflich verwertet bzw. weitergehend aufbereitet werden; der Metallanteil in der Schlacke thermischer Abfallbehandlungsanlagen war mit 0,4% gering und fehlte in den Rückständen von Feuerungsanlagen vollständig. Eine anspruchsvolle Verwertung der Schlacken z.B. als Baustoff scheitert an den Materialeigenschaften (Schwermetallgehalte, u.a.). Verschiedene Verfahren zur Abscheidung der Schwermetalle wurden bereits in den 1990er Jahren entwickelt (MR-Prozess, 3R-Verfahren, u.a.) und werden in Österreich und der Schweiz bei der Aufbereitung der Rostaschen eingesetzt (Stubenvoll et al. 2002). In einer Anlage in Le Havre in Frankreich werden seit 1999 u.a. die MVA-Filterstäube mit dem Oxyreducer-Verfahren aufbereitet, die Schwermetalle extrahiert und einer Verwertung zugeführt (NZZ 2007).

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).

Beseitigung

In der Summe wurden etwa 111 Mio. t Abfälle auf Deponien bzw. Halden abgelagert, darunter 52 Mio. t Bergematerialien aus dem Bergbau, 24,5 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle, 17,4

Mio. t Abfälle aus Produktion und Gewerbe sowie rund 17,8 Mio. t Siedlungsabfälle. Rund 46 Mio. t Siedlungsabfälle wurden auf 1.948 Deponien wurden 2005 beseitigt, darunter 4,8 Mio. t gefährliche Abfälle die auf 389 geeignete Deponien verbracht wurden. Die wesentlichen deponierten Abfälle waren Bau- und Abbruchabfälle (23,2 Mio. t), Abfälle aus thermischen Prozessen (8,1 Mio. t), Abfälle aus Abfall- und Abwasserbehandlungsanlagen (8,2 Mio. t) sowie unbehandelte Siedlungsabfälle (3,9 Mio. t).

7.4.2 Europa

Einen Überblick bezüglich der Abfallentsorgung in Europa geben die Daten des Statistischen Amtes der Europäischen Gemeinschaft – Eurostat (Eurostat 2005). In der Summe wurden auf europäischer Ebene im Jahr 2003 rund 1,6 Mrd. t Abfälle erzeugt. Eine genauere Analyse des Aufkommens und der Entsorgung liegt nur für die rund 243 Mio. t Siedlungsabfälle vor. Die Menge der auf Deponien beseitigten Siedlungsabfälle war zwar rückläufig, aber noch immer wurden rund 50% (118,5 Mio. t) unbehandelt deponiert. Eine zunehmende Menge (42 Mio. t bzw. 17,3%) wurde verbrannt, weitere 33,9% (82,4 Mio. t) anderweitig behandelt und verwertet. Der Anteil der stofflichen Verwertung (als Differenz von Abfallaufkommen sowie thermischer Behandlung und Ablagerung) variiert von gut 68% in Norwegen bis 0% in Litauen und Malta (UBA 2007). Bei der Entsorgung der Abfälle setzen die europäischen Entsorgungsunternehmen etwa 100 Mrd. Euro um (Wendenburg/Willeke 2007). Die Märkte in West- und Osteuropa sind aktuell gleichermaßen wichtig für die deutschen Unternehmen im Abfallentsorgungsbereich, wobei im Zuge der Osterweiterung der EU dem osteuropäischen Markt zukünftig eine stärkere Bedeutung zukommen wird (BMU 2007).

Neben der Hausmüllfassung sind, bis auf wenige Ausnahmen (Griechenland, Litauen, Bulgarien, Türkei), getrennte Erfassungssysteme für Altpapier und Glas, z.T. auch für Bioabfälle, Metalle und Kunststoffe bekannt oder zumindest in einzelnen Kommunen eingeführt (Stand 2003). Die Menge und die Bandbreite der getrennt erfassten Siedlungsabfälle variiert im Bereich von über 300 kg (Papier, Glas, Organik) pro Einwohner und Jahr in der Schweiz - und weniger als 5 kg (Papier) in Polen. Variabel stellt sich auch der Einsatz verschiedener Technologien zur Abfallbehandlung und -beseitigung dar: In Litauen, Bulgarien und der Türkei wurden Siedlungsabfälle ausschließlich auf Deponien beseitigt. In den Niederlanden wurde dagegen fast die Hälfte der Abfälle separat erfasst und kompostiert bzw. mechanisch aufbereitet und verwertet, rund 32% wird verbrannt, weniger als 10% auf Deponie beseitigt.

Traditionell werden aber auch auf der europäischen Ebene Metallschrott bzw. metallhaltige Abfälle in großem Umfang erfasst und verwertet: In den 27 EU-Mitgliedsstaaten wurden 2007 rund 119 Mio. t Stahlschrott in der Rohstahlproduktion eingesetzt; bei einer produzierten Rohstahlmenge von 210 Mio. t entspricht dies einem Sekundärrohstoffeinsatz von rund 57% (EUWID 2007). 41% des europäischen Kupferverbrauchs von rund 5,1 Mio. t werden ebenfalls über Sekundärrohstoffe gedeckt (ECI 2006). Der Bedarf an Aluminium-Metall in Europa belief sich im Jahr 2004 auf rund 12,7 Mio. t – davon wurden 4,7 Mio. t bzw. 37% über Sekundärrohstoffe gedeckt (EAA 2006).

In Westeuropa (EU25 + Norwegen und die Schweiz) fielen 2006 rund 23 Mio. t Plastikabfälle (post-consumer Abfälle) an, die zu rund 50% beseitigt (Deponie) und zu 50% verwertet wurden (Plastics Europe 2008). 4,5 Mio. t (19,7%) wurden stofflich-, und rund 7 Mio. t energie-

tisch verwertet bzw. in thermischen Abfallbehandlungsanlagen verbrannt. 62% der Plastikabfälle im post-consumer Bereich sind Verpackungen. Europaweit werden nur rund 27,5% der Verpackungsabfälle getrennt erfasst und einer Aufbereitung zugeführt. Während die Verwertungsquote für einzelne Verpackungsarten (Flaschen, Industriefolien, Paletten) bis zu 90% beträgt, werden vermischte Kunststoffabfälle im Schnitt zu weniger als 10% verwertet. Auf europäischer Ebene werden rund 40% der PET-Flaschen rund 1,1 Mio. t verwertet.

Nur in wenigen Staaten in Europa (Belgien, Dänemark, Niederlande, Schweden, Schweiz) ist die Entwicklung von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft ähnlich weit fortgeschritten wie in Deutschland. In der Mehrzahl der europäischen Staaten (darunter Frankreich, Großbritannien, Italien und Spanien) ist diese Entwicklung allenfalls im Ansatz erkennbar. Tatsächlich stellt die Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle noch immer die dominierende Entsorgungsvariante dar. In einigen ost- und südosteuropäischen Staaten werden sogar die Erfordernisse der Stadt- und Umwelthygiene nur unzureichend berücksichtigt. Die Umsetzung der europäischen Deponierichtlinie verlangt in den meisten westeuropäischen Staaten einen massiven Ausbau der Erfassungssysteme (getrennte Erfassung von Bioabfällen und ggf. Wertstoffen) und der Abfallbehandlungskapazitäten (mechanische Behandlung, Verbrennung und Kompostierung). In den osteuropäischen Staaten sind zusätzlich Investitionen für den Aufbau geordneter Abfalldeponien nach dem Stand der Technik erforderlich. Das Investitionsvolumen in Europa über den betrachteten Zeitraum bis 2020 wird in der Summe auf rund 29 Mrd. € geschätzt (Knappe/Blazejczak 2007).

7.4.3 Die Situation außerhalb Europas

Das Siedlungsabfallaufkommen in den **USA** im Jahr 2006 betrug rund 251 Mio. t. Über die Hälfte dieser Abfälle wurde auf 1.754 Deponien beseitigt (138 Mio. t bzw. 55%) und 31 Mio. t (12,5%) wurden in 89 Anlagen verbrannt bzw. energetisch verwertet. Weitere 82 Mio. t (32,5%) wurden in über 4.000 Anlagen aufbereitet, wobei rund 61 Mio. t als Sekundärrohstoffe in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt und 21 Mio. t kompostiert wurden (EPA 2007).

Bei den aus Siedlungsabfällen gewonnenen Sekundärrohstoffen dominiert Papier/Pappe mit einer Menge von 44 Mio. t, die Verwertungsrate betrug knapp 52%. Knapp 7 Mio. t Metalle (36%), darunter 5,1 Mio. t Stahl und 0,7 Mio. t Aluminium, 2,9 Mio. t Glas (22%), 2 Mio. t Kunststoffe (7%) und 1,8 Mio. t Textilien (15,3%) wurden als Sekundärrohstoffe verwertet. Bei den kompostierten Materialien dominieren Gartenabfälle (20,1 Mio. t), nur 0,7 Mio. t Küchenabfälle wurden einer Kompostierung zugeführt. Die Verwertungsquoten lagen bei 62% bzw. 2,2%.

Die Abfallentsorgung in den USA bzw. Nordamerika erscheint, an deutschen Maßstäben gemessen, vergleichsweise rückständig, sie ist aber den spezifischen Anforderungen und Randbedingungen angepasst und verfügt über einen eigenen Markt für Anlagenbau und Dienstleistungen. Der nordamerikanische Markt spielt bislang für deutsche Unternehmen im Abfallentsorgungsbereich eine untergeordnete Rolle (Knappe/Blazejczak 2007). Allerdings gewinnt auch in Nordamerika die Kreislaufwirtschaft zunehmend an Bedeutung, so dass dieser Markt für deutsche Aufbereitungstechnologie zukünftig an Attraktivität gewinnen könnte.

Die Abfallwirtschaft in **China** konnte mit dem wirtschaftlichen Aufschwung des Landes und den gesellschaftlichen Veränderungen, insbesondere der wachsenden Urbanisierung und

dem gestiegenen Lebensstandard in Teilen der Bevölkerung, nicht mithalten. Das Siedlungsabfallaufkommen hat in den letzten 15 Jahren um 80% zugenommen und wurde 2004 alleine in den Städten auf rund 190 Mio. t geschätzt. Die Erfassung der Abfälle ist nahezu vollständig, aber nur rund 50% können derzeit geordnet entsorgt werden, wobei 3% verbrannt und 5% kompostiert werden. Die andere Hälfte der Abfälle wird auf wilden Müllkippen entsorgt (UBA 2007). Das Aufkommen an festen Abfällen aus der Industrie (incl. Bergbau) wurde für das Jahr 2002 mit über 1 Mrd. t angegeben (World Bank 2005). Die Entsorgung der Industrieabfälle liegt in der Verantwortung der Unternehmen, Informationen bzgl. der Entsorgungspfade liegen nicht vor.

Die 660 „größeren“ Städte Chinas (175 Städte in China haben mehr als 1 Mio. Einwohner) verfügen über rund 1.000 Siedlungsabfalldeponien und zahlreiche weitere Müllkippen. Der größte Teil dieser Einrichtungen entspricht nicht der Definition einer „geordneten“ Deponie (sanitary landfill); sie werden unsachgemäß betrieben und verfügen über keine ausreichenden Installationen zur Sicherung der Umwelthygiene (unzureichende Sickerwasserfassung und -entsorgung, fehlende Deponiegaserfassung und -entsorgung, u.a.).

Die Beachtung der Umwelthygiene stellt eine der großen Herausforderungen dar, mit denen sich die chinesische Abfallwirtschaft konfrontiert sieht. Neben moderner Deponietechnik erwächst aufgrund der limitierten Fläche in den städtischen Regionen ein Bedarf für thermische Behandlungskapazitäten. Der Investitionsbedarf zum Aufbau von rund 35 Mio. t thermischer Behandlungskapazität wird auf rund 10,5 Mrd. € geschätzt (Knappe/Blazejczak 2007).

Ein formelles Recycling von Siedlungsabfällen fehlt in China noch fast vollständig, allerdings werden erhebliche Anteile (bis zu 20%) der Siedlungsabfälle durch den sog. informellen Sektor, d.h. private unorganisierte Abfallsammler, einer Verwertung zugeführt. Allerdings „leidet“ speziell in China der informelle Verwertungssektor unter einem Preisdumping durch Einfuhr großer Mengen von Abfällen zur Verwertung bzw. Sekundärrohstoffen aus Drittländern. Durch den wachsenden Rohstoffbedarf der chinesischen Volkswirtschaft und die in Folge des gestiegenen Lebensstandards veränderte Abfallmenge und -zusammensetzung werden zukünftig Maßnahmen zur Verwertung von Abfällen, d.h. getrennte Erfassungssysteme für Wertstoffe und Bioabfälle sowie mechanische und biologische Behandlungskapazitäten, auf dem chinesischen Markt an Bedeutung gewinnen.

Eine ähnliche Situation ist in **Indien** anzutreffen: 285 Mio. Einwohner größerer Städte erzeugen jährlich 35 – 45 Mio. t Siedlungsabfälle (Stand 2001). Der Anschlussgrad der Bevölkerung an die Abfallerfassung wird auf 70 – 90% geschätzt und ist abhängig von der Siedlungsstruktur und den wirtschaftlichen Verhältnissen. Auch in Indien sind formelle Maßnahmen zur Abfallverwertung die Ausnahme; weniger als 3% der Siedlungsabfälle werden kompostiert und weniger als 1% energetisch verwertet. Dagegen werden über den informellen Sektor erhebliche Mengen (5 – 7%) des Siedlungsabfalls einer Verwertung zugeführt. Die verbleibenden Materialien werden meist auf Müllkippen entsorgt (Hanrahan et al. 2006).

Eine Besonderheit der indischen Abfallwirtschaft sind die sehr niedrigen Heizwerte der erfassten Siedlungsabfälle, die zumindest nach heutigem Stand eine thermische Behandlung nicht sinnvoll erscheinen lassen. Die Kompostierung bzw. die mechanisch-biologische Abfallbehandlung erscheinen danach die Verfahren der Wahl für den indischen Entsorgungsmarkt zu sein. Im Zuge eines fortgesetzten Wachstums der indischen Wirtschaft werden

auch dort Maßnahmen zur Aufbereitung und Verwertung von Abfällen an Bedeutung gewinnen (Knappe/Blazejczak 2007).

In **Lateinamerika** und der Karibik fällt ein Großteil der 131 Mio. t Siedlungsabfälle (Stand 2005) in den Großstädten an. Im Mittel sind rund 80% der Bevölkerung an ein Abfallerfassungssystem angeschlossen. Nur 23% der Abfälle werden auf geordneten Deponien mit einer geeigneten technischen Ausstattung abgelagert. Im Rahmen formeller Maßnahmen werden nur rund 2% der Abfälle verwertet, darunter insbesondere Kunststoffe, Papier, Metalle und Glas. Informationen zum Umfang der über den informellen Sektor verwerteten Materialien liegen nicht vor (PAOH 2005).

Allerdings stellt sich die Situation in den verschiedenen Staaten in Lateinamerika und der Karibik unterschiedlich dar: In Argentinien und Chile, auf den Bahamas und Trinidad ist der Anschlussgrad an die Abfallerfassungssysteme nahezu vollständig; dort existieren vergleichsweise gut ausgebaute Abfallwirtschaftssysteme, die teilweise auch über Elemente einer Kreislaufwirtschaft (getrennte Wertstofffassung, Sortieranlagen, etc.) verfügen. Defizite bestehen dagegen in erster Linie bei den Deponien, die häufig nicht dem Stand der Technik entsprechen. Eine Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft in diesen Staaten muss die limitierten wirtschaftlichen Möglichkeiten berücksichtigen. Die Verbrennung von Abfällen gilt als zu teuer und konnte sich in keinem der Staaten etablieren, dagegen wird einfachen mechanisch-biologischen Behandlungsverfahren ein gewisses Potential zugesprochen.

In anderen Staaten Mittel- und Südamerikas (Paraguay, Dominica, Haiti, u.a.) ist dagegen nur für Teile der Bevölkerung die Erfassung der Siedlungsabfälle sichergestellt, der Ausbaugrad der abfallwirtschaftlichen Systeme ähnelt dem in Entwicklungsländern. Die grundlegenden Erfordernisse bzgl. der Stadt- und Umwelthygiene werden hier nicht erfüllt. Der Aufbau und die Organisation der Abfallerfassung und die Einrichtung geordneter Deponien stellen die dringlichsten Entwicklungsziele der Abfallwirtschaft in diesen Staaten dar.

In den Städten vieler **Entwicklungsländer** ist nur ein kleiner Teil (< 30%) der Bevölkerung überhaupt an die Abfallerfassung angeschlossen (Zerbock 2003). Ein Großteil der nicht erfassten Menge verbleibt innerhalb der Siedlungen oder wird in den Randbezirken ungeordnet abgelegt. Für die Abfallerfassung stehen häufig keine standardisierten Behälter zur Verfügung, der Abfall wird z.T. lose auf der Straße gelagert. Die Müllkippen für die erfassten Abfälle entsprechen keinen internationalen Standards. Grundsätzlich werden aber auch in den Entwicklungsländern im Abfall enthaltene Wertstoffe durch den informellen Sektor erfasst und einer Verwertung zugeführt.

Die Märkte in den Schwellenländern Asiens und Süd-Ost-Asiens haben bereits heute eine gewisse Bedeutung für die deutschen Unternehmen im Abfallentsorgungsbereich erreicht. Die Märkte Mittel- und Südamerikas sowie Afrikas spielen bislang dagegen keine besondere Rolle (BMU 2007).

Der weltweite Investitionsbedarf im Bereich der Abfallwirtschaft im Zeitraum bis 2020 soll bis zu 44 Mrd. € betragen (Knappe/Blazejczak 2007). Der größte Teil (rund 40 Mrd. €) entfällt auf thermische und biologische Behandlungsanlagen, nur rund 4 Mrd. € betreffen Aufbereitungsanlagen. Rund 55% (24 Mrd. €) dieses Investitionsbedarfs kann durch inländische Produkte und Leistungen gedeckt werden, der Importanteil umfasst rund 20 Mrd. €. Der Welt-

Marktanteil der deutschen Unternehmen im Anlagenbau im Entsorgungsbereich beträgt derzeit 24%. Im Bereich der automatischen Stofftrennung sind deutsche Unternehmen mit rund 64% Marktanteil weltweit führend. Der Umfang der deutschen Exporte aufgrund der zuvor dargestellten Verhältnisse im Zeitraum bis 2020 wird auf fast 6 Mrd. € geschätzt.

7.5 Wichtige Akteure und Netzwerke

Das Bild der Abfallwirtschaft in Deutschland und Europa ist durch eine große administrative Regulierungsdichte und einen hohen organisatorischen und technologischen Entwicklungsstand charakterisiert. Neben ihrem ursprünglichen Stellenwert beim Schutz des Allgemeinwohls und der Umwelt nimmt die Abfallwirtschaft insbesondere in diesem Umfeld auch einen bedeutenden Stellenwert als Wirtschaftsfaktor ein. Dieses Bild der Abfallwirtschaft spiegelt sich im Rahmen einer Zusammenstellung wichtiger Akteure in diesem Handlungsfeld wider.

Einen Schwerpunkt bildet dabei die Interessensvertretung aller mit der Abfallwirtschaft konfrontierten gesellschaftlichen Gruppen; eine Vielzahl von Verbänden und Vereinen vertritt die Interessen der verschiedenen potentiell abfallerzeugenden Wirtschaftszweigen, der mit der Abfallentsorgung befassten Gebietskörperschaften und Unternehmen sowie der Branchen, die solche aus Abfällen gewonnenen Sekundärrohstoffe verwerten.

Die hohe Regulierungsdichte und die anspruchsvollen Umweltstandards bedingen darüber hinaus einen erheblichen Bedarf für Beratungsdienstleistungen sowie Dienstleistungen in wissenschaftlichen und technologischen Bereichen. Einen weiteren Schwerpunkt bei den Akteuren im Handlungsfeld Abfallwirtschaft stellen daher private und universitäre Institute und Forschungseinrichtungen dar.

Fachverbände/Vereine

AGS	Arbeitsgemeinschaft der Sonderabfall-Entsorgungsgesellschaften der Länder	http://www.info-ags.de
agpu	Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V.	http://agpu.com
ANS e.V.	Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V.	http://www.ans-ev.de
ASA	Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung	http://www.asa-ev.de
BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.	http://www.bde.org
BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen	http://www.bdsv.de
BGK e.V.	Bundesgütegemeinschaft Recycling-Baustoffe e.V.	www.recycling-bau.de
BGS e.V.	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.	http://www.kompost.de
BGS e.V.	Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V.	http://www.bgs-ev.de
BKV	Plattform für Kunststoff und Verwertung	http://bkv-gmbh.de
BRB e.V.	Bundesvereinigung Recycling-Baustoffe e.V.	http://www.recyclingbaustoffe.de
BV Glas	Bundesverband der deutschen Glasindustrie e.V.	http://www.glasaktuell.de
BVSE	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.	http://www.bvse.de
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau	http://www.bwkbund.de

DWA	Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	http://dwa.de
DKR	Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH	http://www.dkr.de
GesPaRec	Gesellschaft für Papierrecycling	http://www.gesparec.de
ITAD	Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.	http://www.itad.de
PTS	Papiertechnische Stiftung	http://ptspaper.de
VAR	Verband der Aluminium-Recyclingindustrie e.V.	http://www.aluminium-recycling.de
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.	http://www.vdma.de
VDP	Verband deutscher Papierfabriken e.V.	http://www.vdp-online.de
Vedewa	Kommunale Vereinig. f. Wasser-, Abfall- u. Energie-wirtschaft	http://www.vedewa.de
VKS	Verband kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e. V.	http://www.vksimvku.de
VkU	Verband kommunaler Unternehmen	http://www.vku.de
WaBoLu	Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene	http://www.wabolu.de
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.	https://www.zvei.org

(Projekt)Netzwerke/Informationsdienste

EUWID	Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH Recycling und Entsorgung	http://www.euwid-recycling.de
Knoten-Weimar	Internationale Transferstelle Umwelttechnologie	http://www.bionet.net

Universitätsinstitute im Bereich Wasser/Abwasser

RWTH-ISA	Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)	http://www.isa.rwth-aachen.de/
TU Berlin-ifvt	Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik	http://www2.tu-berlin.de/~ifvt/uvf/uvf.html
TU Berlin-itu	Institut für technischen Umweltschutz	http://www2.tu-berlin.de/fb6/itu/index.html
Uni Bremen	Institut für Umweltverfahrenstechnik (IUV)	http://www.iuv.uni-bremen.de/
RU Bochum		http://www.ruhr-uni-bochum.de/siwawi/
TU Braunschweig		http://www.tu-braunschweig.de/isww
TU Cottbus		http://www.tu-cottbus.de/w-tech/startseite.php
TU Darmstadt		http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/
TU Dresden		http://www.tu-dresden.de/fgghisi/src/index.php?id=1&language=de&user=0&sortby=1
Uni Duisburg-Essen		http://www.uni-due.de/abfall/abfalltechnik-essen.shtml
TU Hamburg-Harburg		http://www.tu-harburg.de/aww/index.html
Uni Hannover		http://www.isah.uni-hannover.de/
Uni Kaiserslautern		http://gandalf.arubi.uni-kl.de/
Uni Karlsruhe		http://www.isww.uni-karlsruhe.de/
GH Kassel		http://www.uni-kassel.de/fb14/siwawi/Welcome.html
Uni Leipzig		http://www.uni-leipzig.de/~grw/siwawi/
TU München	Institut für Wasserwesen	http://www.wga.bv.tum.de

Uni d. Bundeswehr München		
Uni Paderborn Tech. Chemie und Verfahrenstechnik		http://chemie.uni-paderborn.de/fachgebiete/tc
Uni Rostock	Institut für Umweltingenieurwesen	http://www.auf.uni-rostock.de/UIW
Uni Siegen		http://www.uni-siegen.de/fb10/fwu
Uni Stuttgart		http://www.iswa.uni-stuttgart.de
Uni Weimar		http://www.uni-weimar.de/Bauing/siwawi
Uni Wuppertal Lehrst. Abfall- und Siedlungswawi.		http://www.bauing.uni-wuppertal.de/siewawi

Private Institute/Beratungsunternehmen

CUTEC	CUTEC-Institut GmbH	http://www.cutec.de
ifeu Heidelberg GmbH	Institut für Energie- und Umweltforschung	http://www.ifeu.de
IGW	Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen mbH	http://www.igw-witzenhausen.de
IBA	Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Energietechnik	http://www.iba-hannover.de
Öko-Institut	Öko-Institut e.V.	http://www.oeko.de
Ökopol	Institut für Ökologie und Politik GmbH	http://www.oekopol.de
Prognos	Prognos AG	http://www.prognos.de
	Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH	http://www.abfallforum.de

Forschungsförderung

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	http://www.bmbf.de
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	http://www.dbu.de
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	http://www.dfg.de
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit	http://www.gtz.de

Staatliche Einrichtungen/Behörden

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	http://www.bgr.de
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	http://www.bmwi.de
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	http://www.bmu.de
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit	http://www.bmz.de
UBA	Umweltbundesamt	http://www.umweltbundesamt.de
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall	http://www.laga-online.de

International

EERA	European Electronics Recyclers Association	http://www.eera-recyclers.com
ERPC	European Recovered Paper Council	http://www.paperrecovery.org
ETC/RWM	The European Topic Centre on Resource and Waste Management	http://waste.eionet.europa.eu
ISWA	International Solid Waste Association	http://www.iswa.org
PlasticsEu-	Association of Plastics Manufacturers	http://www.plasticseurope.org

rope
UNEP

United Nations System-Wide Earthwatch

<http://earthwatch.unep.net/solidwaste>

7.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Umwelttechnologie im Handlungsfeld „Abfallwirtschaft“ ist mit zwei zentralen Problembereichen konfrontiert: Dies ist zum einen die Hygieneproblematik und zum anderen die Mengen- und Ressourcenproblematik. Abfälle werden primär als ein Problem der Stadthygiene wahrgenommen. Um Gefahren für das Allgemeinwohl abzuwenden, müssen Abfälle erfasst, d.h. sachgerecht gelagert, 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 (nicht Gegenstand der Abfallwirtschaft) verspricht die Verwertung von Abfällen eine Minderung der Abfallmenge und eine Schonung natürlicher Ressourcen.

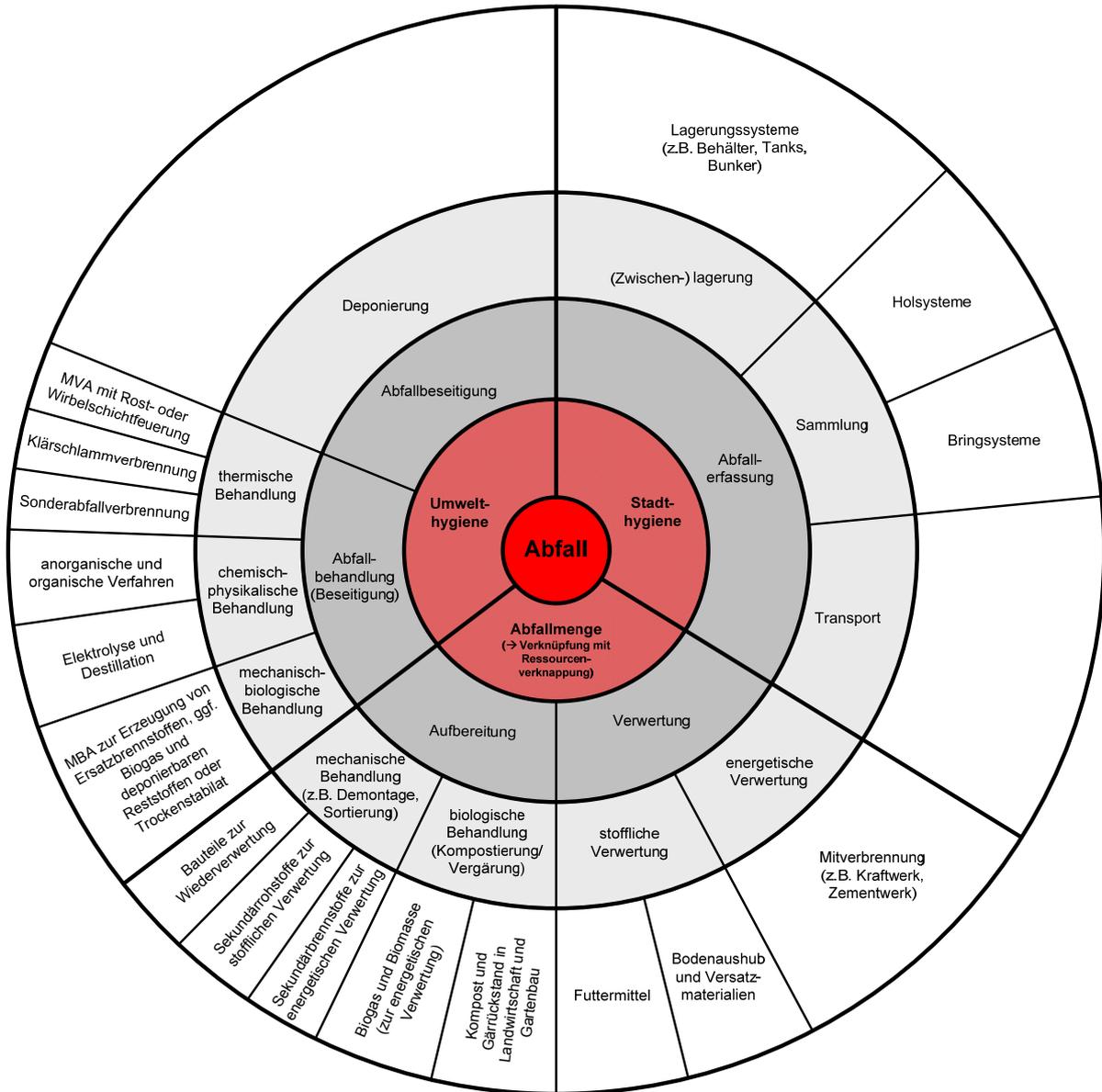
Die primäre Herausforderung an die Abfallwirtschaft besteht darin, die Stadthygiene zu gewährleisten ohne dabei den Aspekt der Umwelthygiene zu vernachlässigen. Im Zuge der Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft tritt die Erschließung des in den Abfällen enthaltenen Rohstoffpotentials als ergänzender Aspekt hinzu. Um dieser Herausforderung adäquat und erfolgreich begegnen zu können, sind neben einem geeigneten Umfeld (administrativer Rahmen, Infrastruktur, Fachkompetenz, wirtschaftliches Potential, u.a.) insbesondere technologische Lösungen notwendig.

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 dienen 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 mechanischer, biologischer, chemisch-physikalischer und thermischer Abfallbehandlungstechnologien auf einem wachsenden Weltmarkt anzubieten.

Während bzgl. der biologischen, chemisch-physikalischen und thermischen Abfallbehandlungsverfahren eine Konsolidierung auf einige erprobte Systeme stattgefunden hat, stellt sich insbesondere der Bereich der mechanischen Abfallbehandlung als Innovationsschwerpunkt dar. Vor dem Hintergrund der Strategie „Ziel 2020“ werden die verbesserten Möglichkeiten automatischer Stofftrennverfahren 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.

Zwar wird Deutschland absehbar der wichtigste Absatzmarkt für die Unternehmen im Handlungsfeld Abfallentsorgung bleiben, die EU-Osterweiterung und die Angleichung der Umweltvorschriften innerhalb der EU wird aber auch die Bedeutung des europäischen Marktes forcieren. Schließlich wird das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in Asien auch dort die Nachfrage nach deutschen Abfalltechnologien verstärken. Besonders gute Chancen haben deutsche Unternehmen aus dem Bereich der automatischen Stofftrennung (mechanische Abfallbehandlung); für dieses besonders innovative Marktsegment wird in den nächsten Jahren ein überproportional starkes Wachstum vorausgesagt, deutsche Unternehmen haben hier einen Weltmarktanteil von über 60% (BMU 2007) – am gesamten Weltmarkt für Anlagen in der Abfall- und Recyclingwirtschaft haben deutsche Unternehmen einen Anteil von rund 24%.

Die Mehrheit der deutschen Unternehmen im Handlungsfeld der Abfallentsorgung bietet Dienstleistungen auf der operativen Ebene der Abfallentsorgung an. Wie bereits für das Handlungsfeld „Wasserschutz“ (Kapitel 4) ausgeführt, könnten Dienstleistungen auch im Bereich der Abfallentsorgung zu Treibern des Exports werden, indem sie im Verbund mit Anlagentechnik angeboten würde. Aber auch für die Abfallentsorgung trifft zu, dass Dienstleistungen bislang meist national bzw. regional bezogen waren. (Staatliche) Maßnahmen zur Unterstützung dieser Unternehmen bei der Erschließung internationaler Märkte wären daher auch in diesem Handlungsfeld wünschenswert.



Technologiekompass zum Handlungsfeld „Abfallwirtschaft“ (Entwurf)

Literatur

- ASA (Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung) (2007): MBA-Steckbriefe 2007/2008, MEDIUM Werbung, Beelen.
- Baccini, P.; Brunner, P.H. (1991): *Metabolism of the Anthroposphere*. Springer Verlag, Berlin.
- Bardt, H.; Biebeler, H.; Mahammadzadeh, M.; Selke, J.-W. (2007): *Forschung und Praxis für Klimaschutz und Anpassung*. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Forschungsstelle Ökonomie/Ökologie, Köln.
- Becker, B.; Knichel, H.; Thomas, J.; Hauschild, W. (2007): *Nachhaltige Abfallwirtschaft in Deutschland*. Ausgabe 2007, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Blight, G.E.; Mbande, C.M. (1996): *Some Problems of Waste Management in Developing Countries*. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 23, No. 1, pp. 19 – 27.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2007): *GreenTech made in Germany*. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. München
- Brüggemeier, F.-J.; Toyka-Seid, M. (1995): *Industrie-Natur-Lesebuch zur Geschichte der Umwelt im 19. Jahrhundert*. Campus-Verlag, Frankfurt/New York, S. 232.
- Büringer, H. (2007): *Aktuelle Entwicklung des Gesamtabfallaufkommens in Baden-Württemberg*. *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg* 11/2007, S. 48 – 51.
- EAA (European Aluminium Association) (2006): *Aluminium Recycling in Europe - The Road to High Quality Products*. EAA and Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, Brussels.
- ECI (Euroepan Copper Institute) (2006): *Annual Report 2006 - Copper Connects Life*, Brussels, S. 2.
- EEA (European Environmental Agency) (1999): *Environment in the European Union at the turn of the century*. Copenhagen, S. 205.
- EPA (US Environmental Protection Agency) (2007): *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2006*, Washington.
- EPA (US Environmental Protection Agency) (2008): *Wastes – Laws and Regulations*. Washington. <http://www.epa.gov/epaoswer/osw/laws-reg.htm>
- EU (Europäische Union) (2005): *Mitteilung der Kommission vom 21. Dezember 2005: „Weiterentwicklung der nachhaltigen Ressourcennutzung - Eine thematische Strategie für Abfallvermeidung und -recycling“*. KOM(2005)666 - Nicht im Amtsblatt veröffentlicht. <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l28168.htm>
- Eurostat (2005): *Waste generated and treated in Europe – Data 1995 – 2003*. European Commission/Eurostat – Theme Environment and Energy, European Communities, Luxembourg.
- EUWID (Europäischer Wirtschaftsdienst) (2007): *Expertenberichte für den Stahlschrottmarkt*. EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 17, Nr. 45, S. 15.
- Förster, U. (2004): *Umweltschutztechnik*. Springer Verlag, Berlin, 6. Auflage.
- Fricke, K.; Bahr, T. (2007): *Integration der Vergärung auf Kompost- und MBA-Anlagen – Potentiale, Chancen und Probleme*. In: K. Wiemer, M. Kern (Hrsg.) *Weiterentwicklung der biologischen Abfallbehandlung vor dem Hintergrund von TA Luft und EEG*. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen.
- Hagelüken, C. (2005): *Der Kreislauf von Platinmetallen – Recycling von Katalysatoren*. Sonderdruck aus: C. Hagelüken (Hrsg.) *Autoabgaskatalysatoren – Grundlagen, Herstellung, Entwicklung, Recycling, Ökologie*. Expert-Verlag, Renningen.

- Hanrahan, D.; Srivastava, S.; Ramakrishna, A.S. (2006): Improving Management of Municipal Solid Waste in India - Overview and Challenges. The World Bank, Environmental Unit, South Asia Region, New Delhi.
- Hasberg, W. (1989): Drehrohrofen und Nachbrennkammer als chemischer Reaktor zur Rückstandsverbrennung. *Wasser, Luft und Boden*, 33, Heft 11-12, S. S18-S24 (Sonderteil)
- Hassan, A. (2001): Rohstoffeinsparung durch Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie. Umweltbundesamt, Texte 21/01, Berlin.
- Hösel, G. (1990): Unser Abfall aller Zeiten. Eine Kulturgeschichte der Städtereinigung. 2. Auflage. Jehle-Rehm Verlag, München.
- Hüther, M. (2006): Von der Abfallentsorgung zum Urban Mining. Institut der Deutschen Wirtschaft, Köln - Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt, Berlin, 13. Dezember 2006
- IDRC (International Development Research Centre) (1999): Managing the Monster - Urban Waste and Governance in Africa. A. G. Onibokun (Edt.), Ottawa, Chapter 6.
- Jörissen, J.; Coenen, R.; Stelzer, V. (2005). Zukunftsfähiges Wohnen und Bauen – Herausforderungen, Defizite, Strategien. Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., TU Berlin.
- Kern, M.; Raussen, T. (2007): Konzepte zur optimierten stofflichen und energetischen Nutzung von Bio- und Grünabfällen. In: K. Wiemer, M. Kern (Hrsg.) Weiterentwicklung der biologischen Abfallbehandlung vor dem Hintergrund von TA Luft und EEG. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen.
- Kloepfer, M.; Franzius, C.; Reinert, S. (1994): Zur Geschichte des deutschen Umweltrechts. Duncker & Humblot GmbH, Berlin, S. 68 f.
- Knappe, F.; Blazejczak, J. (2007): Potentialanalyse der deutschen Entsorgungswirtschaft. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungsbericht 206 31 303, Texte 44/07, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- MRC (2007): Global Waste Management Market Assessment 2007. Market Research.com, Key Note Publication Ltd., Rochville, MD.
- MUNLV (Ministerium für Umwelt- und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW) (2006): Gewerbeabfallentsorgung in NRW seit dem 01. Juni 2005. Ergebnisse von zwei Umfragen bei Betreibern von Aufbereitungs- und Sortieranlagen. Düsseldorf.
- NZZ (Neue Züricher Zeitung) (2007): Kampf gegen schwere Metalle. NZZ am Sonntag. 25. Februar 2007.
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) 2007): Environmental Data – Compendium 2006/2007 – Waste. Environmental Performance and Information Division. Environmental Directorate, Working Group on Environmental Information and Outlooks.
- PAHO (Pan American Health Organisation) (2005): Report on the regional evaluation of municipal solid waste management services in Latin America and the Caribbean. Area of Sustainable Development and Environmental Health, Washington, D.C.
- Plastics Europe (2008): The compelling facts about plastics – an analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe. Plastics Europe - Association of Plastics Manufacturers, Brussels.
- Rissanen, J.; Naarajärvi, T. (2004): China Waste Management – Working Paper for Streams Technology Programme. Tekes, Beijing / Environmental Resources Management, Shanghai.
- Stubenvoll, J.; Böhmer, S.; Szednyj, I. (2002): Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

- Tan, J. S.-E. (2004): State of Waste Management in South East Asia. United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics – International Environmental Technology Centre, Osaka.
- Taube, M. (1988): Materie, Energie und die Zukunft des Menschen. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart.
- UBA (Umweltbundesamt) (2007): Umweltdaten Deutschland online – Abfallaufkommen. Dessau. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2320>
- vdz (Verein Deutscher Zementwerke e.V.) (2007): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2006. Düsseldorf.
- 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.
- Wendenburg, H.; Willeke, R. (2007): Die Chancen und Risiken einer neuen Abfallrahmenrichtlinie. Müll und Abfall, 9/2007, S. 416 – 418.
- World Bank (2005): Waste Management in China: Issues and Recommendations. Urban Development Working Papers, East Asia Infrastructure Department, World Bank, Working Paper No. 9.
- Zerbock, O. (2003): Urban solid waste management: Waste reduction in developing nations. Michigan Technological University, Houghton.

8 Erhalt von Natur und Biodiversität

Der rasant ansteigende Verlust an Naturlandschaft und Biodiversität wird mit großer Übereinstimmung als eines der weltweit gravierendsten Umweltprobleme erachtet (vgl. Kopfmüller et al. 2001, 224)²³. Jährlich sterben – überwiegend verursacht durch die Lebens- und Wirtschaftsweisen der Menschen – ungefähr 27.000 Tier- und Pflanzenarten aus (vgl. Naturschutz 2007). Weltweit liegen die derzeitigen Artenverluste damit etwa hundert bis tausend Mal höher als die vermutete natürliche Aussterberate (Naturallianz 2008b). 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. „Hält dieses Tempo an, so ist auch die wirtschaftliche Entwicklung gefährdet“ (ebd.). Dementsprechend wurde der Rückgang (natürlicher) biologischer Vielfalt auch als eines der herausragenden Nachhaltigkeitsdefizite Deutschlands identifiziert (vgl. Coenen/Grunwald 2003). Auch die Bundesregierung misst dem Erhalt der Biodiversität und deren gerechten und nachhaltigen Nutzung „eine sehr hohe Bedeutung“ zu (Bundesregierung 2007, 3).

Bevor nun im Folgenden Umwelttechniken im Bereich Natur und Biodiversität dargestellt werden (Kap. 8.3), gilt es zunächst das Handlungsfeld in seinen wichtigsten Zügen zu charakterisieren. Im Weiteren werden, nach einigen Vorbemerkungen, Gründe für den Erhalt von Natur und Biodiversität aufgeführt, Probleme und Ursachen benannt, Ziele expliziert sowie Meilensteine und Hemmnisse in der Umsetzung geschildert (Kap. 8.1 u. 8.2). Dies geschieht im Vergleich zu den anderen Handlungsfeldern ausführlicher, da die Problemlagen sehr zahlreich und divers weniger eingängig und oft in der (politischen) Öffentlichkeit nicht in der Weise präsent sind, wie das etwa bei Klima, Wasser oder Luft der Fall ist. In Kap. 8.4 wird kurz auf die Akteurslandschaft eingegangen und in Kap. 8.5 einige ökonomische Aspekte und erste thesehafte Handlungsoptionen vorgestellt.

8.1 Charakterisierung des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ zeigt sich insgesamt als hochgradig divers und komplex. Dementsprechend sind einige kurze begriffliche und theoretische Anmerkungen angebracht.

Im Folgenden geht es um *Umwelt*technologien im Handlungsfeld „Naturschutz und Biodiversität“. Dabei gilt es zu beachten, dass die Begriffe und Konzepte um „Umweltschutz“, „Naturschutz“ und „Erhalt bzw. Steigerung von Biodiversität“ aus unterschiedlichen Kontexten stammen, auf gänzlich verschiedenen Begriffen und Bedeutungen aufbauen und damit ähnliche aber doch deutlich unterschiedliche Gegenstandsbereiche, Ziele und Wertungen umfassen, die zudem in sich heterogen und durchaus auch umstritten sind. Mögen Gegenstandsbereiche, Ziele und Wertungen auch in vielen Fällen deckungsgleich sein, so bleiben Konflikte und Brüche zwischen den Konzepten nicht aus. Als relevante Beispiele lassen sich

²³ Vgl. auch WBGU 2000; Gowdy 1997.

hierfür der Umgang mit und die Bewertung von gentechnisch veränderten Organismen, Stadt als Lebensraum oder Biodiversität von Kulturpflanzen nennen. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird, wenn möglich – sprich wenn die Konzepte von Naturschutz und Biodiversität in ihrem Gegenstandsbereich, ihrer Zielsetzung, etc. annähernd zur Deckung kommen – der „Erhalt von Natur und Biodiversität“ in einem behandelt. Dort wo (im Kontext der Projektziele) Unterschiede virulent werden, wird sprachlich darauf hingewiesen. Dies geschieht bspw. in der (idealtypischen) Unterscheidung von „natürlicher Biodiversität“ und „kultureller Biodiversität“. Letztere umfasst Kulturpflanzen, Nutztiere und kulturgeprägte Lebensräume, die nicht (klassischerweise) Gegenstand des Naturschutzes sind.

Ein weiterer Hinweis sei hier vorgelagert. Operiert das Projekt „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ vor dem Hintergrund eines erweiterten Anthropozentrismus²⁴ und entspricht damit in etwa auch der gängigen Auffassung von *Biodiversität als Ressource*, so gehen Überlegungen und Forderungen im Naturschutz oft über einen solchen ethischen Anthropozentrismus hinaus. Jenseits eines reinen Anthropozentrismus werden auch patho-, bio-, öko- oder physiozentrische Überlegungen herangezogen, bzw. Naturschutz aus solchen Werthaltungen heraus begründet. Natur, Leben und dessen Vielfalt werden nicht nur instrumentelle Werte, sondern durchaus auch Eigenwert zugeschrieben. An prominenter Stelle geschieht dies bspw. im Bundesnaturschutzgesetz (2007), §1: „Natur und Landschaft sind auf Grund ihres eigenen Wertes und als Lebensgrundlagen des Menschen auch in Verantwortung für die künftigen Generationen [...] zu schützen, zu pflegen, zu entwickeln und, soweit erforderlich, wiederherzustellen“ (BNatSchG 2007, §1)²⁵. Somit gründen Ziele und Bemühungen im gängigen Naturschutz gegenüber dem in diesem Projekt verfolgten Zielen teils auf erheblich unterschiedlichen normativen Setzungen und weltanschaulichen Hintergründen.

8.1.1 Gründe für den Erhalt von Natur und Biodiversität

Aus der Fülle der Gründe für die Bewahrung von Natur und Biodiversität seien hier nur einige wenige kurz angerissen. Zur ausführlicheren Darstellung sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (z. B. Körner et al. 2003, oder verdichtet in SRU 2002, 16-25). Die Natur stellt auf mannigfaltige Weise Lebewesen, Stoff- und Energieströme, Funktionen und Dienstleistungen zur Verfügung, die vom Menschen genutzt werden. Sauerstoffproduktion, Photosynthese, Stofffixierung, Erneuerung und Reinigung von Süß- und Trinkwasser, Erosionsschutz, Bestäubung und Befruchtung von Pflanzen, Bodenbildung, etc. sind das Werk natürlicher, biotischer Vorgänge.

Von besonderer Relevanz ist dabei die Biodiversität als eine in ihrer Bedeutung und Dimension erst seit etwa zwanzig Jahren erkannte spezielle Qualität des Lebens²⁶. Sie umfasst die biologische Vielfalt auf Ebene der Gene, der Arten, bis hin zur Vielfalt der Lebensgemeinschaften und Lebensräume sowie die funktionale Vielfalt in Ökosystemen. Auf Ebene der

²⁴ Vgl. die dem Projekt zugrunde liegende ‚Umwelttechnik-Definition‘ und die dort geäußerte Auffassung der Umwelt als funktionale („Umweltfunktionen“), sowie die Einbindung des Projektes in den Kontext nachhaltiger Entwicklung (vgl. Scoping Report 2007).

²⁵ Hervorhebung durch die Autoren.

Arten drückt sich Biodiversität im Wissen um ca. 1,7 Millionen Arten aus. Die tatsächliche Vielfalt kann für viele Organismengruppen allerdings nur geschätzt werden. Hochrechnungen zeigen, dass vermutlich etwa 3 bis 80 Millionen Spezies existieren²⁷. Feststellen lässt sich aber eine Aussterberate enormen Ausmaßes, bedingt vor allem durch die Vernichtung natürlicher Lebensräume in Folge menschlicher Aktivitäten (vgl. Nees 2007). Die biologische Vielfalt unseres Planeten erweist sich für den Menschen in vielerlei Hinsicht als existenziell. So trägt sie unter anderem zur Stabilität von Ökosystemen bei, die ihrerseits elementare Umweltfunktionen aufrechterhalten. Auch hält sie einen unermesslichen Fundus der Nutzung bereit. So sind bspw. 75% aller Heilmittel pflanzlichen, tierischen oder mikrobiologischen Ursprungs.

Im Kontext des Leitbilds Nachhaltiger Entwicklung kann Biodiversität als *Ressource*, genauer als „eine prinzipiell erneuerbare Ressource betrachtet werden, deren verschiedenartige nutzenstiftende Funktionen es durch eine entsprechend schonende Bewirtschaftung zu erhalten gilt“ (Kopfmüller et al. 2001, 221). Das unwiederbringliche Verschwinden einer Lebensform bedeutet damit den Verlust eines tatsächlichen oder potenziellen Nutzens.

Biodiversität kann unter Ressourcengesichtspunkten (und damit in einem weiten Ökonomieverständnis) ein direkter, indirekter und optionaler Wert zugeschrieben werden. Ein direkter Nutzwert ergibt sich aus dem Eingebundensein in heutige Produktionszusammenhänge (bspw. im Nahrungsmittel- und Medizin-Bereich). Hier darf nicht vergessen werden, dass große Bevölkerungsteile in den Entwicklungsländern subsistent leben und zu ihrer Ernährung auf lokal funktionierende Ökosysteme angewiesen sind. Der indirekte Wert bezieht sich auf die Aufrechterhaltung ökosystemarer Prozesse, wie bspw. des Kohlenstoffkreislaufs oder der Umwandlung von Schadstoffen. Ein optionaler Wert lässt sich Biodiversität insofern zuschreiben, dass sich zukünftig ein heute noch unbekannter Nutzwert bekannter Arten oder ein Nutzwert heute noch unbekannter Arten ergeben könnte. Angesichts des heutigen breiten Unwissens um die Existenz und mehr noch die Eigenschaften vieler Arten, kommt diesem Punkt große Bedeutung zu (vgl. Coenen et al. 2003, 8).

Jenseits der oben genannten Argumente für einen Schutz natürlicher Biodiversität lassen sich für einen umfassenden Naturschutz viele weitere anführen. Erwähnt sei an dieser Stelle nur, dass Natur – komplementär zur ökologischen und ökonomischen – auch sozial und kulturell von großer Bedeutung ist. Natur und Naturdinge können von hoher symbolischer Kraft und hohem ästhetischem Wert sein. So wird heute – in einer zunehmend gemachten und technisch überformten Lebenswelt – Natur auch als Ort der Entlastung, Erholung und Kontemplation immer wichtiger. Das Naturschöne dient als Kontrast zum Menschenwerk, das natürlich Gewordene als (ästhetische) Entlastung vom Zwang des Gemachten und Machens.

Im Kontext von Umwelttechnologien sei am Schnittpunkt zwischen Ästhetik und Ökonomie noch auf jene kognitive Funktion von Natur als **Vorbild**, **Ideengeber** und **Inspiration** für

²⁶ Im weiteren historischen Rahmen wurde das, was heute unter Biodiversität gefasst und wertgeschätzt wird, im Begriff der „Wildnis“ – das vielfältige, unbeherrschte, natürliche Werden – vielmehr mit Abscheu versehen.

²⁷ Im Allgemein geht man von einer Gesamtzahl von ca. 14 Millionen Arten aus (so z. B. Kopfmüller et al. 2001; BMU 2007, S. 16). Allerdings sind Zahlen über die Artenvielfalt in der Tiefsee noch unge-

technische Entwicklungen hingewiesen. Nicht nur als Ausgangsstoff (Ressource) oder Mittel und Werkzeug (z. B. in den Biotechnologien), sondern als Inspirationsquelle (bspw. in der Bionik, s. Kapitel 6.3.2) ist die belebte Natur für die Technikentwicklung von unersetzlichem Wert. Klettverschluss, Haifischhaut, Lotuseffekt, aerodynamische Formen, etc. sind Beispiele dafür.

8.1.2 Probleme und Ursachen

Der Erhalt von Natur und Biodiversität stellt auch für und in Deutschland ein dringliches Handlungsfeld dar. „Die Gefährdung der Biodiversität und ein breites Spektrum von Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes sind in Deutschland weiterhin ungelöste, „persistente“ Probleme.“ (SRU 2002, 12). Hervorgerufen werden diese Probleme durch die massiven Eingriffe menschlicher Wirtschafts- und Lebensweisen.

Problemkategorien

Überwiegend sind die Probleme im Bereich Natur und Biodiversität klassische Umweltprobleme. Nämlich insofern sie als **nicht-intendierte**, unerwünschte Nebenfolgen menschlicher Lebens- und Wirtschaftsweisen entstanden sind und als selbst verursachte Veränderungen der Umwelt nun das heutige und zukünftige Leben der Menschen beeinträchtigen. Eine Besonderheit zeigt sich aber bezüglich des Naturschutzes. Die Verdrängung und Umwandlung von Natur in Kultur war lange Zeit nicht unerwünschte Nebenfolge, sondern erklärtes Ziel und **intendierte Folge** menschlichen Tätigseins (so bspw. die Kultivierung des Bodens, der Landschaft, von Wildtieren und -pflanzen, von Wildnis und die Kultivierung des Menschen selbst). Dies gilt in abgemilderter Weise auch heute noch.

Die Folgen unterscheiden sich ferner im Grad ihrer Wirkmächtigkeit. So können als Folgen – zumindest graduell – eine bloße Störung, eine Beeinträchtigung oder eine Zerstörung von Biodiversität unterschieden werden. Ein Beispiel: Die Absenkung des Grundwasserspiegels infolge von Trinkwasserförderung zeigt ebenso Wirkungen auf die Biodiversität eines anliegenden Feuchtgebietes wie das Eindringen von Nährstoffen bspw. aus angrenzender Landwirtschaft. Während die Absenkung des Grundwasserspiegels jedoch für die Biodiversität des Feuchtgebietes essentiell ist und dieses (als spezifisches Ökosystem) zerstört, wird durch die Immission von Nährstoffen die Biodiversität nur tendenziell beeinträchtigt²⁸. Diese Folgen werden auf unterschiedlichen Ebenen sichtbar: Auf der Ebene der Lebensräume und Ökosysteme, der Ebene der Arten und Individuen sowie auf der Ebene der Gene.

Auch die Art und Weise der Wirkungen lässt sich qualitativ unterscheiden. Zur Systematisierung bieten sich die folgenden (naturwissenschaftlichen) Grundkategorien an. Beeinträchtigungen können ausgelöst werden durch räumliche, stoffliche, energetische oder informati-

wiss. Neuere Forschungen deuten auf einen sehr hohen Artenreichtum (10 bis 30 Millionen) hin (vgl. Schuh 2007).

²⁸ Im Weiteren werden bloße Störungen der Biodiversität nicht problematisiert. Es geht nicht um kleine Eingriffe in den Naturhaushalt, in Ökosystemen oder in Populationen (u.U. können solche Störungen sogar positive Wirkungen haben, z.B. Erhöhung der Biodiversität oder Ökostabilität), sondern um wesentliche Beeinträchtigungen und die Reduktion der biologischen Vielfalt. Die Grenzen allerdings sind fließend und schwer zu bestimmen.

sche Einwirkungen. Biodiversität kann bspw. sowohl durch Inanspruchnahme von Böden für Siedlung, Verkehr oder Landwirtschaft (räumlich), die Immissionen von Stoffen (stofflich), durch Lärm- und Wärmeemissionen (energetisch) oder über genetische Information (informativ).

Eine weitere Unterscheidung hilft, die Probleme im Bereich Natur und Biodiversität zu erfassen und ihnen begegnen zu können. Die Wirkungen auf Biodiversität und Natur lassen sich auch anhand des Grads der Kopplung an die Ziele menschlicher Umweltnutzung differenzieren. So lassen sich Fälle unterscheiden, bei denen die Beeinträchtigung oder Zerstörung von Biodiversität und Natur unmittelbar an die Ziele der Bewirtschaftung und Nutzung von Lebensräumen (z. B. bei der Kultivierung von Böden) oder Arten (z. B. über die Befischung) gekoppelt sind, von solchen, bei denen Schädigungen nur mittelbar in Folge, bzw. als unerwünschte Nebenfolge von Umweltnutzungen (bspw. in Form von Schadstoffausstoß oder anfallendem Abfall in Produktionsprozessen) erfolgen.

Diese Unterscheidungen sind nicht nur aus reinem Erkenntnisinteresse hilfreich, sondern zeigen sich auch für die Suche nach Umwelttechnologien als unentbehrlich. Hängt doch die Art der (technischen) Lösungen direkt von der Art der Probleme ab. Je nachdem, ob die Beeinträchtigung über eine räumliche Inanspruchnahme oder die Immissionen bestimmter Stoffe, etc. erfolgt, sind andere Arten von Technologien geeignet, die Probleme zu lösen und zu vermindern.

Räumliche Beeinträchtigungen

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. Direkte Zerstörung oder Schädigung von Lebensräumen erfolgt im Zuge des Baus von Siedlungen, Verkehrsanlagen, sonstiger Infrastruktur, beim Abbau von Rohstoffen im Tagebau und durch den Ausbau von Fließgewässern zur Energieerzeugung und Schiffbarmachung.

Wesentliche Beeinträchtigungen erfolgen auch durch die großflächige, intensive Landwirtschaft mit artenarmen Besatz (Monokulturen), die heute – bei steigender Weltbevölkerung und im Zuge der wachsenden Bedeutung nachwachsender Rohstoffe – weltweit zunimmt. So werden zum Anbau nachwachsender Rohstoffe natürliche (z.B. Regenwald), aber auch brachliegende und naturnahe Flächen intensiv genutzt. Insgesamt – so urteilt das von der UN angestoßene Millennium Ecosystem Assessment – könnte Landwirtschaft weltweit zukünftig „unter allen menschlichen Aktivitäten die größte Bedrohung für die Biodiversität und das Funktionieren unserer Ökosysteme“ darstellen (Spektrum 2008). Besonderes Relevanz kommt im deutschen (und mitteleuropäischen) Raum besonders den Flussauen zu. Diese zeichnen sich durch ihren großen Artenreichtum aus und stellen mangels Regenwäldern, Savannen, oder Korallenriffen in Mitteleuropa die einzigen „Zentren der Artenvielfalt“ dar. Bis dato wurde jedoch der Anteil der Feuchtgebiete durch Trockenlegung, Flusskorrekturen und Ausbau von Schifffahrtswegen kontinuierlich reduziert.

Aufgrund ihrer flächenhaften Dominanz spielt die intensive landwirtschaftliche Nutzung eine zentrale Rolle. Verinselung und Zerschneidung infolge des Verkehrswegebbaus sind sekun-

däre Folgen, bei denen eigentlich intakte Lebensräume eine Beeinträchtigung durch Isolierung erfahren. Dadurch können flächenmäßig kleine Eingriffe große Wirkungen haben. Eine Sonderrolle kommt den Fließgewässern zu, die – sofern sie strukturell intakt sind – unterschiedliche Natur- und Lebensräume miteinander verbinden. Hier erfolgt die Zerschneidung infolge von Staumaßnahmen und Gewässerausleitungen, die die Durchgängigkeit dieser „Lebensadern“ erheblich vermindern.

Eine weitere räumliche Problematik stellt die Verdrängung der endemischen Population durch invasive Arten dar. Standortfremde Tier- und Pflanzenarten werden (meist ungewollt) in heimische Biotope eingeschleppt und verdrängen dort mangels natürlicher Feinde oder Hemmnisse sukzessiv und flächendeckend bestehende Arten. Betroffen können Ökosysteme aller Art sein, Feuchtgebiete genauso wie trockene, aquatische oder maritime Biotope.

Stoffliche Beeinträchtigungen

Stoffliche Beeinträchtigungen von Ökosystemen tragen ebenfalls stark zu einem Rückgang der Artenvielfalt bei. Dabei spielt sowohl die Immission ökotoxischer Schadstoffe als auch der Eintrag von Nährstoffen aus der Landwirtschaft eine Rolle. Als Hauptverursacher gilt in Deutschland die intensive Landwirtschaft, die großflächig sowohl Schadstoffe (z.B. Herbizide), als auch Nährstoffe über Düngemittel in Ökosysteme emittiert und damit die Lebensbedingungen bestehender Populationen wesentlich ändert sowie Lebensgemeinschaften gefährdet.

Für die ozeanischen Ökosysteme stellt die zunehmende Versauerung des Meeress eine große und ubiquitäre Beeinträchtigung dar. Infolge des höheren CO₂-Gehalts der Atmosphäre steigt auch die CO₂-Konzentration im Wasser an. Höhere Säurekonzentrationen finden sich dabei nahezu überall, auch in den Tiefen. Am stärksten werden wirbellose kalkbildende Organismen betroffen sein, deren Wachstum, Fortpflanzung und Lebensdauer mit steigender CO₂-Konzentration abnimmt. In den kalten Gewässern wird es innerhalb der nächsten 30 Jahre einen Shift von kalkbildenden zu kalklösenden Bedingungen geben (vgl. Lublinski 2006). Ursachen für die atmosphärische und ozeanische CO₂-Erhöhung (auf etwa den doppelten Wert wie vor der Industriellen Revolution) liegen nach Meinung vieler Experten in der energetischen Nutzung fossiler Brennstoffe.

Deutlich verbessert hat sich in Deutschland – im Gegensatz zur globalen Lage – die Situation bezüglich des Schadstoffausstoßes von Industrie, Haushalt und Verkehr. In den letzten 30 Jahren wurden die Emissionen in die Umweltmedien Luft, Boden, Wasser vor allem durch umweltpolitische Steuerung, gesetzliche und andere normierende Vorgaben drastisch reduziert²⁹. Der Eintrag von säurebildenden und eutrophierenden Stoffen über die Luft in Boden und Wasser bleiben allerdings auch weiterhin problematisch (UBA 2007). Zu erwähnen gilt es, dass diese Reduktionen letztlich nahezu ausschließlich mithilfe von Umwelttechniken und nicht etwa durch einen Verzicht auf Produktivität oder Konsum erreicht wurden.

Neben flächendeckenden Schadstoffeinträgen aus diffusen Quellen schädigen punktuelle Schadstoffemittenten die Biodiversität in einem engen Radius. Über das achtlose Ausbringen

²⁹ Hinzu kommt der Zusammenbruch der DDR-Industrie.

oft hochtoxischer Stoffe in die Umwelt, wird die lokale Artenvielfalt beeinträchtigt. Was in Deutschland im Einzelfall als Unfall oder Gesetzesbruch stattfindet, ist in Entwicklungs- und Schwellenländern mit weit weniger wirksamen Umweltschutzmaßnahmen oft die Regel. Verursacher sind hier vor allem Anlagen zur Gewinnung und Extraktion von Bodenschätzen, sowie Chemieunternehmen und Betrieb des produzierenden Gewerbes (vgl. Blacksmith 2007).

Energetische Beeinträchtigungen

Natur und Biodiversität wird des Weiteren über energetische Einflüsse geschädigt und gefährdet. Ein vor allem in dicht besiedelten Regionen drängendes Problem stellen diesbezüglich Lärmemissionen dar. Schallemissionen vertreiben bestimmte Tierarten, setzen diese unter Stress, evozieren Verhaltensänderungen und unterbinden u.U. deren Reproduktion. Als Verursacher sind vor allem Schiene und Straße zu nennen, da diese „flächendeckend“ Lärm hoher Intensität emittieren. Die Zerschneidung von Lebensräumen wird über den Lärm noch verstärkt. Regional nehmen aber auch die Flughäfen zunehmend Einfluss.

Doch auch in den Ozeanen ist Lärm inzwischen zum Problem geworden. Eine weltweit stetig zunehmende Handelsflotte sorgt für Lärm unter Wasser. Hinzu kommen militärische und explorative Sondierungen (zur Erkundung des Meeresgrunds nach Rohstoffen) mittels Schallbomben. Leidtragende sind vor allem hoch entwickelte Meeressäuger wie Wale und Delfine.

Biodiversität gerät auch lokal über die Emission von Abwärme in Gefahr. Dies gilt vor allem für Gewässer (bzw. Gewässerabschnitte) deren Wasser in erheblichen Mengen zur Kühlung von thermischen Kraftwerken oder Produktionsanlagen genutzt und mit erhöhter Temperatur wieder eingeleitet wird. In diesen Gewässern ergeben sich erhebliche Einschnitte in die bestehenden Ökosysteme. Die Probleme werden durch die zunehmende Klimaerwärmung noch verschärft, da die Gewässer mitunter erheblich weniger Wasser führen und damit die eingeleiteten Abwärmelasten mehr zur Wirkung kommen.

Zudem mag es auch zur Schädigung von Natur und Biodiversität über elektromagnetische oder ionisierende Strahlung kommen. Licht, Radioaktivität, „Elektrosmog“, nehmen ebenfalls Einfluss auf Erhalt von Natur und Biodiversität (vgl. Moller/Mousseau 2007). Die bekannten schädlichen Auswirkungen dürften allerdings weit geringer sein als die der oben genannten.

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 und der Zusammensetzung der Lebensformen – zumindest auf regionaler Ebene – mit sich. Regional zeigt sich oft ein Schwund heimischer Arten, gleichzeitig setzen global große Ströme der „Artenwanderung“ ein. „Es ist eine Zunahme einschneidender Beeinträchtigungen von Ökosystemen durch Faktoren wie Feuer, Dürre, Schädlingsbefall, Einwanderung von Arten, Stürmen und Ausbleichen der Korallenriffe zu erwarten. Durch Klimaänderung verursachte Belastungen drohen substanziellen Schaden oder völligen Verlust einiger einzigartiger Systeme und das Aussterben einiger bedrohter Arten zu verursachen, wenn sie zu anderen Belastungen auf ökologische Systeme hinzukommen.“ (IPCC 2001, zit. nach Klimaportal 2008). Die UNEP warnt „vor einem völligen Zusammenbruch der Fischbestände in den wichtigsten Fischfang-

zonen ohne Chance auf Erholung“, hervorgerufen durch das Zusammenspiel von Überfischung und Klimaerwärmung (vgl. Spiegelonline 2008a)³⁰.

Besonders betroffen zeigen sich klimasensible Zonen wie die Gebirgslagen oder die Randgebiete des Permafrosts. In warmen, trockenen Regionen droht Wüstenbildung. Aber auch der (globale) Anstieg der Wassertemperaturen nimmt starken Einfluss auf die dortigen, oft temperaturempfindlichen Lebensgemeinschaften.

Informatorische Beeinträchtigungen

In erster Näherung lassen sich informatorische Beeinträchtigungen dort finden, wo kleinste stoffliche oder energetische Dosen große (biologische) Auswirkungen nach sich ziehen. Diese lassen sich systemtheoretisch so beschreiben, dass ihre Wirkung nicht durch eine Modifizierung (Zerstörung) von Systemkomponenten, sondern regulatorisch über eine Informierung und Steuerung von Systemen ausgelöst wird. Dies kann sowohl auf genetischer, physiologischer oder auch ökosystemarer Ebene erfolgen.

Konkret lassen sich Beeinträchtigungen auf Ebene der Gene und Erbinformationen durch das Ausbringen von gentechnisch veränderten Organismen in die (natürliche) Umwelt vermuten und aufzeigen. Durch die unkontrollierte Ausbreitung des veränderten Erbgutes (bspw. über Pollenflug) sind umliegende Bestände verwandter Sorten durch Einkreuzung sortenfremder Erbinformationen bedroht. Oder aber die gentechnisch veränderten Organismen können über eingebaute Selektionsvorteile als invasive Art andere Arten (Sorten) verdrängen.

Viren und Krankheitserreger, die durch die erhöhten globalen Waren- und Personenströme verbreitet und endemische Arten bedrohen, schwächen oder gar ausrotten, können ebenfalls zu den informatorischen Beeinträchtigungen gezählt werden. Auch hormonaktive Substanzen und Arzneimittelrückstände, die auf stofflich-physiologischer Ebene Tiere und Pflanzen in geringsten Dosen beeinträchtigen, kann man unter diese Kategorie fassen. Diese Stoffe stammen vor allem aus der Tierzucht und Agrarwirtschaft. Gelangen sie in die Oberflächengewässer, so werden gerade (bestimmte) aquatische und amphibische Lebensformen bedroht. Die Auswirkungen dieser Stoffgruppen auf Tier- und Pflanzenwelt sind bislang allerdings wenig geforscht und bekannt³¹.

Ein umstrittenes Feld informatorischer Beeinträchtigungen bildet die (mögliche) Beeinflussung von Lebewesen über elektromagnetische Strahlungsarten („Elektrosmok“), die weit unterhalb der bekannten energetisch wirksamen Dosis bereits Wirkungen zeigt. Wissenschaftlich belastbare Nachweise sind selten (vgl. Steiermärkische Landesregierung 2008). Hinweise aber, dass in exponierten Lagen Tiere Verhaltensänderungen zeigen oder Tiere und Pflanzen öfter an (bestimmten) Krankheiten und Missbildungen leiden, gibt es reichlich (vgl. Puls-Schlag 2008; Arnetz et al. 2007).

³⁰ Und weiter: „Wir verspielen unsere wichtigste Nahrungsquelle, da weltweit etwa 2,6 Milliarden Menschen sich hauptsächlich von Fisch ernähren“ (Spiegelonline 2008a).

³¹ Worst-Case-Szenarien stellen ein Zusammenbrechen der ozeanischen Nahrungsketten in Aussicht.

Generell gilt, dass unter den Beeinträchtigungen die informatorischen bislang wissenschaftlich am wenigsten untersucht und belegt wurden. Das bedeutet aber nicht (zwingend), dass diese für Leben und Natur die vergleichsweise geringste Relevanz haben müssen. Es wäre durchaus denkbar, dass sich bezüglich informatorischer Wirkungen ein wissenschaftsimmanenter „blinder Fleck“ einer vorwiegend materiell-energetisch ausgerichteten Naturwissenschaft zeigt³².

Verlust natürlicher Arten und kultureller Biodiversität

Neben den oben genannten Beeinträchtigungen für Natur und Biodiversität, die sich – eher unbeabsichtigt und (lange) unbewusst – indirekt als Nebenfolgen eines fortschreitenden technisch-wirtschaftlichen Weltumgangs ergeben, lassen sich durchaus Fälle erkennen, in denen der Mensch direkt – und das mitunter durchaus bewusst und gewollt – Natur zerstört und Vielfalt reduziert. So werden ergänzend Problemlagen geschildert, die entweder als intendierte Folgen entstanden und entstehen oder aber unmittelbar an die Ziele der menschlichen Nutzung von Natur und Leben (bzw. von ökosystemaren Leistungen) gekoppelt sind.

Immer wieder wurden in der Menschheitsgeschichte Arten – meist höher entwickelte Tiere – in lokalen Beständen oder auch weltweit existenziell bedroht oder ausgerottet (vgl. WWF 2007)³³. Dies geschah entweder durch Bejagung und Befischung oder aber durch Bekämpfung von Schädlingen und „Fressfeinden“ (bspw. große Raubtiere). Auch heute sind Arten durch die Nutzung des Menschen direkt vom (kommerziellen) Aussterben bedroht (WWF 2008), wie bspw. manche Walbestände oder Speisefischarten. Eine in Science veröffentlichte Studie rechnet, dass bis im Jahre 2050 die Artenvielfalt und der Bestand aufgrund der industriellen Fischerei so drastisch sinken werden, dass kaum noch Speisefische und Meeresfrüchte gefangen werden können (Worm et al. 2005 u. 2006)³⁴. Unkontrollierte Bejagung und Befischung stellt im globalen Kontext auch heute noch den zentralen Faktoren für den Schwund Biodiversität dar (vgl. Streit 2007, 12f.).

Im Hinblick auf die Natur lässt sich mit zunehmendem technischen Fortschritt ein Schwinden natürlicher Landschaften, Lebensräume und Ökosysteme diagnostizieren. Der Verlust an biologischer Diversität ist allerdings nicht zwingend an einen Naturverlust geknüpft – wie die struktur- und artenreichen Kulturlandschaften Mitteleuropas zeigen. Der Rückgang der Diversität ist vielmehr mit dem Grad der Intensität der Landnutzung verbunden. Ein Sonderstatus kommt dem Verlust **kultureller Biodiversität** zu, obwohl diese Problematik im Naturschutz subsumiert wird. Es geht also auch um die Erhaltung und Weiterentwicklung jener künstlich geschaffenen, oder besser gesagt, kulturell überformten Biodiversität der Nutzpflanzen und -tiere.

³² Weitere ‚informatorische‘ Wirkungen auf Lebewesen und Lebensvorgänge werden abseits gängiger, etablierter (Natur-)Wissenschaft in Kreisen alternativer Forschung diskutiert. Konzeptionell hierzu bspw. Bechmann 2002 u. 2004.

³³ Hier besteht die (prinzipiell empirische) Schwierigkeit des Nachweises eines tatsächlichen Aussterbens einer Art an allen Orten der Erde. Pflanzensamen bspw. können teils Jahrzehnte keimfähig überdauern. Wenn der Bestand einer Art für die menschliche Nutzung zu klein geworden ist spricht man von „kommerziell ausgestorben“ (WWF 2007, 1).

³⁴ Die Studie steht (ihrer Methodik wegen) wissenschaftlich in der Kritik (vgl. bspw. Science 2007), dennoch ist man sich über die Größenordnung der Überfischungsproblematik weitgehend einig.

Eine industrialisierte und globalisierte Agrar-, Vieh-, Fischerei- und Forstwirtschaft führte in kurzer Zeit zu einem massiven Rückgang der im Laufe der Menschheitsgeschichte durch Züchtung erzielten Vielfalt. Bspw. gingen seit Beginn des 20. Jahrhunderts in den USA 6.000 Apfelsorten verloren. In Deutschland gehören heute 84% der gehaltenen Rinder „zu lediglich vier Rassen, obwohl es in Europa 100 unterschiedliche Rinderrassen gibt. Bei Schafen, Schweinen und Geflügel und anderen Nutzierrassen ist es ähnlich. In der Roten Liste der gefährdeten Nutzierrassen werden in Deutschland 19 Rassen als stark gefährdet und 64 Rassen als gefährdet eingestuft. Wenn diese Rassen aussterben, sind ihre Gene für zukünftige Züchtungen verloren.“ (BMU 2007, 12). Weltweit sind seit Beginn der Industrialisierung ca. 75% aller Kulturpflanzensorten unwiederbringlich ausgestorben.

Vor allem in armen Ländern aber ist die oft subsistent lebende Bevölkerung auf diese Biodiversität und den freien Zugang zu dieser angewiesen. Durch jahrhundertelange Züchtung erhaltene standortgerechte Arten und das Ausbringen einer Mischung verschiedener Nutzpflanzensorten garantieren dort selbst unter schwierigen Bedingungen zumindest ein Minimum an Ertrag. Aber auch für die industrielle Produktion erweist sich die Sortenarmut als gefährlich. Die Möglichkeiten zur Anpassung an veränderte Anforderungen, z.B. in Folge des Klimawandels sinkt, das Potential katastrophaler Ernteausfälle durch Krankheiten und Schädlinge steigt dagegen³⁵.

Möchte man ökosystemare Analogien bemühen, so kann man den Verlust an Diversität von Kulturpflanzen und Nutztieren als Folge eines ökonomisch gewollten und gelenkten Stromes invasiver Arten deuten, die die traditionellen Kulturrassen aufgrund ihrer besseren Anpasstheit an die Umgebung einer industrialisierten und globalisierten Marktwirtschaft verdrängten und weiterhin verdrängen. Vielfach ist dies weit mehr als eine Analogie nämlich gängige Praxis großer Konzerne, die explizit darauf abzielen bestehende Arten- und Sortenvielfalt zu beseitigen und durch einige wenige konzerneigene Sorten zu ersetzen.

Die Verdrängung vieler traditioneller Kulturpflanzen geht mit Privatisierung (von Kulturpflanzen und genetischen Ressourcen) und dem Bestreben großer Konzerne, hierüber Abhängigkeiten zu erzeugen, Hand in Hand. In der Tat nimmt industrielle Tier- und Pflanzenzucht von Großkonzernen entscheidenden Einfluss auf die Biodiversität von Kulturarten. So konzentriert sich bspw. die Geflügelzucht inzwischen weltweit in den Händen von nur vier global agierenden Unternehmen. Ähnliche Oligopole bilden sich in der Schweinezucht (vgl. hierzu Weber 2007). Mit der ökonomischen Vormachtstellung und der Patent- und Lizenzhoheit von Konzernen hinsichtlich genetischer Ressourcen von Nutzpflanzen und -tieren sind indes soziale, menschenrechtliche und ethische Fragen hoher Tragweite verknüpft. Im Rahmen der Internationalen Biodiversitätskonvention (CBD) wurde mit dem „Internationalen Vertrag über pflanzengenetische Ressourcen für Ernährung und Landwirtschaft“ versucht, diesbezüglichen heutigen und zukünftigen Missständen entgegenzuwirken.

Abschließend sei zu den Problemlagen bemerkt, dass sowohl räumliche, stoffliche als auch energetische und informatorische Beeinträchtigungen von Natur und Biodiversität drängende

³⁵ Die um 1840 in Europa grassierende Kartoffelfäule wurde in ihren katastrophalen Folgen (über eine Million Hungertote allein in Irland) begünstigt durch die Sortenarmut und genetische Nähe der Sorten. Sämtliche europäische Kartoffelsorten stammten lediglich von zwei Sorten ab.

Probleme in Deutschland, wie auch weltweit, hervorrufen. Für Deutschland – und andere wohlhabende, dicht besiedelte Länder – stehen die räumlichen Probleme heute insgesamt im Vordergrund. Weniger im deutschen dafür umso mehr im globalen Kontext stellen die Ausrottung natürlicher Arten durch Übernutzung und der enorme Rückgang an Diversität von Kulturpflanzen und Nutztieren – auch infolge deutschen Konsums – prekäre Probleme dar. Dies gilt vor allem aufgrund ihres hohen, direkten Nutzwerts und, damit verbunden, ihres sozialen Konfliktpotentials wegen.

Verursacher

Möchte man die Probleme im Handlungsfeld bestimmten „Verursachern“ – bzw. Produktionszweigen zuordnen, so lässt sich sagen, dass alle Sektoren: Landwirtschaft, Bausektor, Energiebereitstellung, industrielle Produktion, Ressourcenentnahme und Transport erhebliche Beeinträchtigungen im Bereich Naturschutz und Biodiversität hervorrufen. Besonders großen Einfluss haben in Deutschland die Landwirtschaft und der Bausektor ihrer hohen und intensiven Flächeninanspruchnahme wegen. Die Landwirtschaft trägt darüber hinaus durch das flächendeckende Ausbringen von Nähr- und Schadstoffen bei. Diese Hauptverursacherkonstellation mag typisch für dicht besiedelte, wohlhabende Räume mit ausdifferenzierten Umweltschutzregelungen sein, in Entwicklungs- und Schwellenländern aber dürften oft andere Konstellationen maßgeblich sein. So ziehen dort Ressourcenentnahme, Energiebereitstellung und industrielle Produktion sehr viel gewichtigere Probleme für Natur und Biodiversität nach sich, als das bspw. in Mitteleuropa oder Nordamerika der Fall ist (vgl. bspw. Blacksmith 2007).

Neben diesen Verursachern, die Natur und Biodiversität im Zuge ihres (technischen) Normalbetriebs schädigen, sei hier noch auf jene Beeinträchtigungen und Zerstörungen hingewiesen, die durch Unfälle verursacht werden. Unfälle können prinzipiell in allen Sektoren auftreten. Von besonderer Bedeutung sind die Bereiche der industriellen (chemischen) Produktion, der Transport gefährlicher Güter und die Energiebereitstellung durch Atomkraftwerke. Die Einflüsse bleiben meist lokal oder regional begrenzt, haben dort aber mitunter verheerende Auswirkungen, wie die Unfälle von Sandoz (1986), der Exxon Valdez (1989) und Erika (1999) oder Tschernobyl (1984; vgl. Moller/Mousseau 2007) zeigen.

8.1.3 Ziele des Naturschutzes und des Erhalts von Biodiversität

Angesichts der Problemlagen wurden und werden immer wieder von verschiedenen Seiten Ziele für den Erhalt von Natur und Biodiversität formuliert. Im Folgenden seien die wichtigsten auf deutscher und internationaler Ebene genannt. Ausgestaltung, Fokussierung, Konkretisierung, Verbindlichkeit, Legitimierung und Grad der Ausdifferenzierung unterscheiden sich dabei wesentlich.

In Artikel 1 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) sind die „Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege“ wie folgt benannt: „Natur und Landschaft sind auf Grund ihres eigenen Wertes und als Lebensgrundlagen des Menschen auch in Verantwortung für die künftigen Generationen im besiedelten und unbesiedelten Bereich so zu schützen, zu pflegen, zu entwickeln und, soweit erforderlich, wiederherzustellen, dass

1. die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts,

2. die Regenerationsfähigkeit und nachhaltige Nutzungsfähigkeit der Naturgüter,
3. die Tier- und Pflanzenwelt einschließlich ihrer Lebensstätten und Lebensräume sowie
4. die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft

auf Dauer gesichert sind“ (BNatSchG, § 1). Diese Ziele werden in Artikel 2 „Grundsätze des Naturschutzes und der Landschaftspflege“ weiter ausgeführt.

Über die Breite der anzustrebenden Ziele – und damit auch über die Komplexität der Problemlagen im Handlungsfeld Naturschutz und Biodiversität – gibt der Sachverständigenrat für Umweltfragen in seinem Sondergutachten „Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes“ Aufschluss. Hiernach sind im Bereich Erhalt von Natur und Biodiversität folgende Ziele in Deutschland prioritär anzustreben (vgl. SRU 2002, 41ff.):

1. Artenschutz (besonders gefährdete Arten, Arten mit gemeinschaftlicher Bedeutung)
2. Lebensraumschutz, Stabilisierung der Populationen und Erhaltung der genetischen Vielfalt (Schutzwürdige Biotop auf 10 bis 15 Prozent der Landfläche Deutschlands)
3. Fernhalten gebietsfremder Arten und Neubürger (Ausbreitungsstopp für risikoreiche Neubürger bis 2010)
4. Erhaltung historisch und ästhetisch wertvoller Landschaften (Rote Liste seltener und gefährdeter Landschaftstypen und wertvoller Landschaftselemente)
5. Schutz des Grundwasserdargebots (nachhaltige Bewirtschaftung, flächendeckend max. 50 mg Nitrat)
6. Verbesserung der Qualität der Oberflächengewässer (Stabilisierung aller Fließgewässer Güte I und oligotrophen Seen bis 2010)
7. Klimaschutz, Luftqualität (Schutz auf Organismen ausweiten)
8. Bodenschutz, Erosionsschutz, Schutz vor Bodenverdichtungen, Geotopschutz (Reduzierung der Bodenerosion und -verdichtung um 80% bis 2010)
9. Verminderung der Schadstoffeinträge in Ökosysteme (aus Dünge- und Pflanzenschutzmitteln)
10. Verminderung der Nährstoffeinträge in Ökosysteme (ausgeglichene Nährstoffbilanzen anstreben)
11. Reduzierung der Belastung der Naturgüter und -funktionen durch Flächeninanspruchnahme und Zerschneidung (Reduktion der Flächeninanspruchnahme auf 30 ha pro Tag bis 2020)
12. Gute fachliche Praxis (weitere Konkretisierung der Mindeststandards für Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft)
13. Natur- und landschaftsschonende Bewirtschaftung in empfindlichen Gebieten (dort Umstellung auf entsprechende Bewirtschaftung bis 2010)

Im Internationalen Kontext verpflichteten sich mit der „Convention on Biological Diversity (CBD)“ 189 Staaten auf die generelle Zielsetzung, natürliche Biodiversität zu erhalten, einen nachhaltigen Umgang mit ihr zu leisten und Wert und Nutzen aus den genetischen Ressourcen der Erde in fairer Weise zu teilen (vgl. UNEP 2001). Die Biodiversitätskonvention steht

dabei stark im Kontext der Armutsbekämpfung³⁶. Im Nachfolgeprozess der Biodiversitätskonvention wurden zu je spezifischen Themen (vgl. CBD 2008a) diese Ziele konkretisiert und teils quantifiziert.

Mit der im November 2007 beschlossenen „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ liegt erstmals in Deutschland „eine umfassende und anspruchsvolle Strategie zur Umsetzung des UN-Übereinkommens über die biologische Vielfalt vor, die rund 330 Ziele und rund 430 Maßnahmen zu allen biodiversitätsrelevanten Themen enthält.“ (BfN 2008):

„Unsere Vision für die Zukunft ist:

In Deutschland gibt es eine für unser Land typische Vielfalt von natürlichen sowie durch menschliches Handeln geprägte Landschaften, Lebensräumen und Lebensgemeinschaften, die in der Bevölkerung eine hohe Wertschätzung genießen. Die diesen Lebensräumen zugehörigen Arten existieren in überlebens- und langfristig anpassungsfähigen Populationen.

Unser Ziel ist:

Bis 2010 ist der Rückgang der Biodiversität gemäß dem EU-Ziel von Göteborg in Deutschland aufgehalten. Danach findet eine positive Trendentwicklung statt.“ (BMU 2007, 26).

Neben diesen hier aufgeführten Zielen gibt es eine Vielzahl weiterer auf unterschiedlichen politischen und geographischen Ebenen. Die oben benannten Zielsysteme der CBD, des Naturschutzgesetzes und der Biodiversitätsstrategie aber dürften für Deutschland (und global) diejenigen der größten Tragweite und Legitimität darstellen. Neben der Richtung lassen die Ziele auch die Entfernungen erahnen, die auf dem Weg hin zu einer Realisierung von Naturschutz und Biodiversität in der Erfüllung dieser Ziele noch zurückzulegen sind. Im Kontext des vorliegenden Projektes bieten die Ziele Referenzpunkte für die Forschung, Entwicklung und Etablierung von Umwelttechnologien. Anhand der Zielsysteme lassen sich Stand und (möglicher) Beitrag von Umwelttechnologien im Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ bewerten und letztlich auch Handlungsempfehlungen entwickeln.

³⁶ “In April 2002, the Parties to the Convention committed themselves to achieve by 2010 a significant reduction of the current rate of biodiversity loss at the global, regional and national level as a contribution to poverty alleviation and to the benefit of all life on Earth.” (CBD 2008)

8.2 Meilensteine, wesentliche Entwicklungen und Hemmnisse

Im Folgenden werden wesentliche Entwicklungen und Hemmnisse sowohl zum Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ als auch zu diesbezüglichen Techniken skizziert.

8.2.1 Meilensteine

Im internationalen und nationalen Kontext lassen sich auf dem Weg zu einer Bewahrung von Biodiversität und Natur folgende wichtige Ereignisse lokalisieren.

1962: Als Vorbote einer ökologischen Bewegung alarmierte der Roman „Silent Spring“ (Carson 1962) die Weltöffentlichkeit und brachte damit viele Umweltschutz-Aktivitäten ins Rollen. Der Titel bringt dabei dramatisch die Folgen zerstörter Biodiversität ins Bewusstsein.

1972: Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) wurde „als Stimme der Umwelt bei den Vereinten Nationen“ ins Leben gerufen. Hinsichtlich Biodiversität spielt hier das World Conservation Monitoring Centre mit seinen Veröffentlichungen zu Ecosystem und Biodiversity Assessment eine bedeutende Rolle (s. UNEP/WCMS 2008). In den frühen 1970er Jahre nahm das „Man and the Biosphere Programme“ der UNESCO seinen Anfang.

1975: Als Reaktion auf das (drohende) Aussterben vieler (hochentwickelter) Tierarten tritt das „Washingtoner Artenschutzabkommen“ (CITES) in Kraft und reglementiert den internationalen Handel mit (geschützten) Tier- und Pflanzenarten.

1992: In Rio de Janeiro findet mit der Unterzeichnung der „Biodiversitätskonvention (CBD)“ ein Vertragswerk Eingang in die internationale Politik, das (in dessen Folgeprozess, COPs) bis heute die Anstrengungen auf dem Gebiet der Biodiversität maßgeblich leitet. Bislang wurde das Abkommen von 189 Staaten und der EU unterzeichnet. Auf EU-Ebene wird die „Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie“ (FFHR) erlassen. Diese beinhaltet unter anderem auch das wirkungsvolle Konzept „Natura 2000“ zur Schaffung eines zusammenhängenden Netzes geschützter Gebiete.

1998: Von der EU-Kommission wird die „EU-Biodiversitätsstrategie (EC Biodiversity Strategy)“ verabschiedet.

2001: Auf Basis der EU-Biodiversitätsstrategie werden Aktionspläne zu den Bereichen „Landwirtschaft“, „Fischerei“, „Schutz der natürlichen Ressourcen“ und „Entwicklung und wirtschaftliche Zusammenarbeit“ und die „Europäische Strategie zum Schutz der Pflanzen“ vorgelegt. Beim EU-Gipfel in Göteborg wird im Rahmen der europäischen Nachhaltigkeitsstrategie beschlossen, den Verlust an Biodiversität bis zum Jahr 2010 zu stoppen.

2002: Beim Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg wird der Beschluss gefasst, dass die gegenwärtige Verlustrate an Biodiversität bis zum Jahr 2010 deutlich reduziert werden soll.

2003: Das „Cartagena-Protokoll“ tritt in Kraft. In diesem internationalen Abkommen (bislang 143 Vertragsparteien) werden völkerrechtlich bindend der grenzüberschreitende Transport, die Handhabung und der Umgang mit gentechnisch veränderten Organismen geregelt. Der

Internationale Vertrag (2001) über pflanzengenetische Ressourcen für Ernährung und Landwirtschaft wird auch in Deutschland gesetzlich verankert.

2006: Nach der „Malahide-Konferenz“ (2004) werden weitere Anstrengungen von der EU in Richtung Biodiversität unternommen (Aktionsplan, Leitindikatoren, KOM(2006) 216).

2007: EU-Rat und EU-Parlament zeichnen das „LIFE+ Umweltförderungsprogramm 2007-13“ ab. Das Programmbudget von über zwei Milliarden Euro ist zentral für die Finanzierung von „Natura 2000“ und wird mindestens zur Hälfte für Biodiversitätsprojekte bereitgestellt.

Für Deutschland zeigen sich des Weiteren folgende Gegebenheiten als wichtig für das Vorranschreiten in Naturschutz und Biodiversität. Im Bereich der Land- und Forstwirtschaft wurden, initiiert durch die Agrarreform der EU 1992, Agrarumweltmaßnahmen sukzessiv befördert und die Zusammenarbeit zwischen Landwirtschaft und Landschaftsschutz ausgebaut. Eigene nationale Programme, wie das zur „Erhaltung und nachhaltigen Nutzung der genetischen Ressourcen für Ernährung, Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft“ (1999) und eine „Sektorstrategie Forstwirtschaft und biologische Vielfalt“ (2000) wurden entwickelt.

In jüngster Vergangenheit sind als Motor und Impulsgeber für den Erhalt von Natur und Biodiversität die Gründung der alle gesellschaftlichen Bereiche übergreifenden „Naturallianz“, sowie herausragend die „Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt“ (beide 2007) zu nennen. Mit der im November 2007 beschlossenen Nationalen Strategie erfüllt Deutschland Artikel 6 der Biodiversitätskonvention und gleichzeitig die Hauptforderung des Sachverständigenrates für Umweltfragen von 2002 nach einer umfassenden, konsistenten Strategie³⁷. Mit dem Umsetzungsprozess der Nationalen Biodiversitätsstrategie wurde bereits Anfang 2008 begonnen. Des Weiteren entfaltet die 2008 in Bonn auszurichtende 9. Vertragsstaatenkonferenz der CBD bereits im Vorfeld Wirkung. So werden bspw. Umweltschutzaktivitäten auf das Feld „Naturschutz und Biodiversität“ fokussiert und gestärkt.

Neben diesen speziell auf Erhalt von Natur und Biodiversität ausgerichteten politischen Ereignissen sind eine ganze Reihe anderer mit zunächst anderen Zielrichtungen – bspw. hinsichtlich der einzelnen Umweltmedien (Luft, Wasser, Boden), wie die „EU-Wasserrahmenrichtlinie“ oder das „Bundes-Bodenschutzgesetz“ auch bezüglich der Verbesserung des Zustandes von Natur und Biodiversität von hoher Bedeutung. Erwähnt seien hier beispielhaft für den Bereich Wasser noch die internationalen Gewässerschutzkommissionen.

8.2.2 Schwierigkeiten in der Umsetzung von Naturschutz und Biodiversität

Die sehr positive Entwicklung der letzten zwei Jahrzehnte im Bereich politischer Bemühungen um Naturschutz und Biodiversität darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich der Zustand von Natur und Biodiversität faktisch hoch defizitär erweist³⁸. So zeigen die politischen Bemühungen vielmehr die Dringlichkeit notwendigen Handelns, denn das Erreichen von Zielen und die Realisierung von Naturschutz und Biodiversität auf.

³⁷ Dies gilt zumindest für den Erhalt der Biodiversität – nicht aber für den Naturschutz insgesamt.

³⁸ „Trotz dieser Erfolge und erheblicher Anstrengungen aller staatlichen Ebenen, von Verbänden und weiteren privaten Akteuren auf Seiten der Naturnutzung wie des Naturschutzes und trotz bereits erreichter Fortschritte besteht allerdings noch erheblicher Handlungsbedarf.“ (BMU 2007, 25).

Hemmend wirkten sich bis vor kurzem der Mangel an bindenden Zielvereinbarungen sowie Akzeptanzprobleme bei der Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen aus (vgl. SRU 2002, 12). Die Ende 2007 verabschiedete Nationale Biodiversitätsstrategie wirkt zumindest diesem Mangel entgegen. Eine erfolgreiche Umsetzung der Ziele und Maßnahmen muss sich aber zukünftig noch erweisen.

Nach wie vor ist der Naturschutz mit Akzeptanzdefiziten belastet. Dabei mangelt es nicht an genereller Akzeptanz. Umfragen zufolge stößt der Naturschutzgedanke auf breite Zustimmung, sondern an der konkreten Akzeptanz vor Ort bei der Realisierung von Naturschutz. Dieses Phänomen ist in der Ethik und TA weithin als NIMBY-Phänomen („Not In My Backyard“) bekannt und trifft die meisten Umweltschutzmaßnahmen. Bei Naturschutz und Biodiversität aber ist es extrem ausgeprägt. Ein Grund mag in der mangelnden Gegenständlichkeit und Evidenz des konkreten Nutzens von „Natur“ und „Biodiversität“ liegen.

Hinzu kommen, dass bei der Verwirklichung von Naturschutzziele nicht nur „harte“ Interessengegensätze aufgrund von Nutzungskonflikten oder finanziellen Einbußen aufeinander stoßen, sondern eben auch unterschiedlichen Wertvorstellungen und Weltbilder.

Insgesamt lassen sich fünf hauptsächliche Argumentationsmuster für Akzeptanzdefizite finden (SRU 2002, 45):

1. Ökonomische Nachteile bzw. ungünstige Rahmenbedingungen finanzieller und organisatorischer Art,
2. mangelnde Vertrautheit mit Naturschutzziele,
3. konträre Werthaltungen und Überzeugungen,
4. Kommunikationsformen, die von den Beteiligten als unbefriedigend oder als autoritär erlebt werden und
5. Angst vor Verhaltenseinschränkungen, Bevormundung und Fremdbestimmung.

Naturschutzbemühungen scheitern zudem oft nicht an sachlichen Gründen, sondern an emotionalen. Ästhetische Empfindungen spielen dabei eine große Rolle. Generell schwingt in der Akzeptanzproblematik indes das Naturverständnis der Moderne, einer „Kultur als Gegennatur“ mit: Wer Naturschutz betreibt, betreibt Kulturkritik. Wer für Natur ist, ist gegen Kultur und Technik (s.u.). Nicht zuletzt diese Schwierigkeiten führen dazu, dass Naturschutz und Biodiversität in Politik, Forschung, Wirtschaft – und damit auch in der Technikentwicklung – zu wenig Berücksichtigung finden und im Konfliktfall meist andere Zielsetzungen priorisiert werden.

8.2.3 Naturschutztechnologien und Biodiversitätstechnologien – Grundsätzliche Hemmnisse

Ausgehend von der Bestandsaufnahme, dass sich nur sehr wenige Sachtechniken und noch weniger Hightech im Bereich des Naturschutzes finden lassen, und dass nahezu keine ausgesprochenen Naturschutztechnologien oder Biodiversitätstechnologien entwickelt werden (s. Kap. 8.3), liegt die Vermutung nahe, dass prinzipielle Hemmnisse zur Entwicklung solcher Sachtechniken bestehen müssen. Und in der Tat lassen sich solche „grundsätzlichen“ Hemmnisse auf jener Denk-, Begründungs- und Handlungsebene der kulturellen Gewissheiten und kollektiven Weltbilder finden (vgl. Parodi 2006, Kap. 3 u. 4).

Zur Erläuterung: „Ursachen“ von Umweltproblemen lassen sich auf drei unterschiedlichen Begründungsebenen ausmachen: 1.) einer naturwissenschaftlich-technischen Ebene; 2) einer gesellschaftlichen Ebene (soziale, ökonomische, rechtliche Aspekte); oder 3) einer Ebene der kulturellen und sozialpsychologischen Verfasstheiten, die Umweltprobleme als Folge von Weltbildern und weltbildgeprägtem Wahrnehmen, von Vorstellungen, Einstellungen und Denkwesen erkennt. Zur Veranschaulichung, das Problem „Waldsterben“ kann wie folgt unterschiedlich begründet werden: „Der Wald stirbt aufgrund des technisch bedingten sauren Regens“ (Ebene 1). „Der Wald stirbt aufgrund des wirtschaftlich-politisch-rechtlichen Rahmens, welcher Technik steuert“ (Ebene 2). „Der Wald stirbt als Folge der Vorherrschaft eines neuzeitlich anthropozentristischen, rationalistisch-sensualistischen Weltbildes“, welches dem gesellschaftlichen Rahmen und der Sachtechnik zugrunde liegt (Ebene 3) (vgl. Weizsäcker 1977, 63f.).

Hemmnisse und damit Gründe für den Mangel an Naturschutz- und Biodiversitätstechniken lassen sich nun auf jener dritten Begründungsebene der kulturellen Gewissheiten ausmachen. Die grundlegende Auffassung von Kultur als *Gegennatur*, die dem Weltbild der Moderne eigen ist (vgl. Großklaus/Oldemeyer 1983), sowie die daraus erwachsende prinzipielle Gegennatürlichkeit von Technik und einer damit verbundenen Vorstellung der Unvereinbarkeit von Technik und Natur hemmt letztlich die Entwicklung von „Naturtechniken“ oder „Naturschutztechniken“³⁹.

In der abendländischen Kulturgeschichte bildet der Technikbegriff seit Einsetzen der Moderne den Gegenbegriff zu „Natur“. Und auch unserem heutigen kulturellen Selbstverständnis nach wird Technik gemeinhin Natur entgegengesetzt. Leben und gerade die Vielfalt und überbordende Fruchtbarkeit von Leben („Wildnis“) wird dabei als Kern und Domäne von Natur aufgefasst. Mit Beginn der Moderne wird Technik (in Gefolge der Naturwissenschaften) zum zentralen kulturellen Programm. Inhalt dessen ist die möglichst weitgehende Herrschaft über die Natur sowie deren Ausbeutung. So lassen auch heute gängige „Technikdefinitionen“ das Gegeneinander deutlich erkennen: „Technik ist eben nichts anderes als die Überwindung der Natur durch das menschliche Bewußtsein. [...] Die Gegennatürlichkeit der Technik ist prinzipiell“ (Ropohl, zit. nach Huber 1989, 35). Auch in der zeitgenössischen Philosophie wird also in der Begriffsbestimmung von Technik auf ihre Gegennatürlichkeit abgehoben. „Technik wird im Gegensatz zu Natur“ verstanden (Precht/Burkhard 1996, 512). Oder, ganz im Stile Baconscher Naturbeherrschung: Technik „ist die Ausbeutung der Naturschätze und Naturkräfte im Dienste menschlicher Bedarfsdeckung“ (Brugger 1998, 393).

Diese der Technik zugeschriebene Gegennatürlichkeit und Ausbeutung der Natur sind indes nicht nur geisteswissenschaftliche Blüten, sondern spiegeln durchaus die heutige materiale Welt der Technik wider. Nicht von ungefähr zeigt sich der technisierte Weltumgang des Menschen nicht nur begrifflich, sondern auch faktisch als Hauptursache für das Schwinden von Natur und Biodiversität. So wie die sozialen Rahmenbedingungen (naturwissenschaftliche)

³⁹ Hinweis auf diese weitreichende (bzw. tiefgreifende) Unvereinbarkeit zeigt sich bereits im sprachlichen Unbehagen an den Begriffen ‚Naturtechnik‘ und ‚Naturschutztechnik‘.

Sachtechnik bedingen, so liegen dieser (und den sozialen Institutionen) die grundlegenden Vorstellungen und Einstellungen von und über die Welt („Weltbilder“) zu Grunde⁴⁰.

So wirkt das weit verbreitete kulturelle Verständnis von *Technik als Gegennatur* – das sowohl (meist unbewusst und implizit) der Technikentwicklung als auch dem gesellschaftlichen Rahmen deren Steuerung zugrunde liegt – der Entwicklung von Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität entgegen. Im Ausgangspunkt stehen somit Naturschutz und Technik – belastet durch die kulturelle Hypothek der Moderne – in Sinn- und Zweck diametral und unvereinbar zueinander⁴¹.

8.2.4 Lösungswege

Je nachdem, welcher Begründungsebene man folgt, bzw. welche Begründungsebene man in den Vordergrund rückt, lassen sich Umweltprobleme unterschiedlich fassen (und begründen) und sehen „Lösungen“ für Umweltprobleme anders aus, werden Sachtechniken, gesellschaftliche Steuerungsinstrumente oder die Änderung der kulturellen Deutungsmuster („Bewusstsein“, Weltbilder) im Zuge von Aufklärung oder Bildung als Mittel der Wahl präferiert.

Entwickelt man Umwelttechnologien, ohne Rahmenbedingungen und Weltbild zu ändern, so werden deren positive Wirkungen früher oder später kompensiert („Rebound Effekt“)⁴². Ändert man Weltbild und Naturverständnis, ohne dies gesellschaftlich zu institutionalisieren und letztlich auch dementsprechende Sachtechniken zu entwickeln, bleiben die vorhandenen Umweltprobleme schlicht bestehen. Für eine dauerhaft tragfähige Lösung bedarf es meist des Dreiklangs der Änderungen auf sachtechnischer, gesellschaftlicher und kultureller Ebene.

Dem soll im Rahmen dieses Projektes zumindest soweit Rechnung getragen werden, insofern nicht nur Sachtechniken, sondern auch Sozialtechniken (s.u.) als mögliche Lösungswege für Umweltprobleme in den Blick genommen werden. Geschehe dies nicht, würde das Projekt (im Handlungsfeld „Naturschutz und Biodiversität“) Gefahr laufen, hinter dem Erkenntnisstand der Wissenschaft zurückzubleiben, dem projekteigenen Ziel der Lösung von Umweltproblemen zuwider zu laufen und auch einen damit anvisierten Nachhaltigkeitsgedanken zu verfehlen.

Nimmt man die Gegennatürlichkeit von Technik, wie auch die unseres gesellschaftlichen Handlungsvollzugs, als gegeben, dann fragt man sich: Was bleibt zu tun? Nicht das Unwissen über Natur(vorgänge) sondern die eigene – natur- und biodiversitätsmissachtende – kulturelle Lebensweise, rückt in den Fokus.

Möchte man Lösungen zum Erhalt und Befördern von Natur und Biodiversität entwickeln, so sind vor allem Instrumente einschlägig, die nicht – wie bei Sachtechniken überwiegend der

⁴⁰ welche sich ihrerseits wieder aus den gegebenen Sachtechniken und sozialen Institutionen speisen.

⁴¹ Nun sind die Dinge im Wandel, und sowohl der Technikbegriff als auch der Naturbegriff – sowie die damit verknüpften Weltbilder, Vorstellungen und Wertungen – lösen sich heute langsam von dieser Dichotomie (vgl. bspw. Parodi 2006).

⁴² Man denke nur an die Überkompensation in der Motorentchnik, wo höhere Effizienz durch mehr Leistung kompensiert wird.

Fall – Natur bzw. Naturzusammenhänge kontrollieren, sondern Instrumente, die auf die kulturelle Sphäre des Menschen abzielen und dort auf eine Kontrolle und Lenkung dessen Aktivitäten gegenüber seiner Umwelt ausgerichtet sind. Nicht nur Natur, vielmehr (unsere) Kultur muss heute in ihrem (technischen) Weltumgang und ihrer Naturnutzung beherrscht werden. Es bedarf also Techniken, die Technik kontrollieren. Solche (Kontroll- und Regelungs-) Instrumente sind üblicherweise in institutionalisierten Handlungsmustern, wie bspw. Gesetzen, Verordnungen, Governance-Konzepten, Planungsverfahren, Managementregeln oder Raumordnungsplänen gegeben.

All jene Instrumente, die institutionalisiert auf gesetzlichen, politischen oder ökonomischen Wegen gesellschaftliche Belange zu steuern oder restringieren suchen, sind für das Handlungsfeld „Naturschutz und Biodiversität“ von zentraler Bedeutung. Sie werden in einem weiten Technikverständnis⁴³ – und in deren Ausrichtung auf gesellschaftliche Belange hin – im Weiteren 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) Zusammenhänge⁴⁴.

8.3 Lösungen – Techniken und neue technologische Entwicklungen

Im Folgenden werden heutige und zukünftige Umwelttechniken angeführt, die sich positiv auf den heutigen Zustand von Natur und Biodiversität auswirken, das heißt in Richtung der in Kap. 8.1.3 angedeuteten Ziele wirken und zukünftig wirken können. Allerdings wurden und werden die wenigsten dieser Techniken explizit auf eine Stärkung von Natur und Biodiversität hin entwickelt. Meist stehen andere, konkretere Nutz- oder Umweltschutzziele im Vordergrund, bildet der Erhalt von Natur und Biodiversität – wenn überhaupt – ein nachrangiges Ziel. So werden im Folgenden Techniken mit unmittelbarem Bezug zu Naturschutz und Biodiversität (Kap. 8.3.1) von solchen mit nur mittelbarem (Kap. 8.3.2) unterschieden.

Es gibt eine ganze Reihe technischer Komponenten, die hochspezifisch dem Schutz einzelner Arten dienen. Diese hochspezifischen technischen Maßnahmen⁴⁵ sind sicherlich in ihrer Gesamtheit wichtig für Natur und Biodiversität, im Kontext des Projektes – bei dem es um

⁴³ Dieses folgt einem technikphilosophisch (weiten) Verständnis, das Technik nicht nur als Sachtechnik sondern als öko-soziotechnische Systeme auffasst und in dessen Kern Technik als reproduzierendes Handeln verankert ist. Zudem steht eine solch weite Technikauffassung auch mit einem abstrakten Luhmannschen Technikverständnis in Einklang, das Technik als „Vorgang effektiver Isolierung“ im „Ausschalten der Welt-im-übrigen“ kennzeichnet. „Die maßgebende Unterscheidung, die die Form »Technik« bestimmt, ist nun die zwischen kontrollierbaren und unkontrollierbaren Sachverhalten. Extrem abstrakt formuliert, geht es also um gelingende Reduktion von Komplexität.“ (Luhmann 1997, 524f.).

⁴⁴ Tiefgreifendere Lösungsansätze – auf Ebenen der kulturellen Gewissheiten – werden hier nicht weiter in Betracht gezogen. Es sei nur vermerkt, dass sich um den naturausbeuterischen Weltumgang zu beenden, ein wesentlich anderes Natur- (und Kultur-)Verständnis etablieren müsste. Dies müsste wesentlich an der Aufhebung der dichotomen Natur-Kultur-Trennung ausgerichtet sein.

⁴⁵ Oftmals orientieren sich solche an den spezifischen Bedürfnissen einer speziellen Art oder Familie, z. B. Nisthilfen wie Spatzenhaus, Baumläuferhöhle, Mauersegler-Nistkasten, Schwalben-Lehmbau, Schleiereulen-Kasten, etc. (NABU 2008a).

wesentliche Probleme und herausragende Technikentwicklungen geht – aber nicht einschlägig. Deshalb werden im Folgenden keine dieser hochspezifischen „Artenschutztechniken“ berücksichtigt, sondern nur Techniken, die auf einem höheren Aggregationslevel wirken und etwa viele verschiedene Arten oder Genressourcen, Landschaften oder Ökosysteme zu erhalten helfen.

8.3.1 Genuine und unmittelbare Techniken zum Schutz von Natur und Biodiversität

Hierunter sollen zunächst Techniken gefasst werden, deren vordringliches und explizites Ziel ist, Natur oder Biodiversität unmittelbar zu befördern⁴⁶. Solche Techniken, die genuin zum Schutz und Erhalt von Natur und natürlicher Biodiversität entwickelt wurden und werden (wie bspw. der Naturnahe Wasserbau), sind äußerst selten und haben meist keinen Hightech-Charakter. Etwas anders verhält es sich hinsichtlich der Diversitätssteigerung bei Kulturpflanzen und Nutztieren. Hier sind gerade erhebliche technische Entwicklungen im Gange mit zumindest teilweise deutlichem Hightech-Bezug. Neben diesen seltenen *genuinen* Naturschutz- und/oder Biodiversitätstechniken werden hier ebenfalls Techniken aufgeführt, die in ihrer breiten Anwendung *unmittelbar* stark positiven Einfluss auf Natur und Biodiversität haben oder zukünftig haben könnten.

Naturnaher Wasserbau

Flüsse und Seen wurden in Deutschland im Laufe der Geschichte starker Nutzung und Überformung unterzogen, die sich extrem nachteilig auf Naturbestand und Biodiversität auswirkten und auswirken. Flussläufe wurden „korrigiert“, Staustufen errichtet, Fließdynamik eliminiert, Ufer und Feuchtgebiete zerstört, Seen „überdüngt“ (s. Kapitel 4.3.3). Dabei kommt den Gewässern und Gewässerlandschaften hinsichtlich Naturschutz und Biodiversität als Lebensraum, natürliches Transportmedium und als „Lebensadern“ eine zentrale Rolle zu⁴⁷.

Naturnaher Wasserbau trägt als Kombination von ökologischen und technischen Maßnahmen diesen entstandenen Defiziten Rechnung und damit auf vielen Ebenen zum Erhalt der Biodiversität bei. Über Strukturvielfalt und Durchgängigkeit der Gewässerläufe, sowie über den Anschluss der umgebenden Landschaft an die Gewässer, erhöht sich sowohl die Artenvielfalt als auch die Vielfalt der Habitate. Neben dem direkten Artenschutz (über Fischtrepfen, Fischunterstände, Rauhe Rampen, Störsteine, vielfältige Uferstrukturen etc.) werden im Naturnahen Wasserbau auch jene basalen Funktionen von Biodiversität „die Aufrechterhaltung grundlegender ökosystemarer Prozesse wie z.B. den Wasser- und Kohlenstoffkreislauf,

⁴⁶ Techniken, die mittelbar stark positive Wirkungen auf Erhalt von Natur und Biodiversität zeigen, nicht aber vordringlich mit diesem Ziel entwickelt wurden/werden, werden im Folgekapitel 8.3.2 behandelt.

⁴⁷ Natürliche oder naturnahe Fließgewässer nehmen bezüglich der Habitate gleich eine Vierfachrolle ein. Zunächst stellt das Gewässer selbst mit seinem Flusslauf und der umgebenden Feuchtzone artenreiche Habitate, dann trägt es beispielsweise über den Grundwasseraustausch essentiell zum Bestehen angrenzender Habitate im Tal bei, durch seine Fließdynamik wälzt es ufernahe Lebensräume um, schafft, zerstört und verlegt diese im kleinräumigen Maßstab (z. B. Uferabbrüche als Nistplätze für Eisvögel). Letztlich trägt ein Fließgewässer als „Medium“ zur Vernetzung aquatischer und nicht-aquatischer Lebensräume bei (z. B. als Transportmedium für Weidensamen).

die Absorption und Umwandlung von Schadstoffen, die Bodenbildung und das Entstehen von Biomasse“ (Kopfmüller et al. 2001, 222) unterstützt. So lässt sich bspw. die (chemisch-biologische) Wassergüteklasse eines Gewässers merklich steigern, allein indem man einen entsprechenden Gewässerabschnitt renaturiert⁴⁸. Weitere wasserbauliche Techniken, die direkt auf den Erhalt bzw. die Wiederherstellung von Natur und Biodiversität abzielen, sind unter anderen die Lebensicherung der Ufer, das Einbringen oder Belassen von Totholz in Bach- und Flussläufen, die Bepflanzung der Tallage mit standorttypischen Gewächsen, die Nasslagerung von zeitweise entnommenem Sediment zum Erhalt der sedimentären Biozönose oder auch das korrektive Anheben von Sohle und Wasserspiegel⁴⁹ zur Hebung des Grundwasserspiegels und zur Revitalisierung von Altarmen/Aubereichen.

Die im naturnahen Wasserbau installierten technischen Artefakte sind überwiegend „Lowtech“ und damit allermeist auch vergleichsweise kostengünstige Lösungen (vgl. Abb. 17 und 18). Einfach bzw. „Lowtech“ sind diese Techniken aber insofern nicht, wenn man den Weg ihrer Genese als Umsetzung naturwissenschaftlicher und angewandter Forschung betrachtet. Viele dieser naturnahen, letztlich „einfachen“ technischen Lösungen sind Ergebnis jahrelanger (Grundlagen-)Forschung zu Strömungsverhalten, zum Verhalten von Tierarten und Ökosystemen, und wären undenkbar ohne hochmoderne Forschungsapparaturen, Simulationstechniken und Messinstrumente. Allgemein wird hier die These gewagt, dass der heutige naturnahe Ausbau von Fließgewässern (unter Beibehaltung der gewünschten anderen wasserwirtschaftlichen Funktionen wie bspw. Hochwasserschutz) ohne den Einsatz zeitgemäßer Hightech (vor allem moderner Mess-, Informations- und Kommunikationstechniken) schlicht unmöglich wäre. Am Naturnahen Wasserbau zeigt sich beispielhaft in aller Deutlichkeit, was für viele Bereiche des Handlungsfelds „Erhalt von Natur und Biodiversität“ gilt: Es geht um die Förderung und Etablierung von High Science für Lowtech.

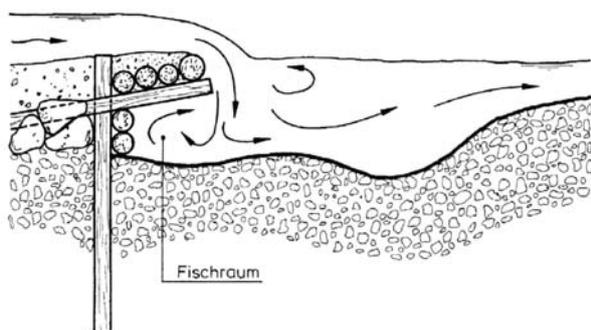


Abbildung 17: Naturnahe, technische Maßnahme zur Schaffung von „Lebensraum“ für Fische (Quelle: Lecher et al. 2001, 440)

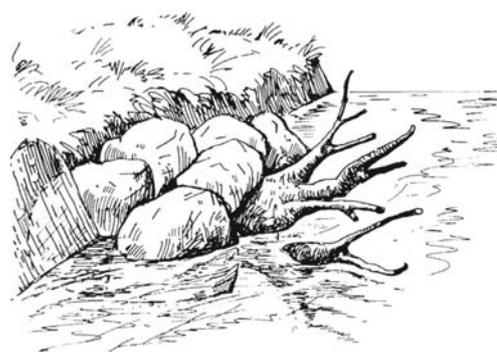


Abbildung 18: Eingebauter Wurzelstock als naturnahe Technik zur Fließgewässerleitung und Uferschutz (Quelle: Patt et al. 1998, 230)

⁴⁸ Langjährigen Erfahrungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, nach um etwa eine Wassergüteklasse.

⁴⁹ Am Oberrhein beispielsweise ist die Korrespondenz von Fluss- und Grundwasser am Gewässerlauf erheblich gestört, nachdem sich das Flussbett aufgrund der Begradigung und der massivwasserbaulichen Eingriffe im Laufe der Jahrzehnte um bis zu acht Meter eingegraben hat.

Naturnaher Wasserbau ist – als Strauß von Einzeltechniken zur Erlangung eines naturnah-ökologischen („ökonatürlichen“ Parodi 2006) Zustandes – in Forschung und Entwicklung bereits sehr weit gediehen. Es gilt jedoch, naturnahe Wasserbautechnik, dort wo sie installiert wird, immer der herrschenden naturräumlichen, ökosystemaren und zivilisatorischen Situation anzupassen. Diese Anpassung gelingt aber nur durch intensive Beforschung der jeweils gegebenen Situation (im Vorfeld) und der weitsichtigen Auswahl und Anpassung der zur Verfügung stehenden wasserbautechnischen Komponenten.

Hemmnisse in der Etablierung und Verbreitung naturnaher Wasserbautechnik liegen in den konkurrierenden Ansprüchen an die Gewässer (bspw. Transport, Energieerzeugung und Inanspruchnahme von Flächen in Tallagen). Treiber für die Entwicklung und Verbreitung naturnahen Wasserbaus sind die gesetzlich verankerte EU-Wasserrahmenrichtlinie mit ihrer verbindlichen Forderung nach einem „guten Gewässerzustand“ bis 2015 sowie die zunehmende (Wahrnehmung der) Hochwasserproblematik in der Öffentlichkeit.

Verkehrstechnik

Um räumliche Beeinträchtigungen gerade in dicht besiedelten Regionen wie Deutschland abzumildern, bedarf es Änderungen in der Verkehrs- und der Verkehrswegetechnik. Es geht zum einen darum, Verkehr zu vermeiden und effizienter zu gestalten und andererseits Verkehrs- und Wegetechnik Natur- und Lebensraum-verträglicher zu gestalten. Hierfür liegen viele technische und logistische Konzepte in den Schubladen, wenige aber finden (heute) den Weg in die flächendeckende Anwendung.

Auf Ebene der Verkehrsinfrastruktur zählt hierzu die raumplanerische und umwelttechnische Maßnahme der Bündelung von Verkehrswegen, die explizit darauf abzielt, den Flächenverbrauch und Zerschneidungseffekt für Lebensräume zu verringern. Bei der Planung neuer Verkehrswege findet dieser planerische Grundsatz bereits Anwendung. Einer flächendeckenden Verwirklichung aber stehen in Deutschland die Funktionsdichte der Nutzungen und die Langlebigkeit der Verkehrsinfrastruktur sowie deren inhärente „Systemzwänge“ im Wege.

Neben der bloßen Bündelung etablierter Verkehrswegetechniken (Straße, Schiene, Wasserstraßen) könnte sich in fernerer Zukunft (jenseits 2020) für den Erhalt von Natur und Biodiversität auch die Entwicklung gänzlich neuer Verkehrssysteme wirksam zeigen. Entlastungseffekte ließen sich zum einen durch Konvergenzen erzielen, zum anderen durch die Verlagerung der Verkehrswege in weniger sensible Lebensräume (s.u. „Geotechniken“). Positive Effekte durch bspw. eine effiziente, verkehrs- und flächensparende Wegeauslastung ließen sich zum einen über die (technische) Zusammenführung von Individual- und Kollektivverkehr realisieren. Zum anderen könnte eine Konvergenz der Wegetechniken „Schiene“ und „Straße“ zu enormen Flächeneinsparungen führen. Durch Verlagerung der Verkehrswege vom Boden in den Untergrund oder in den bodennahen Luftraum, könnte die Flächeninanspruchnahme und der Zerschneidungseffekt von Verkehrsflächen minimiert werden, und so die biodiversen Ökosysteme am Boden geschont werden. Denkbar wäre so bspw. ein kleines (leises) Vehikel das in der Kurzstrecke über naturnahe Straßen fährt, im Fernverkehr sich automatisch zu langen Zügen zusammenschließt und auf Schienen verkehrt, die über weite Strecken im Untergrund oder aufgeständert verlaufen.

Die Forschung an solch Natur- und Biodiversitäts-verträglichen Verkehrssystemen müsste hierfür ausgebaut und koordiniert werden. Zunächst aber gilt es Förderer, Planer und Entwickler von Verkehrstechnik für die Belange von Natur und Biodiversität zu sensibilisieren. Als „enabling technologies“ für eine Realisierung naturfreundlicher Verkehrstechnik kommen hier Automations- und Verkehrsleitetechniken – also IuK-Technologien und Sensortechniken – sowie Simulations- und Modellierungsverfahren eine Schlüsselfunktion zu.

Weniger spektakulär dafür unmittelbar für Ziele der Biodiversität und des Naturschutzes entworfen und installiert sind all jene baulichen Maßnahmen, die Tieren die Querung von Verkehrswegen ermöglichen. Dies sind vor allem Grünbrücken und Durchlässe. Punktuell, beim Neubau von Streckenabschnitten oder in besonders naturschützerischen Situationen sind diese verwirklicht, die flächendeckende Anwendung aber ist defizitär. Zudem besteht Forschungsbedarf über Wirkung und Erfolg dieser Maßnahmen. Größeres Innovationspotenzial lässt sich hier allerdings nicht erkennen.

Technisches Innovationspotential liegt indes in der „Mikrodurchlässigkeit“ von Straßen und Schienentrassen für Kleinlebewesen. Barrierefreie Übergänge zwischen Verkehrsweg und Umgebung, Räume zur Querung in Form von Nischen oder Röhren im/unter dem Fahrbahnbelag. Auch wäre eine stufenweise Entsiegelung der Fahrbahnoberflächen denkbar.

Des Weiteren zeigen umwelttechnische Maßnahmen zur Verkehrslenkung, umweltschonende Logistikkonzepte und eine effiziente Kopplung der Verkehrssysteme (Wasser, Schiene, Straße, Luft) unmittelbar einschlägig. Neben Simulation, Modellierung und Management von Verkehrsströmen sind gerade für letzteres Sachtechniken gefragt, die ein schnelles Umladen von Gütern – oder auch einen reibungslosen Wechsel der Verkehrssysteme im Personenverkehr – erlauben. Mitunter können diese Schnittstellen zwischen den Verkehrssystemen über Erfolg oder Misserfolg der Systeme selbst mitentscheiden⁵⁰.

Antriebssysteme von Fahrzeugen können ebenfalls über emissionsärmere Techniken einen erheblichen Beitrag zu Naturschutz und Biodiversität leisten. Diese sind aber zunächst in den Handlungsfeldern „Luftreinhaltung“ und „Klimaschutz“ einschlägig.

Letztlich positiv für den Erhalt von Natur und Biodiversität erweisen sich all jene Strategien und Entwürfe, die zu einer Verkehrsvermeidung führen. Technisch lässt sich hier potentiell durch den Ausbau von Kommunikationstechniken virtueller Präsenz (Videokonferenz, holographische Präsenz, Tele-Arbeit) beitragen. Es sei aber gleichzeitig auch auf die Möglichkeit der Überkompensation hingewiesen⁵¹. Sehr viel weit reichender könnten sich dagegen umfassende Ansätze zur dezentralen Organisation von Arbeits- und Produktionsprozessen auswirken, wie sie im Rahmen nachhaltiger Raumentwicklung diskutiert und erprobt werden (vgl. Kapitel 5.3.1). So greift auch die Nationale Biodiversitätsstrategie den Gedanken der

⁵⁰ So besteht ein Grund in dem relativ zur Straße abnehmenden Güteraufkommen auf Schiene und Wasserstraße in der defizitären Kopplung mit dem Verkehrsträger „Straße“. Oder: Im öffentlichen (Nah-)Verkehr entscheidet über Erfolg oder Misserfolg von Konzepten oft die Kopplung an andere Verkehrssysteme („Park and Ride“).

⁵¹ Die Möglichkeit einer virtuellen Omnipräsenz führt nicht zwingend zu einer Verkehrsvermeidung. So lässt sich seit geraumer Zeit gleichzeitig sowohl ein „Schrumpfen der Räume“ durch neue Kommunikationstechniken als auch eine Zunahme des Personenverkehrs verzeichnen. Dies legt ein Szenario des „überall gleichzeitig und dauernd unterwegs“ nahe.

dezentralen Wirtschaftsformen auf (BMU 2007, 84f.). Kleinräumige, regional organisierte Produktion aber auch Konsumtion können das heutige über eine globale Wirtschaftsweise induzierte Verkehrsaufkommen drastisch reduzieren.

Geotechnik

Biodiversität, Ökosysteme, und vieles, was uns als Natur erhaltenswert erscheint, spielt sich unmittelbar an der Erdoberfläche, am Boden und in Gewässern ab. Demnach sind alle Techniken, die helfen, diese (Ober-)Flächen nicht oder in geringerem Maße in Anspruch zu nehmen tendenziell geeignet, diese in ihrer Biodiversität und/oder Natürlichkeit zu schonen.

Eine Möglichkeit besteht dabei, mit Geotechniken den Untergrund als Wirtschafts- und Transportraum zu erschließen. Gängig ist dies heute im städtischen Raum in Form von U-Bahn- und Straßentunnelnetzen, dort allerdings weit entfernt von Naturschutz- und Biodiversitätsüberlegungen. Eine große Rolle spielen Naturschutzargumente dagegen bei laufenden Projekten der Schweizer Bundesbahn zur unterirdischen Querung des sensiblen Alpenraums. Auch in Deutschland werden Streckenabschnitte der Bahn in besonders sensiblen Naturräumen unterirdisch geführt.

Geotechnik ist teuer und wird damit bislang nur selten und punktuell eingesetzt. Eine Weiterentwicklung von Sondierungs- und Vortriebstechniken sowie der Verfahren zum Tunnelausbau und damit verbundene Kostenreduktionen können somit langfristig auch zur Entlastung von Natur und Ökosystemen (in bestimmten sensiblen Bereichen) führen. Deutschland verfügt bei Entwicklung und Vertrieb von Bohr- und Tunnelbautechniken bereits über internationale Spitzenplätze, so dass hier auf vorhandenes Know-how angeknüpft werden kann.

Neben dem gängigen Verfahren, bestehende Verkehrssysteme schlicht in Tunnel zu verlegen, könnte aber auch die Entwicklung neuer, an die Bedingungen des Unterirdischen angepasster und kostengünstiger Transportsysteme angezeigt sein. Als Beispiel hierfür seien die Ideen und Entwicklungen der Institutionen um ISUFT (International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/Tunnel Systems, ISUFT 2008; s. auch CargoCap 2008) genannt.



Abbildung 19: CargoCap, Computersimulation (Quelle: CargoCap 2008a)

Mit einer Verlagerung von Wirtschaftsaktivitäten und Transport mittels Geotechniken in den Untergrund, kann Flächenverbrauch und Zerschneidung minimiert werden. Auch können stoffliche, energetische und informatorische Beeinträchtigungen von den sensiblen Oberflächenbereichen ferngehalten werden. Zu bedenken gilt es aber auch, dass mit der großräumigen Unterhöhlung eventuell grundlegende Bodenfunktionen wie Wasserspeicherung und -transport oder Bodenbildung tangiert würden sowie auch Risiken für Mensch und Umwelt entstünden.

Schallschutztechniken

Umwelttechniken mit einem starken Bezug zu Erhalt von Natur und Biodiversität, sind all jene Techniken, die zu einer Reduktion der Schallemissionen und -immissionen (energetische Belastung) führen. Viele dieser Lärmschutztechniken stammen aus dem Verkehrsbereich wie bspw. leise Antriebsaggregate, Flüsterasphalt, lärmarme Gleisanlagen, schallschluckender Gleisunterbau, lärmvermeidende Rad-Schiene-Systeme, aerodynamische Fahrzeuge, Schallschutzwände, etc. Dass es hier noch ein erhebliches Innovationspotential zu mobilisieren gilt, zeigen die Entwicklungen der letzten Jahre. Insbesondere in der Schifffahrtstechnik lassen sich (vor allem bei der Binnenschifffahrt aber auch im Überseeverkehr) Verbesserungen erzielen.

Techniken zum Schutz von Arten und Lebensräumen

Um einen direkten Verlust an natürlichen Lebensformen in Form der Ausrottung spezifischer Arten zu verhindern, kommen klassischer Weise Sozialtechniken wie Jagd-Verbote, Fang-Quoten, das Ausweisen von Schonzeiten oder Schutzgebieten, Handelsverbote, etc. zur Anwendung. Diese Reglementierungen müssen überwacht und bei Nicht-Erfüllung sanktioniert werden. Sachtechniken spielen hierbei (bspw. in Form von Überwachungstechnik) eine nachgeordnete Rolle. Sachtechniken können aber sehr wohl eine Rolle bei der Reduzierung von Nebenfolgen der gängigen Jagd-, Fischerei und Pflanzensammelmethode spielen, um unnützen Schäden an anderen Tieren und Pflanzen zu minimieren, z.B. den Beifang in der Fischerei durch spezifische Netze oder Fischereitechniken.

Des Weiteren dient auch die Erarbeitung nachhaltiger Nutzungskonzepte für pflanzliche und tierische Ressourcen dem Artenerhalt. Innovative Lösungen setzen dabei auf ökosystemaren Überlegungen auf, oder wie Forscher des Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei fordern, könnten einen evolutionsbiologischen Ansatz⁵² verfolgen (Innovationsreport 2008). Um solche Nutzungskonzepte in Form ökosystemarer oder evolutionsbiologischer Steuerung erfolgreich und stabil zu etablieren, bedarf es des problembezogenen Wissens und ausgiebiger Forschung.

⁵² Hierbei geht es darum, das Evolvieren von Arten unter den Bedingungen menschlicher Nutzung für Nutzungskonzepte mit ins Kalkül zu ziehen, z.B. beim Fischfang: „Die Frage ist nicht, ob Fischereidruck die Evolution der Arten beeinflusst, sondern wie schnell. Es müsse bedacht werden, dass Fischerei-induzierte genetische Veränderungen womöglich unumkehrbar sind. Die Art und Weise der Befischung von Süß- und Salzwasserfischen sei vergleichbar einer Zucht durch Auslese. Allerdings mit unbeabsichtigten Züchtungsergebnissen, fügt Arlinghaus hinzu. Kommerzielle Fischerei ist für viele Spezies weltweit die Todesursache Nummer 1 geworden.“ (Innovationsreport 2008).

Auch zum Erhalt von Natur und Biodiversität auf Ebene der Landschaften und Lebensräume sind meist Sozialtechniken einzig probates Mittel. Steht nicht eine gänzliche Konservierung des Lebensraumes im Vordergrund (s.u.), so können auch Konzepte einer nachhaltigen Nutzung entwickelt werden. Auf dieser Ebene geht es um ganzheitliche Entwürfe, die sowohl ökologischen Landschaftserhalt als auch Leben und Wirtschaften der Bewohner mit einschließen. Hier gilt es nachhaltige Raumnutzungskonzepte, neue Lebensstile, Wirtschaftsformen, Produktionswege, etc. zu entwerfen und zu installieren. Wegweisende Projekte sind in den UNESCO-Biosphärenreservaten, in Agenda-21-Projekten und alternativen ökologischen Arbeitsprojekten (wie z.B. Landlebenkunstwerk 2008) zu finden.

Zumindest Erwähnung finden muss an dieser Stelle noch, dass auch sämtliche Sicherheitstechniken, die verhindern, dass im Falle eines Stör- oder Unfalls große Mengen ökotoxischer Substanzen oder Strahlung in die Umwelt gelangen, einen Beitrag zum Erhalt von Natur und Biodiversität leisten. Beispiele wären hier doppelhäutige Tankschiffe oder Auffang- und Abscheideanlagen in Chemiebetrieben.

Traditionelle und ökologische landwirtschaftliche Praxis

In der Agrar- und Viehwirtschaft finden heute „alte“, traditionelle Sorten, Rassen und Arten wieder vermehrt Verwendung. „On farm“ werden bedrohte Bestände in der gelebten Praxis aufgebaut, genutzt und für die Nachwelt erhalten. Nicht selten ist damit ein Erhalt biodiverser Kulturlandschaften verbunden und damit auch der Erhalt traditioneller Arbeitsweisen und landwirtschaftlichen Wissens. Wo die landwirtschaftliche Nutzung nicht mehr zum Erhalt dieser (vorindustriellen) Kulturlandschaften ausreicht, können gesondert Maßnahmen des Landschaftsschutzes und der Landschaftspflege greifen. Dies geschieht noch vergleichsweise selten.

Bis dato hat sich beim Erhalt kultureller Biodiversität (gerade auch in Verbindung mit Naturschutz) vor allem der ökologische Landbau hervorgetan. Unter dem Bio-Label fanden viele alte Kultursorten wieder Eingang in die gelebte Praxis, auch wurden durch eine extensivere und kleinräumigere Bewirtschaftung naturnähere, biodiverse Flächen erhalten oder geschaffen. Dies geschah zum einen aus der Notwendigkeit heraus, durch den stark verminderten Einsatz chemischer Dünge-, Arznei- und Pflanzenschutzmittel auf resistenterer und standortgemäße Arten zurückgreifen zu müssen, zum anderen aber auch aus der Wertschätzung einer naturnahen Bewirtschaftungsweise. Zudem wird über den ökologischen Landbau der Austrag von stofflichen (Nähr-) und Schadstoffen in die Umwelt reduziert, Böden tendenziell aufgebaut statt degradiert, usw.

Nicht vergessen werden darf, dass sich ein großer Teil der Weltbevölkerung über kleinräumige, regionaltypische, traditionelle Landwirtschaft mit eigenen Arten, Sorten und Anbauweisen ernährt. Diese zu erhalten und zu modernisieren leistet ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Biodiversität. Erfolgreich gelingt dies in agrardominierten Staaten, Schwellen- oder Entwicklungsländern, oft im Zuge einer Umstellung auf ökologischen Landbau mit international gültigen und verpflichtenden Qualitätskriterien.

Züchtung alternativer Kulturpflanzen, alternative Anbauverfahren

Zur Erhöhung der Agrobiodiversität können der Anbau alternativer Kulturpflanzen und alternative Anbauverfahren beitragen. Als Alternativen zu den heute gängigen Kulturpflanzen kommen für Deutschland in Frage: alte Weizenarten, Hirsen, Buchweizen, Amarant, Reis- melde als Stärkepflanzen; Zichorie, Topinambur als Zuckerpflanzen; Crambe, Leindotter, Saflor als Ölpflanzen; Fasernessel als Faserpflanze; Arznei- und Gewürzpflanzen, Färber- pflanzen sowie Zuckerhirse, Sudangras, Miscanthus, Pappel, Weide als Nutzpflanzen zur energetischen Nutzung (Meyer 2005, 4). Diese alternativen Kulturpflanzen sind insbesonde- re für den Anbau auf leichteren Böden und zu Trockenheit neigenden Standorten geeignet. „Sie lassen sich gut in die Fruchtfolgen integrieren und würden damit die Agrobiodiversität auf diesen Standorten erhöhen.“ (Meyer 2005, 5). Insbesondere der Anbau von Heil- und Gewürzpflanzen könnte wegen der Kleinräumigkeit des Anbaus der jeweiligen Art einen be- sondern wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Biodiversität darstellen. Als Blühpflanzen erhö- hen diese auch die Attraktivität dieser Standorte für zahlreiche Insekten.

Mit dem Anbau alternativer Kulturpflanzen gehen oft alternative Anbauverfahren Hand in Hand. Alternative Anbauverfahren wie Mischanbau, spezielle Reihenkulturen und Mulchver- fahren tragen oft zu einer direkten Erhöhung von Biodiversität auf landwirtschaftlichen Nutz- flächen bei, ermöglichen aber auch die Reduzierung von Dünge- und Pflanzenschutzstoffen, was mittelbar ebenfalls förderlich für Natur und Biodiversität ist (vgl. Meyer 2005, Kap. 4). Auch eine Mischung konventioneller Arten (bzw. Sorten) oder eine bestimmte räumliche An- ordnung oder zeitliche Abfolge dieser Arten kann bereits einen Beitrag zu Biodiversität liefern. Agroforst-Systeme, d.h. der gemeinsame Anbau von Gehölzen und einjährigen Nutzpflanzen zum Beispiel in Form des „alley cropping“ haben sich als besonders erwiesen. Neben einer direkten Erhöhung der Vielfalt an Arten und Landschaften wird damit auch Wasser und Bo- den geschützt.

Der vom TAB herausgegebene Bericht zum Projekt „Moderne Agrartechniken und Produkti- onsmethoden“ (Meyer 2005) kommt zu der Einschätzung: „Insgesamt ist kurzfristig eine deutliche Ausweitung des Anbaus alternativer Kulturpflanzen nicht zu erwarten.“ Mittel- bis langfristig aber „könnten sich die Chancen für alternative Kulturpflanzen erhöhen.“ (ebd., 4f.). Hinsichtlich alternativer Kulturpflanzen zeigt sich, dass „in den meisten Fällen keine an deut- sche Standorte angepassten Sorten zur Verfügung“ stehen. „Die züchterische Bearbeitung der alternativen Kulturpflanzen [...] wird daher noch für längere Zeit einen sehr hohen Stel- lenwert behalten.“ (ebd.).

Der TAB-Bericht stellt des Weiteren fest, dass Züchtungsversuche zu alternativen Kultur- pflanzen die Ausnahme darstellen, und eine verstärkte Züchtung bei alternativen Kulturpflan- zen wünschenswert wäre. „Die Züchtung alternativer Kulturpflanzen stellt eine mittel- bis längerfristige Aufgabe dar, die erhebliche Investitionen erfordert, erst bei der Etablierung von leistungsfähigen Sorten bzw. deutlich verbesserten Sorten Einnahmen verspricht und auf absehbare Zeit nur einen begrenzten Markt erwarten lässt.

Rückzüchtung, Züchtung mehrjähriger Sorten

Heute wird versucht, aus den noch vorhandenen Kulturpflanzen und Nutztieren, die aus spe- zifischen Reihen von Züchtungen hervorgingen, über Rückzüchtung wieder zu früher verbreit- eten Arten und Rassen zu gelangen. Dies geschieht oft im Zuge des Bestrebens einer na- turräumlich, ökologischen Bewirtschaftung von Agrarflächen.

Neben reinen Rückzüchtungen sind momentan Züchtungsversuche interessant, die darauf abzielen, Landwirtschaft naturnäher und damit (kulturell wie natürlich) biodiverser zu gestalten. Vorbild dieser Ansätze bilden dabei natürliche Ökosysteme, wie sie von der modernen Landwirtschaft verdrängt wurden („Natural Systems Agriculture“, Land Institute 2008). Diese bestanden überwiegend aus einer Mischung mehrjähriger Pflanzen. Dementsprechend wird versucht, unsere zentralen Nutzpflanzen, wie Getreide, Hülsenfrüchte und Ölsaaten, die insgesamt 80% der weltweiten Anbaufläche einnehmen, von einjährigen Pflanzen auf mehrjährige umzuwandeln. Dies soll konventionell mittels Züchtung erfolgen: durch direkte Domestikation wilder Pflanzen und/oder Kreuzung existierender einjähriger Pflanzen mit ihren wild lebenden Verwandten. Als Vorteile werden eine höhere Produktivität mit weniger finanziellem und stofflichem Einsatz von Düngemitteln, Pestiziden, Wasser, etc. sowie erosionsverhindernden, bodenbildenden und wasserreinigenden Funktionen gesehen (vgl. Glover et al. 2007). Durch die höhere CO₂-Senkenfunktion der mehrjährigen Pflanzen würde sich gegenüber einjährigen Pflanzen zudem ein klimaschützender Effekt ergeben.

In Anbetracht eines wachsenden Bedarfs an Pflanzen sowohl zur Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung, als auch aufgrund des vermehrten Bedarfs an nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen und energetischen Nutzung, können mehrjährige Pflanzen zu einer erheblichen Milderung negativer ökologischer Folgen beitragen. Forschungsinstitutionen in USA, Australien, Kanada, China, Indien, etc. arbeiten seit mehreren Jahren an der Neuzüchtung solcher Pflanzensorten. Züchtung aber gestaltet sich per se langwierig und laborintensiv. Dadurch könnte sich ein neues, biodiverses und naturnahes Gefüge landwirtschaftlicher Praxis ausbilden, das menscheitsgeschichtlich in der Tat revolutionär sein könnte. Heutige Forschung und Praxis diesbezüglicher Züchtung greifen dabei auch auf analytische Methoden aus der Gen-Forschung zurück (z.B. Markierung von Chromosomen oder die markerunterstützte Selektion), beschleunigen damit die Züchtung und gestalten sie effizienter. Von diesen Analysetechniken erwartet die Züchtungsforschung entscheidende Unterstützung. Im Gegensatz dazu wird der Einsatz von genmodifizierenden Techniken (transgene Modifikation) eher skeptisch bewertet, zumindest in den frühen Stadien der Züchtung. In reiferen Phasen der Züchtung, wenn nur noch einzelne Eigenschaften wie bspw. eine günstige Gluten-Mischung fehlen, könnte dagegen Gentechnik mit Erfolg zum Einsatz kommen.

Precision Agriculture (Precision Farming)

Bei Precision Agriculture (PA) steht die Ressourcenschonung aber auch die Entlastung der Ökosysteme im Vordergrund (vgl. Meyer 2005, 3). Mit der ortsdifferenzierten und zielgerichteten Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen (Präzisionsackerbau) mit Hilfe von IuK- und Automations-Techniken können kleinstflächig Unterschiede des Bodens und der Ertragsfähigkeit berücksichtigt werden. Prinzipiell birgt diese Technik über die Entlastung von Umweltmedien und Ökosystemen wie auch über die Möglichkeit der kleinteiligen Bewirtschaftung Potential für Naturschutz und Biodiversität. Eine Verminderung des Pestizid- und Düngemitelesinsatzes entlastet die dortige Lebenswelt direkt und vermindert den Austrag in die Umgebung (vgl. TAB 2008). Die automatisierte, präzise Bewirtschaftung erlaubt prinzipiell auch alternative (biodiversere) Anbauformen.

Neben der vorgesehenen Anwendung von Precision Agriculture auf intensiv genutzten Flächen ließe sich diese so auch bei extensiven Anbauformen, bei Landwirtschaft in Natur- und

Diversität-sensiblen Bereichen (bspw. in Uferzonen, Grenzflächen zu Natur/Wasserschutzgebieten) oder gar zur Pflege in Landschafts- und Naturschutzgebieten einsetzen. Denkbar wären in fernerer Zukunft bspw. auch auf Basis dieser Technik operierende Landschafts-schutz-Roboter, die helfen, die entstandenen Natur- und Kulturlandschaften zu erhalten.

Precision Agriculture zeigt durch die Anwendung von IuK-Technologien sowie automations-gestützter Landmaschinen einen klaren Hightech-Bezug und ist damit essenziell abhängig von den dort stattfindenden Innovationen. Die Technik findet sich im Entwicklungs- und Erprobungsstadium. In Deutschland und international sind viele Einrichtungen in Forschung und Entwicklung von Precision Agriculture involviert (vgl. Rösch et al. 2006). „Trotz der bisherigen Forschungsanstrengungen existieren beim gegenwärtigen Stand der Technik zum teilflächenspezifischen Pflanzenbau noch verschiedene ungelöste technische, fachliche und methodische Herausforderungen, die eine rasche und breite Praxiseinführung von Precision Agriculture verhindern.“ (TAB 2008). So sind auf vielen (denkbaren) Einsatzfeldern konkrete Adaptionen noch zu erforschen und entwickeln. Zur gezielten, direkten Unterstützung von Natur- und Biodiversität mittels PA-Techniken außerhalb intensiv genutzter Flächen müsste in Forschung und Entwicklung jedoch gänzlich Neuland betreten werden. Dies scheint ohne die Unterstützung der öffentlichen Hand undenkbar.

Gefahren liegen bei Precision Agriculture – wie bei allen Techniken zur Effizienzsteigerung – darin, dass positive umweltschonende Effekte durch eine Steigerung der Nutzungsintensität überkompensiert und zunichte gemacht werden (Rebound-Effekt). So können nach Auffassung des TAB „die bestehenden Nachhaltigkeitsdefizite der Landwirtschaft nur teilweise durch den Einsatz moderner Technik behoben werden.“ (TAB 2008).

Gentechnische Herstellung

Die Herstellung gentechnisch veränderter Organismen (GVO) ist umstrittene aber inzwischen etablierte Praxis. Akteure aus den Bereichen des Naturschutzes und der kulturellen Biodiversität wenden sich meist einhellig, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen gegen eine unkontrollierte, flächige Verbreitung von GVOs. Begründet wird dies vordringlich mit den Gefahren, die mit einer potentiellen Freisetzung von GVOs in Naturräumen und Ökosystemen verbunden sind oder aber mit einer (ökonomischen) Verdrängung traditioneller kultureller Biodiversität (vgl. Kap. 8.1.2; NABU 2008; Cartagena-Protokoll). Darüber hinaus werden im Naturschutz gentechnische Verfahren ihrer Widernatürlichkeit wegen oft kategorisch abgelehnt.

Dessen ungeachtet könnten gentechnisch veränderte Organismen in anderen Handlungsfeldern positive Effekte für den Erhalt von Natur und Biodiversität haben. Hier sei auf die weiße Biotechnologie verwiesen, die in Produktionsprozessen zu einer Ressourcenschonung beitragen, oder auf die graue Biotechnologie, die in der spezifischen Abfallbehandlung den Schadstoffaustrag vermeiden oder Schadstoffe (In-Situ) abbauen kann (vgl. Schaaf 2007). Darüber hinaus können GVOs auch beim Monitoring zur Detektion und Indikation von stofflichen Belastungen der Umweltmedien eingesetzt werden. In fernerer Zukunft könnten evtl. auch gezielt hergestellte Organismen eingesetzt werden, um spezifisch Schadstoffe umzuwandeln und so zumindest indirekt auf Natur und Biodiversität positiven Einfluss nehmen (vgl. Spiegelonline 2008).

Ausweisen und Erstellen von Schutzräumen

Um einem unwiederbringlichen Verschwinden von natürlichen Entitäten und Lebensformen entgegenzuwirken, werden technische Wege beschritten, diese abseits lebender Naturzusammenhänge oder kultureller Nutzungen quasi „museal“ zu erhalten und so zukünftigen Generationen in wesentlichen Aspekten zugänglich zu machen. Dieser letztmögliche Bestandsschutz kann auf unterschiedlichen Ebenen mit ebenso unterschiedlichen Techniken (bzw. Verfahren) geschehen.

Auf der Ebene der Landschaften und Ökosysteme geschieht diese Konservierung „In-Situ“ bspw. durch das Ausweisen von Schutzgebieten unterschiedlicher Ausprägung. Menschliches Wirtschaften und Tätigsein ist in diesen Gebieten mehr oder minder stark eingeschränkt. Beispiele hierfür sind Naturschutzgebiete, Biosphärenreservate, Nationalparks, Naturparks, Landschaftsschutzgebiete, Meeresschutzgebiete. Hier wird vor allem auf den Erhalt von Natur, aber wie bspw. im Falle der Naturparks und Landschaftsschutzgebiete auch auf Kulturlandschaften, Kulturarten und traditionelle Bewirtschaftungsweisen abgezielt.

Auf Ebene der Arten erfolgt die Konservierung großteils im Zuge jener großräumig ausgewiesenen Schutzgebiete, teils aber auch ex situ in kleinräumigen, künstlich angelegten „Konservatorien“ wie Zoos, Botanische Gärten, Wildgehege, Parks u.ä. Zoos und Botanische Gärten übernehmen neben ästhetischen, pädagogischen und wissenschaftlichen Aufgaben zunehmend auch Aufgaben des Naturschutzes, hier vor allem in der Nachzucht gefährdeter Arten zur „Auswilderung“⁵³. Neben wildlebenden Arten finden zunehmend auch (einstige) Nutztiere und -pflanzen Eingang in Zoos sowie speziell angelegte Haus- und Nutztierparks („Archen“).

Genbanken

Biodiversität lässt sich auch auf der Ebene der Gene konservieren. In Forschungseinrichtungen, Universitäten und Museen lagern heute weltweit ca. 3 Milliarden Proben von Tieren, Pflanzen und Samen, welche die Tradierung genetischer Informationen dieser Arten auf natürlich-stofflicher Basis für einen gewissen Zeitraum erlauben. Darüber hinaus sollen speziell für den Zweck der Konservierung errichtete Samen- und Genbanken den Erhalt genetischer Ressourcen Ex situ sicherstellen.

Von besonderer Bedeutung ist wegen seines hohen direkten und optionalen Wertes das genetische Material von Kulturpflanzen und Nutztieren, sowie von wildlebenden Arzneimittel- und sonstigen Nutzpflanzen. Wie bei allen archivarischen Bemühungen sind die Techniken zur Konservierung und Aufbewahrung (Präparation, Kühlung) aber auch der regelmäßigen Pflege (der Aussat und Aufzucht in Erhaltungskulturen) für die Dauerhaftigkeit mit entscheidend. Hierzu sind vertiefte Forschungen zur Fertilität und zu den Auswirkungen und Bedingungen der Langzeit-Kühlung von Samen erforderlich.

Weltweit existieren inzwischen ca. 1.400 Genbanken für Kulturpflanzen. Diese sind dezentral organisiert und werden meist von staatlicher Seite unterhalten bzw. unterstützt. Größte Unternehmung stellt momentan das so eben eröffnete „Arche Noah“-Projekt auf Spitzbergen

⁵³ Diese „Auswilderung“ erfolgt meist unter Beobachtung und wiederum in geschützte Räume hinein.

dar. Dort entstand in einem Fels der Permafrost-Region ein Bunker für Saatgut der wichtigsten Kulturpflanzen aus aller Welt.

Im Gegensatz zur Archivierung genetischen Materials von Kulturpflanzen erfolgt die Sammlung von Wildpflanzen und -tieren nur sporadisch und weithin noch unkoordiniert (vgl. Schuh 2007). Obwohl die 2002 erwirkte „Globale Strategie zur Erhaltung der Pflanzenvielfalt“ die Unterzeichnerstaaten verpflichtet, 60% der gefährdeten Arten in Ex situ-Sammlungen zu bringen, verläuft die Realisierung stockend. Deutsche Pilotprojekte, wie die Samenbank der thüringischen Wildpflanzenflora oder die Loki Schmidt Genbank für Wildpflanzen am Botanischen Garten der Universität Osnabrück, verfügen nur über bescheidene und zudem unsichere Mittel. Weltweit ist das britische „Millenium Seed Bank Projekt“ mit seinem Ziel, bis 2010 10% des weltweiten Bestandes zu sichern und mit seinen 18.000 bislang gesammelten Pflanzenarten einzigartig. Doch zur erfolgreichen Wiederansiedelung ausgestorbener Pflanzen in ihrer Heimat genügt die Bewahrung der genetischen Information allein nicht. Viele Versuche der Wiederansiedelung endemischer Arten scheitern. Die Gründe dafür liegen teils noch im Dunkeln. Hier bedarf es grundlegender (pflanzenphysiologischer und ökosystemarer) Forschung.

Der weltweite Bestand an genetischen Ressourcen kann erodieren, wenn Neuzugänge unsachgemäß gelagert und gepflegt werden, und dadurch für die weitere Verwendung verloren gehen. Eine solche Gefährdung gilt insbesondere für Neuzugänge in Genbanken, die nur über geringe finanzielle Mittel verfügen (Deke 2004, 41f.; ICSTM 2002; FAO 1997)

Genbanken werden auch für tierisches Erbgut angelegt⁵⁴. Dies geschieht nahezu ausschließlich für Nutztierarten und -sorten. Neben der Lebendhaltung in kleinräumigen Arealen (z.B. in „Nutztier-Archen“; s.o.: „Parks und Zoos“) erfolgt die Erhaltung des Genmaterials vor allem über die Kryokonservierung von Sperma und Embryonen. Die Bewahrung tierischen Erbgutes ist zwar weniger arbeitsintensiv als die Lagerung und regelmäßige Kultivierung von Pflanzensamen, erfordert aber einen sehr viel höheren technischen Aufwand als die Konservierung von Pflanzensamen. Zudem hängen die Konservierungsmöglichkeiten und -kenntnisse stark von der einzelnen Tierart ab, so dass bei vielen Arten (z.B. Ziege, Schaf) noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Zurzeit wird in Deutschland ein Programm entwickelt, das eine Gewinnung und Lagerung von Zellmaterial vor allem in Deutschland ursprünglicher und heimischer Nutzierrassen vorsieht (BfLE 2008).

Gendatenbanken, Bioinformationssysteme

Im Unterschied zu Genbanken werden in Gendatenbanken die genetischen Informationen einzelner Arten oder Sorten möglichst umfassend elektronisch gespeichert. Obwohl diese Gendatenbanken zunächst der gentechnischen Forschung und biotechnischen Entwicklung von Organismen dienen, ist mit ihnen durchaus die Hoffnung verbunden, anhand des elektronisch gespeicherten Bauplans zukünftig Organismen gezielt synthetisch herstellen zu können oder auch bereits ausgestorbene Arten wiederzubeleben.

⁵⁴ Einen Überblick über die Ex-situ-Bestände Tier- und Pflanzen-genetischer Ressourcen bietet Be-gemann et al. 2004.

Darüber hinaus werden in speziellen Bioinformationssystemen die weltweit vorhandenen Informationen über Lebensformen, deren genetische Spezifika und Biodiversität zusammengetragen, katalogisiert und zugänglich gemacht. Beispiel hierfür ist das internationale Projekt „Global Biodiversity Information Facility“ (GBIF). Ziel ist eine möglichst umfassende biologische Inventur der Erde. Mehr als 100 Millionen Biodiversitätsdaten können bereits über das von 50 Staaten und über 200 Datenanbietern unterstützte GBIF-Portal abgerufen werden (GBIF 2008). Neben der Forschung bildet dieses Portal auch eine wichtige Grundlage für politische Entscheidungen zur Ausgestaltung von Naturschutz und Biodiversität.

Virtuelle Natur und Biodiversität

Gewisse Aspekte von Natur und Biodiversität lassen sich auch gänzlich im Rechner („in silico“) speichern und tradieren. Die natürliche Vielfalt kann elektronisch in Bild, Ton und Schrift codiert in einer umfassenden multimedialen Datensammlung zu einem virtuellen „second life“ verholfen werden. Eine virtuell konservierte Natur hat zunächst den Charakter einer Dokumentation. In ästhetischer, symbolischer und pädagogischer Hinsicht aber lässt sich Natur in dieser Form zukünftigen Generationen zugänglich machen. Auch als Ideengeber kann eine solche virtuelle Natur mit detaillierten, multimedialen Daten zu verschiedenen Lebensformen dienen. Gerade aussterbende Arten könnten so zumindest in gewissen Aspekten erhalten werden.

Soweit die elektronische Speicherung multimedialer Daten zum Erhalt von Aspekten von Natur und Leben beitragen kann, hilft sie kulturelle Funktionen von Natur zu bewahren und könnte so evtl. als Umwelttechnik einer sich bildenden Informationsgesellschaft gekennzeichnet werden. Welcher Stellenwert dieser virtuellen Natur zukünftig zukommt, ist allerdings ungewiss.

Betrachtet man die Konservierungstechniken angefangen mit der Ausweisung von Schutzräumen über Genbanken, Gendatenbanken bis hin zur virtuellen Natur, dann zeigt sich eine zunehmende „Abhängigkeit“ der Bewahrung von Natur und Biodiversität von dem technischen Vermögen des Menschen. Natur und Biodiversität liegt immer ausschließlicher in den Händen des homo technicus und wird immer vollständiger zu technischen Konstruktionen.

Techniken des Monitoring von Natur und Biodiversität

Die Beobachtung und Datenerfassung von Natur und Landschaft ist in Deutschland über das Bundesnaturschutzgesetz als Aufgabe von Bund und Länder verankert. Der über bestimmte Kriterien erfasste „Zustand von Natur und Biodiversität“ dient der weiteren Forschung, aber auch Verwaltung und Politik als Entscheidungsgrundlage. Daten werden auf unterschiedlichen Erfassungsebenen erhoben, gespeichert und zu verschiedenen Zwecken aufgearbeitet. Landschaften, Schutzgebiete, „Kulturräume“, Ökosysteme werden in ihrer Entwicklung verfolgt, Arten und Populationen ermittelt, physiologische Daten (bspw. bezüglich Schadstoffbelastung) gesammelt und auf der genetischen Ebene der Einfluss von gentechnisch veränderten Organismen auf ihre artverwandte Umwelt erfasst. Zudem wird eine Vielzahl von Faktoren (bspw. stoffliche und energetische Emissionen) datiert, die für Natur und Biodiversität

von Bedeutung sind (bspw. eutrophierende Stoffe, s. UBA 2008)⁵⁵. Letztlich wird auch versucht, die Umwelt „als Ganzes“ in ihrer Entwicklung zu dokumentieren (Umweltprobenbank 2008).

Die Datenerhebung ist dabei teils in hoehm Maße an Sachtechniken geknüpft, wie bspw. die Analyseverfahren zur Schadstoffermittlung in Gewebe und (Körper-)Flüssigkeiten, teils erfolgt sie aber auch manuell dominiert, oft schlicht durch abschreiten, verlesen und zählen von Arten und Individuen. Tendenziell findet auch hier eine Technisierung statt, Datenerfassung durch den Menschen wird maschinell ersetzt oder es werden technisch neue Möglichkeiten der Datenerfassung erschlossen, wie bspw. bei Satelliten-gestütztem Monitoring oder Beobachtungen aus dem Luftraum. Auch die (Analyse-)Verfahren der Gentechnik lassen sich zum Monitoring nutzen. So sollen bspw. im Zuge des „Barcoding of Life“ (BOLD 2008) zukünftig – im Rückgriff auf die genetische Katalogisierung der globalen Artenvielfalt mit GBIF – kleine, tragbare Geräte entwickelt werden, die es ermöglichen, Pflanzen und Tiere anhand einer Gewebeprobe vor Ort zu analysieren (TAZ 2005, vgl. bspw. Canon 2008). Kernstück dieser Technik ist bei Tieren die Analyse eines (Art-spezifischen) Stückes Erbguts auf den Mitochondrien. Zumindest wenn es um Analyse und Monitoring von Natur und Biodiversität geht⁵⁶, können also auch jene Unternehmungen der Forschung und Entwicklung an der Schnittstelle zwischen Leben und Technik, wie Biotechnologie, Life Sciences, Computational Biology, etc., eine wichtige Rolle spielen.

Auch auf Ebene des Artenschutzes findet gegebenenfalls eine Überwachung von Individuen statt. (Viele) einzelne Tiere – meist Säugetiere, Vögel, Fische, aber auch Insekten, etc. – werden beobachtet. Oft spielen Sachtechniken eine entscheidende Rolle. Prominent gilt dies für die Fernüberwachung, bei denen Tiere mit einer Sendeeinheit oder einem Datenspeicher ausgestattet werden. Vor allem werden räumliche Daten, Aufenthaltsort, Bewegungsmuster ermittelt, vielfach werden aber auch physiologische Daten in einem Biomonitoring erfasst (vgl. Jokat/Oerter 1995, 62; Driesen-Kern 2008). RFID (Radio Frequency Identification) und GPS basierte Techniken werden eingesetzt. Technisch nimmt die fortschreitende Miniaturisierung (von Mechanik und Elektronik) entscheidend Einfluss. Je kleiner die Geräte, desto kleinere Tiere oder desto mehr Parameter lassen sich pro Tier gleichzeitig überwachen⁵⁷.

Fast noch bedeutsamer als die Techniken zur Erfassung von Daten erweist sich heute anhand der Fülle und Unübersichtlichkeit vorhandener Daten und Datenerhebung, ein leis-

⁵⁵ Auf Techniken des Monitoring von Emissionen, bzw. Immissionen, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen solange sich diese konkret in den anderen Handlungsfeldern (vor allem „Luftreinhaltung“, „Wasserschutz“, „Bodenschutz“) verorten lassen und dementsprechend dort abgehandelt werden.

⁵⁶ Wie bereits ausgeführt können Biotechnologien auch auf anderen Gebieten wie Ressourcenschonung, Abwasser-, Abfall-, Altlastenbehandlung positive Effekte auf Natur und Biodiversität zeitigen.

⁵⁷ Generell sei hier bemerkt, dass Techniken des Monitorings im Sinne eines „dual use“ wesentlich anwendungsoffen sind. Die sensorische Beobachtung und Überwachung von Natur und Biodiversität und das Erfassen und Speichern von diesbezüglichen Daten kann sowohl zum Schutz der überwachten Einheit als auch zur Nutzung und Ausbeutung dieser beitragen. Pervasive Computing könnte in ferner Zukunft auch die belebte Natur erreichen. Werden diese Techniken als Umwelttechniken deklariert, so bergen sie dementsprechend „Missbrauchspotentiale“. (Ein Extrembeispiel: Techniken, die zum exakten Monitoring von Hirnströmen eingesetzt werden können– leicht modifiziert – auch zur gezielten Manipulation eingesetzt werden. So geschehen bei der Fernsteuerung von Mäusen in Japan)

tungsfähiges Datenmanagement. Je größer die Datenmengen werden, desto mehr Augenmerk muss auf eine sinnvolle und zweckdienliche Koordinierung der Datenerhebung, Harmonisierung der Messmethoden, Verfügbarkeit und Verknüpfung der Datensätze und eine integrierende Auswertung gelegt werden. Neben einer Steigerung der Effizienz (durch Vermeidung von Redundanzen) lässt sich mit einem angemessenen Datenmanagement auch wesentlich neues Wissen generieren. So schreibt bspw. das Umweltbundesamt bezüglich ökosystemarer Umweltbeobachtung: „In der Realisierung einer integrierenden Auswertung liegt das größte Entwicklungspotential in der Umweltbeobachtung: Mit einer, auch behördenübergreifenden, Zusammenführung von Datensätzen lässt sich der Aussagewert der bestehenden Beobachtungsprogramme und Messnetze erheblich steigern.“ (UBA 2001, 2). Ist diese Zusammenführung auf nationaler Ebene im Gange, so steht sie auf internationaler Ebene weitestgehend noch aus.



Abbildung 20: Biene mit RFID-Chip (Quelle: Vistaverde 2003)

Mit der steigenden Datenflut und den Verknüpfungsversuchen sind für ein erfolgreiches Datenmanagement wachsende Anforderungen an Theorien und theoretische Konzepte geknüpft. Auch das (außerwissenschaftliche) Ziel von Monitoring, Entscheidungswissen für politische und gesellschaftliche Weichenstellungen bereit zu stellen, erfordert – ebenfalls vor dem Hintergrund wachsender Datenverfügbarkeit sowie einer steigenden Nachfrage nach Zukunftswissen (in Form von Vorhersagen, Gefährdungspotentialen, Risikoabschätzungen, Szenarien, Modellierung, etc.) – vermehrt theoretische Ansätze. Forschung und Entwicklung für und von Theorien zur Datenkonvergenz und Generierung von Entscheidungswissen sind im Kontext des Monitorings entscheidende Einflussgrößen.

Insgesamt lässt sich beim Monitoring von Biodiversität und Natur eine starke und direkte Abhängigkeit vom Entwicklungsstand der IuK-Technologien feststellen. So sind bei der Datenerhebung (Analysetechniken), beim Datenmanagement (Datenbanken), bei der Aufarbeitung, Interpretation (Datenverarbeitung), Darstellung und Visualisierung (GIS) der Primärdaten, sowie beim Erzeugen von Zukunftswissen (Simulation, Modellierung) essenziell Computertechnologien beteiligt. Rechenleistung, Kompatibilität, sowie im Feldeinsatz Robustheit und geringe Größe sind – neben den Anschaffungskosten – entscheidende Faktoren beim

Einsatz von Computertechniken. Weitere „ermöglichende Techniken“ für das Monitoring liegen in der Sensorik, der Datenübertragung sowie der Luft- und Weltraum gestützten Erkundung und Überwachung.

8.3.2 Umwelttechnologien anderer Handlungsfelder mit starkem Einfluss auf 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 Umwelttechnologien anderer Handlungsfelder erheblichen Einfluss auf den Erhalt von Natur und Biodiversität. Im Folgenden werden ergänzend zu den genuinen und unmittelbaren Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität tatsächliche und mögliche Umwelttechnologien benannt, die für den Erhalt von Natur und Biodiversität einen starken Einfluss haben oder erwarten lassen, die aber vornehmlich den anderen Handlungsfeldern zugeordnet sind. Dementsprechend findet sich die Darstellung dieser Techniken und ihrer Wirkungsweisen in den jeweiligen Handlungsfeldern. An dieser Stelle werden lediglich die Einflüsse jener Techniken auf Biodiversität und Natur aufgezeigt und dargelegt.

Handlungsfeld Klimaschutz

Techniken, die zu einer Verlangsamung des Klimawandels beitragen, entschärfen auch die Dramatik der klimabedingten Änderungen in Natur und Lebensgemeinschaften. Da der anthropogen mitbedingte Klimawandel ein globales Phänomen ist, tragen sämtliche Klimaschutz-Techniken zu Erhalt von Natur und Biodiversität bei.

Im Zuge der Klimaerwärmung einsetzenden Artenwanderungen sollen Fluchtkorridore und Rückzugsräume bereitgestellt werden. Diese „ökologischen Korridore“ sollen bspw. durch eine Vernetzung von Schutzgebieten entstehen (z.B. in und zwischen Bergregionen, vgl. BMU 2004, 9). Neben dem Ausweisen solcher Korridore und Räume sind hierbei alle Techniken einschlägig, die zu einer Rücknahme der räumlichen Beeinträchtigungen beitragen (vgl. Kap. 8.3.1).

Handlungsfeld Luftreinhaltung

○ Filtertechniken

Luftreinhaltung zielt primär auf die Gesundheit des Menschen. Doch auch andere Lebewesen leiden unmittelbar oder mittelbar an Emissionen in das Umweltmedium „Luft“. So gelangen auch Schad- und Nährstoffe über die Luft in Ökosysteme und schädigen diese. Ist in Deutschland die Belastung mit Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxiden (NO_x) und Ammoniak (NH₃), die zur Versauerung und Eutrophierung führen, über den Luftweg in den letzten zwei Jahrzehnten auch stark gesunken, so sind die Belastungen durch NO_x und NH₃ (gemäß NEC-Richtlinie 2001/81/EG) weiterhin zu hoch (vgl. UBA 2008). „Diese Belastungen schaden der biologischen Vielfalt“ schreibt das UBA, fordert: „Ökosysteme besser vor Luftschadstoffen [zu] schützen“ (UBA 2007) und reagiert mit einer Neuauflage des nationalen Luftreinhaltung-Programms.

Filtertechniken zur Luftreinhaltung entlasten Ökosysteme und schützen damit prinzipiell Biodiversität und Natur. Wenn auch die Belastung in Deutschland durch scharfe Grenzwerte und angemessene Technologien deutlich zurückgegangen ist, so treten vor allem in Ballungs- und Industrieräumen der Entwicklungs- und Schwellenländer erhebliche Luftbelastungen mit entsprechenden Folgen (z.B. saurer Regen) auf. Der globale Einsatz bestehender Filtertechnologien kann hier eine große Verbesserung auch und gerade für Erhalt von Natur und Biodiversität mit sich bringen.

Handlungsfeld Wasserschutz

○ Grundwasseranreicherung

Die Anreicherung von Grundwasser durch wasserbauliche Maßnahmen (Überflutungsgebiete, Talsperren, Versickerungsbauwerke) kann in sensiblen Bereichen hoher (potentieller) Biodiversität oder Naturbestandes (bspw. in Au-Gebieten) einen wertvollen Beitrag zum Erhalt dieser leisten. Auch können Lebensräume, die durch intensive Grundwassernutzung zu versteppen oder zu versalzen drohen, mittels Grundwasseranreicherung geschützt werden.

○ Senkung Wasserverbrauch und Abwasserbehandlung

Techniken zur Senkung des Wasserverbrauchs, der Kreislaufführung, der Mehrfachnutzung, der Leitungsinstandhaltung und Abwasserbehandlung zeigen positive Wirkungen, indem sie die Nutzung ökosystemarer Funktionen zurücknehmen und diese weniger mit (produkt- oder prozessbedingten) Schad- und Nährstoffen belasten. Einen wesentlichen Einfluss können zukünftig (in ihrer flächendeckenden Anwendung) Umwelttechniken der Abwasserbehandlung nehmen, die Mikroverunreinigungen, wie Arzneimittelrückstände oder hormonaktive Substanzen, oder Nährstoffe eliminieren oder rückgewinnen können.

○ Meerversauerung und -erwärmung

Der Klimawandel bringt aller Voraussicht nach global starke Änderungen der bestehenden naturräumlichen Verhältnisse und der Zusammensetzung der Lebensformen mit sich. Z.B. hat die Temperaturzunahme des Meerwassers direkte Folgen für die Meerespopulationen; es kommt zu einer räumlichen Verschiebung. Diese führt zu einer extremen Veränderung in den Nahrungsnetzen und in der Artenzusammensetzung. Darüber hinaus kann die Versauerung der Meere u.A. für Tiere mit einem Schutzmantel aus CaCO_3 einschneidende Folgen mit sich bringen. Um die Resilienz des Meerökosystems zu stärken, müssen Lösungsansätze aus den anderen Handlungsfeldern als „Vorsorgemaßnahmen“ kommen, wie bspw. alle Technologien aus dem Klimaschutz, die den Ausstoß von Treibhausgasen reduzieren. Es gibt keine reine „Wassertechnologie“, die eine Lösung bieten würde.

○ Wärmerückgewinnung von Abwässern/Kühlwässern

Lokal zeigen sich häufig energetische Beeinträchtigungen von Ökosystemen in Folge der Einleitung großer Mengen warmen Abwassers vor allem aus Kraftwerks- oder Produktionsbetrieben. Techniken, die Restwärmemengen nutzen, entlasten gleichzeitig die Gewässerökosysteme, die zunehmend unter klimabedingtem Stress stehen.

Des Weiteren sind Techniken des Meeres- und Gewässerschutzes einschlägig. Diese wurden aber bereits im Kapitel 4.3.3 und 8.3.1 in ihren Wirkungen auf Natur und Biodiversität dargelegt.

Handlungsfeld Bodenschutz

○ Gute landwirtschaftliche Praxis

Da Landwirtschaft einen Großteil der zur Verfügung stehenden Flächen in Anspruch nimmt und zudem Lebensraum für diverse Arten bietet, nimmt im Handlungsfeld „Bodenschutz“ eine gute fachliche Praxis im Bereich der Landwirtschaft großen Einfluss auf Natur und Biodiversität. Neben dem direkten Bodenschutz wird der Eintrag von Schad- und Nährstoffen (inklusive hormonaktiver Substanzen) aus einer (gängigen) Überdosierung von Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln und Arzneimitteln in Ökosysteme stark reduziert oder vermieden. Reduziert wird über eine gute fachliche Praxis auch die qualitative und quantitative Schädigung der örtlichen Grundwasservorkommen. Auch dies wirkt sich mittelbar positiv auf Erhalt von Natur und Biodiversität aus. Ebenfalls mittelbaren Einfluss auf Natur und Biodiversität nimmt eine gute landwirtschaftliche Praxis – bestenfalls einer ökologischen Landwirtschaft (s. Kap. 8.3.1) – über eine Reduktion von Stickstoffdüngung und damit einer verminderten Ausgasungen der klimawirksamen Substanzen Methan und Lachgas.

○ Altlastensanierung

Neue Verfahren der Bodensanierung und der Aufarbeitung von Altlasten wie der Phytoremediation, der Natural Attenuation oder neue mikrobielle Verfahren erlauben eine Bodenschonende und Biozönose-erhaltende In Situ-Sanierung. Durch das Belassen des Bodens und die Entnahme der Schadstoffe vor Ort werden die bodeneigenen Ökosysteme vor Ort erhalten und entlastet und nicht (wie im Fall des Aushubs und der thermischen Behandlung) zerstört. Somit leisten diese Verfahren einen Beitrag zur Biodiversität auf ökofunktionaler Ebene.

Weitere bodenrelevante Umwelttechniken mit starkem Naturschutz- und Biodiversitäts-Bezug sind all jene Techniken, die zu einer Reduktion des Flächenverbrauchs für Siedlungs- und Verkehrsfläche, der Zerschneidung durch Verkehrswege sowie des Versiegelungsgrades führen. Hier greifen Techniken aus Bauwesen, Architektur, Stadt- und Raumplanung.

Handlungsfeld Schonung endlicher Ressourcen

○ Nachwachsende Rohstoffe

Die global herrschende Praxis im zunehmenden Anbau von nachwachsenden Rohstoffen konterkariert vielfach Bemühungen zu Naturschutz und Biodiversität. Großflächige Monokulturen, Regenwaldzerstörung, hohe Pestizid- und Düngemittelanwendung, (mitunter hoher Wasserverbrauch) beeinflussen Natur und Biodiversität. Es gilt auch im Bereich nachwachsender Rohstoffe zu einer guten fachlichen Praxis und international anerkannten Zertifizierungssystemen zu gelangen. Wichtige Elemente wären u.a. geeignete Standorte, Fruchtfolgen, mehrjährige Pflanzen, Mischkulturen, Landschaftspflege, geringe Eingriffe, angemessene Verwendung der nachwachsenden Rohstoffe. Neben Anbauverfahren können hier auch

Neuzüchtungen und evtl. gentechnisch veränderte Pflanzen einen Beitrag leisten (vgl. Kap. 8.3.1).

- Extraktionstechniken

Die Gewinnung von mineralischen und metallischen Rohstoffen nimmt weltweit stark negativen Einfluss auf Natur und Biodiversität. Vor allem über die direkte Zerstörung von Habitaten sowie deren Schädigung durch Ausbringung großer Mengen ökotoxischer Stoffe im Zuge von Tagebau und Extraktions- und Reinigungsverfahren. Oft werden riesige giftige Abraumhalden hinterlassen und Abwasser aus den Reinigungsprozessen hochtoxisch in großen Mengen in nahe gelegene Flüsse geleitet (vgl. Blacksmith 2007, 16f.). Jeder Beitrag einer Ressourcenreduktion und jedes umweltfreundlichere Extraktionsverfahren leistet direkt einen Beitrag zum Erhalt von Natur und Biodiversität⁵⁸. Erwähnt sei, dass die Sanierung und Renaturierung von Abraumhalden, Tagebauarealen und der anliegenden Umgebung (bspw. in punkto Wasserhaushalt) Raum für Natur und Biodiversität schaffen können. Diesbezüglich können in Deutschland entwickeltes Know-how und erprobte Verfahren durchaus auch international von Interesse und Wirkung sein.

- Kreislaufführung und Substitution

Verfahren des Recycling und der Kreislaufführung entlasten durch ihre Ressourceneffizienz prinzipiell Natur und Biodiversität. Allerdings kann es hier zu einer Akkumulation von Schadstoffen in den Produkten kommen und damit auch zu einer diffusen Verteilung von Schadstoffen höherer Konzentration in die Umwelt (z. B. von Schwermetallen in Baustoffen). Einen eindeutig positiven Effekt hingegen erzielen hier Techniken, die eine Substitution umweltschädlicher Stoffe durch umweltverträglichere anstreben (FCKW-Ersatz, NiCd- durch Lithium-Ionen-Akkus, etc.).

- Weißer und graue Biotechnologie

Große Hoffnung – auch von Akteuren des Naturschutzes und der Biodiversität – werden auf die zukünftigen Verfahren der weißen und grauen Biotechnologie gesetzt. Mit der Verwendung biotechnischer Verfahren zur industriellen Herstellung und Aufbereitung von Stoffen wird eine Schonung natürlicher Ressourcen und damit auch von Ökosystemen und Natur erwartet.

Handlungsfeld Abfallwirtschaft

Umwelttechniken zur Abfallvermeidung, -erfassung, -behandlung und -beseitigung nehmen auf zwei großen Wegen Einfluss auf Natur und Biodiversität. Zum einen über deren Funktion der Umwelthygiene, d.h. die Diffusion von Schadstoffen in die Umweltmedien Luft, Boden, Wasser zu verhindern, zum anderen über die Schonung der Ressourcen im Zuge von Abfallvermeidung und Kreislaufwirtschaft („Urban Mining“), was letztlich eine Reduktion der Eingriffe in Lebensräume mit sich bringt. In dem Maße wie Abfalltechniken zum einen oder anderen

⁵⁸ Vielfach zeitigt sich die Zerstörung von Biodiversität und Natur in Tagebaugebieten besonders präkär. Liegen diese Gruben oder Brüche doch oft in dünn besiedelten Gebieten mit tendenziell hohem Artenreichtum und (in Entwicklungs- und Schwellenländern) oft in mitten einer subsistent lebenden Bevölkerung, die unmittelbar vom lokalen Artenreichtum abhängig ist.

beitragen, leisten sie auch im Allgemeinen einen Beitrag zum Erhalt von Biodiversität und Natur. Liegt der zukünftige Schwerpunkt in Deutschland auf der Wiederverwertung, steht in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern die Umwelthygiene im Vordergrund.

8.4 Akteure und Netzwerke

Sucht man nach Akteuren in Forschung und Entwicklung von Umwelttechniken im Handlungsfeld Biodiversität und Naturschutz, so wird man – bezüglich Sachtechniken – vor allem in den anderen Handlungsfeldern („Klimaschutz“, „Luftreinhaltung“, „Wasserschutz“, „Bodenschutz“, aber auch „Schonung endlicher Ressourcen“ und „Abfallwirtschaft“) fündig. In dem Maße, wie dort Natur- und Biodiversitäts-relevante Techniken entwickelt werden, sind auch die entsprechenden Akteure verortet⁵⁹.

Bezüglich genuiner und unmittelbarer Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität (vgl. Kap. 8.3.1) sind die Akteure gemäß den Problemfeldern ebenfalls in sehr unterschiedlichen Themenbereichen, wie bspw. der Verkehrstechnik, dem ökologischen Landbau oder der Bioinformationssysteme, tätig. Aufgrund der fehlenden (Selbst-)Zuordnung der Akteure zum Bereich Naturschutz und Biodiversität sowie den großen thematischen Divergenzen gibt es auch kaum Vernetzung der Akteure zwischen den Themenfeldern – schon gar nicht unter dem Banner der „Technikentwicklung für Naturschutz und Biodiversität“.

Im weiteren Umfeld der Entwicklung von Techniken und Verfahren zum Erhalt von Biodiversität und Natur sind Akteure der Forschung und Politik maßgebend. Sorgen erstere für das Verstehen von Problemen, Ursachen und Zusammenhängen im Problemfeld – und eröffnen damit die prinzipielle Möglichkeit des Erhalts (über technische Lösungen), so tragen zweite zur Umsetzung und zum Handeln – und damit zur Verwirklichung (von Techniken) des Erhalts von Natur und Biodiversität bei.

In der Forschung sind im Handlungsfeld „Naturschutz und Biodiversität“ die öffentlichen (meist universitären) Forschungseinrichtungen zu Biologie, Biodiversität, Ökologie, Ökosystemforschung, Genetik und Gentechnik tätig. Hinsichtlich Sozialtechniken sind auch Forschungsinstitutionen der Politik-, Sozial-, Kultur- und Rechtswissenschaften mit Ausrichtung „Umwelt“ oder „Natur“ einschlägig, sowie auch die disziplinären Hybride der Umweltforschung, Sozialökologische Forschung, Humanökologie, Geographie oder der Nachhaltigkeits- und Global Change Forschung von Bedeutung, sofern sie die Interaktion von Mensch und Natur („gesellschaftliche Naturverhältnisse“) oder Ökosystem in den Blick nehmen. Die Akteurslandschaft zeigt sich hier dementsprechend weitläufig, kleinteilig und dispers⁶⁰.

Bei den politisch Agierenden lassen sich Akteure des klassischen Naturschutzes von Akteuren zum Erhalt von Biodiversität trennen. Sind erstere eher (bottom up) bürgerschaftlich organisiert, so sind die treibenden politischen Kräfte zum Erhalt von Biodiversität zunächst (top

⁵⁹ Von „Akteuren“ kann in diesen Fällen allerdings nur in einem weiteren (strukturalistischen) Sinne gesprochen werden. In einem engeren (sozialwissenschaftlichen) Sinne kann hier nur mit Vorbehalt von „Akteuren der Technikforschung und -entwicklung auf dem Felde von Naturschutz und Biodiversität“ gesprochen werden, da die in Technikentwicklung involvierten Institutionen sich selbst nur in seltenen Fällen den Feldern „Naturschutz“ oder „Biodiversität“ zuordnen.

⁶⁰ Zum Ausschnitt der Agrobiodiversität vgl. bspw. IÖW et al. 2004, Kap. 7.

down) auf Ebene der EU und vor allem der UN zu finden⁶¹. Naturschutz wird gestützt von Bürgerengagement, von unzähligen Initiativen, Vereinen, Kooperationen und Verbänden zum Schutz von Arten, Sorten, Landschaften, etc. Das Konzept der Biodiversität dagegen wird vielmehr ausgehend von der UN über internationale Organisationen, Gremien und Verträge in nationale Politiken hineingetragen.

Im Bereich der Wirtschaft lassen sich (außerhalb der anderen Handlungsfelder) kaum Akteure finden. Ausnahmen bilden hier (oft kleinere) Unternehmen und Zweckverbände, die direkt von Natur und Ökosystemleistungen abhängig sind (wie bspw. naturnahe Freizeit, Touristik, Körperpflege und Pharmazeutika, Imkerei) oder deren Unternehmensphilosophie die Bewahrung von Natur und Leben mit einschließt. Einzig nennenswerte Initiative zur Verknüpfung der Akteure zwischen den Bereichen Forschung, Wirtschaft (Technik) und Politik bildet die 2007 ins Leben gerufene „Naturallianz“ (2008), die sich unter anderem auch für eine Stärkung des Themenfeldes in Wirtschaft und Unternehmen einsetzt (vgl. Naturallianz 2008a).

8.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Abschließend sei hier das Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ hinsichtlich der Forschung und (ökonomisch erfolgreichen) Entwicklung von Umwelttechnologien kurz zusammengefasst und dabei erste zielführende Handlungsoptionen identifiziert.

Diese Handlungsempfehlungen erfolgen hier skizzen- und thesenhaft. Vor dem Hintergrund der Zielsetzungen im Handlungsfeld, der Stärkung der Wirtschaft in Deutschland, sowie des derzeitigen Standes in Forschung und Technikentwicklung lassen sich diese Empfehlungen durchaus begründen, bedürfen aber der weiteren Festigung und Ausdifferenzierung. So werden die Empfehlungen im weiteren Verlauf des Projektes als Thesen geprüft, gefestigt oder verworfen, sowie in ihrem Detaillierungsgrad und Grad der Konkretion ausgestaltet, um schließlich als Bestandteile einer Roadmap Niederschlag zu finden.

Das Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ erweist sich in seinen Problemen und (technischen) Lösungsansätzen nahezu ebenso divers wie Natur und Leben selbst. Eine Aufarbeitung des Feldes aus Technikperspektive gestaltet sich hinreichend komplex.

Probleme im Handlungsfeld

Hinsichtlich der Probleme und Ursachen ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Diesen im Einzelnen auszuweisen, ist nicht Gegenstand dieses Projektes. Allerdings sollen vier grundsätzliche – und ebenfalls für die Entwicklung technischer Lösungen einschlägige – Punkte benannt werden.

Unter den Beeinträchtigungen von Natur und Biodiversität sind solche mit vornehmlich informativischen Wirkungen bislang am wenigsten erforscht. Hier gilt es die Forschungen auch auf konzeptioneller Ebene voranzutreiben.

⁶¹ Auch hier haben sich – in Folge internationaler Politik – inzwischen bürgernahe Institutionen und Plattformen gebildet, diese rekrutieren sich aber zumeist aus den bereits bestehenden Umwelt- und Naturschutz-, sowie Entwicklungshilfe-Organisationen.

Wie auch in der nationalen Biodiversitätsstrategie festgehalten sind die „Zusammenhänge zwischen wirtschaftlichen Tätigkeiten und der Auswirkungen auf die biologische Vielfalt [...] noch nicht hinreichend bekannt. Daher sollte die Forschung in diesem Bereich gefördert werden.“ (BMU 2007, 44). Dies ist auch für die Identifikation (ökonomisch) sinnvoller Ansätze der Technikentwicklung wesentlich. Grundlage hierfür bieten die Ergebnisse der Forschungen in den BMBF-Programmen *BIOLOG* und *BioTeam*.

Daran anschließend und diesen Gedanken weiterführend sollte Forschung vermehrt gefördert werden, welche die Zusammenhänge zwischen menschlichem Tätigsein und Natur bzw. biologischer Vielfalt in einer interdisziplinären (und interwissenschaftlichen) Perspektive zu begreifen sucht (z. B. sozialökologische Forschung und ähnliche).

Biodiversitätsforschung könnte durch eine reflexive und kritische Forschung über Biodiversitätsforschung stärker begleitet werden. Nicht zuletzt, um den Erhalt von Natur und Biodiversität in seiner Komplexität und Wertgeladenheit als Politikum handhabbar zu machen und um „rationale Biodiversitätspolitiken“ (Weinmann 2003, 13) zu ermöglichen.

Hemmnisse in der Umsetzung

Probleme hinsichtlich Biodiversität und Naturschutz liegen – ebenso wie deren mannigfaltigen Lösungsansätze – nicht im Zentrum öffentlicher, politischer und forschungspolitischer Aufmerksamkeit. Mit der nationalen Biodiversitätsstrategie (und auch der Naturallianz) wurde zumindest politisch ein sichtbarer Meilenstein gesetzt. Im Vergleich zu anderen Handlungsfeldern steht Naturschutz und Biodiversität jedoch in punkto Sichtbarkeit und politische Maßnahmen oft hinten an. So werden – aus unterschiedlichen Gründen (vgl. Kap. 8.2) – bei Abwägungen mit anderen Handlungsfeldern, deren Wirkung für die (menschliche) Gesellschaft größer, unmittelbarer und leichter zu quantifizieren sind, im Zweifelsfall diese priorisiert, und eben beforscht, gefördert oder bevorzugt. Eine höhere Präsenz von Naturschutz und Biodiversität in öffentlichen, politischen, forschungspolitischen und auch ökonomischen und technischen Debatten wäre wünschenswert.

Des Weiteren unterstützen – auf der Ebene kultureller Verfasstheiten und Weltbilder – den Erhalt (und die nachhaltige Nutzung) von Natur und Biodiversität all jene Bemühungen, die das kulturell tradierte heute aber überkommene Natur- und Kulturverständnis von Kultur als Gegennatur explizieren, kritisch hinterfragen oder gar zu überwinden suchen. In der Praxis (aber bislang weitgehend unbewusst) geschieht dies in der gesellschaftlichen Etablierung des Nachhaltigkeits-Paradigmas⁶². Darüber hinaus sind explizite Formen der Überwindung diesbezüglich althergebrachter Denk- und Wahrnehmungsmuster zu begrüßen (vgl. bspw. Global Mindshift 2008) – auch wissenschaftliche Ansätze, die versuchen, diese Denkkategorien innerhalb der Wissenschaften aufzulösen (wie sozialökologische Forschung, Humanökologie oder auch neuere Ansätze in der Kultur- und Geisteswissenschaft, vgl. bspw. Hansen 2000)⁶³.

⁶² Zur Überwindung der Gegennatur und zur Nachhaltigkeit vgl. Parodi 2006, Kap. 4, 5.4 u. 6.2.

⁶³ Diese wissenschaftlichen Ansätze erhalten ihre politische und öffentliche Kraft gerade aus ihrem Status als Wissenschaft, als säkulare Instanz des Weltdeutungsmonopols. (Dafür aber müssen diese Forschungsansätze innerhalb der Wissenschaft akzeptiert und etabliert sein.)

Technikentwicklung zum Erhalt von Natur und Biodiversität

Zum jetzigen Stand des Projektes lassen sich noch keine Handlungsempfehlungen zur Priorisierung einzelner Umwelttechniken (hinsichtlich deren Umweltproblemlösungs- und/oder Marktpotentiale) geben. Hierzu fehlt schlicht eine gesicherte Begründungsbasis. Diese herzustellen, ist Aufgabe der weiteren Projektarbeit. Auf einer abstrakteren Ebene allerdings lassen sich diesbezüglich bereits Aussagen treffen. Doch auch diese gilt es, im weiteren Projektverlauf kritisch zu prüfen und zu konkretisieren.

Es gibt heute kaum explizite oder genuine Sachtechniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität. Ausnahme bilden hier der Naturnahe Wasserbau und der Ökolandbau⁶⁴.

Naturschutztechniken und Biodiversitätstechniken werden in erster Linie nicht über Sachtechniken sondern über Sozialtechniken realisiert. Diese kontrollieren nicht nur Naturgegebenheiten sondern vor allem die kulturelle Sphäre des Menschen. Sie reglementieren den Zugriff des Menschen auf Natur und schränken dessen Wirkungen auf Natur und Leben ein.

Viele Umweltschutztechniken anderer Handlungsfelder nehmen allerdings positiv Einfluss auf Natur und Biodiversität, indem sie räumliche, stoffliche, energetische oder informativische Beeinträchtigungen auf Natur und Biodiversität zurücknehmen oder neue vermeiden. Natur und Biodiversität erweist sich so als wesentlich abhängig von diesen Techniken. Meistens werden diese Umwelttechniken (bspw. der Luftreinhaltung, der Ressourcenschonung oder des Bodenschutzes) nicht einmal mit den Zielen des Naturschutzes oder der Biodiversität in Verbindung gebracht, geschweige denn explizit an diesen ausgerichtet. Erhalt von Natur und Biodiversität ist bislang meist nur unbeabsichtigte und unbedachte – wenn auch letztlich erwünschte – Nebenfolge vieler Umwelttechnologien. Hier könnte – ohne etwas an den Techniken zu ändern – durch schlichtes Marketing oder Labeling („Diese Technik dient auch dem Erhalt von Natur und Biodiversität“) sowohl die entsprechende Umwelttechnik argumentarisch gestützt als auch die Öffentlichkeit und technikentwickelnde Community für das Problemfeld stärker sensibilisiert werden. Findet doch Natur und Biodiversität nicht nur im Rahmen der Entwicklung von Sachtechniken, sondern auch von vielen Sozialtechniken, wie bspw. bei Raumnutzungskonzepten, keine hinreichende Beachtung. Naturschutz und Biodiversität sollte nicht nur Nebenfolge, sondern vielmehr explizites Ziel bei der Entwicklung von Umwelttechniken werden.

Von den Umwelttechniken anderer Handlungsfelder sind es gerade Technologien mit High-tech-Charakter die direkten Einfluss auf Natur und Biodiversität haben, z.B. Filtertechniken, weiße Biotechnologie, Bionik. Von den Sachtechniken, die direkt dem Erhalt der Natur und Biodiversität dienen, erweisen sich überwiegend naturnahe Techniken und „Lowtech“ als wirksam, da diese in gewissem Umfang Kontrolle und Nutzung von Natur und Ökosystemen extensivieren

Dabei ist zu berücksichtigen, dass heutige „Lowtech“ meist das Produkt erheblicher wissenschaftlicher Anstrengungen ist, so bspw. im naturnahen Wasserbau oder in vielen Versuchen

⁶⁴ Diese beiden Technikfelder sind gekennzeichnet durch ein kollektives Weltbild, das Natur und Leben nicht als bloße Ressource für den Menschen, sondern darüber hinaus als Eigenwert ansieht.

der Entwicklung angepasster Technologien („appropriate technology“). So geht es zukünftig um die Förderung und Etablierung von high science für Lowtech.

Ebenfalls zu bedenken gilt es, dass „appropriate technology“, „Lowtech“ und naturnahe Techniken zu ihrer Forschung und Entwicklung allermeist essentiell auf Hightech angewiesen sind. Informations- und Computertechnologien, Softwareentwicklung, Mess- und Regelungstechnik, auch Materialtechniken erweisen sich als enabling technologies für die Forschung und Entwicklung von Lowtech. Dasselbe gilt – eingeschränkt auf das Feld der luK-Technologien – auch für die Forschung und Entwicklung von Sozialtechniken.

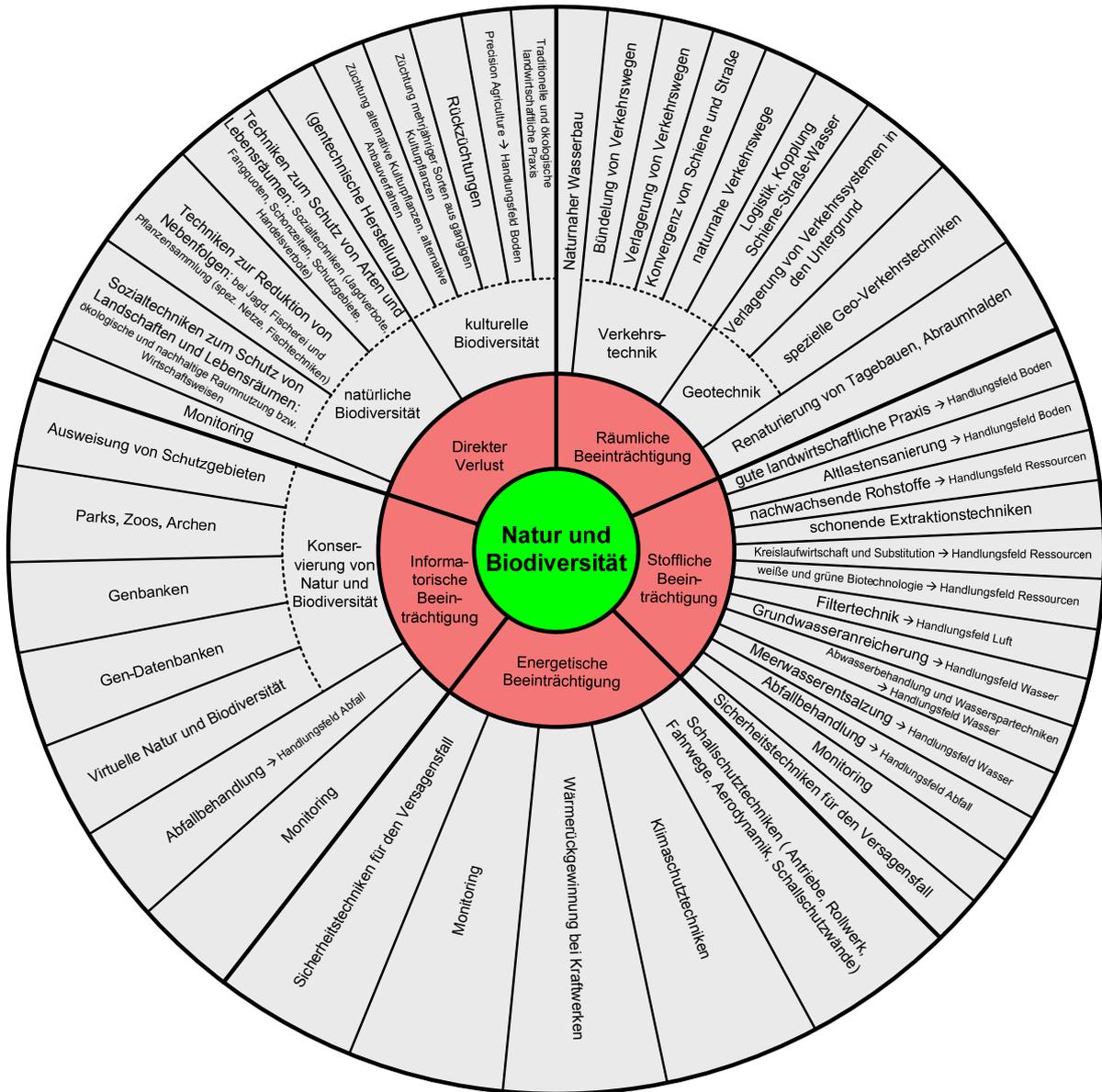
Da Sozialtechniken für den Bereich Naturschutz und Erhalt von Biodiversität an erster Stelle stehen, sollten zukünftig auch vermehrt Forschungen in diese Richtung gefördert werden. Zudem sollte versucht werden diese Sozialtechniken fest im gesellschaftlichen Alltag zu institutionalisieren. Dies aber ist Kerngeschäft nationaler und internationaler Politik.

Für die Installation von Technik in der Biosphäre, bzw. in sensiblen Lebensräumen gilt: Entweder sind die technischen Sachsysteme naturnah und ökosystemverträglich auszubilden – das gilt vor allem, wenn es um flächen-, bzw. raumgreifende Techniken geht oder aber um Techniken, die direkt Naturgegebenheiten, Ökosystemfunktionen oder Lebensräume in Nutzung nehmen (vgl. Kap. 8.3.1 Ökolandbau oder Naturnaher Wasserbau). Oder, technische Systeme sind in ihren Wirkungen derart gegen „Natur“ und Ökosysteme abzuschotten, dass Beeinträchtigungen und eine direkte Zerstörung von Natur und Biodiversität weitgehend vermieden werden. Beide Meta-Strategien können zur Gestaltung von Sachtechniken und technischer Infrastruktur herangezogen und gegebenenfalls auch kombiniert werden (bspw. in der Siedlungs- oder Verkehrstechnik).

Des Weiteren geht es bei der Entwicklung von Naturschutz- und Biodiversitätstechniken – der Diversität der natur- bzw. lebensräumlichen Gegebenheiten wegen – stets um angepasste Techniken. Diese Anpassung wird aber weithin willkürlich vollzogen. Reflexion auf solche angepassten Technologien tut Not und könnte zu einer grundlegenden Systematik angepasster Technologien führen. Diese wiederum könnte die Entwicklung von Techniken zum Erhalt von Natur und Biodiversität unterstützen.⁶⁵

Das Weltbild befindet sich hier im Wandel von einem anthropozentrischen hin zu einem (diffus) physiozentrischen. (vgl. Parodi 2006, Kap. 4).

⁶⁵ Die punktuelle Überwindung natürlicher Beschränkungen durch den Menschen darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass er als Individuum, Gesellschaft, Wirtschaftsgemeinschaft oder Menschheit immer noch existenziell in Naturzusammenhänge eingebunden ist. Er ist und bleibt – so die ökologische Kränkung – wesentlich abhängig von einer weithin unkontrollierten, gewordenen, natürlichen Welt. (Die Folgen des Klimawandels führen dies wieder einmal deutlich vor Augen.) So ist es ein bloßer Akt der Klugheit, das was einem die jetzige Existenz ermöglicht, dauerhaft zu erhalten – auf dass Natur und Biodiversität zukünftig einen integralen Bestandteil des aufkommenden Technotops bilden.



Technologiekompas zum Handlungsfeld „Erhalt von Natur und Biodiversität“ (Entwurf)

Literatur

- Arnetz, B.; Akerstedt, T.; Hillert, L.; Lowden, A.; Kuster, N.; Wiholm, C. (2007): The Effects of 884MHz GSM Wireless Communication Signals on Self-reported Symptoms and Sleep – An Experimental Provocation Study. In: PIERS Online (2007). Vol. 3,. No. 7.
- BOLD (Barcode Of Life Data Systems) (2008). <http://www.barcodinglife.org/views/login.php>, Stand 20.02.2008
- Bechmann, A. (2002): Nachmaterialistische Naturwissenschaft. Grundlage für ein wissenschaftliches Weltbild der Kultur-Kreativen. Barsinghausen.
- Bechmann, A. (2004): Prolog zu einer Nachmaterialistischen Wissenschaft. Orientierungen, Konzept, einführende Beispiele. Barsinghausen.
- Begemann, F.; Bremond, J.; Gladis, T.; Harrer, S.; Monnerjahn, U.; Münch, E.; Weber, G. (2004): Überblick über die Ex-situ-Bestände genetischer Ressourcen in Deutschland. <http://www.genres.de/infos/pdfs/bd23/23-08.pdf>, Stand 20.02.2008
- Blacksmith (2007): The World's Worst Polluted Places – The Top Ten of The Dirty Thirty. New York. Auch: <http://www.blacksmithinstitute.org/wwpp2007/finalReport2007.pdf>, Stand 20.02.2008
- Brugger, W. (1998): Technik. In: Brugger, W. (Hrsg.) (1998): Philosophisches Wörterbuch. Freiburg i. Br. S. 393f.
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2008): Übereinkommen über die biologische Vielfalt (CBD). <http://www.biodiv-chm.de/>, Stand 20.02.2008
- BfLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2008): Kryokonservierung. http://www.genres.de/CF/genres/index.cfm?nav=tgr_kryo, Stand 20.02.2008
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2004): Internationale Partnerschaft für nachhaltige Entwicklung in Bergregionen. Berlin. http://www.uibk.ac.at/diamont/downloads/documents/berg_partnerschaften.pdf, Stand 20.02.2008
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin.
- Bundesregierung (2007): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage: Rückgang von Ackerwildkräutern in Deutschland und Nutzen von Saatgut-Genbanken für Wildpflanzen. Drucksache 16/6850.
- Canon (2008): Innovation in DNA Analysis. Inline PCR + Thermal Melting Detection. <http://www.uslife-sciences.com/research/animation.html>, Stand 20.02.2008
- CargoCap (2008). <http://www.cargocap.de>, Stand 20.02.2008
- CargoCap (2008a): Die Kapazitätsgrenze der Straße. <http://www.cargocap.de/content/die-kapazitaetsgrenze-der-strasse>, Stand 20.02.2008
- Carson, R. (1962): Silent Spring. Boston.
- Coenen, R.; Grunwald, A. (Hrsg.) (2003): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland. Analyse und Lösungsstrategien. Berlin.
- Coenen, R.; Grunwald, A.; Kopfmüller, J. (2003): Nachhaltige Entwicklung und Globaler Wandel – Konsequenzen für die Forschung am Beispiel des Themenfeldes Biodiversität. Karlsruhe.
- CBD (Convention on Biological Diversity) (2008): 2010 Biodiversity Target. <http://www.cbd.int/2010-target/>, Stand 04.01.2008
- CBD (Convention on Biological Diversity) (2008a): Thematic Programmes and Cross-Cutting Issues. <http://www.cbd.int/programmes/>, Stand 04.01.2008
- Deke, O. (2004): Der Preis des "Grünen Goldes" – Informationen und Informationsdefizite über den Marktwert genetischer Ressourcen. Kieler Arbeitspapier Nr. 1233. Institut für Weltwirtschaft. Kiel.

- Deke, O. (2004a): Internalizing Global Externalities from Biodiversity – Protected Areas and Multilateral Mechanisms of Transfer. Kieler Arbeitspapier Nr. 1226. Institut für Weltwirtschaft. Kiel.
- Driesen-Kern (2008): BioLogger. <http://www.driesen-kern.de/produkte/biologgerd/index.html>, Stand 20.02.2008
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (1997): The state of the World's plant genetic resources for food and agriculture. Rome, Italy.
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility) (2008): Das GBIF Deutschland Programm. <http://www.gbif.de/>, Stand 20.02.2008
- Global Mindshift (2008). <http://www.global-mindshift.org/>, Stand 20.02.2008
- Glover, J. D.; Cox, C. M.; Reganold, J. P. (2007): Future Farming: A Return to Roots? In: Scientific America. 8/2007
- Gowdy, J. (1997): The Values of Biodiversity. Markets, Society and Ecosystems. In: Land Economics (1997) No. 1. Vol. 73, p. 25–41
- Groombridge, B.; Jenkins, M. D. (2002): World Atlas of Biodiversity. Earth's Living Resources in the 21st Century. Berkley
- Großklaus, G.; Oldemeyer, E. (Hrsg.) (1983): Natur als Gegenwelt. Beiträge zur Kulturgeschichte der Natur. Karlsruhe
- Hansen, K. P. (2000): Kultur und Kulturwissenschaft. 2. erw. Aufl. Tübingen
- Huber, J. (1989): Technikbilder. Weltanschauliche Weichenstellungen der Technologie- und Umweltpolitik. Opladen
- ICSTM (Imperial College of Science, Technology and Medicine) (2002): Crop diversity at risk. The case of sustaining crop collections. Kent, UK
- Innovationsreport (2008): Evolution durch Fischfang. http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/bericht-96676.html, Stand 20.02.2008
- IOW (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung), Öko-Institut e.V., Schweisfurth-Stiftung, Freie Universität Berlin, Landesanstalt für Großschutzgebiete (Hrsg.) (2004): Agrobiodiversität entwickeln! Handlungsstrategien für eine nachhaltige Tier- und Pflanzenzucht. Endbericht. Berlin. <http://www.agrobiodiversitaet.net>, Stand 20.02.2008
- ISUFT (International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/Tunnel Systems) (2008). www.isuft.org, Stand 20.02.2008
- Jokat, W.; Oerter, H. (Hg.) (1995): Die Expedition ANTARKTI mit FS "Polarstern" 1995. Bericht vom Fahrtabschnitt AN. Herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter; mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer. <http://epic.awi.de/Publications/BerPolarforsch1997219.pdf>, Stand 11.02.2008
- Klimaportal (2008): Auszüge zu "Klimaänderung und Biodiversität" – IPCC Bericht: Klimaänderung 2001. http://www.proclim.ch/klima-portal/Tiere-Pflanzen/Biodiversitaet/Biodiversitaet_IPCC.html, Stand 20.02.2008
- Kopfmüller, J.; Brandl, V.; Jörisen, J.; Paetau, M.; Banse, G.; Coenen, R.; Grunwald, A. (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Berlin
- Körner, S.; Nagel, A.; Eisel, U. (2003): Naturschutzbegründungen. Bundesamt für Naturschutz. Münster
- Landlebenkunstwerk (2008). <http://www.landlebenkunstwerk.de/> (20.02.2008)
- Land Institute (2008): Introduction and Mission. <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2000/08/10/37a747b43>, Stand 20.02.2008
- Lecher, K.; Lüher, H.-P.; Zanke, U. C. E. (Hg.) (2001): Taschenbuch der Wasserwirtschaft. 8. Aufl. Berlin

- Lublinski, J. (2006): Der saure Ozean – Wie der Klimawandel die Weltmeere bedroht. <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/494275/>, Stand 17.02.2008
- Luhmann, N. (1997): Die Gesellschaft der Gesellschaft. Bd. I. Frankfurt a. M.
- Meyer, R. (2005): Alternative Kulturpflanzen und Anbauverfahren. 1. Bericht zum TA-Projekt Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potentiale. TAB Arbeitsbericht 103. Berlin
- Moller, A. B.; Mousseau, T. A. (2007): Species richness and abundance of forest birds in relation to radiation at Chernobyl. In: *Biology Letters* (2007) Vol. 3. No. 5. Royal Society (ed.). p. 483–486
- Naturallianz (2008): <http://www.naturallianz.de/>, Stand 20.02.2008
- Naturallianz (2008a): Erste internationale Unternehmensinitiative für den Schutz der biologischen Vielfalt. <http://www.naturallianz.de/204.html>, Stand 20.02.2008
- Naturallianz (2008b): Handel: Die Natur als Dienstleisterin. <http://www.naturallianz.de/handel.html> . Stand 20.02.2008
- Naturschutz (2007): Naturschutz. <http://www.planet-wissen.de/pw/Artikel,,,,,,,,,BF1CB29ADFD154D4E030DB95FBC31990,,,,,,,,,,,,,html>
- NABU (Naturschutzbund Deutschland e. V.) (2008): Gentechnik. :http://www.nabu.de/m06/m06_11/ , Stand 17.02.2008
- NABU (Naturschutzbund Deutschland e. V.) (2008a): Bauen und Reinigen von Nistkästen. @: http://www.nabu.de/m05/m05_03/01082.html, Stand 20.02.2008
- NEES (Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen) (2007): Biodiversität im Wandel – Muster und Interaktionen pflanzlicher Vielfalt in gestörten und ungestörten Lebensräumen. <http://www.nees.uni-bonn.de/mainz/leit.html>, Stand 20.02.2008
- Oertel, D.; Grunwald, A. (2006): Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik. Vorstudie. TAB-Bericht 108. Berlin
- Patt, H. (1998): Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. Berlin
- Prechtl, P.; Burkhard, F.-P. (Hrsg.) (1996): Metzler-Philosophie-Lexikon. Begriffe und Definitionen. Stuttgart
- Puls-Schlag (2008). <http://www.puls-schlag.org/>, Stand 20.02.2008
- Reichholf, J. H. (2007): Stadtnatur – Eine neue Heimat für Tiere und Pflanzen. München
- Rösch, C.; Dusseldorf, M.; Meyer, R. (2007): Precision Agriculture – Landwirtschaft mit Satellit und Sensor. Frankfurt a. M.
- Schaaf (2007): Interview. Erhältlich beim Projektteam, ITAS, FZK
- Schuh, H. (2007): Der Tod am Wegesrand. In: *Die Zeit* (2007). Nr. 33/2007
- Spektrum (2008): Ackerbau der Zukunft – Zurück zu den Wurzeln? <http://www.suw-online.de/artikel/910621>, Stand 20.02.2008
- Spiegelonline (2008): Craig Venter kreiert Kunst-Chromosom. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,509848,00.html>, Stand 20.02.2008
- Spiegelonline (2008a): Uno warnt vor totalem Kollaps der Fischbestände. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,537224,00.html>, Stand 20.02.2008
- Steiermärkische Landesregierung (2008): Umweltepidemiologische Untersuchung der Krebsinzidenz in den Gemeinden Hausmannstätten & Vasoldsberg. Salzburg. http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10039771_21212/af062e66/Krebsstudie%20Hausmannst%C3%A4tten%20&%20Vasoldsberg%202008%20-%20OBERFELD.pdf, Stand 20.02.2008
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2002): Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes. Sondergutachten. Drucksache 14/9852

- Schuh, H. (2008): Artenreiche Finsternis. In: Die Zeit (2008). Nr. 9/2008
- Science (2007): Biodiversity Loss in the Ocean: How Bad Is It? Letters. In: Science (2007) Vol. 316. No. 5829. pp. 1281–1284. Auch:
<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/316/5829/1281b?maxtoshow=&HITS=10&hits=10&RESULTFORMAT=&fulltext=worm+2005+fish&searchid=1&FIRSTINDEX=0&resourcetype=HWCIT>
Stand 17.02.2008
- Streit, B. (2007): Was ist Biodiversität? Erforschung, Schutz und Wert biologischer Vielfalt. München.
- TAZ (Tageszeitung) (2005): Strichcodes für das Leben <http://www.taz.de/index.php?id=archivseite&dig=2005/02/11/a0201>, Stand 17.02.2008
- TAB (Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2008): Precision Agriculture. Zusammenfassung des TAB-Arbeitsberichtes Nr. 106. <http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab106.htm>, Stand 17.02.2008
- UBA (Umweltbundesamt) (2001): Modellhafte Umsetzung der ökosystemaren Umweltbeobachtung. Zusammenfassung. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/k2631.pdf> (20.02.2008)
- UBA (Umweltbundesamt) (2007): Ökosysteme besser vor Luftschadstoffen schützen. Presseinformation Nr. 59/2007 vom 29.08.2007. Dessau-Roßlau.
- UBA (Umweltbundesamt) (2008): Umweltbeobachtung in Deutschland. <http://www.umweltbundesamt.de/umweltbeobachtung/uid/mapping/fallstudie.htm>, Stand 20.02.2008
- UBA (Umweltbundesamt) (2008a): Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff am Beispiel Nordrhein-Westfalens. http://www.umweltbundesamt.de/umweltbeobachtung/uid/mapping/karte_cl_nut_nrw_bze.htm, Stand 20.02.2008
- Umweltprobenbank (2008). www.umweltprobenbank.de, Stand 11.02.2008
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2001): Global Biodiversity Outlook. Montreal.
- UNEP (United Nations Environment Programme); WCMS (World Conservation Monitoring Centre) (2008): Biodiversity Assessment. <http://www.unep-wcmc.org/assessments/index.htm>, Stand 11.02.2008
- Vistaverde (2003): "Big Brother" – Daten-Rucksack für Bienen. http://www.vistaverde.de/news/Natur/0308/21_chipbienen.htm, Stand 11.02.2008
- Weber, S. (2007): Genschatz in Gefahr. <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/umwelt/667325/>, Stand 20.02.2008
- Weinmann, J.; Hoffmann, S. (2003): Brauchen wir eine ökonomische Bewertung von Biodiversität? In: Weinmann, J.; Hoffmann, A.; Hoffmann, S. (Hg.) (2003): Messung und ökonomische Bewertung von Biodiversität: Mission impossible? Marburg. S. 17–42.
- Weizsäcker, C. F. von (1977): Der Garten des Menschlichen. Beiträge zur geschichtlichen Anthropologie. München.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, (Hrsg.) (2000): Welt im Wandel. Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre. Jahrgutachten 1999. Berlin.
- Worm, B.; Barbier, E. B.; Beaumont, N.; Duffy, J. E.; Folke, C.; Halpern, B. S.; Jackson, J. B. C.; Lotze, H. K.; Micheli, F.; Palumbi, S. R.; Sala, E.; Selkoe, K. A.; Stachowicz, J. J.; Watson, R. (2006): Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. In: Science (2006). Vol. 314. No. 5800, pp. 787–790
- Worm, B.; Sandow, M.; Oschlies, A.; Lotze, H. K.; Myers, R. A. (2005): Global Patterns of Predator Diversity in the Open Oceans. In: Science (2005). Vol. 309. No. 5739. pp. 1365–1369

WWF (World Wildlife Fund) (2007): Hintergrundinformation März 2007: Ausgestorbene Arten. Frankfurt a. M. http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Ausgestorbene_Arten_HG_12_06.pdf , Stand 20.02.2008

WWF (World Wildlife Fund) (2008): <http://www.wwf.de/>, Stand 14.01.2008

9 Erste Bewertung und Ausblick

Mit diesem „State-of-the-Art-Report“ wird der erste Zwischenbericht des Projekts Roadmap Umwelttechnologien 2020 vorgelegt. Er gibt einen 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. Wie in der Einleitung ausgeführt, kann gerade das Potential von Umwelttechnologien nicht ohne deren regulatives Umfeld betrachtet und bewertet werden.

Der Schwerpunkt liegt in dieser Phase des Projekts auf den Technologien selbst, wobei auf eine umfassende Darstellung in großer Breite Wert gelegt wurde. Wichtige Technologien sind entlang von sieben Umwelthandlungsfeldern beschrieben. Dabei wird deutlich, dass in allen sieben Handlungsfeldern eine Zahl sehr unterschiedlicher Technologien, Güter und Dienstleistungen identifiziert und beschreiben werden können. Die Fülle der hier zusammen getragenen Technologien unterstreicht, dass Umwelttechnologien bereits heute eine wichtige Größe in Deutschland sowie auf den globalen Märkten darstellen. Der Megatrend Umwelttechnologien hat sich fest etabliert (vgl. Jänicke 2008). Viele Umweltprobleme werden durchaus auch als Chance begriffen, insbesondere an einem exportorientiertem Hightech-Standort wie Deutschland.

In jedem der sieben Handlungsfelder gibt es Technologien, die aus unterschiedlichen Gründen im Hinblick auf die Perspektive 2020 besonders relevant erscheinen. Einige Beispiele werden im Folgenden genannt.

- Im Bereich Klimaschutz fallen zum einen Technologieentwicklungen auf, die ausschließlich aufgrund politischer Regelmechanismen ein Marktpotential entwickeln können. Prominentestes Beispiel ist die häufig und kontrovers diskutierte CCS-Technologie, mit der trotz ungelöster Probleme bei der CO₂-Speicherung große Exportpotentiale ab 2020 verbunden werden. Hauptquelle der Klimagase ist die Verbrennung fossiler Energieträger, deren Substitution somit einen wesentlichen Ansatzpunkt darstellt. Gleichzeitig erscheinen vor dem Hintergrund steigender Energiepreise die zahlreichen Ansätze zur Erhöhung der Energieeffizienz sehr interessant. Große Potentiale zeigen der Verkehrs- und der Gebäudebereich. Eine große Anzahl von Technologien, welche die Folgen des Klimawandels mildern können (Adaptation), sind Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsprojekten (Dammbau, Pflanzenzüchtung, Modellierung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels, u.a.). Im Hinblick auf Adaptation geht es oft darum, Forschungsbedarf überhaupt erst zu identifizieren. Generell lässt sich sehr viel Forschungs- und Entwicklungstätigkeit mit Bezug zum Klimaschutz in Deutschland identifizieren - in sehr unterschiedlichen Feldern und auf allen politischen Ebenen.
- Auch im Handlungsfeld Luftreinhaltung sind politische Regelungen meist eine notwendige Bedingung für die Einführung und Verbreitung entsprechender Technologien. In vielen Industrieländern, darunter Deutschland, sind in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte bei der Luftreinhaltung gemacht worden. Bei genauer Betrachtung bleiben aber immer noch erhebliche Beeinträchtigungen für Umwelt und menschliche Gesundheit bestehen. Kritischer ist die Situation in Osteuropa, dramatisch ist sie in vielen Schwellen-

und Entwicklungsländern. Neben der Verminderung des Bedarfs an fossiler Energie trugen in den Industrieländern insbesondere Entstickungs-, Entschwefelungs- und Entstaubungsanlagen an Kraftwerken, prozessintegrierte Maßnahmen der Großindustrie sowie die Einführung benzol- und schwefelarmer Kraftstoffe zur Minderung der Emissionen bei. Zunehmend rücken kleinere Emittenten in den Vordergrund (z.B. Holzheizungen, Farben, Lacke, Aerosolsprays) für die vielgestaltige Lösungen und Anpassungsstrategien erforderlich sind. Potentiale für Innovationen sind nach wie vor vorhanden, gerade mit Blick auf die Schwellen- und Entwicklungsländern geht es aber vor allem darum, grundsätzliche Strategien (Regelungen, Gesetzgebung und deren Durchsetzung) umzusetzen und vorhandene Technologien überhaupt in den Markt zu bringen.

- Wasser ist international ein viel beachtetes Thema: auch in diesem Handlungsfeld ist im Zuge von Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum und steigendem Lebensstandard in den Schwellenländern mit einer stark wachsenden Nachfrage nach „Wassertechnologien“ im Feld von „no-tech“ bis „Hightech“ zu rechnen. Auffällig ist der nach wie vor extreme Unterschied zwischen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern im Hinblick auf Verfügbarkeit und Qualität von Trinkwasser (Millenniumsziele der UN). Wichtigste technologische Entwicklungen werden innovative Filtertechniken, Technologien zur Wiederverwendung von Abwasser (neues Paradigma: Abwasser als Rohstoff) und ganz besonders Membrantechnologien sein. Weitere relevante technologische Entwicklungen werden im Bereich der Meerwasserentsalzung, im Hochwasserschutz, bei Wassergewinnungstechnologien sowie bei den Verfahren zur Sanierung von Leitungssystemen und Konzepten der dezentralen Abwasserentsorgung erwartet. Im Wasserbereich finden sich viele Überlappungen zu den anderen Umweltmedien (Boden, Luft) und -themen (Klima, Abfall, Ressourcen, Biodiversität). Beispiele für ein derartiges Zusammenspiel verschiedener Handlungsfelder sind Meerwasserentsalzungsanlagen und Membrantechnologien, die nicht zuletzt auch unter dem Gesichtspunkt Energieeffizienz betrachtet werden sollten (Einsatz von solaren Entsalzungsanlagen).
- Bodenschutz stand nicht immer im Mittelpunkt des Interesses. So mag es überraschen, wenn bei diesem Handlungsfeld zunächst einmal die nicht zu überschätzende Bedeutung des Bodens für viele andere Handlungsfelder auffällt. Boden dient als Wasserspeicher, als CO₂-Senke, als essentielle Grundlage für Biodiversität, als Ernährungsgrundlage für die wachsende Weltbevölkerung aber eben auch als Ressource für den Anbau von Biomasse, die eine klimaschonende Energieversorgung unterstützen kann. Die Bodenfunktionen sind durch ein sich änderndes Klima bedroht. Bodengefährdungen durch Kontamination, Degradation, Flächenverbrauch für Siedlung und Verkehr/Verdichtung sind global betrachtet kein marginales Umweltproblem mehr, sondern haben eine bedrohliche Tragweite erreicht. Wesentliche technologische Entwicklungen wird es in kostengünstigen In-Situ Sanierungsverfahren mit kurzer Sanierungsdauer, Rekultivierungsmaßnahmen, in analysetechnischen und Bewertungsverfahren und in Verfahren der Fernerkundung, Verfahren zur Lösung von Erosionsproblemen und der konservierenden Bodenbearbeitung geben. Wichtigstes Forschungsthema werden die Wechselwirkungen zwischen Klimaänderung und den Veränderungen von Bodenzustand und „Leistungsfähigkeit“ der Böden sein.

- Die Schonung endlicher Ressourcen wird als ein Thema skizziert, das in den nächsten Jahrzehnten von herausragender Bedeutung sein wird. In Anbetracht der Verknappung wichtiger Rohstoffe für die industrielle Produktion aufgrund der wachsenden Nachfrage von Industrie- und Schwellenländern, der Belastung des produzierenden Gewerbes durch steigende Rohstoffpreise sowie der gravierenden Umweltbelastungen, die mit dem beschleunigten Rohstoffverbrauch verbunden sind, erscheint die Erhöhung der Rohstoffproduktivität nicht nur wünschenswert, sondern zwingend erforderlich. Vier Basisstrategien kommen für die Erhöhung der Rohstoffproduktivität in Betracht (Substitution, Kreislaufführung, Erhöhung der Materialeffizienz und Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten). Zu deren praktischer Umsetzung steht ein breites Spektrum an Einzeltechnologien zur Verfügung, darunter Spitzentechnologien wie beispielsweise die weiße Biotechnologie, anspruchsvolle Technologien im Anlagenbau oder aus der Mess-, Steuer- und Regeltechnik und innovative Dienstleistungen. Das Feld wird generell als forschungs- und wissensintensiv eingestuft und es sind im Durchschnitt steigende deutsche Patentaktivitäten zu verzeichnen. 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. Im Hinblick auf die Substitution bietet sich der Ersatz knapper Rohstoffe durch solche mit größerer Reichweite, durch nachwachsende Rohstoffe oder durch Sekundärrohstoffe an. Stoffe, die Schäden für Mensch und Umwelt hervorrufen, aber nicht substituierbar sind, können in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Eine Steigerung der Materialeffizienz, also die Verringerung des Rohstoffinputs pro Produkteinheit, lässt sich durch Miniaturisierung, Leichtbau und Bionik, den Einsatz neuer Werkstoffe sowie eine optimierte Prozessführung und eine Reduzierung von Ausbeuteverlusten im Herstellungsprozess erreichen. Zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten kommen Oberflächenbeschichtungen, die Verbesserung des Korrosionsschutzes, Konzepte zum „Upgrading“ gebrauchter Produkte sowie die Einbeziehung der Reparaturfähigkeit als Kriterium in den Designprozess in Betracht. Um bereits im Produktentstehungsprozess die Weichen für eine Kreislaufführung von Abfällen zu stellen, setzt „Design for Recycling“ z.B. auf eine geeignete Werkstoffauswahl, einen modularen Aufbau sowie lösbare Verbindungstechniken. Deutschland ist bei der Entwicklung von Technologien, die zur Umsetzung dieser strategischen Ansätze dienen, gut aufgestellt. Dies gilt vor allem mit Blick auf die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe, den optimierten Leichtbau und die Entwicklung neuer Werkstoffe, sowie die Anwendung bionischer Problemlösungen.
- Im Bereich Abfallwirtschaft ist erneut die große Diskrepanz zwischen den Industrieländern und den Entwicklungsländern auffällig. Abfälle stellen zwar primär ein Hygieneproblem dar, sie werden aber vor dem Hintergrund einer allgemeinen Verknappung von Rohstoffen und Energie zunehmend auch als Ressource begriffen. Die Industrienationen haben bereits teilweise einen Paradigmenwechsel von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft vollzogen und die Vermeidung und Verwertung von Abfällen forciert. Begriffe wie „Urban Mining“ weisen auf die wachsende Bedeutung anthropogener Rohstofflager in einem gesamtwirtschaftlichen Kontext hin. Die Strategie „Ziel 2020“ für die Zukunft der Abfallentsorgung in Deutschland führt diesen Ansatz weiter (Verbücheln et al 2003); eine

möglichst vollständige Nutzung der in Abfällen enthaltenen Werkstoffe und Energien sowie die Vermeidung nachsorgebedürftiger Deponien werden angestrebt. Für die Behandlung von Abfällen steht in den Industrienationen ein konsolidiertes Portfolio mechanischer, biologischer, thermischer und chemisch-physikalischer Verfahren zur Verfügung, die Beseitigung von Abfällen oder Behandlungsrückständen erfolgt auf geordneten Deponie. Die Weiterentwicklung der Sortiertechnik bietet besondere Potentiale hinsichtlich der Rückgewinnung von Wertstoffen. Ein wichtiger Trend ist die sensorgestützte Sortiertechnik; sie erscheint geeignet, bislang ungenutzte Potentiale auch in gemischten Abfällen und Reststoffen zu erschließen. Im Bereich automatische Stofftrennung sind deutsche Unternehmen weltweit führend. Obgleich die Rückgewinnung von Wertstoffen auch in den Schwellen- und Entwicklungsländern ein fester Bestandteil der Abfallwirtschaft ist, sind Abfälle dort noch immer und in erster Linie ein Problem der Stadt- und Umwelthygiene; die Organisation der Abfallerfassung und die Einrichtung geordneter Deponien erscheinen vielerorts 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. Die Behandlung, Aufbreitung und Verwertung von Abfällen ist mit Kosten verbunden, denen bislang nur in Ausnahmefällen deckende Erlöse, bspw. für zurückgewonnene Wertstoffe, gegenüber stehen; administrative Vorgaben sind daher als wesentliche Impulsgeber im Bereich der Abfallwirtschaft anzusehen.

- Naturschutz und Biodiversität: Der Verlust an Biodiversität und Natur stellt global ein gravierendes Umweltproblem dar. Er ist meist unmittelbar an die menschliche Inanspruchnahme von Flächen, Lebensräumen und Ökosystemen gekoppelt. In Politik, Wissenschaft und Wirtschaft erfährt das Thema inzwischen zunehmend Beachtung. Technologien mit dem unmittelbaren Ziel des Schutzes von Natur oder Biodiversität gibt es allerdings wenige. Größere Ausnahmen bilden hier der Naturnahe Wasserbau und der Ökolandbau. Gerade zum Erhalt von Biodiversität und Natur sind politische Steuerungsinstrumente wie Raumplanung, Grenzwertsetzung, Ausweisen von Schutzgebieten, Governance, Labeling, Verbraucheraufklärung, Ökosystemmanagement, etc. unverzichtbar. Hightech lässt sich heute wie künftig vor allem in der Emissionsreduktion, der Ressourceneffizienz und dem Monitoring gewinnbringend einsetzen. Hier nehmen die Techniken der anderen Handlungsfelder entscheidend Einfluss. Lowtech spielt in den flächendeckenden technischen Praxen wie der Landwirtschaft, Siedlung oder dem Verkehr eine große Rolle, sofern sie die Inanspruchnahme der dortigen Ökosysteme reduziert. Ein eigenes Problemfeld bildet der Verlust an Arten- und Sortenreichtum von Kulturpflanzen und Nutztieren. Hier zeigt sich neben Konservierungstechniken und Neuzüchtungen vor allem der Erhalt in der gelebten Praxis als wichtig. Diese aber gilt es (global) über rechtliche, politische und wirtschaftliche Regelungen zu ermöglichen.

Die hier getroffene Hervorhebung von Technologien ist zunächst illustrativ und vorläufig. In der zweiten Phase des Projekts muss diese Auswahl im Hinblick auf die zeitliche Perspektive 2020 überprüft und ergänzt werden. Grundsätzlich haben sich die in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber gewählten und abgegrenzten Handlungsfeldern bisher als tragfähige Kategorien erweisen. Im weiteren Projektverlauf ist jedoch zu überprüfen, inwieweit eine weniger sektorale, mehr integrative Betrachtungsweise ergänzende Erkenntnisse liefern kann.

Dabei wird es darum gehen, Schnittstellen zwischen den Handlungsfeldern im Hinblick auf konvergierende Entwicklungen und Synergieeffekte untersuchen.

Es wurde in diesem Bericht mehrfach darauf hingewiesen sowie an manchen Stellen detaillierter ausgeführt, dass das regulative Umfeld sowie die politischen Zielsysteme in vielen Bereichen der Umwelttechnik von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung innovativer Technologien sind. Dieses wechselseitige Verhältnis wird im Rahmen des Roadmapping-Prozesses in Phase II dieses Projekts im Hinblick auf den Zeithorizont 2020 näher ausgeleuchtet. Es erfolgt dann die anvisierte Integration der problemorientierten Perspektive mit der technikinduzierten Vorgehensweise. Auf dieser Basis wird es möglich, Forschungsbedarf zu identifizieren und strategische Handlungsoptionen für eine zukünftige Förderpolitik im Bereich Umwelttechnologien aufzuzeigen.

Literatur

- Jänicke (2008): Megatrend Umweltinnovation. Zur ökologischen Modernisierung von Wirtschaft und Staat. Oekom.
- 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.