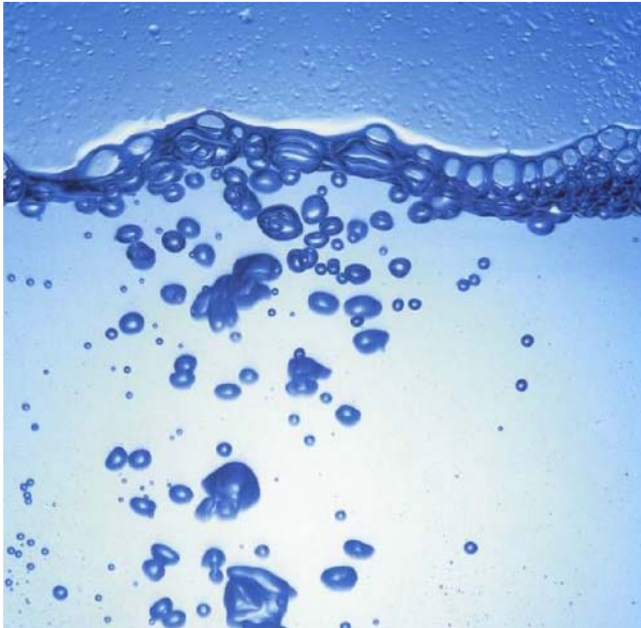


Zukunftsmarkt

Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Umwelt
Bundes
Amt 
Für Mensch und Umwelt

Zukunftsmarkt

Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie

Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes

im Rahmen des Forschungsprojektes

Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern

(Förderkennzeichen 206 14 132/05)

Gesamtkoordination: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
(Fh-ISI), Karlsruhe.

Durchgeführt von

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC)

der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

Autoren:

Wolfgang Luther

Gerd Bachmann

Vera Grimm

Frank Marscheider-Weidemann

Hartmut Schug

Axel Zweck

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt (UBA)
Postfach 1406, 06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
www.umweltbundesamt.de

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Referat Öffentlichkeitsarbeit
11055 Berlin
E-Mail: service@bmu.bund.de
www.bmu.de

ISSN: 1865-0538

Projektbetreuung: Michael Golde
Umweltbundesamt (UBA)

Peter Franz
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Autoren: Dr. Wolfgang Luther, Dr. Gerd Bachmann, Dr. Vera Grimm, Hartmut Schug,
Dr. Dr. Axel Zweck (VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf)
Dr. Frank Marscheider-Weidemann
(Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe)

Titelfotos: Q-Cells AG, BMU / Rupert Oberhäuser, ccvision GmbH

Stand: Dezember 2007

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Summary	2
1 Einführung	3
2 Potenziale der Technik-/Produktlinie.....	4
2.1 Optimierung, Vermeidung und Prozess-Substitution	5
2.2 Aufbereiten und Filtern.....	6
2.3 Mess- und Regelungstechnik.....	13
2.4 Reifegrad der Technologie.....	15
3 Technologische Entwicklungsdynamik	16
4 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft.....	18
5 Wirtschaftliche Potenziale	19
6 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder	25
7 Akteursanalyse.....	27
8 Rahmenbedingungen und Regulierung	30
9 Fazit und SWOT-Analyse	32
Literatur.....	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Trenngrößen und Molekulargewicht für die verschiedenen Trennverfahren (Quelle: EnTec).....	7
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung eines möglichen Verfahrens zur <i>in situ</i> Grundwasserreinigung	10
Abbildung 2-3:	Das Prinzip der Photokatalyse an TiO ₂	11
Abbildung 3-1:	Weltweite Patententwicklung der Nanotechnologie 1991 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)	16
Abbildung 3-2:	Patentdynamik der Nanotechnologie weltweit (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)	17
Abbildung 5-1:	Welthandelsanteil für Nanotechnologie-Waren in den Jahren 2000 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)	21
Abbildung 5-2:	Entwicklung der Welthandelsanteile für Nanotechnologie-Waren in den Jahren 1993 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)	22
Abbildung 5-3:	RCA für Nanotechnologie im Zeiträumen 2000–2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)	23
Abbildung 6-1:	Verteilung der Nanotechnologiepatente nach Herkunftsländern (EPO 2006)	25
Abbildung 6-2:	Relativer Patentanteil für Nanotechnologie in den Zeiträumen 2000–2004 und 1995–1999 (eigene Berechnung Fraunhofer-ISI, 2007)	26
Abbildung 6-3:	Patentanteile nach ausgewählten Ländern und verschiedenen Segmenten für 2000 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer-ISI, 2007)	26
Abbildung 8-1:	Behandlungsniveau für organische Belastung in kommunalen Abwässern im europäischen Vergleich (EU Kommission 2004)	31
Abbildung 8-2:	Investitionen Abwasser im europäischen Vergleich (OECD)	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1:	Internationaler Vergleich der Außenhandelsstärke in Bezug auf Nanotechnologieranwendungen in der Produktgruppe Filtersysteme; Revealed Comparative Advantage (RCA) 2004, Welthandelsanteil (WHA) 2004 [%] (eigene Berechnung FHG-ISI, 2007)	23
Tabelle 9-1:	SWOT-Analyse für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EU und Deutschlands in der Techniklinie nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologien	33

Zusammenfassung

Diese Fallstudie zum Handlungsfeld „Nanotechnologie“ mit dem Schwerpunkt „Nachhaltige Wasserwirtschaft“ wurde im Rahmen des Forschungsprojektes des Umweltbundesamtes „Zukunftsmärkte – Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ erstellt.

Die **Nanotechnologie** ist eine breite Querschnittstechnologie mit einer Vielzahl von Verfahrens- und Technologieplattformen. Nanotechnologien können dazu beitragen, Wasserverschmutzungen vorzubeugen (z. B. durch Substitution wasserbelastender Prozesse) oder zu beseitigen (z. B. durch Nanomaterialien/-membranen zur Aufbereitung von Abwässern). Darüber hinaus können Nanotechnologien zur Überwachung der Wasserqualität eingesetzt werden (z. B. durch Nanosensoren).

Wasser spielt eine zentrale Rolle bei der Ernährung und der Gesundheit, in der Landwirtschaft (Bewässerung) sowie als Lösungsmittel bei industriellen Prozessen. Die weltweite nachhaltige Versorgung mit Trink- und Brauchwasser wird als eine der großen Herausforderungen der nächsten Jahrzehnte angesehen. Der **Weltmarkt** in der Wasserversorgung wird auf über 400 Mrd. US-\$ prognostiziert (2010), wobei die Membrantechnologien eine Schlüsselrolle einnehmen.

Die hohe **Entwicklungsdynamik** in den Nanotechnologien spiegelt sich in der stetig wachsenden Zahl an Nanotechnologiepatenten und -publikationen wider. Wichtiges Segment sind neuartige Filtrationsmembranen sowie Nanomaterialien für die katalytische, adsorptive oder magneto-separative Reinigung von Abwässern; zum Teil wurden in diesem Bereich bereits erste marktreife Produkte entwickelt. Langfristig bietet die Konvergenz von Elektronik, Biotechnologie, Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik neue Perspektiven und Anwendungen auch für die nachhaltige Wasserwirtschaft.

Deutschland besitzt vor allem aufgrund seiner starken Grundlagenforschung eine **hohe technologische Kompetenz** in der Membran- und Nanofiltrationstechnik, die als gute Basis zur Erschließung von Auslandsmärkten dienen kann. Die USA sind führend im Bereich der Nanotechnologie und bei Anwendungen für die Wasserwirtschaft.

Ansatzpunkte für **Politikmaßnahmen** sind die Initiierung und Durchführung von innovationsbegleitenden Maßnahmen für den weiteren Ausbau dieser Technologien – insbesondere im Hinblick auf Anwendungen zur Vorbeugung wasserbelastender Prozesse – sowie zur Erschließung von internationalen Märkten. Eine besondere Unterstützung sollte bei der Entwicklung serienreifer Anwendungen und Verfahren erfolgen, damit die innovativen Ansätze aus der Forschung in international vermarktbare Produkte ermöglicht bzw. beschleunigt werden. Hohe Umweltstandards in Deutschland und in der EU – die dann möglicherweise auch von weiteren Ländern übernommen werden – verbessern dabei die Exportchancen.

Summary

This case study on nanotechnology with a focus on sustainable water management was done within the scope of the research project "Future markets – innovative environmental policy in important fields of action".

Nanotechnology is a broad cross-cutting technology with a multitude of process and technology platforms. Nanotechnologies can contribute to preventing water pollution (e. g. by substituting water polluting processes) or removing this (e. g. nanomaterials/membranes in wastewater treatment) and can be used to monitor water quality (e. g. nanosensors).

Water plays a key role in nutrition and health, in agriculture (irrigation) and as a solvent in industrial processes. A globally sustainable supply of drinking water and industrial water is seen as one of the main challenges of the next decades. The world water supply market is predicted to be more than 400 billion US-\$ (2010), in which membrane technologies will play a key role.

The **rapid development** of nanotechnologies is reflected in the constant growth in the number of nanotechnology patents and publications. New types of filtration membranes and nanomaterials for the catalytic, adsorptive or magnetic-separation purification of wastewater constitute an important segment; some marketable products have already been developed in this field. In the long term, convergence in the fields of electronics, biotechnology, nanotechnology and microsystems will offer new perspectives and applications, in sustainable water management as well.

Germany has **high technological competence** in membrane and nanofiltration technology, mostly based on the strength of its basic research, which can serve as a good basis from which to tap foreign markets. The USA is the leader in the field of nanotechnology and in water management applications.

Starting points for **policy measures** are the initiation and implementation of innovation-supporting measures for the further development of these technologies –particularly with regard to applications preventing water polluting processes – as well as tapping international markets. Developing applications and processes which are ready to go into mass production should receive particular support so that innovative methods from research make internationally marketable products possible or accelerate them. Strict environmental standards in Germany and the EU – which may then be adopted by other countries – improve the prospects for exports.

1 Einführung

Der Umwelt- und Ressourcenschutz gewinnt national und international eine zunehmende Bedeutung. Damit verbunden wird sich die Nachfrage nach Umwelttechniken weltweit dynamisch entwickeln. Inzwischen hat sich aus dem Umwelt- und Ressourcenschutz auch ein maßgeblicher Treiber für Innovationen entwickelt. Umwelt- und Innovationspolitik wachsen dadurch immer stärker zusammen, moderne Umweltpolitik muss auch Innovationspolitik sein.

Um Wachstums- und Beschäftigungspotenziale zu mobilisieren ist es wichtig, Synergieeffekte zwischen der Verbesserung der Umweltsituation, der Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze und der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit zu identifizieren und zu nutzen. Das Forschungsprojekt „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ analysiert die Innovationsdynamik in wichtigen Handlungsfeldern systematisch und auf zusammenfassender Ebene. Diese Handlungsfelder bildeten die Basis, um elf Produktgruppen/Technologien auszuwählen, die in Fallstudien vertieft untersucht werden.

Jede Fallstudie enthält eine kurze Vorstellung der Grundlagen der entsprechenden Technologie. Anschließend folgt eine nähere Analyse des Zukunftsmarktes und seiner Innovationsdynamik. Besonderes im Blickpunkt stehen dabei die Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen im internationalen Vergleich, ihr Umfeld sowie Ansatzpunkte für eine Stärkung des deutschen und europäischen Innovationssystems.

Innerhalb der Reihe: „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind Fallstudien zu den folgenden Themen erschienen: Solarthermische Stromerzeugung, CO₂-Abscheidung und Speicherung, Elektrische Energiespeicherung, Solares Kühlen, Energieeffiziente Rechenzentren, Biokunststoffe, Synthetische Biokraftstoffe, Hybride Antriebstechnik, Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement, Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie, Stofferkennung und –trennung.

In dieser Fallstudie zum Handlungsfeld „Nanotechnologie und Umwelt“ werden Produkte und Verfahren der Nanotechnologien mit Bezug zur nachhaltigen Wasserwirtschaft vorgestellt und beschrieben sowie deren Bedeutung für Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft dargelegt. Die Studie stellt weiterhin marktführende Länder vor und geht auf die Patentlage sowie das Innovationssystem ein, das den Entwicklungen in der Nanotechnologie zugrunde liegt. Die abschließende SWOT-Analyse bietet eine Zusammenfassung über den aktuellen Stand sowie die zukünftigen Herausforderungen in diesem Technologiesegment.

2 Potenziale der Technik-/Produktlinie

Die Nanotechnologie bietet als Schlüssel- und Querschnittstechnologie eine Fülle interdisziplinärer Ansätze für Verfahrens- und Produktinnovationen in zahlreichen Technikfeldern und Wirtschaftsbranchen, auch im Bereich der nachhaltigen Wasserwirtschaft. Zunehmende Wasserknappheit und weltweite Wasserverschmutzungen werden als eine der großen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte gesehen; die nachhaltige Versorgung der Weltbevölkerung mit Trink- und Brauchwasser ist von grundlegender Bedeutung.

Die Nanotechnologie stellt eine Vielzahl von Möglichkeiten bereit, die Potenziale für ökologisch sinnvolle und vorteilhafte Verfahrensinnovationen und Umweltschutzmaßnahmen im Wassersektor bieten. Das Spektrum der Nanotechnologie-Anwendungen reicht dabei von *Nanomaterialien* zur Reinigung und Aufbereitung von Abwässern über *Nanosensoren* zur effizienten und selektiven Überwachung der Wasserqualität bis zur vollständigen Substitution wasserbelastender Prozesse durch *nanotechnologische Verfahrensinnovationen*.

Nanotechnologische Innovationen setzen an verschiedenen Stellen der Verfahrens- und Wertschöpfungskette der Trinkwasserversorgung an. Nanotechnologien können dazu beitragen, Wasserverschmutzung vorzubeugen oder zu beseitigen. Direkte und vielfältige Einsatzmöglichkeiten bieten sich insbesondere auch in den nachgeschalteten Reinigungsverfahren, wie z. B. der Wasseraufbereitung, der Abwasserbehandlung oder der Grundwassersanierung.

Die Reinigung von Abwässern ist ein aufwändiger und energieintensiver Prozess, so dass es sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll ist, den Einsatz von Prozesswasser zu reduzieren oder sogar komplett zu vermeiden. Auch der Einsatz von nur leicht verschmutztem Brauchwasser in Haushalten und in der industriellen Produktion sowie eine damit verbundene Kreislaufführung führen zur Reduktion von Abwässern. Die Nanotechnologien bieten darüber hinaus Potenziale, neue Produktionsprozesse mit weniger wasserbelastenden Nebenprodukten zu etablieren (siehe Kap. 2.1).

Die Aufbereitung und Filterung von Wasser, das durch industrielle, landwirtschaftliche oder siedlungsbedingte Einträge verunreinigt wurde, ist ein wichtiger Einsatzbereich der Nanotechnologien. Auch die Wasserdesinfektion und die Wasserentsalzung sind hier von Bedeutung. Wichtige Technologien umfassen Membran- und Filtertechnologien, biotechnologische Verfahren, aber auch Verfahren aus dem Anlagenbau (siehe Kap. 2.2).

Bei der Überwachung von Abwässern und Reinigungsprozessen ist ein vielfältiges Spektrum an Mess- und Regeltechnologien zur Erfassung chemischer und biologischer Verunreinigungen im Wasser erforderlich. Die Nano-Sensorik bietet in vielen Bereichen Optimierungspotenziale bei der selektiven Messung von Schadstoffen (siehe Kap. 2.3).

Die möglichen toxischen Wirkungen von Nanopartikeln sind noch nicht hinreichend untersucht. Daher gilt auch für die Nanotechnologie im Kontext mit der nachhaltigen Wasserwirtschaft, dass die technologische Fortentwicklung immer mit einer wissenschaftlichen Risikobewertung einhergehen sollte.

2.1 Optimierung, Vermeidung und Prozess-Substitution

Traditionelle Technologien in der Wasserwirtschaft beinhalten die Kreislaufführung, die teilstromspezifische Wasserbehandlung, die Lebensdauerverlängerung von Produkten sowie die Umstellung von Abläufen und Synthesen. Nanotechnologien könnten an all diesen Stellen für effizientere, wassersparendere Verfahren eingesetzt werden. Prozessintegrierte Maßnahmen im industriellen Umfeld dienen der Minimierung des Wasserverbrauchs, z. B. durch Kreislaufführung oder der gänzlichen Vermeidung von Wasser als Trägermedium in einer Reaktion. Darüber hinaus werden lösungsmittelfreie Prozesse entwickelt.

Organische Lösungsmittel können die Gewässer stark belasten, daher müssen die Abwässer entsprechend aufwendig gereinigt werden; zurück bleibt oft Sondermüll. Als Ersatz für Lösungsmittel werden Nanoemulsionen z. B. im Kosmetikbereich bzw. in der Pharmabranche untersucht [z. B. Wu 2007]. Durch den Einsatz von Nanoemulsionen – also von Öl-Wasser-Emulsionen im Submikron-Bereich – kann die Wirksamkeit von Cremes oder Salben optimiert werden. Mit Hilfe einer wesentlichen Tröpfchenverkleinerung vom Mikrometer-Bereich hin zum Submikron-Bereich gelingt es, die Penetration in die Haut zu verbessern und so entsprechende Wirkstoffe gezielter an den Wirkort zu transportieren. Nanoemulsionen können darüber hinaus unter bestimmten Voraussetzungen transparent werden. Die wenigen heutigen Herstellungsverfahren von Nanoemulsionen arbeiten jedoch mit hohen Drücken, was energieaufwändig und mit verschiedenen Problemen behaftet ist; Prozesse, die mit Niederdruck arbeiten und somit energetisch günstiger sind, werden untersucht. Eine Verwendung von Nanoemulsionen im Reinigungsbereich als Ersatz für halogenierte Lösungsmittel wird diskutiert [Acosta 2005].

Lösungsmittel können durch lösungsmittelfreie Pulverbeschichtung von Werkstoffen sowie durch Einsatz überkritischer Fluide bzw. ionischer Flüssigkeiten gänzlich vermieden werden. Da eine Pulverbeschichtung nur auf elektrisch leitenden Werkstoffen

möglich ist, könnte eine dünne Schicht eines leitenden Nanomaterials die Grundlage für eine Pulverbeschichtung ermöglichen [ETAG 2006].

Nanotechnologien können in weiteren Bereichen der Produktion sowie auch im landwirtschaftlichen Bereich ökologisch sinnvoll eingesetzt werden und zu deutlichen Einsparungen von Wasser führen. Beispielsweise können chemische Prozesse durch nanostrukturierte Katalysatoren¹ deutlich effizienter gestaltet und dadurch die Menge an wasserbelastenden Nebenprodukten reduziert werden. Ein weiteres Beispiel ist die Versiegelung von Fassaden durch schmutzabweisende Nano-Beschichtungen, um den Verbrauch von Reinigungsmitteln zu reduzieren.

2.2 Aufbereiten und Filtern

Direkte und vielfältige Einsatzmöglichkeiten bieten sich für Nanotechnologien in den nachgeschalteten (end-of-pipe) Reinigungsverfahren, wie der Wasseraufbereitung, der Wasserdesinfektion, der Grundwassersanierung und der Abwasserbehandlung. Besonders die Prinzipien der Stofftrennung und Katalyse sind neben neuartigen Nanomaterialien im Wassersektor von Interesse. Stoffgemische können mit physikalischen Trennverfahren, wie der Filtration, Adsorption, Magnetseparation oder Sedimentation getrennt werden. Für wässrige Lösungen mit nanoskaligen Partikeln sind auch thermische Trennverfahren geeignet, deren Trennmechanismus überwiegend auf diffusiven und konvektiven Stofftransportvorgängen beruht.

Filtration

Bei der Wasserreinigung sind insbesondere Membranverfahren wichtig. Sie trennen druckgetrieben und selektiv Stoffe entsprechend ihrer Größe, Ladung oder anderer Eigenschaften mit Hilfe semipermeabler Membranen (vgl. Abbildung 2-1). Je nach Größe des zu trennenden Stoffes, handelt es sich um eine mechanische oder thermische Trennung. Die Mikro-(MF) und die Ultrafiltration (UF) trennen kolloidal oder molekular dispers gelöste Partikel bis zu einer Größe von 2 nm bis ca. 10 nm, während die Nanofiltration (NF) und die Umkehrosmose (reverse osmosis, RO) auch gelöste organische und anorganische Substanzen mit einer Größe < 2 nm zurückhalten können, die mit nicht-chemischen Trennverfahren sonst nur schwer zu separieren sind.²

¹ Inwieweit Enzyme aus der Weißen Biotechnologie als nanostrukturierte Katalysatoren angesehen werden können, wird kontrovers diskutiert; in dieser Studie werden sie nicht als solche betrachtet.

² Die hier bezifferten Trenngrenzen entsprechen den Empfehlungen der IUPAC-Kommission (International Union of Pure and Applied Chemistry).

Bei der Aufbereitung mikrobiell belasteter Wässer zu Trinkwasser wird nach der Membranfiltration allerdings noch eine anschließende Desinfektion empfohlen, um sämtliche gefährdende Rückstände zu eliminieren (insbesondere Viren). Über bestimmte Eigenschaften der Membranen – wie das Verhalten im Langzeitbetrieb oder unter ungünstigen Bedingungen – fehlen derzeit noch ausreichende Informationen [DVGW 2006].

Die Nanofiltration hat sich in den letzten 25 Jahren zu einem schonenden und selektiven Trennverfahren für wasserlösliche Produkte in der Prozesstechnik entwickelt und findet zunehmend Verwendung in der Abwasserbehandlung, der Wasseraufbereitung und der Wasserdesinfektion. Bei der Nanofiltration werden fast ausschließlich mehrwertige Ionen abgetrennt, während einwertige Ionen, wie Nitrate und Fluoride nur mit einer Umkehrosmose beseitigt werden können [Samhaber 2005].³ Als Membranmaterialien kommen Polymere mit nanoskaligen Poren (auch gefüllt mit funktionalen polymeren Flüssigkeiten), nanoporöse Zeolithe, Lehme, Keramiken, Nanonetze oder Nanofasern in Frage [GDNP 2006a]. Membranen, die aus regelmäßig angeordneten Kohlenstoffnanoröhren bestehen, stehen für eine effizientere Wasserentsalzung in der Diskussion [Srivastava 2004, Casavant 2002].

Abbildung 2-1: Trenngrößen und Molekulargewicht für die verschiedenen Trennverfahren (Quelle: EnTec).



In der Nanofiltration beschäftigen sich verschiedene Ansätze mit der Entfernung von pathogenen Organismen, wie der Abtrennung von Bakterien (z. B. mit Aluminiumoxid-Nanofasern) oder der Filtration von Viren.

³ Die Umkehrosmose wird bevorzugt in der Wasserentsalzung eingesetzt.

Große Nachteile von Nanofiltrations- (und anderen) Membranen sind – insbesondere in der Wasserbehandlung – Scaling- und Fouling-Prozesse. Je nach Abwasserzusammensetzung, Belastung und Prozessführung kann es zu mehr oder weniger stark ausgeprägten mineralischen (Scaling) und biologischen (Fouling) Ablagerungen kommen, die die Lebensdauer der Membranen verkürzen. Um die Anlagerung von Stoffen und Organismen zu minimieren und die Lebensdauer zu erhöhen, werden Beschichtungen mit nanoskaligen Partikeln untersucht [Nygaard 2006, Yana 2006].

Adsorption

Die Adsorption spielt in der Wasserreinigung – neben der Filtration – eine bedeutende Rolle.

Besonders die Gewässerbelastung mit organischen, endokrinen Substanzen und persistenten Stoffen, wie z. B. über die Sanitärsysteme entsorgte Medikamente und deren Metabolite, bereiten zunehmend Besorgnis. Zur Lösung dieses Problems werden – neben den ebenfalls eingesetzten Membranverfahren – adsorptive Methoden untersucht, wie z. B. nanoporöse adsorbierende Polymere aus Cyclodextrinen, die organische Substanzen, wie Benzol, Aceton, Dünger oder Pestizide, aus Wasser adsorbieren können [GDNP 2006a]. Auch die Entfernung von Uran-Verbindungen aus kontaminiertem Wasser oder Boden wird erforscht [Telford 2004].

Ebenfalls auf adsorptiven Effekten beruht die Hauptwirkweise der SAMMS-Technologie.⁴ Eine Einzelschicht von Molekülen lagert sich hierbei an die funktionalisierte Oberfläche von mesoporösem Material an. Die Oberflächeneigenschaften ermöglichen eine Adsorption von Schwermetallen und Anionen. SAMMS sind besonders für die Grundwasserreinigung in der Erprobung [Tratnyek 2006].

Zur Adsorption von Arsen-Verbindungen und anderen Schwermetallen (Blei, Kupfer und Cadmium) werden Kohlenstoffnanoröhren (CNT) auch in Verbindung mit Ceroxid (CeO_2) vorgeschlagen [Peng 2005]. Diese wurden als „Superadsorber“ für Dioxine bezeichnet, da sie eine um mehrere Größenordnungen höhere Affinität zu Dioxinen zeigten als Aktivkohle [Long 2001]. Neuere Untersuchungen beschäftigen sich auch mit der Beseitigung von Nickel-Salzen mit Kohlenstoffnanoröhren [Lu 2006]. Die Herstellungskosten von CNTs sind im Vergleich zu Aktivkohle jedoch um mindestens zwei Größenordnungen höher. Ein großflächiger Einsatz von CNTs in naher Zukunft ist daher relativ unwahrscheinlich, da auch die Verfügbarkeit von CNTs noch nicht an die von Aktivkohle heranreicht.

⁴ Self-assembled monolayers on mesoporous supports.

In der mobilen Trinkwasserreinigung könnten Nanonetze (nano-mesh) zum Einsatz kommen. Nanonetze basieren auf gebündelten Kohlenstoffnanoröhren, die auf einem flexiblen, porösen Trägermaterial aufgebracht sind. Das Substrat kann zu schmalen Röhren aufgerollt oder um zylindrische Gegenstände gewickelt werden. So können „Filterstäbe“ konstruiert werden, die das Wasser beim Durchfließen des Stabes reinigen. Derzeitige Prototypen der Firma Seldon Laboratories (USA) ermöglichen die 99 %-ige Reinigung von organisch und anorganisch belastetem Wasser bei Durchflussraten von etwa 600 ml Wasser pro Minute. Die Einsatzgebiete solch flexibler, billig zu produzierenden und skalierbarer Filterungsgeräte sind breit; vor allem in infrastrukturschwächeren Ländern und in Katastrophengebieten ist ein Einsatz denkbar.

Weitere Nanomaterialien umfassen Dendrimere mit Bindungsfunktion zur Beseitigung verschiedener Ionen [Diallo 2005]. Dendrimere können in verschiedenen Formen synthetisiert werden, u. a. als flexible offene Konstrukte oder als „Container“ und als Chelatbildner fungieren. Je nach funktioneller Gruppe lassen sich selektiv Anionen oder Kationen aus Wasser binden und auch eine Funktionalisierung hinsichtlich katalytischer Aktivität ist denkbar. Die mit Ionen beladenen Dendrimere lassen sich wieder entladen und so dem Prozess erneut zuführen.

Katalytische Umsetzung

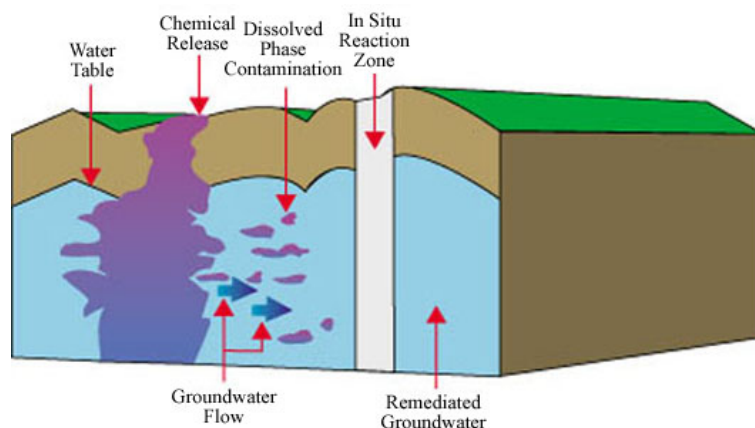
(Nano-)Katalysatoren verändern die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen und gehen aus diesen unverändert hervor. Das Verfahren der Katalyse hat für fast alle Industriezweige und auch im Wassersektor eine hohe Bedeutung, denn Schadstoffe sind so unter milderer Reaktionsbedingungen reduzier-, oxidier- und abbaubar. Nanoskalige Katalysatoren besitzen durch ihr großes Oberflächen/Volumen-Verhältnis sowie die ungewöhnlichen Formen von Nanokristallen eine hohe katalytische Aktivität. Es kann zu einer hohen Konzentration von reaktiven Ecken und Kanten mit Fehlstellen (defect sites) kommen, was ebenfalls eine erhöhte Oberflächenreaktivität zur Folge hat. In einigen Fällen entwickeln reaktionsträge Stoffe, wie das Edelmetall Gold, erst ab einer Partikelgröße von einigen Nanometern signifikante katalytische Aktivität. Ein nanoskaliger Goldcluster beschleunigt z. B. die Umsetzung von giftigem Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid [Yoon 2005].

Heterogene Katalysatoren in Verbindung mit nanoskaligen Metallpartikeln werden seit den 1920er Jahren kommerziell eingesetzt, und seit den 1970er Jahren findet sich der erste Nanokatalysator in einer umweltrelevanten Anwendung, dem Autokatalysator. Dieser besteht aus porösem Aluminium mit nanoskaligen Platin, Rhodium und Zirkonium-Partikeln zur Oxidation von Kohlenstoffmonoxid und Stickoxiden [Larsen 2004].

Katalytisch aktive Nanopartikel gelten in der *in situ* und *ex situ* Reinigung von Grundwasser und kontaminiertem Boden, der Wasserdesinfektion und in der Wasserentsalzung als vielversprechend und findet bisher Verwendung bei der Entfernung von Schwermetallen und Arsen-Verbindungen aus Grund- und verunreinigtem Trinkwasser. Die Nanokatalysatoren können dispers gelöst oder immobilisiert auf einer Membran mit dem Wasser in Kontakt gebracht werden. Es ist auch möglich, die Partikel in einer reaktiven „Wand“ im Boden einzubringen, durch die verunreinigtes Wasser fließt und gereinigt wieder austritt (Abbildung 2-2). Als katalytische Materialien werden vorwiegend Metalloxide (MgO , CaO , SrO , TiO_2 , MgO_2), Metall-Nanocluster, nanokristalline Carbide und Sulfide, Keramiken und Composite, nanostrukturierte Aluminium-Silikate und insbesondere nullwertige Eisenpartikel verwendet [Larsen 2004].

Nullwertige Eisenpartikel im Mikromaßstab sind heute verbreitet im Einsatz zum Abbau von leicht flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen [Cao 2005, NRW 2005]. Nanoskalige, nullwertige Eisenpartikel (nanoscale zero-valent Iron, $\text{Fe}(0)$, NZVI) stoßen zunehmend auf Interesse, insbesondere wegen ihrer höheren Reaktivität und dem damit verbundenen Potenzial in der Grundwasser- und Altlastensanierung. Sie werden zur Oxidation von Organosphosphorverbindungen (Nervengifte wie Phosgen) oder der Eliminierung von Nitraten, Chrom- und Blei-Verbindungen sowie schwefelhaltigen Triazinen und Perchloraten untersucht [Chen 2005, McDowall 2005]. Nitrate befinden sich in größeren Mengen im Grundwasser (diffuse Einträge über die Landwirtschaft), sind aber mit konventionellen Reinigungsverfahren nicht vollständig zu beseitigen.

Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines möglichen Verfahrens zur *in situ* Grundwasserreinigung



Über zehn verschiedene Produkte mit nanoskaligem Fe(0) sind bereits auf dem Markt erhältlich, die Kosten liegen zwischen 40–150 \$ pro Kilogramm [GDNP 2006a]. Auch andere nullwertige Metallpartikel (Silizium, Platin, Gold) im Nanometerbereich werden hinsichtlich ihres Potenzials, toxische Stoffe zu adsorbieren und zu zersetzen, analysiert [Metrix 2005].

Ein für die Bereiche Wasser, Luft und Boden bedeutender Katalysator ist nanoskaliges Titandioxid (TiO_2). Er fungiert als Photokatalysator und Adsorbent und kann zur Wasserreinigung – insbesondere für die *in situ* und *ex situ* Grundwassersanierung – verwendet werden. Im Zusammenspiel mit Wasser, Sauerstoff, UV-Strahlung und TiO_2 entstehen reaktive freie Radikale, die Schadstoffe in harmlosere Substanzen umwandeln können (Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Das Prinzip der Photokatalyse an TiO_2



Im Fokus stehen hier chlorhaltige und persistente organische Verbindungen. Nanoskaliges TiO_2 lässt sich als Pulver oder granulares Medium herstellen und kann auch in Beschichtungen oder (Komposit-) Membranen eingebracht werden. Für die Photokatalyse sind neben TiO_2 auch andere nanostrukturierte katalytisch aktive oder nanoskalige Halbleiter, wie ZnO , ZnS und CdS geeignet [Metrix 2005, Lu 2005, GDNP 2006a].

Magnetische Separation

Magnetische Nanopartikel können mittels Magnetseparation zur Beseitigung verschiedener Schadstoffe, wie Schwermetalle oder organische Substanzen, eingesetzt werden. Arsen-Verbindungen stehen hierbei im Fokus, da diese giftigen Substanzen in den Gewässern vieler Entwicklungsländer zu finden sind und so gut wie keine effektiven Reinigungsverfahren zur Verfügung stehen. Die magnetischen Nanopartikel (z. B. nanoskaliges Magnetit Fe_3O_4) binden die Zielmoleküle selektiv und können anschließend magnetisch aus dem Wasser extrahiert werden – das gereinigte Wasser bleibt zurück [Yavuz 2006]. Hierbei konnten die Wissenschaftler bei einer Partikelgröße von 12 nm sowohl As(III) als auch As(IV)-Verbindungen in beiden Fällen zu über 98 % aus

dem Wasser extrahieren. Der Einsatz von nanoskaligem Eisenoxid ist eine interessante Alternative zu energieintensiven Stofftrennverfahren, da die Herstellungskosten vergleichsweise gering sind und bisher sind keine negativen Effekte bekannt wurde, so dass der direkte Einsatz in Wasser und Boden untersucht wird. Eine abschließende (öko-)toxikologische Bewertung sowie eine Abschätzung des Gefährdungspotenzials sind allerdings aufgrund mangelnder wissenschaftlicher Erkenntnisse zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich.

Für die Grundwassersanierung und die Beseitigung von Schwermetallen sind nanoskalige Eisenpartikel und -verbindungen bereits im Einsatz. Beispielsweise wird nanostrukturiertes Eisenoxidhydroxid zur Beseitigung von Arsen-Verbindungen kommerziell angeboten. Eines der markttypischen Produkte ist AD-33 (Adedge Technologies Inc.), die in den USA zugelassene Version von Bayoxid E-33 (Lanxess). AD-33 ist etwa 2–4 Jahre aktiv und muss anschließend ausgetauscht bzw. erneuert werden. Die Technologie lässt sich für Großreinigungsanlagen einsetzen und ist aber auch für den Hausgebrauch skalierbar. Eine Weiterentwicklung der traditionellen Eisenoxidpartikel sind Nanokomposite aus nanoskaligem Magnetit (Fe_2O_3) mit einer mesoporösen Silizium-Beschichtung. Sie zeigen eine erhöhte Resistenz gegen Umwelteinflüsse, die normalerweise die Lebensdauer magnetischer Eisenpartikel begrenzen. Die magnetischen Eigenschaften werden durch die Schutzhülle nicht beeinträchtigt [Wu 2004].

Entkeimung

Nanoskalige Silberpartikel gelten als biozid und werden in Bereichen mit hohen Reinheitsanforderungen eingesetzt [Morones 2005]. Mit Nanosilber kann das Wachstum von gramnegativen und grampositiven Bakterien, Pilzen, Hefen und Viren verhindert oder eingeschränkt werden. Die bakteriziden Eigenschaften der Silberionen (die aus dem elementaren Silber freigesetzt werden) beruht auf einer Vielzahl komplexer Wechselwirkungen mit der DNA/RNA, mit Nukleinsäuren und Reaktionen mit verschiedenen Enzymen. So kann beispielsweise eine Interaktion mit den Cytochromen der Atmungskette stattfinden und einen gestörten Elektronentransport zur Folge haben. Auch eine kovalente Bindung mit funktionellen Gruppen der Aminosäuren von Enzymen ist möglich, was in einer Deformation und Destabilisierung der räumlichen Struktur und damit oftmals in einer Fehlfunktion des Proteins resultieren kann [Gühring 2000].

In den USA werden nanoskalige Silberpartikel („Nanosilber“) bereits in über 200 Produkten verwendet. Ein Beispiel ist die erste kommerziell erhältliche Waschmaschine, die nanoskalige Silberpartikel verwendet um die Wäsche ohne Bleich- und sonstige Waschmittelzusätze in kaltem Wasser zu desinfizieren. Untersuchungen zufolge ist kalt und heiß gewaschene Wäsche immer noch mit Geruch erzeugenden Mikroorganismen

belastet und genau dieses Problem soll mit dem Zusatz biozider Nanosilberpartikel behoben werden. Laut Herstellerangaben können mit der Maschine 99,9 % der getesteten Bakterien abgetötet werden. Silber ist ein Schwermetall, das für den Menschen nur in relativ hohen Konzentrationen toxisch wirkt, aber als Silberionen ein hohes toxikologisches Potential gegenüber Bakterien und andere Kleinstlebewesen besitzt.

Die US-Umweltbehörde⁵ hat nanoskalige Silberpartikel als Pestizide eingestuft, so dass die regulatorischen Auflagen für pestizidhaltige Produkte von den Herstellern erfüllt werden müssen. Auch in Europa werden Waschmaschinen mit nanoskaligen Silberpartikeln angeboten und in der Öffentlichkeit diskutiert bzw. vor solchen Waschmaschinen gewarnt; in Schweden wurde dieses Verfahren inzwischen aufgrund des Drucks von Verbraucherorganisationen und Wasserwirtschaftsverbänden vom Markt genommen.

Das Gerät wird daher kontrovers diskutiert, und der Hersteller wurde bereits von verschiedenen Verbänden aufgefordert, das Gerät vom Markt zu nehmen. Das Verfahren steht in der Kritik, da bei diesem Prozess Silber als Schwermetall und Biozid in die Umwelt gelangt. Die Kritik bezieht sich allerdings nicht auf die Nanopartikel, da das Silber in gelöster Form als Silberionen ins Abwasser abgegeben wird. In der Diskussion wird die Relation der Belastung oftmals überbewertet: Im Vergleich mit der Silberbelastung durch Entwicklungschemikalien der Fotografie sind die Stoffströme hier noch sehr gering.

2.3 Mess- und Regelungstechnik

Die konstante Überwachung der Gewässergüte ist in vielen Ländern gesetzlich geregelt. Sensoren sind ein wichtiges Instrument zur Überwachung der Wasser- und Gewässergüte. Mobile Sensoren mit miniaturisierten Bauteilen sind hierbei von besonderem Interesse, denn eine schnelle *in situ* Analyse vor Ort ermöglicht zeitnahes Handeln. Sinnvoll ist auch die kontinuierliche Überwachung großer Areale in Echtzeit. Nanotechnologien ermöglichen präzisere und sensitivere Sensoren, die Toxine und Pathogene detektieren. Das Aufspüren nanoskaliger Stoffe ist dabei ebenfalls von Bedeutung, um natürliche und eine zunehmende Menge artifizieller Nanomaterialien und Wirkstoffe in der Umwelt nachzuweisen. Die Sensorentypen lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Nanosensoren, die auf physikalisch-chemischer Detektion beruhen und Nanobiosensoren, die eine biologische Erkennung nutzen. Die Grenzen hier-

⁵ EPA – Environmental Protection Agency.

bei sind fließend. Chemische Sensoren können zum Nachweis von Organismen und biologische Sensoren zum Nachweis von chemischen Substanzen verwendet werden.

Nanosensoren nutzen z. B. elektrochemische Verfahren, Impedanzmessung oder optische Verfahren zum Nachweis von Schwermetallen, organischen Substanzen oder Toxinen. Poröses halbleitendes Silizium ist beispielsweise ein gut geeignetes Material für Sensoren, denn die große Oberfläche und auch die Emission von Licht bei Raumtemperatur sind nützliche Eigenschaften bei der Detektion von Toxinen und Pathogenen [Jianrong 2004]. Auch andere nanoskalige Strukturen, wie Nanodrähte oder Nanoröhren [Forzani 2006], haben das Interesse der Wissenschaftler auf sich gezogen. Nanosonden aus Bor-dotierten Siliziumdrähten (SiNWs) werden z. B. zur sensitiven, markerfreien Echtzeit-Analytik von biologischen und chemischen Stoffen untersucht [Cui 2001]. Ein interessantes Material für die allgemeine Bestimmung von organischen Molekülen ist Zinkoxid (ZnO). Es emittiert im sichtbaren Spektrum des Lichts und reagiert sensitiv auf organische Substanzen, die sich an der Oberfläche anlagern. Dadurch wird eine Lumineszenzabnahme (Quenching) induziert, die optisch detektierbar ist. Darüber hinaus ist ZnO katalytisch aktiv und kann die angelagerten Schadstoffe unter Lichteinfluss zersetzen. Entsprechende Geräte könnten organische, vorrangig aromatische, Verbindungen detektieren und selbige auch photokatalytisch zersetzen [Kamat 2002].

Nanobiosensoren nutzen Prinzipien der molekularen Erkennung. Typischerweise bestehen sie aus einem biologischen Teil (z. B. Antikörper-Bindung, DNA-Hybridisierung, Enzym-Bindung) sowie einer Auswerteeinheit (z. B. optisch, elektrochemisch oder piezoelektrisch) und verschiedenen Nanomaterialien [Tschmelak 2004]. Es können auch ganze Zellen als Testsysteme verwendet und deren Reaktion auf Umwelteinflüsse gemessen werden. In den meisten Systemen werden zur Auswertung Biomarker benötigt, d. h. Substanzen, die z. B. einen optischen Nachweis der molekularen Bindung erlauben. Hierfür finden unterschiedliche Nanopartikel Verwendung; insbesondere Quantenpunkte und halbleitende Nanokristalle (CdSe-ZnS) haben Hoffnungen auf sensitive und schnellere Sensoren geweckt. Metallische Nanopartikel wurden erfolgreich in elektrochemischen Sensoren an immobilisierten Biomolekülen getestet. Beispielsweise lassen sich Gold-Kolloide mit vielen verschiedenen biologischen Stoffen als Sonden zur Pathogen-Bestimmung einsetzen. Oligonucleotide können an kolloidale Goldpartikel im Nanometerbereich angelagert und zur sequenzspezifischen Detektion von DNA verwendet werden [Cai 2002]. Auch Mikroarrays – also eine regelmäßige Anordnung von Sonden-Molekülen auf einem Chip – sind für die Sensorik von Interesse.

2.4 Reifegrad der Technologie

Nanotechnologien sind in nachgeschalteten Reinigungsverfahren, wie z. B. der Wasseraufbereitung, der Abwasserbehandlung oder der Grundwassersanierung in marktreifen Anwendungen vertreten. Verbesserungen von Trennmembranen und Nanopartikel für katalytische und adsorptive Reinigungsverfahren werden bereits kommerziell eingesetzt. Viele andere Nanotechnologie-Ansätze befinden sich noch auf der Stufe von Prototypen oder in der Grundlagenforschung [siehe Bachmann 2007]. Mittelfristig sind deutliche Verfahrensoptimierungen im Hinblick auf Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu erwarten.

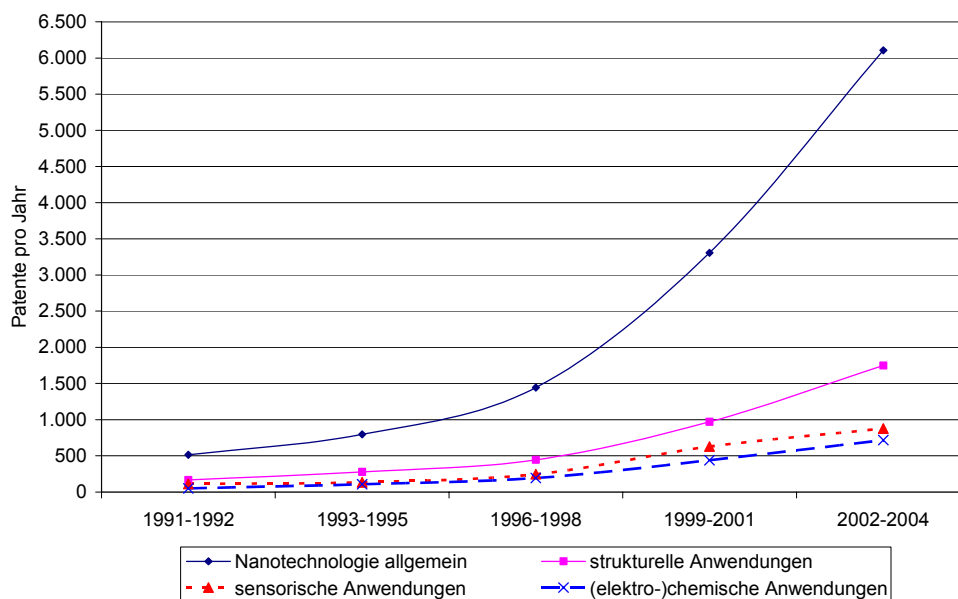
Die technologische Weiterentwicklung sollte dabei immer mit einer Risikobewertung einhergehen, da die möglichen toxischen Wirkungen von Nanopartikeln noch nicht hinreichend bekannt sind.

Langfristig wird die Konvergenz von Elektronik, Biotechnologie, Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik beispielsweise in der Verfahrens- und Regelungstechnik neue Perspektiven und Anwendungsbereiche für die Wasserwirtschaft bieten. Insbesondere im Bereich der Wasseranalytik werden hochfunktionale Lab-on-a-chip-Systeme zu einer umfassenden Charakterisierung von Schadstoffen im Abwasser beitragen. Weiterhin bieten Nanotechnologie basierte Produktionsverfahren Potenziale, um die Abwasserbelastung bereits im Produktionsprozess deutlich zu reduzieren.

3 Technologische Entwicklungsdynamik

Die Dynamik der Nanotechnologie im Bezug auf Forschung und Entwicklung lässt sich anhand der Entwicklung der Patentanmeldungen bei internationalen oder nationalen Patentämtern beschreiben. Abbildung 3-1 zeigt die Dynamik der Patentanmeldungen zur Nanotechnologie (Nanotechnologie allgemein) und der Nano-Hauptsegmente beim Europäischen Patentamt (EPA) und bei der Weltorganisation für Geistiges Eigentum (WIPO) zwischen 1991 und 2004. Zur Glättung statistischer Schwankungen, welche auf Grund der vergleichsweise geringen Fallzahlen bei einigen Segmenten auftreten, wurden die jährlichen Patentzahlen in Drei-Jahres-Scheiben zusammengefasst. Der Bereich 1991–1992 wurde entsprechend korrigiert.

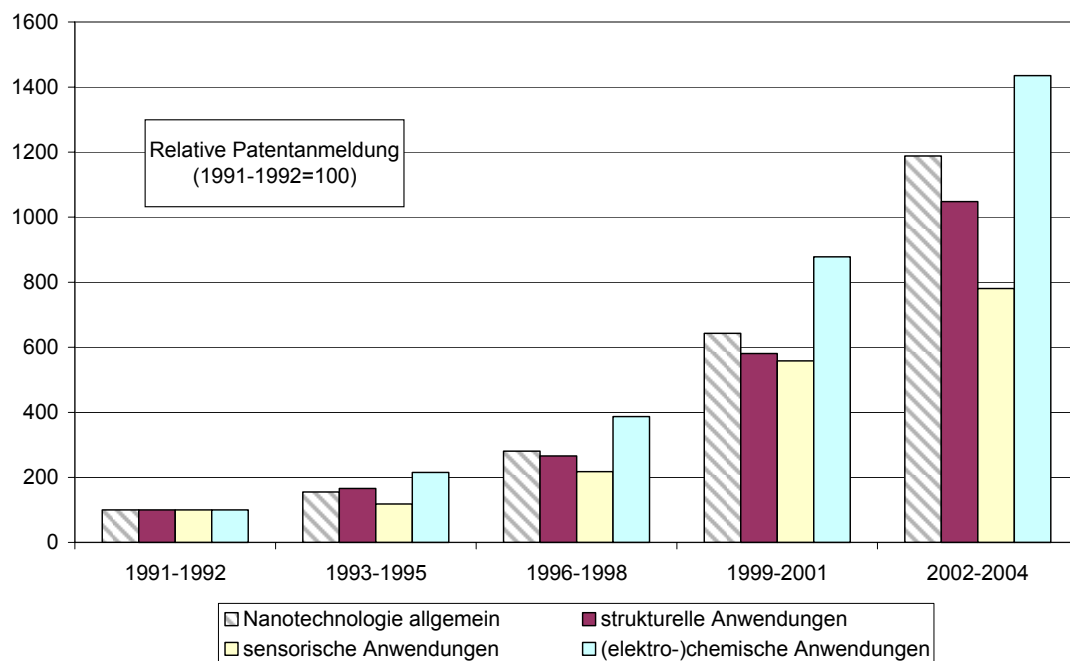
Abbildung 3-1: Weltweite Patententwicklung der Nanotechnologie 1991 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)



Insgesamt ist ein exponentielles Wachstum der Nanotechnologiepatente zu verzeichnen. Bei den Patenten dominieren strukturelle Anwendungen, bei denen Nano-Partikel in Werkstoffen (wie Keramiken, Verbundmaterialien, Fullerenen bzw. Carbon Nano Tubes) oder in Beschichtungen eingesetzt bzw. Nano-Strukturen in Oberflächen geprägt werden. Die zweitgrößte Anzahl an Anmeldungen besteht im Bereich der Sensoren mit Nano-Strukturen oder mit biologischen Molekülen. Der drittgrößte Bereich, allerdings der Bereich mit den größten Zuwächsen machen Patente zu chemischen Anwendungen und Verfahren aus (Abbildung 3-2). Zu diesen gehören neben Katalysatoren, Elektroden und Syntheseverfahren, bei denen Nano-Strukturen eine Rolle spielen, auch Filtrationsverfahren. Das für die nachhaltige Wasserwirtschaft relevanteste Seg-

ment sind hierbei die (elektro-)chemischen Anwendungen, wie z. B. neuartige Filtrationsmembranen, Nanomaterialien für die katalytische, adsorptive oder magneto-separative Reinigung von Abwässern. Ebenfalls eine Rolle spielt der Bereich sensorische Anwendungen, die zum Teil auch in der Wasseranalytik eingesetzt werden. Eine noch genauere Aufschlüsselung der Patentanmeldungen in Bezug auf Technologien für eine nachhaltige Abwasserwirtschaft ist für spezifizierte Teilgebiete (z. B. Filtrationstechnologien) prinzipiell möglich, kann aber im Rahmen der Studie nicht geleistet werden.

Abbildung 3-2: Patentedynamik der Nanotechnologie weltweit
(eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)



4 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft

Wasser spielt für den Menschen eine zentrale Rolle bei der Ernährung, Gesundheit, in der Landwirtschaft (Bewässerung) sowie als Lösungsmittel in der industriellen Fertigung. Zunehmende Wasserknappheit und weltweite Wasserverschmutzungen werden als eine der großen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte gesehen; die nachhaltige Versorgung der Weltbevölkerung mit Trink- und Brauchwasser ist von grundlegender Bedeutung für den Menschen. Zu den zentralen Problemfeldern zählen hierbei die Versorgung der Menschen mit Trink- und Brauchwasser, die langfristige Sicherung des Wasserkreislaufs und des Wasserhaushalts sowie die Reduktion der Gewässerverschmutzung. In 80 Ländern der Welt leiden nach Schätzungen bereits heute rund 1 Milliarde Menschen an absoluter oder chronischer Wasserknappheit. Ca. 2 Milliarden Menschen verfügen über keine oder unzureichende sanitäre Einrichtungen, aus deren Folge jährlich schätzungsweise 5 Millionen Menschen an Krankheiten sterben, die durch verschmutztes Trinkwasser mitverursacht sind. Die Situation wird sich in Zukunft noch weiter verschärfen und der Zugang zu Trinkwasserressourcen zunehmend ein Auslöser politischer Konflikte darstellen.

Neben end-of-pipe-Lösungen – z. B. bei verschmutztem Trinkwasser – oder der Bereitstellung von Trink- oder Brauchwasser durch Wasserentsalzung können Ansätze zur effizienten und sparsamen Wassernutzung wie Kreislaufführung, Anpassung der Infrastruktur (durch defekte Rohre kann wertvolles Trinkwasser ungenutzt versickern) oder Verhaltensänderungen die Verfügbarkeit von Trink- und Brauchwasser erhöhen.

Die Reinigung von schadstoffbelastetem Wasser bleibt jedoch bis auf weiteres eine der global vordringlichsten Herausforderungen der kommenden Dekaden. Insbesondere hier kann der Einsatz von Nanotechnologien einen wesentlichen Beitrag zur langfristigen Sicherung der Wasserversorgung liefern.

Auch in die Wasserentsalzung werden große Hoffnungen gesetzt, denn Meerwasser ist in beliebig großer Menge verfügbar und könnte Wasserknappheiten mindern. Nanotechnologien bieten hier Ansätze zur Optimierung von Trennmembranen beispielsweise auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren. Kostengünstige Meerwasserentsalzungsverfahren besitzen die Potenziale für einen deutlich geringeren Energieverbrauch als bei der Umkehrosmose und könnten damit zu einer ökonomischen Bewirtschaftung von Meerwasser beitragen. [Risbud 2006]

5 Wirtschaftliche Potenziale

Von Nanotechnologie-Innovationen betroffene Wirtschaftssektoren sind in erster Linie die unmittelbar beteiligten Zulieferer-Branchen des Wassersektors. Dies umfasst den Geräte- und Anlagenbau (Filteranlagen, Prozesstechnik, etc.), die Mess- und Regelungstechnik sowie die chemische Industrie und Materialhersteller (Herstellung von Fällungschemikalien, Filtrationsmaterialien, keramische und polymere Membranen). Nanotechnologie-Innovationen setzen hierbei relativ früh in der Wertschöpfungskette an, d. h. bei der Bereitstellung von Grundstoffen und Komponenten. Wie zuvor dargelegt, liefern die Nanotechnologien Ansätze für optimierte Materialien und Komponenten, die Verfahren zur Wasseraufbereitung effizienter und wirtschaftlicher gestalten können. Die Umsetzung der Innovationen erfordert jedoch ein abgestimmtes Handeln entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Wassersektor (Versorger, Endkunden, Regulierungsbehörden, etc.).

Der Wassersektor ist einer der aussichtsreichsten Märkte, in denen für die Nanotechnologien ein hohes Innovationspotenzial gesehen wird (vgl. Bachmann 2007). Die Tübinger Unternehmensberatung Helmut Kaiser Consultancy schätzt, dass der weltweite Wassermarkt von 287 Mrd. \$ im Jahr 2004 auf 412 Mrd. \$ im Jahr 2010 wachsen wird. Innovationen sind wegen steigenden Wasserbedarfs (demand pull) entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Wassergewinnung, dem Transport und der Verteilung bis zur Entsorgung und Reinigung zu erwarten. Technologische Lösungen spielen hierbei eine zentrale Rolle (technology push). Trends auf dem Wassermarkt werden bestimmt von einer Internationalisierung des Geschäfts, der Nachfrage nach ganzheitlichen Wassermanagement-Systemen und industriellen Recycling-Techniken sowie chemiefreien/chemiearmen Lösungen, wie z. B. physikalische Verfahren zur Abwasserbehandlung oder dem Einsatz von biotechnologischen Verfahren.

Besonders Membranverfahren gelten als Schlüsseltechnologien im Wassersektor. Filtrationsmembranen zeigen hohe Trennleistungen und können für ein breites Spektrum von Anwendungen eingesetzt werden, wie z. B. in der Abwasserbehandlung, der Trinkwasseraufbereitung und der Wasserentsalzung. Für 2010 wird für die USA im Sektor der Membranfilter (für alle Anwendungen) eine Nachfrage von 3 Mrd. \$ erwartet [Freedonia 2006]. Die Mikrofiltration ist mit einem Umsatz von 792 Mio. \$ in 2005 und einem erwarteten Umsatz von 1,2 Mrd. \$ in 2010 bei einem jährlichen Wachstum von 9,4 % [BCC 2006] marktführend. Auch für die Umkehrosmose mit nanoporösen Membranen wird ein deutliches Wachstum von 10,3 % prognostiziert. Fallende Produktionskosten (seit 1990 sind z. B. die Kosten für Mikrofiltrationsmembranen um 80 % gesunken), eine steigende Nachfrage, besonders von Seiten der Industrie, begünstigen diese Entwicklung.

Die Wasserentsalzung ist für aride Länder mit Meerzugang eine wichtige Technologie und wird zunehmend auch zur Aufbereitung von Abwässern verwendet. Seit 1975 ist ein exponentielles Wachstum zu verzeichnen. Die Kosten für die Wasserentsalzung sind insbesondere vom Salzgehalt der zu reinigenden Wässer abhängig (z. B. Verfügbarkeit von Brackwasser) und bewegen sich in einer Bandbreite von unter 1 EUR pro m^3 über durchschnittlich 2 bis 3 EUR pro m^3 bis hin zu Spitzenwerten von über 10 EUR pro m^3 [Karlhuber-Vöckl 2003]. Die Produktionskosten für die Umkehrosmose-Techniken konnten in den letzten Jahren jährlich um 10 % gesenkt werden. Experten zufolge ist das Einsparungspotenzial noch nicht ausgeschöpft, und mit einer weiteren deutlichen Preisreduktion ist zu rechnen. Technologische Innovationen führen zu einem geringeren Energieverbrauch und effizienteren Anlagen. Moderne Anlagen, wie z. B. in Ashkalon (Israel), produzieren Wasser für 0,527 \$ pro m^3 .

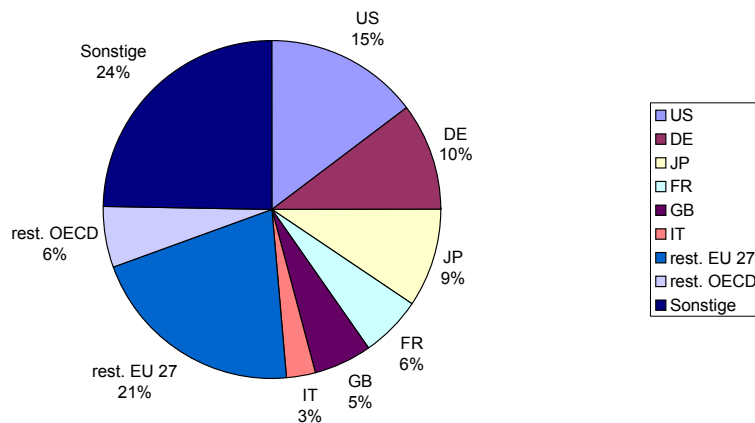
Der Schweizer Vermögensverwaltung Sustainable Asset Management (SAM) zufolge wird die Bedeutung der Meerwasserentsalzung insbesondere mittels Nano- und Ultrafiltration weltweit zunehmen und das Marktvolumen von heutigen 3 Mrd. \$ auf 70 Mrd. \$ in 2020 anwachsen. Für die MENA Region (Middle East and North Africa Region) wird das größte zukünftige Marktvolumen (2 Mrd. \$ in 2010) gesehen, für den asiatischen Raum ein Wachstum auf 1 Mrd. \$. Auch andere Regionen setzen verstärkt auf die Wasserentsalzung, um Wasserknappheiten zu vermindern. In England soll nach den Vorstellungen des privaten Versorgers Thames Water eine Entsalzungsanlage im Themse Delta entstehen.

Zur Bewertung der Exportchancen für die deutsche Wirtschaft soll zunächst die relative Außenhandelsstärke Deutschlands im Bereich der Nanotechnologie bewertet werden. Den größten Anteil am Welthandel hat die USA mit 15 %. Der Anteil Deutschlands am Außenhandel liegt bei ca. 10 % (Abbildung 5-1). Die EU-27 hat einen Anteil von ca. 45 %. Im Gegensatz zu anderen Technikfeldern ist der Anteil von nicht zu den OECD Ländern gehörenden Ländern mit 24 % hoch. Aus Abbildung 5-2 ist ersichtlich, dass die Anteile der USA von über 20 % und Japans von über 15 % in den neunziger Jahren in den letzten Jahren stark gefallen sind. Die Welthandelsanteile der dargestellten europäischen Länder blieben in diesem Zeitraum relativ konstant.

Als weiteres Beurteilungskriterien wird die Messzahl RCA (Revealed Comparative Advantage) herangezogen, die angibt, inwieweit Ausfuhrüberschüsse bei einer bestimmten Produktgruppe von der Außenhandelsposition bei verarbeiteten Industriewaren

insgesamt abweichen.⁶ Hohe Werte deuten auf eine starke internationale Wettbewerbssituation hin, weil ausländische Konkurrenten im Inland relativ gesehen nicht in dem Maße Waren verkaufen konnten, wie es denn inländischen Produzenten seinerseits im Ausland gelungen ist [Legler 1992].

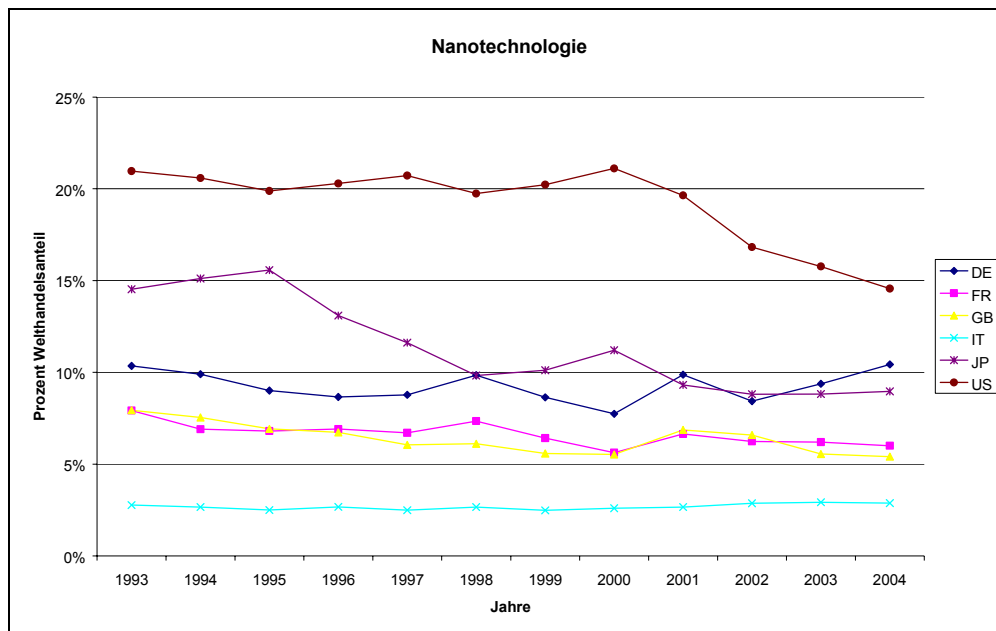
Abbildung 5-1: Welthandelsanteil für Nanotechnologie-Waren in den Jahren 2000 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)



⁶ Der RCA (Revealed Comparative Advantage) gibt die Spezialisierung im Außenhandel eines Landes im spezifischen Kompetenzfeld wieder. Neben den Ausfuhren (a) berücksichtigt er auch die Einfuhren (e) des jeweiligen Landes und gilt insofern als umfassender Indikator der Außenhandelsposition. Positive Werte deuten auf eine starke internationale Wettbewerbssituation des jeweiligen Landes im betrachteten Kompetenzfeld hin. Für jedes Land i und jedes Kompetenzfeld j wird der RCA nach folgender Formel berechnet:

$$RCA_{ij} = 100 \cdot \tanh \ln \left[(a_{ij}/e_{ij}) / \left(\sum_j a_{ij} / \sum_j e_{ij} \right) \right]$$

Abbildung 5-2: Entwicklung der Welthandelsanteile für Nanotechnologie-Waren in den Jahren 1993 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)



Beim RCA haben, bis auf Kanada und Südkorea, die dargestellten Länder komparative Vorteile (Abbildung 5-3). Dieser Vorteil ist bei den USA mit einem RCA von 70 sehr ausgeprägt. Die europäischen Länder sind unterschiedlich positioniert: die Schweiz, Großbritannien und Frankreich haben gegenüber Japan einen leichten Wettbewerbsvorteil, während Deutschland, die Niederlande und Italien einen niedrigeren RCA haben. Zur Potenzialabschätzung wurde anhand verschiedener Quellen⁷ untersucht, welche nanotechnologischen Produkte am Markt sind bzw. schon beworben werden, und die entsprechenden Warengruppen aus der Außenhandelsstatistik zur Analyse herangezogen. Durch die gänzliche andere Klassifikation und Logik bei der Außenhandelsstatistik (HS 2002 sowie SITC) ist es nicht möglich, dieselben Kategorien wie bei den Patenten zu verwenden. Es wurden folgende Kategorien gebildet:

- **Oberflächen:** antibakterielle Oberflächen, Glasoberflächen, Kosmetik, Pigmente, Textilien,
- **Sensoren:** Analytik, Halbleiter,
- **Chemie:** Katalysatoren, Kunststoffadditive, Medizin, Schmieröladditive,
- **Filter:** Filter, Membranen, Nanokristalle.

⁷ Z. B. Internetdatenbanken wie www.nanotechproject.org, www.nanoingermany.com, u. a.

Abbildung 5-3: RCA für Nanotechnologie im Zeiträumen 2000–2004
(eigene Berechnung Fraunhofer ISI, 2007)

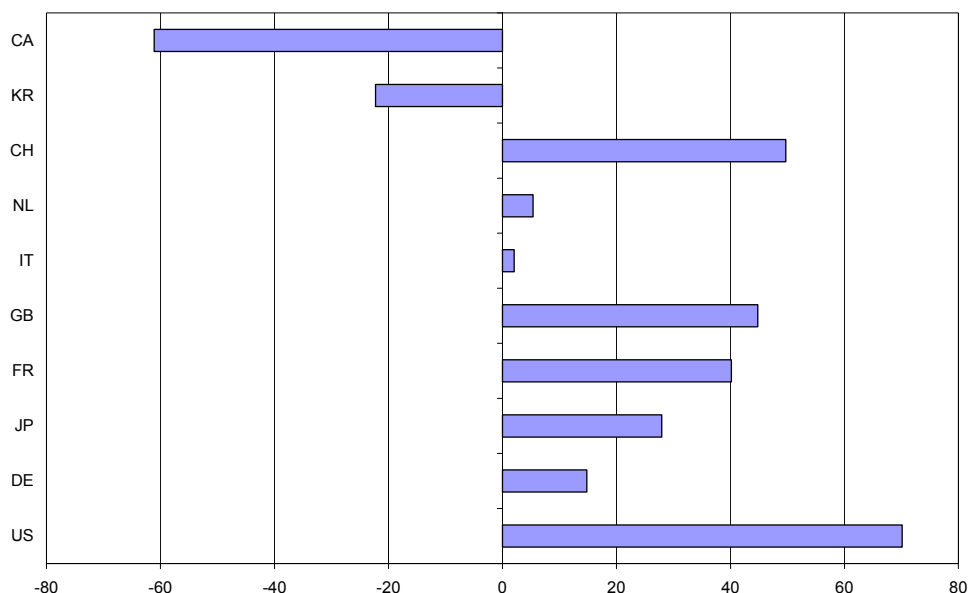


Tabelle 5-1 zeigt die Ergebnisse, der für den Wassersektor besonders relevanten Kategorie Filter (Filter, Membranen, Nanokristalle). Es zeigt sich, dass Deutschland insbesondere im Bereich der Membranen gut positioniert ist und nach den USA den zweithöchsten Welthandelsanteil aufweist sowie bezüglich des RCA an vierter Position liegt (hinter Japan, Italien und den USA). Der niedrige RCA-Wert Deutschlands im Bereich der Nanokristalle deutet auf eine schwächere internationale Wettbewerbsposition hin, wenngleich auch hier der Welthandelsanteil mit 12,3 % an dritter Position liegt. Insbesondere die USA, die Niederlande aber auch China haben international im Bereich der Nanokristalle die stärkste Wettbewerbsposition.

Tabelle 5-1: Internationaler Vergleich der Außenhandelsstärke in Bezug auf Nanotechnologienanwendungen in der Produktgruppe Filtersysteme; Revealed Comparative Advantage (RCA) 2004, Welthandelsanteil (WHA) 2004 [%] (eigene Berechnung FHG-ISI, 2007)

		US	DE	JP	FR	GB	IT	KR	NL	CN	CA	restl. EU27	restl. OECD	restl. Welt
Filter	RCA	62,7	70,0	15,7	29,6	69,0	76,4	-41,6	19,7	-88,4	48,4	-6,8	-32,5	-82,8
	WHA	17,9	15,2	4,0	6,7	7,6	7,4	1,7	2,8	1,2	8,8	16,5	6,1	4,4
Membranen	RCA	60,9	59,8	90,0	-37,3	-14,2	81,2	-25,1	12,3	-75,2	-11,3	-9,3	-46,8	-52,1
	WHA	11,0	15,5	12,8	3,7	4,2	11,5	2,2	3,9	2,6	3,3	17,9	4,4	7,1
Nanokristalle	RCA	94,9	3,8	-54,9	-36,9	42,8	4,0	-82,2	93,9	87,8	-70,0	-58,0	-72,5	-87,3
	WHA	19,7	12,3	5,7	2,6	4,5	6,4	2,1	15,2	7,7	1,2	12,3	3,0	7,3

Aussichtsreiche **Zielmärkte** deutscher Nanotechnologie-Produkte insbesondere im Membranbereich sind vor allem die USA, Europa und China. In den USA werden in den nächsten Jahren über 30.000 neue kommunale Wasserwerke benötigt. In China geht es über die Bereitstellung von Trinkwasser hinaus auch um den Aufbau einer Strom-Infrastruktur, für die gewaltige Mengen hochreinen Kesselspeisewassers benötigt werden. Ein weiterer Wachstumsmarkt, in dem die Wasserinfrastruktur auf- bzw. ausgebaut werden wird, sind die ost- bzw. die südosteuropäischen Staaten. Der Mittlere und Nahe Osten stellt einen interessanten Wachstumsmarkt im Hinblick auf Meerwasserentsalzungsanlagen dar.

6 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder

Die USA gelten im Nanotechnologie-Bereich weltweit als führende Nation hinsichtlich der öffentlichen Förderaufwendungen, des investierten Privatkapitals sowie der Patentanmeldungen. Mehr als die Hälfte der Nanotechnologiepatehte weltweit stammen aus den USA (Abbildung 6-1).

Vergleicht man die Entwicklung der relativen Patentanteile, stellt man fest dass die USA ihre Spitzenposition im Zeitraum von 2000 bis 2004 noch weiter ausgebaut hat, während in Deutschland die Patentanmeldungen im Nanotechnologiebereich im Vergleich zur Gesamtzahl der Patente in den letzten Jahren abgenommen hat (Abbildung 6-2).

In Abbildung 6-3 sind die relativen Patentanteile nach den Anwendungsfeldern der Nanotechnologie weiter aufgeschlüsselt. Während die Patentaktivitäten der USA in allen Bereichen überdurchschnittlich und bei Japan in allen Bereichen unterdurchschnittlich sind, haben sich Frankreich und Deutschland auf die chemischen Anwendungen spezialisiert. Vor allem bei den sensorischen Anwendungen ist Deutschland unterrepräsentiert.

Abbildung 6-1: Verteilung der Nanotechnologiepatehte nach Herkunftsländern (EPO 2006)

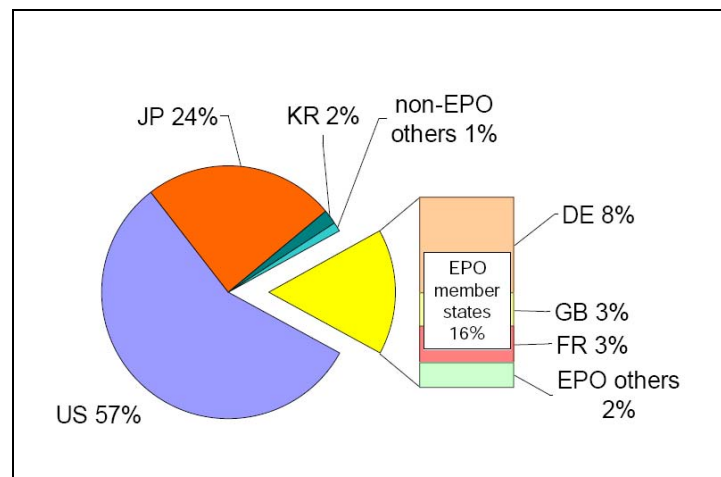


Abbildung 6-2: Relativer Patentanteil für Nanotechnologie in den Zeiträumen 2000–2004 und 1995–1999 (eigene Berechnung Fraunhofer-ISI, 2007)

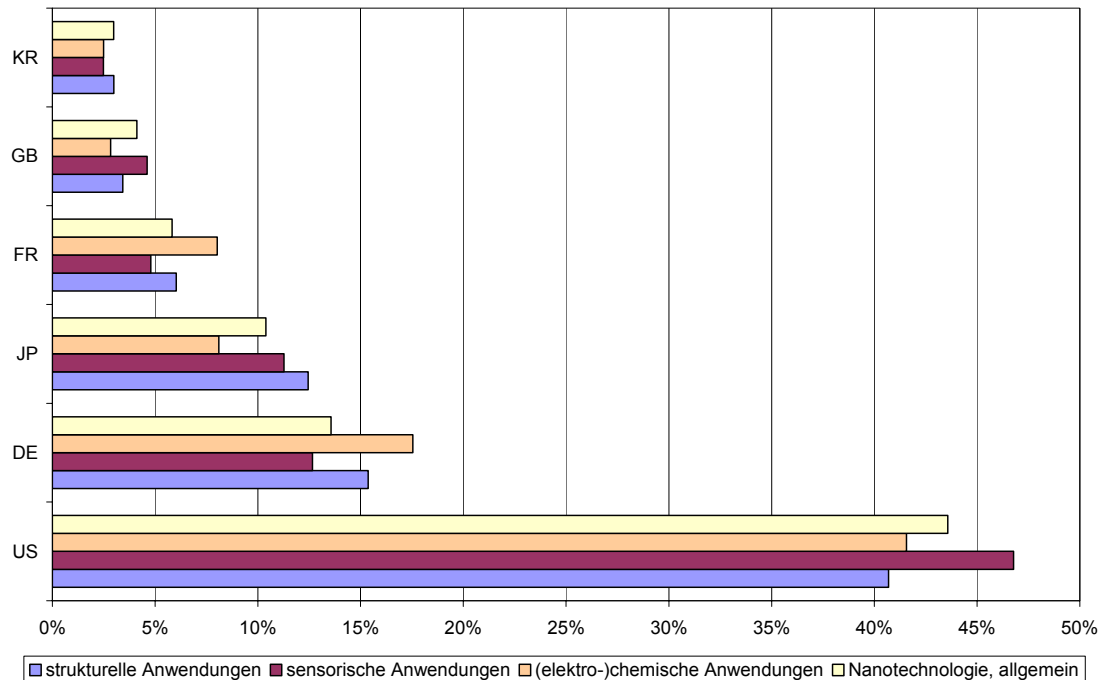
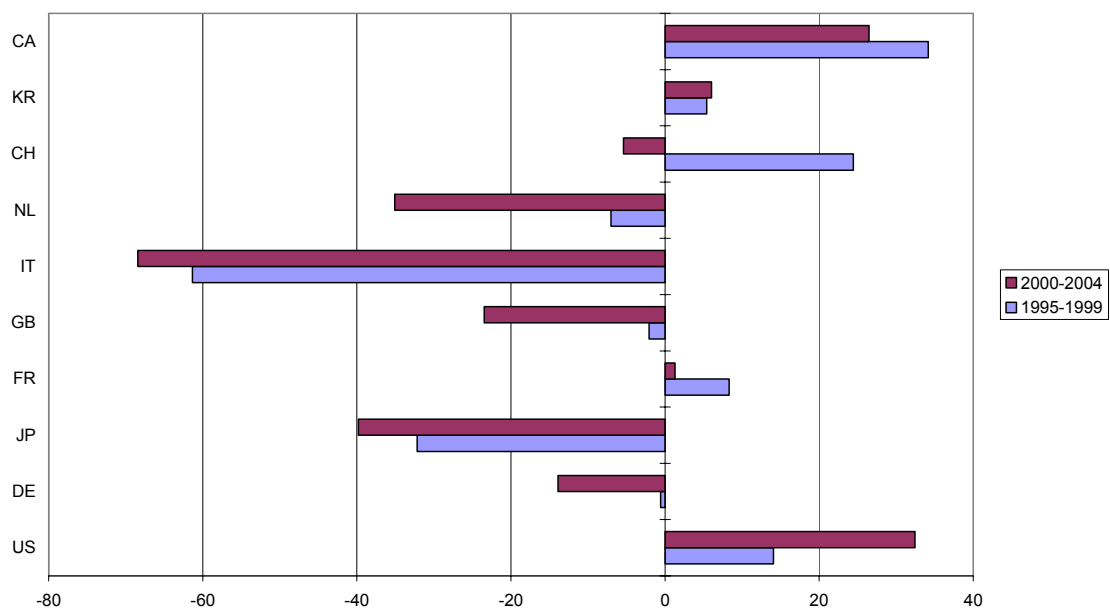


Abbildung 6-3: Patentanteile nach ausgewählten Ländern und verschiedenen Segmenten für 2000 bis 2004 (eigene Berechnung Fraunhofer-ISI, 2007)



7 Akteursanalyse

Die USA sind als führend im Bereich nanotechnologischer Anwendungen im Wassersektor zu bezeichnen, sowohl hinsichtlich der Forschungsaktivitäten als auch bei der Herstellung kommerzieller Produkte (vgl. Bachmann 2007). Verschiedene Nanomaterialhersteller in den USA bieten Produkte und Systemlösungen im Bereich der Wasseraufbereitung und Reinigung kommerziell an. So stellt die Firma Argonide oxidierte Aluminium-Nanofasern her, die auf einem Glasträger aufgebracht der Filterung von Schadstoffen und Mikroorganismen dienen. Poröse Nanofasern aus MnO_2 und granularem Eisenhydroxid werden von unterschiedlichen Anbietern vertrieben (u. a. Inframat Corporation) und dienen z. B. der Entfernung von Arsen aus Trinkwasser. Die Firma Seldon Laboratories bietet „Filterstäbe“ mit nanoskaligen Netzen als Prototypen an, die zur Reinigung organisch und anorganisch belastetem Wasser eingesetzt werden und eine 99 %-ige Reinigungsquote aufweisen. Die Firma Adedge Technologies Inc. bietet ein nanoskaliges Eisenoxid zur Beseitigung von Schwermetallen in Abwässern an, das sowohl in Großreinigungsanlagen als auch für den Hausgebrauch eingesetzt werden kann. Nanofiltrationsmembranen, die zweiwertige Ionen und besonders Pestizide zurückhalten, werden mittlerweile von verschiedenen Firma gefertigt und angeboten, z. B. Filmtec Corporation⁸, Applied Membranes Inc.⁹, GE Osmonics¹⁰ oder TORAY¹¹.

Beispiele für relevante Forschungsinstitutionen in den USA mit Aktivitäten im Bereich nanobasierter Abwasseraufarbeitung sind u. a.:

- Los Alamos National Laboratory (hocheffiziente nanoporöse Polymermembranen zur Bindung von organischen Schadstoffen),
- Rice University (Nanokatalysatoren zur Grundwassersanierung),
- MIT (neuartige Kunststoffe mit gleichzeitig Wasser anziehender (hydrophil) und abstoßender (hydrophob) Wirkung z. B. zur Wasserentsalzung),
- WaterCAMPWS (The Center of Advanced Materials for the Purification of Water with Systems). In der fakultätsübergreifenden Initiative von elf amerikanischen Universitäten, werden Nanotechnologien für die Anwendung im Wassersektor untersucht. Zu den Forschungsschwerpunkten gehören u. a. neuartige nanoporöse Filtermembranen.

In Deutschland zählen die Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung zu den traditionellen und gut entwickelten Sektoren der Umwelttechnologie. In Deutschland betreiben

⁸ www.dow.com/liquidseps/contact/efilmtec.htm

⁹ www.appliedmembranes.com

¹⁰ www.gewater.com/index.jsp

¹¹ www.toray.com

etwa 6.700 meist kommunale Unternehmen die Trinkwassergewinnung in 18.000 Wasseraufbereitungsanlagen. Wasser- und Abwassertechnik ist mit einem jährlichen Exportvolumen von 13 Mrd. \$ einer der Exportschlager der deutschen Umwelttechnik.

Allerdings besteht in Deutschland insbesondere im Bereich des Technologietransfers neuer Technologieentwicklungen hin zu kommerziellen Produkten noch Verbesserungsbedarf. Dennoch gibt es eine Reihe von Firmen, die die Kommerzialisierung der Nanotechnologie im Wassersektor vorantreiben und bereits Produkte im Markt platziert haben. Dazu zählt die Saarbrückener Firma ITN Nanovation, die nanoporöse Keramikmembranen als Filtrationskomponenten herstellt. Diese dienen als Kernstück von Filtrationsanlagen in Kläranlagen und werden bereits in der Praxis eingesetzt z. B. in einer Testanlage im Landkreis St. Wendel. Eine weitere Kläranlage, die mit dieser Technologie ausgestattet sein wird, befindet sich in der Gemeinde Leidingen in Bau [Hassel, 2005].

Neben den klassischen Versorgern wie RWE ist insbesondere Siemens bei der Umsetzung nanotechnologischer Innovationen im Wassersektor aktiv. Durch die Beteiligung der Siemens Venture Capital (SVC) an dem Filtrationsanlagenhersteller Inge AG in Deutschland und der Akquisition von USFilter hat sie sich eine gute Ausgangsposition geschaffen, um ein Global Player im Wassergeschäft zu werden und dadurch große Synergieeffekte mit dem Kerngeschäft Kraftwerkstechnik zu erreichen. Siemens will bei der Ultrafiltration der führende Technologieanbieter werden und im Jahr 2010 bereits einen Umsatz von mindestens 100 Mio. € erzielen.

Der Automobilhersteller Ford setzt in Deutschland innovative Nanofiltrationstechnologie in der Automobilproduktion ein, bei der Aufarbeitung von Abwässern, die bei der Lackierung anfallen. Eine Pilotanlage wurde im Fordwerk Saarlouis installiert, die als Vorbild für Automobilproduktionsanlagen weltweit dienen.

Einen erfolgreichen Technologietransfer aus der öffentlichen Förderung des Bundes konnte mit der Herstellung der Filtermembran „Nanoweb“ verzeichnet werden. Diese resultierte aus einer vom BMBF geförderten Kooperation von Wissenschaftlern der Universität Marburg und dem Filter Hersteller Hollingsworth & Vose. Die neuartige Filtermembran zeichnet sich durch besondere Langlebigkeit und eine hohe Aufnahmekapazität aus [Hessen 2005]. Ansonsten befinden sich viele nanotechnologische Ansätze noch im Forschungsstadium. Seitens des BMBF werden eine Reihe anwendungsorientierter Forschungsprojekte in dem Bereich gefördert:

- Verbundprojekt NANOKAT: Entwicklung nanoskaliger Biokatalysatoren für die Abwasserbehandlung (Laufzeit 2006–2009),
- IntegTa: Integratives Management mehrfach genutzter Trinkwassertalsperren mit Teilprojekt „Nanofiltration“ (Laufzeit 2006–2009),
- Organophile Nanofiltration für eine nachhaltige Produktion in der Industrie (Laufzeit 2005–2008).

Ein weiterer wichtiger Player im Bereich nanotechnologischer Anwendungen im Wasserbereich sind die Niederlande. Der niederländische Norit-Konzern ist einer der führenden Anbieter innovativer Filtrations- und Membrantechnologie. Andere Länder mit Forschungsaktivitäten im Bereich Nanotechnologien und Wasserwirtschaft sind beispielsweise Korea und Australien. U. a. beschäftigt sich die australische Firma Nano-Chem Pty Ltd mit der Filterung und Rückgewinnung von Ammoniak aus Abwasser, industriellem Prozesswasser oder natürlichen Gewässern mittels nanoporöser Membranen [Australien 2005]. Koreanische Wissenschaftler haben Nanofiltrationsmembranen zur Filtration von Viren und anderen Organismen entwickelt [Yang 2006].

8 Rahmenbedingungen und Regulierung

Wichtige Treiber für die Technologieentwicklung im Bereich Wasser/Abwasser in Deutschland und der europäischen Union sind gesetzliche Vorschriften wie die EU-Wasserrahmenrichtlinie von 2000, die europaweit das Ziel verfolgt, die Gewässer in einen „guten ökologischen Zustand“ zu bringen. Die Umsetzung dieser Richtlinie stellt v. a. eine große Herausforderung für die neuen EU-Mitgliedsstaaten dar. In Deutschland spielt die Abwasserverordnung mit Stand vom 17.06.2004 eine wichtige Rolle, die die Abwasserbehandlung für 53 Branchen regelt. Deutschland ist hinsichtlich des Behandlungsniveaus für organische Belastung von Abwässern im europäischen Vergleich bereits sehr gut aufgestellt (Abbildung 8-1). Andere Länder haben hier noch großen Nachholbedarf. Abbildung 8-2 zeigt, dass Deutschland bei den Investitionen im Abwasserbereich in den vergangenen Jahren ebenfalls an der europäischen Spitze lag.

Regulatorische Anforderungen stellen auch in den USA einen der Haupttreiber für nanotechnologische Innovationen im Wasserbereich dar. Durch die amerikanische Umweltbehörde (EPA) wird das Thema Nanotechnologie und Umwelt seit einigen Jahren intensiv vorangetrieben. Die jährlichen Fördermittel im Bereich der Umwelt, Gesundheits- und Sicherheitsforschung der Nanotechnologie betragen über 40 Mio. \$. Insbesondere die US-amerikanische Umweltbehörde EPA unterstützt eine ganze Reihe an Forschungsprojekten, die zu ökoeffizienteren und umweltverbessernden Anwendungen durch Nanotechnologien führen könnten u. a. im Rahmen des EPA's Small Business Innovation Research (SBIR). Während damit auf der einen Seite Nanotechnologie-Innovationen im Umweltbereich durch regulatorische Maßnahmen gefördert werden, werden andererseits in einigen Bereichen auch Einschränkungen hinsichtlich des Einsatzbereiches vorgenommen. So hat die EPA beispielsweise inzwischen nanoskalige Silberpartikel als Pestizide eingestuft, so dass sämtliche Verbraucherprodukte, die Nanosilberpartikel enthalten gemäß den Richtlinien für pestizidhaltige Produkte gekennzeichnet und registriert werden müssen. Generell ist der Einsatz von Nanotechniken im Umweltbereich – insbesondere die Verwendung von Nanopartikeln in offenen Stoffkreisläufen – auch unter dem Gesichtspunkt möglicher Risiken zu untersuchen. Derzeit ist wenig über das Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt, deren Anreicherung in Umweltmedien und der Nahrungskette sowie deren Verhalten im menschlichen Körper bekannt. Um die möglichen Risiken der Nanotechnologien besser einschätzen

zu können, befassen sich bereits zahlreiche Projekte auch in Deutschland den potenziellen gesundheitlichen und Umweltauswirkungen von Nanoanwendungen.¹²

Abbildung 8-1: Behandlungsniveau für organische Belastung in kommunalen Abwässern im europäischen Vergleich (EU Kommission 2004)

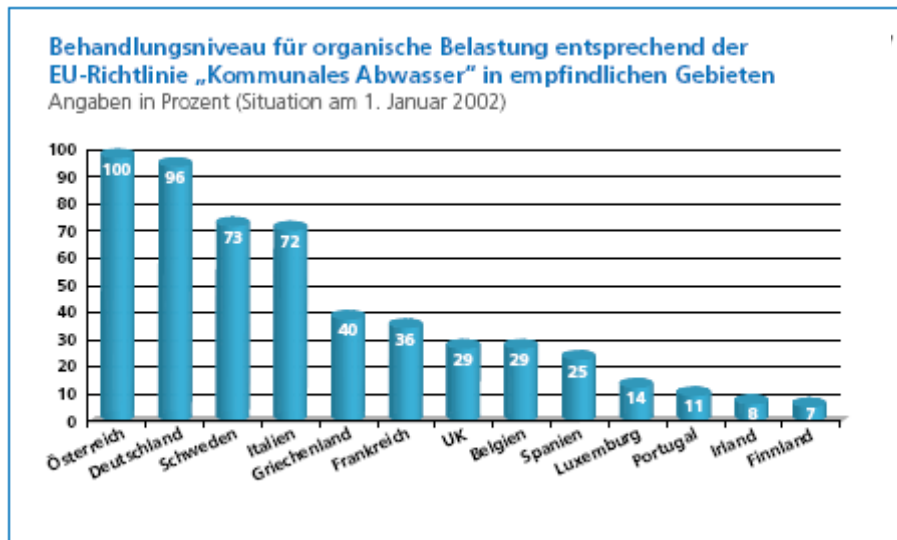
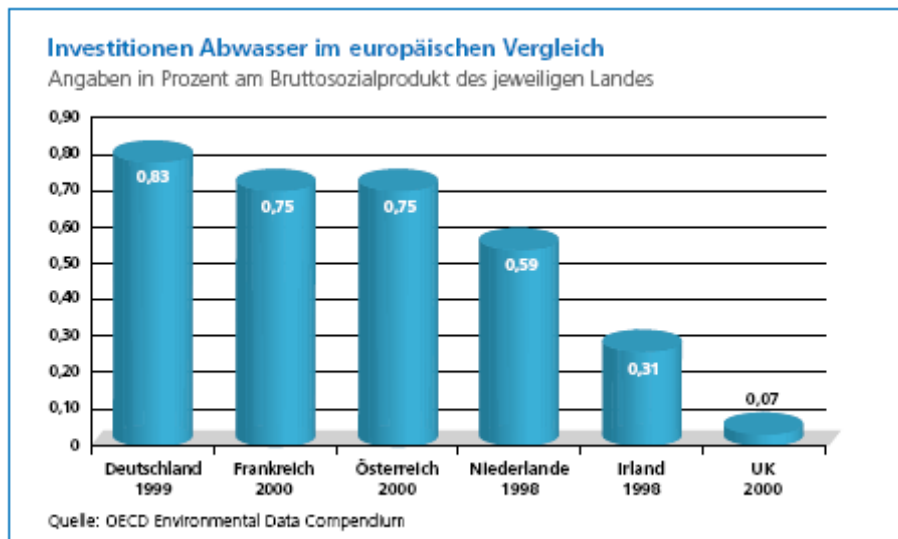


Abbildung 8-2: Investitionen Abwasser im europäischen Vergleich (OECD)



¹² Z. B. Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) / Umweltbundesamt (UBA), 2006; www.dialog-nanopartikel.de; Nanocare: www.nanopartikel.info.

9 Fazit und SWOT-Analyse

Innovationsdynamik

- Ein exponentielles Wachstum der Nanotechnologiepatehte weist auf eine große Dynamik hin. Hierbei dominieren strukturelle Anwendungen, bei denen Nano-Partikel in Werkstoffen oder in Beschichtungen eingesetzt werden bzw. Nano-Strukturen in Oberflächen geprägt werden.
- Das für die nachhaltige Wasserwirtschaft relevanteste Segment sind (elektro-)chemische Anwendungen, wie z. B. neuartige Filtrationsmembranen sowie Nanomaterialien für die katalytische, adsorptive oder magneto-separative Reinigung von Abwässern.
- Langfristig bietet die Konvergenz von Elektronik, Biotechnologie, Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik neue Perspektiven und Anwendungsbereiche für die Wasserwirtschaft.

Marktpotenzial

- Besonders Membranverfahren, die als Schlüsseltechnologien in den Sektoren Abwasserbehandlung, Trinkwasseraufbereitung und Wasserentsalzung angesehen werden, wird ein großes Marktpotenzial zugesprochen.

Wettbewerbsfähigkeit

- Deutschland besitzt eine hohe technologische Kompetenz insbesondere in der Membran- und Nanofiltrationstechnik.
- Die technologische Ausgangsbasis bietet eine aussichtsreiche Grundlage für die Festigung und den Ausbau der guten internationalen Positionierung der deutschen Exportwirtschaft in der Umwelttechnik.

Tabelle 9-1: SWOT-Analyse für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EU und Deutschlands in der Techniklinie nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologien

Stärken	Chancen
• Wassersektor in Deutschland international gut positioniert mit hoher Exportstärke. • Deutschland international führend im Bereich der Membrantechnologie. • Gute und ausdifferenzierte Grundlagenforschung in der Nanotechnologie mit ausgeprägten Stärken in der Nanochemie. • Hohe Umweltstandards in Deutschland verbessern Exportchancen.	• Sicherung von Exportchancen im Wachstumssektor Wasserwirtschaft. • Technologieführerschaft in der Membrantechnologie kann ausgebaut und für Erschließung von Auslandsmärkten genutzt werden. • Erschließen von Synergiepotenzialen in anderen Wirtschaftssektoren z. B. dem Kraftwerksbau.
Schwächen	Herausforderungen
• Technologietransfer und marktwirtschaftliche Umsetzung zu langsam. • Wirtschaftliche Dynamik im Nanotechnologiebereich in anderen Ländern z. T. stärker. • Öffentliche Förderung von Nanotechnologien im Wassersektor wird in anderen Ländern intensiver vorangetrieben.	• Abwägung von Chancen und Risiken der Nanotechnologie im Umwelt- und Gesundheitsschutz. • Verschärfte Konkurrenzsituation mit stärker werdenden Ländern aus Südostasien (u. a. China, Korea, Taiwan).

Literatur

- Acosta, E. A.; Nguyen, T.; Witthayapanyanon, A.; Harwell, J. H.; Sabatini, D. A. (2005): Linker-based Bio-compatible Microemulsions, *Environ. Sci. Technol.*, 39(5), 1275–1282, 2005.
- Australian Nanotechnology, Water & Environment – investing in a clean future, Australian Government, Invest Australia, 2005.
- Bachmann, G.; Grimm, V.; Hoffknecht, A.; Luther, W.; Ploetz, C.; Reuscher, G.; Teichert, O.; Zweck, A. (in Druck): Nanotechnologien für den Umweltschutz, ZTC-Band Nr. 71, Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2007.
- BCC (2006): The Membrane Microfiltrations Market, BCC Research, Business Communications Company Inc. (BCC), 2006.
- Cai, H.; Xu, C.; He, P.; Fang, Y. (2002): Colloid Au-enhanced DNA immobilization for the electrochemical detection of sequence-specific DNA, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 510, No. 1, 7, pp. 78–85(8), September 2001.
- Cao, J.; Elliott, D.; Zhang, W. (2005): Perchlorate Reduction by Nanoscale Iron Particles, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, Nos. 4–5, 2005.
- Casavant, M. J.; Walters, D. A.; Schmidt, J. J.; Smalley, R. E. (2002): Neat macroscopic membranes of aligned carbon nanotubes, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, Issue 4, pp. 2153–2156, 2003.
- Chen, S.; Hsu, H.; Li, C. (2005): A new method to produce nanoscale iron for nitrate removal, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 6, No. 6, 2004.
- Cui, Y.; Wei, Q.; Park, H.; Lieber, C. M. (2001): Nanowire Nanosensors for Highly Sensitive and Selective Detection of Biological and Chemical Species, *Science* 293, 1289.2001.
- Diallo, M. S.; Savage, N. (2005): Nanoparticles and Water Quality, *Journal of Nanoparticle Research*, Astronomy Issue, Vol. 7, Nos. 4–5, 2005.

- DVGW (2006): Hygienische Sicherheit von Ultrafiltrations- und Mikrofiltrationsanlagen zur Trinkwasseraufbereitung Eine Information aus dem Technischen Komitee „Wasseraufbereitungsverfahren“ des DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V., 2006.
- ETAG (2006): The Role of Nanotechnology in Chemical Substitution, Input for the Validation Workshop, Deliverable No2, European Technology Assessment Group, 2006.
- Forzani, E. S.; Li, X.; Zhang, P.; Tao, N.; Zhang, R.; Amlani, I.; Tsui, R.; Nagahara, L. A. (2006): Tuning the Chemical Selectivity of SWNT-FETs for Detection of Heavy-Metal Ions, small, Vol. 2, Issue 11, pp. 1283–1291, 2006.
- Freedonia (2006): Membrane Separation Technologies to 2010, Freedonia Group, 2006.
- GDP (2006a) Overview and Comparison of Conventional Water Treatment Technologies and Nano-Based treatment Technologies, Global Dialogue on Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks. Meridian Institute (Hrsg.), 2006.
- GDP (2006b) Nanotechnology, Water & Development, Global Dialogue on Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks, Meridian Institute (Hrsg.), 2006.
- Gühring, I. K. (2000): Mikrobieller Befall von Elektrotauchlack in der Automobilindustrie, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades, Stuttgart, 2000.
- Christoph Hassel (2005): Abwasserreinigung der Zukunft, Umweltmagazin Saar 4/2005, S. 16–17, 2005 (www.bund-saar.de/cms/upload/umags0504/16-17.pdf , abgerufen am 13.09.07).
- Hessen (2005): Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnik, Innovationspotenziale für Unternehmen, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2005.
- Jianrong, C.; Yuqing, M.; Nongyue, H.; Xiaohua, W.; Sijiao, L. (2004): Nanotechnology and biosensors, Biotechnol Adv. Sep; 22(7):505-18, 2004.
- Kamat; P. V.; Huehn, R.; Nicolaescu, R. (2002): A "Sense and Shoot" Approach for Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants in Water, J. Phys. Chem. B, 106 (4), 788–794, 2002.

- Karlhuber-Vöckl, Lisa (2003): Trinkwassergewinnung im Mittleren Osten und in Nordafrika – ein Kosten- und Technologievergleich, Diplomarbeit der Technischen Universität Wien, Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik, Mai 2003 (www.lieberts.net/lisa/pages/diplomzus.htm, abgerufen am 13.09.07).
- Larsen, S. C. (2004): Nanocatalysts for Environmental Technology, ACS Symposium Series 890, Nanotechnology and Environment, Applications and Implications, American Chemical Society (Hrsg.), 2004.
- Legler, H.; Grupp H.; Gehrke B.; Schasse U. (1992): Innovationspotential und Hochtechnologie – Technologische Position Deutschlands im internationalen Wettbewerb. Physica-Verlag, Heidelberg, 1992.
- Long, R. Q.; Yang, R. T. (2001): Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin removal, J. Am Chem Soc., 7; 123(9):2058-9, 2001.
- Lu, C.; Liu, C. (2006): Removal of nickel(II) from aqueous solution by carbon nanotubes, Journal of Chemical Technology & Biotechnology, Vol. 81, Issue 12, pp. 1932-1940, 2006.
- McDowall, L. (2005): Degradation of Toxic Chemicals by Zero-Valent Metal Nanoparticles - A Literature Review, Human Protection and Performance Division, Defence Science and Technology Organisation (DSTO), Australia, 2005.
- Metrix (2005): Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology, Environment Canada (Hrsg.), 2005.
- Morones, J. R.; Elechiguerra, J. L.; Camacho, A.; Holt, K.; Koun, J. B.; Ramirez, J. T.; Yacaman, M. J. (2005): The bactericidal effect of silver nanoparticles, Nanotechnology, 16, 2346–2353, 2005.
- NRW (2005): Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung 2004/2005, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen LUA NRW (Hrsg.), 2005.

- Nygaard, Jodie (2006): Mechanisms and Control of Irreversible Fouling in Commercial and Nano-Structured Ro/Nf Membranes, AIChE – American Institute of Chemical Engineers, The 2006 Annual Meeting, 12–17 November 2006, San Francisco, CA, Topical 1: Water Resource Conservation: Purification, Reclamation and Re-use – Advanced Materials and Nanotechnology in Water Treatment, Purification and Desalination, 2006
(<http://aiche.confex.com/aiche/2006/techprogram/P69293.HTM>, abgerufen am 13.09.07).
- Peng, X.; Luan, Z.; Ding, J.; Di, Z.; Li, Y.; Tian, B. (2005): Ceria nanoparticles supported on carbon nanotubes for the removal of arsenate from water, *Materials letters*, Vol. 59, No.4, pp. 399–403, 2005.
- Risbud, A. (2006): Cheap Drinking Water from the Ocean - Carbon nanotube-based membranes will dramatically cut the cost of desalination, *Technology review*, online-Dokument (<http://www.technologyreview.com/Nanotech/16977>, Abruf 07.05.2007)
- Samhaber, W. M. (2005) Die industrielle Anwendung der Nanofiltration - Potenziale, Erfahrungen und Grenzen, *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 77, Issue 5, pp. 566–572, 2005.
- Srivastava, A.; Srivastava, O. N.; Talapatra, S.; Vajtai, R.; Ajayan, P. M. (2004): Carbon nanotube filters, *Nature Materials* 3, 610–614, 2004.
- Telford, J. R. (2004): Outer-Sphere Coordination of Uranyl Carbonate by Modified Cyclodextrins: Implications für Speciation and Remediation, ACS Symposium Series 890, *Nanotechnology and Environment, Applications and Implications*, American Chemical Society (Hrsg.), 2004.
- Tratneyk, P. C.; Johnson, R. (2006): Nanotechnologies for the environmental cleanup, *nanotoday*, Vol. 1, No. 2, May 2006.
- Tschmelak, J.; Kumpf, M.; Käppel, N.; Proll, G.; Gauglitz, G. (2004): Total internal reflectance fluorescence (TIRF) biosensor for environmental monitoring of testosterone with commercially available immunochemistry: Antibody characterization, assay development and real sample measurements, *Talanta*, 69 (2), 343–350, 2004.

- Wu, P.; Zhu, J.; Xu, Z. (2004): Template-Assisted Synthesis of Mesoporous Magnetic Nanocomposite Particles, *Advanced Functional Materials*, Vol. 14, Issue 4, pp. 345–351, 2004.
- Wu, Wan-hsun (2007): Parenteral Nanoemulsions – Composition, Preparation and Cellular Uptake, Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 2007.
- Lu Yan; Yu Shui Lia; Chai Bao Xiang; Shun Xiandac (2006): Effect of nano-sized Al_2O_3 -particle addition on PVDF ultrafiltration membrane performance, *Journal of Membrane Science* Volume 276, Issues 1-2, 1 May 2006, Pages 162–167, 2006.
- Yang S. Y., Ryu I., Kim H. Y., Kim J. K., Jang, S. K.; Russell, T. P. (2006): Nanoporous Membranes with Ultrahigh Selectivity and Flux for the Filtration of Viruses, *Advanced Materials*, Volume 18, Issue 6, pp. 709–712, 2006.
- Yavuz; C. T.Z.; Mayo, J. T.; Yu, W. W.; Prakash, A.; Falkner, J. C.; Yean, S.; Cong, L.; Shipley, H. J.; Kan, A.; Tomson, M.; Natelson, D.; Colvin, V. L. (2006): Low-Filed Magnetic Separation of Monodispers Fe_2O_3 Nanocrystals, *Science*, Vol. 314, 10 November 2006.
- Yoon, B.; Häkkinen, H.; Landmann, U.; Wörz, A. S.; Antonietti, J.; Abbet, A.; Judai, K.; Heiz, U. (2005): Charging Effects on Bonding and Catalyzed Oxidation of CO on Au_8 Clusters on MgO, *Science* 21, Vol. 307. No. 5708, pp. 403–407, January 2005.

In der Reihe „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind bisher die folgenden Bände erschienen:

01/07	Wirtschaftsfaktor Umweltschutz: Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation
02/07	Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen
03/07	Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung
04/07	Zukunftsmarkt CO ₂ -Abscheidung und –Speicherung
05/07	Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung
06/07	Zukunftsmarkt Solares Kühlen
07/07	Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren
08/07	Zukunftsmarkt Biokunststoffe
09/07	Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe
10/07	Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik
11/07	Zukunftsmarkt Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement
12/07	Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie
13/07	Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung

Alle Veröffentlichungen können kostenlos auf www.umweltbundesamt.de heruntergeladen werden.