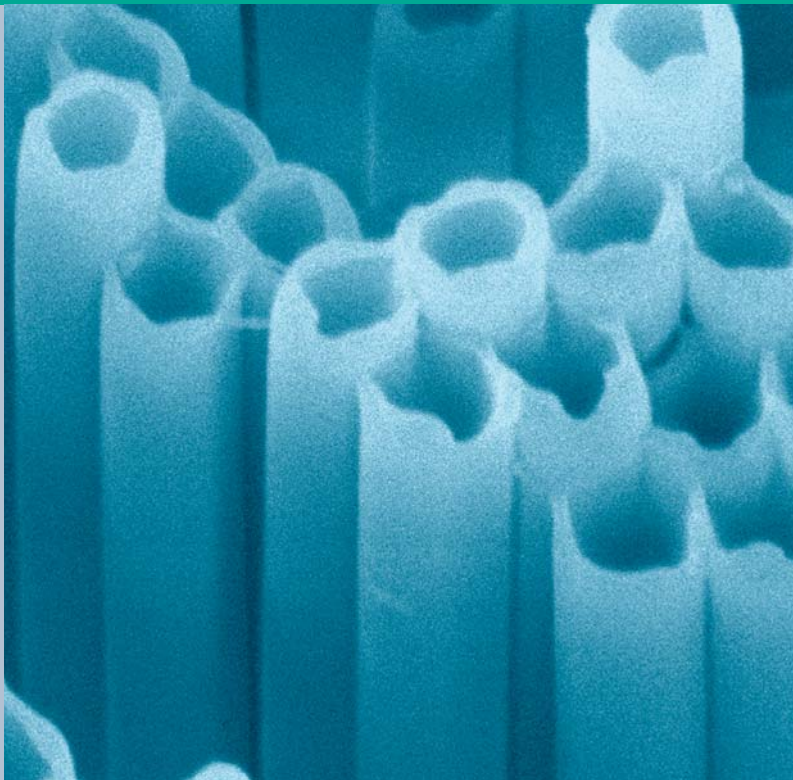




Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie

Innovationspotenziale für Unternehmen



**Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie
- Innovationspotenziale für Unternehmen**

eine Unternehmerbroschüre der Aktionslinien hessen-umwelttech
und hessen-nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung

erstellt von:

Daniel Heubach
Severin Beucker
Claus Lang-Koetz
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstraße 12
D-70569 Stuttgart



Redaktion:

Dr. Rainer Waldschmidt, Maria Rieping (HMWWL)
Alfred Stein, Sabine Wesche, (HA, hessen-umwelttech)
Alexander Bracht, Markus Lämmer, (HA, hessen-nanotech)
Redaktionsbüro Frantz, Göttingen

Herausgeber:

HA Hessen Agentur GmbH
Abraham-Lincoln-Straße 38-42
D-65189 Wiesbaden
Telefon 0611/774-8614
Telefax 0611/774-8620
Internet www.hessen-agentur.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit,
die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie
für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffent-
lichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht
mit der Meinung des Herausgebers übereinstimmen.

© Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung
Kaiser-Friedrich-Ring 75
D-65185 Wiesbaden
Internet www.wirtschaft.hessen.de

Vervielfältigung und Nachdruck - auch auszugsweise -
nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung.

Gestaltung: WerbeAtelier Theißen, Lohfelden
Druck: Koehler & Hennemann, Wiesbaden
Titelbild: Bündel von Nanoröhrchen
(Quelle: Philipps-Universität Marburg)

www.hessen-umwelttech.de

www.hessen-nanotech.de

Umweltechnologie trifft Nanotechnologie -



denn Erfolg lebt von Innovation!

In der Umwelttechnologie nehmen deutsche Unternehmen seit jeher eine Spitzenposition ein. Hessische Betriebe sind ganz vorne mit dabei und werden von der Aktionslinie hessen-umwelttech meines Hauses unterstützt. Doch auf den Lorbeeren ausruhen kann sich Hessen damit nicht. In Zeiten ständig wachsender und sich wandelnder Märkte liegt ein Schlüssel zum Erfolg in der Erforschung und dem Einsatz von Zukunftstechnologien.

Eine der wichtigsten Zukunftstechnologien des noch jungen Jahrhunderts ist die Nanotechnologie. Durch die gezielte Nutzung und Beeinflussung physikalischer und chemischer Eigenschaften kann Nanotechnologie Innovationen hervorbringen, die als Produkte in alle Lebensbereiche des Menschen hineinwirken können. Auf allen Teilfeldern der Nanotechnologie wird in Hessen auf hohem Niveau geforscht. Das im Jahre 2004 gegründete NanoNetzwerk Hessen der hessischen Hochschulen unterstützt zusammen mit unserer Aktionslinie hessen-nanotech und dem TechnologieTransferNetzwerk (TTN-Hessen) gezielt hessische Hochschulen bei der Initiierung von Kooperationen mit hessischen Unternehmen. Namhafte Unternehmen sind bereits als Technologieanbieter oder -anwender tätig.

Wie eine von meinem Hause in Auftrag gegebene Unternehmensbefragung bei über 6.000 hessischen Firmen ergeben hat, sind diese Potenziale der Nanotechnologie jedoch noch nicht ausreichend bekannt.

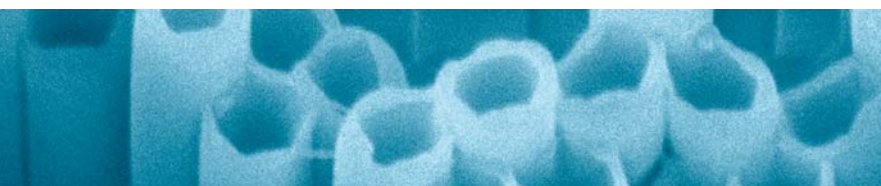
Getreu dem Motto „Stärken stärken“ wollen wir deshalb die in Hessen vorhandenen Stärken in der Nanotechnologie mit der herausragenden Marktposition der Umwelttechnologieunternehmen zusammenführen. Dreh- und Angelpunkt in Hessen sind hierbei die mittelständischen Umwelttechnologie-Firmen als bedeutender Teil der Wertschöpfungskette. Ihre Innovationskraft und ihr detailliertes Marktverständnis sind die Hebel, an denen wir ansetzen müssen. Nur gemeinsam mit dem Mittelstand kann Hessen auch zukünftig eine starke Position im internationalen Wettbewerb einnehmen.

Diese Unternehmerbroschüre soll dazu einen Beitrag leisten. Ich wünsche mir, dass wir damit Ihr Interesse an der Nanotechnologie wecken können und so die Entwicklung neuer umwelttechnologischer Produkte auf Basis von Nanotechnologie ermöglicht wird.

Dr. Alois Rhiel
Hessischer Minister für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung

Inhalt

Vorwort	1
Zusammenfassung	4
Einleitung - Warum diese Unternehmerbroschüre?	6
1 Einführung in die Nanotechnologie	8
1.1 Definition der Nanotechnologie	8
1.2 Innovationspotenziale der Nanotechnologie	9
1.3 Funktionalitäten der Nanotechnologie	12
Mechanische Funktionalitäten	12
Geometrische Besonderheiten	12
Elektrische Funktionalitäten	12
Magnetische Funktionalitäten	13
Optische Funktionalitäten	13
Chemische Funktionalitäten	13
Biologische Funktionalitäten	13
1.4 Forschungs- und Anwendungsstand	14
Anwendungsbeispiele der Nanotechnologie	14
Entwicklungsstand	15
Nanotechnologieforschung	16
Akteure in Hessen	17
1.5 Forschungsprogramme und Markt	17
1.6 Technikfolgenabschätzung	18



2	Anwendungspotenziale und Anwendungsfelder der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie	19
2.1	Aufgaben und Anwendungsfelder der Umwelttechnologie	19
2.2	Anwendungspotenziale der Nanotechnologie	
	in der Umwelttechnologie	23
	Technologiebereich Wasser / Abwasser	24
	Technologiebereich Abfall / Recycling	24
	Technologiebereich Energie, Luftreinhaltung, Klimaschutz	24
	Technologiebereich Integrierte Produktpolitik (IPP)	25
	Technologiebereich Analytik, Mess- / Steuer- / Regeltechnik (MSR)	25
	Bewertung der Funktionalitäten und der Technologiebereiche	25
2.3	Gegenüberstellung der Anwendungsfelder mit der Branchenstruktur der Umwelttechnologiefirmen in Hessen	27
2.4	Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie	
	in der Umwelttechnologie	29
	Anwendungsgebiet Filtration (Filter, Membran)	29
	Anwendungsgebiet Schadstoffrückhaltung	30
	Anwendungsgebiet Katalytischer Schadstoffabbau	31
	Anwendungsgebiet Nanosensoren (Lab-on-Chip-Systeme)	32
3	Innovationspotenziale und Ansatzpunkte des Technologietransfers	34
	Anhang	39
	Literatur	39
	Forschungsprogramme und Markt	42
	Nanoforschung in den USA	43
	Nanoforschung in der EU	45
	Nanoforschung in Deutschland	45
	Nanoforschung der Industrie	47
	Markt	47
	Technikfolgenabschätzung	48
	Informationen & Adressen	49

Zusammenfassung

Die Nanotechnologie zeichnet sich durch Funktionalitäten und Eigenschaften von Komponenten und Stoffen aus, die von Effekten im Nanometerbereich (10^{-9}m) abhängig sind

Die Nanotechnologie wird zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gezählt. Sie zeichnet sich durch Funktionalitäten und Eigenschaften von Komponenten und Stoffen aus, die von Effekten im Nanometerbereich (10^{-9}m) abhängig sind. Ziel der Nanotechnologie ist es, solche nanoskaligen Strukturen mit definierten Funktionalitäten bewusst und gezielt aufzubauen. Hierzu zählen z. B. mechanische, chemische oder geometrische Eigenschaften von Partikeln oder Oberflächen, die in Produktsystemen zur Anwendung kommen.

Es wird erwartet, dass sich die Nanotechnologie mittelfristig auf nahezu alle industriellen Branchen auswirkt. Ihre Einsatzmöglichkeiten reichen von der Optimierung bestehender Produkte und Prozesse über Produktinnovationen bis hin zu einer revolutionären Neugestaltung der Produktion. Nanotechnologie wird damit Einfluss auf alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens nehmen. Derzeit befinden sich zwar viele der nanotechnologischen Anwendungen noch im Forschungsstadium, und für zahlreiche Anwendungen ist noch weitere FuE-Arbeit notwendig. Erste Produktinnovationen haben aber bereits ihren Weg in den Markt gefunden (siehe Abbildung 8, Seite 16). Beispielsweise kommen TiO_2 -Nanopartikel als UV-Schutz in Sonnencremes oder Nanopartikel in kratzfesten Autolacken zum Einsatz, und Nanofäden optimieren neue Filtersysteme.

Die Umwelttechnologie ist bisher in der Forschung der Nanotechnologie noch keine unmittelbar treibende Kraft. Aufgrund der Eigenschaften der Nanotechnologie sind aber viele technologische Innovationen in der Umwelttechnologie denkbar: Mechanische, chemische und biologische Funktio-

nalitäten sowie geometrische Eigenschaften der Nanotechnologie können in vielen Anwendungen der Umwelttechnologie, z. B. in der Filtration, der Sensorik, der Katalyse oder auch in Energiesystemen zum Einsatz kommen (siehe Tabelle 2, Seite 26).

Zudem kann die Umwelttechnologie von einer Reihe „indirekter“ Anwendungsfelder der Nanotechnologie profitieren. Zu diesen zählen u. a. Oberflächen mit ausgewiesenen umweltverträglichen Easy-to-clean Eigenschaften.

Nanotechnologie kann dort Unternehmen der Umwelttechnologie unterstützen und zu neuen Produktinnovationen führen, wo:

- ▶ physikalisch-chemische (Verfahrens-)Prozesse eine wichtige Rolle spielen und ein besonders großes Oberflächen / Volumen-Verhältnis den Prozess maßgeblich beeinflusst,
- ▶ biologische (Verfahrens-)Prozesse grundlegend für die Produkte sind, besonders an der Schnittstelle zwischen biologischen und technischen Bauelementen,
- ▶ die Gestaltung und Funktionalisierung von Oberflächen oder Grenzflächen eine große Bedeutung haben und deren Beeinflussung den Produktnutzen erhöht, oder
- ▶ die Miniaturisierung weiter vorangetrieben werden soll bzw. kompakte Systeme (z. B. Sensorik und Energieversorgung) notwendig sind.

Was können dann die nächsten Schritte sein?

Wenn einer oder mehrere dieser Aspekte für das Produkt oder die Prozesse des Unternehmens eine wichtige Rolle spielen, kann in einem nächsten Schritt detailliert betrachtet werden, welche „Nanofunktionalität“ (siehe Kapitel 1.3) den Produktnutzen erhöht und wie sich die neuen technologischen

Eigenschaften zu etablierten Technologien verhalten (siehe Kapitel 3). Parallel hierzu kann über eine Literatur- und Internetrecherche, Patentanalyse oder Kontakt zu Forschungs- und Technologietransferinstitutionen in Hessen (siehe Seite 49) durch das Unternehmen Wissen aufgebaut werden, um das Einsatzpotenzial abzuschätzen.

Untersuchungen im Rahmen dieser Unternehmerbroschüre haben gezeigt, dass die Nanotechnologie in der Umwelttechnologiebranche noch weitgehend unbekannt ist. Die Forschung in der Nanotechnologie ist derzeit stark durch die technischen Möglichkeiten getrieben, während in der Umwelttechnologie problemorientiert vorgegangen wird. Beide Ansätze müssen zusammengeführt werden, um innovative Produkte und Dienstleistungen zu realisieren – die Potenziale sind vorhanden.

Hessen ist sowohl in der Nano- als auch der Umwelttechnologie gut positioniert. Auf allen Teilfeldern der Nanotechnologie wird in Hessen auf international hohem Niveau geforscht, und es sind namhafte Unternehmen im Bereich der Nanotechnologie vertreten. In der Umwelttechnologie ist Hessen besonders gut positioniert in den Umwelttechnologiebereichen Wasser / Abwasser, Abfall, Energie / Luftreinhaltung / Klimaschutz, Analytik / Mess- / Steuer- und Regeltechnik sowie der Integrierten Produktpolitik. Damit sind die Voraussetzungen vorhanden, um die Forschung in den Überschneidungsbereichen von Nano- und Umwelttechnologie voranzutreiben und zur Anwendung zu bringen. Dies ist ein Beitrag zum Schutz der Umwelt und stärkt zugleich den Wirtschaftsstandort Hessen.

Die vorliegende Unternehmerbroschüre will die Innovationspotenziale der Nanotechnologie für die Unternehmen der Umwelttechnologie in Hessen aufzeigen. Dazu wird zuerst ein Einstieg in die Nanotechnologie gegeben. Die verschiedenen Funktionalitäten der Nanotechnologie bilden die Grundlage für die Bewertung des Anwendungspotenzials

in der Umwelttechnologie. Das Anwendungspotenzial wird schließlich mit der Branchensituation in Hessen verglichen. Anhand ausgewählter Anwendungen der Umwelttechnologie in der Filtration, dem Schadstoffabbau, der Katalyse und der Sensorik wird der Einsatz der Nanotechnologie beispielhaft dargestellt. Abschließend werden – aus Sicht des Technologiemanagements – Innovationspotenziale der Nanotechnologie sowie Ansatzpunkte für einen effektiven Technologietransfer von der Nanotechnologie in die Umwelttechnologie aufgezeigt.

Für Schnellleser:

Was ist neu an der Nanotechnologie?

- ▶ Kapitel 1.2, Seite 9
- ▶ Abbildung 5, Seite 9

Was kann die Nanotechnologie?

- ▶ Kapitel 1.3, Seite 12

Welche Anwendungen gibt es bereits, und was kommt noch?

- ▶ Kapitel 1.4, Seite 14
- ▶ Abbildung 8, Seite 16

Welche Anwendungen sind in der Umwelttechnologie denkbar?

- ▶ Tabelle 1, Seite 20 / 21
- ▶ Tabelle 2, Seite 26

Was sind konkrete Anwendungsbeispiele in der Umwelttechnologie?

- ▶ Kapitel 2.4, Seite 29

Wie können Unternehmen der Umwelttechnologie vorgehen?

- ▶ Kapitel 3, Seite 34

Wer sind die Ansprechpartner in Hessen?

- ▶ Informationen & Adressen, Seite 49

Einleitung – Warum diese Unternehmerbroschüre?

Die Nanotechnologie wird zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gezählt (*Bierhals 2000, BMBF 2002, VDI 2004/2*). Erkenntnisse über neue Funktionalitäten und Eigenschaften von Materialien und Werkstoffen auf molekularer Ebene, die maßgeblich von den nanoskaligen Effekten ihrer Komponenten abhängig sind, machen ihre Bedeutung aus. Beispiele für solche nanoskaligen Effekte sind chemische Oberflächeneigenschaften, die zu neuen, katalytischen oder adsorbierenden Funktionalitäten von Materialien führen. Eine nanostrukturierte Oberfläche sorgt zum Beispiel für eine Beschichtung, die weder von Wasser noch Öl benetzt wird (ultraphob), und an der Flüssigkeiten und Schmutz nicht anhaften (*siehe beispielhaft den Lotuseffekt in Abbildung 1*).

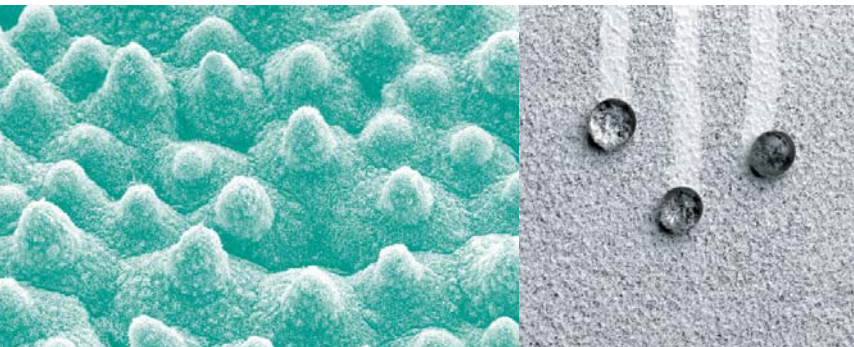


Abbildung 1:

Links: Eine auf Selbstreinigung optimierte doppelt strukturierte biologische Oberfläche. Durch die Kombination von Mikro- (Zellen) und Nanostruktur (Wachskristalle) werden Kontaktflächen minimiert (*Quelle: Professor Wilhelm Barthlott, Universität Bonn*).

Rechts: Fassadenfarbe Lotusan®, die sich dank Lotus-Effect® mit Regen selbst reinigt (*Quelle: sto AG*)

Nanotechnologie ist weder ein Produkt noch ein Verfahren, sie beschreibt vielmehr die neuen Erkenntnisse von Materialeigenschaften und -strukturierung in der Dimension 10^{-9} m. Die Kombination dieser Erkenntnisse mit bestehenden, konventionellen Produkten oder Technologien ergibt völlig neue Perspektiven. Sie betreffen das Produkt, dessen Anwendungsfelder, aber auch das Engineering von Produkten. Die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie setzt zunächst das Verständnis über die Effekte und Potenziale beider Technologien voraus. Dieses ist Bedingung für die bewusste Nutzung von Eigenschaften der Nanomaterialien, die dann auf makroskopischer Ebene integriert werden und zu neuen komplexen Produktsystemen zusammengefügt werden können (*Abbildung 2, Seite 7*).

Die Umwelttechnologie ist – wie die Nanotechnologie – ein interdisziplinäres Arbeitsfeld, das sich an der Lösung von Umweltproblemen in den einzelnen Umweltmedien orientiert. Die medienbezogenen Anwendungsfelder der Umwelttechnologie bieten vielfältige Möglichkeiten für den Einsatz von Nanotechnologie. So kann Nanotechnologie zur Lösung von Wasser- und Energieversorgungsfragen der Zukunft beitragen. Filtersysteme, Solar- und Brennstoffzellen sowie Wasseraufbereitung (z. B. Meerwasserentsalzung) sind Forschungsfelder mit großem Marktpotenzial.

Der Umwelttechnologie wird ein weltweites Marktvolumen von 750 Mrd. Euro bis zum Jahr 2010 vorausgesagt, dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von acht Prozent. Ihr Einsatz- und Wachstumspotenzial macht die Umwelttechnologie damit zu einem attraktiven Anwendungsfeld für die Nanotechnologie. Der Export innovativer Umwelttechnologie bietet somit große Chancen für hessische Unternehmen. Innovationen der Nanotechnologie in den Bereichen Werkstofftechnik, Verfahrenstechnik, Biotechnologie, Mikroelektronik oder Informationstechnologie kommen



Abbildung 2: Wertschöpfungskette und Integration der Nanotechnologie

zudem auch der Umwelttechnologie zugute. Hierzu zählen z. B. energieeffizientere Beleuchtungssysteme, festere und leichtere Materialien, deutlich verbesserte chemische und biologische Sensoren oder spezifische Oberflächeneigenschaften.

Bisher steht die praktische Anwendung von Nanotechnologie in der Umwelttechnologie wie in vielen anderen Branchen erst am Beginn ihrer Möglichkeiten. Dies liegt zum einen daran, dass in vielen Bereichen der Nanotechnologie noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten ist. Zum anderen sind vielen Anwendern und Herstellern von Umwelttechnologie grundlegende nanotechnologische Effekte noch nicht bekannt.

Wo und wie kann die Nanotechnologie auch in der Umwelttechnologie zur Anwendung kommen? Wie können die innovativen Potenziale der Nanotechnologie einer interessierten Öffentlichkeit im Bereich der Umwelttechnologie bekannt gemacht werden und damit dazu beitragen, Umwelttechnologie-Firmen Vorteile am Markt zu verschaffen? Diese Unternehmerbroschüre möchte Antworten geben, indem sie Innovationspotenziale der Nanotechnologie für die Umwelttechnologie aufzeigt und anhand von viel versprechenden Anwendungsfeldern hervorhebt.

Für die vorliegende Unternehmerbroschüre wurden ausgewählte Experten aus der Nanotechnologie sowie der Umwelttechnologie zu ihren Erfahrungen befragt. Ihre Aussagen sind anonymisiert in Inhalte und Ergebnisse dieser Unternehmerbroschüre eingeflossen und geben einen Einblick in den aktuellen Stand der Nanotechnologie sowie deren Anwendungsmöglichkeiten in der Umwelttechnologie in Hessen.

Aufbau dieser Broschüre:

- ▶ Kapitel 1:
Einführung in die Nanotechnologie
- ▶ Kapitel 2:
Anwendungspotenziale und Anwendungsfelder der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie
- ▶ Kapitel 3:
Innovationspotenziale und Ansatzpunkte des Technologietransfers
- ▶ Anhang:
Forschungsprogramme und Markt Technikfolgenabschätzung
- ▶ Informationen & Adressen

1 Einführung in die Nanotechnologie

1.1 Definition der Nanotechnologie

Definition: „Nanotechnologie beschäftigt sich mit Systemen, deren Funktionalität und Eigenschaften nur allein von den nanoskaligen Effekten ihrer Komponenten abhängig sind“

Nanotechnologie¹ beruht auf den Erkenntnissen und Möglichkeiten, die Eigenschaften und Strukturen von Materialien auf supramolekularer Ebene gezielt und bewusst zu beeinflussen. Damit wird es möglich, Materialien und Oberflächen zu funktionalisieren, zu miniaturisieren oder zu spezifizieren, um so z. B. ihre chemische Selektivität zu verbessern.

Nanotechnologie ist deshalb weder eine einzelne Wissenschaftsdisziplin noch ein definiertes Anwendungsfeld. Für eine Definition kann ihre Größenordnung herangezogen werden. Demnach beschäftigt sich die Nanotechnologie mit Systemen, deren Funktionalität und Eigenschaften nur allein von den nanoskaligen Effekten ihrer Komponenten abhängig sind (Bachmann 1998).

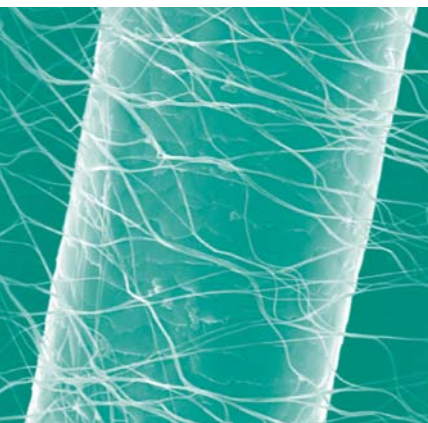


Abbildung 3: Nanofasern (quer verlaufend) im Vergleich zu einem menschlichen Haar (senkrecht) unter dem Elektronenmikroskop (Quelle: Philipps-Universität Marburg)

Gemeinhin wird die Beeinflussung von Strukturen unterhalb 100 nm Ausdehnung als Arbeitsbereich der Nanotechnologie angesehen (siehe Größenvergleich in Abbildung 3). Die im Folgenden erläuterten Effekte sind wesentlich und funktionsbildend für die Nanotechnologie und aus Sicht der Umwelttechnologie von besonderer Bedeutung:

- ▶ **Größeneffekte:** Die fortschreitende Miniaturisierung bis in den nanoskaligen Bereich erlaubt neue Anwendungsgebiete bzw. die Unterbringung von Funktionalitäten auf engstem Raum².
- ▶ **Struktureffekte:** Mit dem Verstehen und bewussten Aufbau von Strukturen soll es möglich werden, die Eigenschaften von Materialien gezielt von Grund auf zu beeinflussen, zu nutzen und in komplexe Gesamtsysteme zu integrieren³.
- ▶ **Oberflächeneffekt / Grenzflächeneffekt:** Die Gestaltung von Strukturen auf molekularer Ebene sowie das zunehmende Oberflächen / Volumen-Verhältnis haben Auswirkungen auf die Grenzfläche von Materialien und Partikeln. Durch eine Vergrößerung und Funktionalisierung der Grenzfläche können die Oberfläche eines Materials sowie dessen Eigenschaften zu einer wichtigen Produktfunktion werden (siehe Abbildung 4, Seite 9).

1 Die Bezeichnung „Nano“ leitet sich von der Größenordnung des betrachteten Bereichs ab, dem Nanometer ($\text{nm} = 10^{-9} \text{m}$). Das Wort „Nano“ kommt aus dem Griechischen und heißt „Zwerg“.

2 Der US-Amerikaner Richard Feynman (1918 - 1988), Professor für theoretische Physik, der 1965 den Nobelpreis für seine Arbeit auf dem Gebiet der Quantenelektrodynamik bekam, wies auf die unbegrenzten Möglichkeiten der Miniaturisierung hin: „There is plenty of room at the bottom“. In atomarer Dimension sei auf einem Stecknadel-

kopf genügend Platz für das gesamte Wissen der Menschheit (Hullmann 2001 und Bachmann 1998).

3 Das grundlegende Konzept, aus kleinen Teilchen (nanotechnologisch betrachtet also einzelnen Atomen oder Molekülen) ein größeres System zusammenzubauen, wird als „bottom-up-Ansatz“ bezeichnet. Im Gegensatz dazu bezeichnet der „top-down-Ansatz“ die Schaffung von kleinen Strukturen aus größeren Einheiten, wie z. B. in der Mikroelektronik mit Lithographieverfahren.

1.2 Innovationspotenziale der Nanotechnologie

Im Nanometerbereich ändern sich Betrachtungsweise und Verständnis des Engineering

Mit den Arbeiten im Nanometerbereich ändern sich auch die Betrachtungsweise und das Verständnis des Engineering: An Stelle der klassischen Kontinuumsphysik tritt die Quantenmechanik. Oberflächeneffekte und molekulare Eigenschaften von Materialien dominieren gegenüber makroskopischen, z. B. mechanischen Effekten.

Ein Nanopartikel mit einem Durchmesser von drei nm enthält etwa 800 Atome. Davon liegen über 30 Prozent an den Grenzflächen (*zur Verdeutlichung siehe Abbildung 4*). Die Oberflächenatome haben eine hohe Reaktivität, da sie im Allgemeinen nicht abgesättigte Bindungen haben. Dadurch werden die chemischen Eigenschaften - wie die katalytische Aktivität - der Partikel entscheidend beeinflusst.

Abbildung 5: Kopplung der Mikro- und Nanowelt und Gestaltungsansätze (Bachmann 2004)

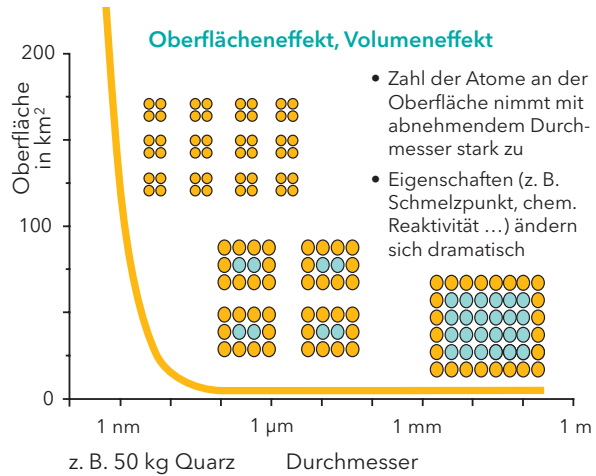
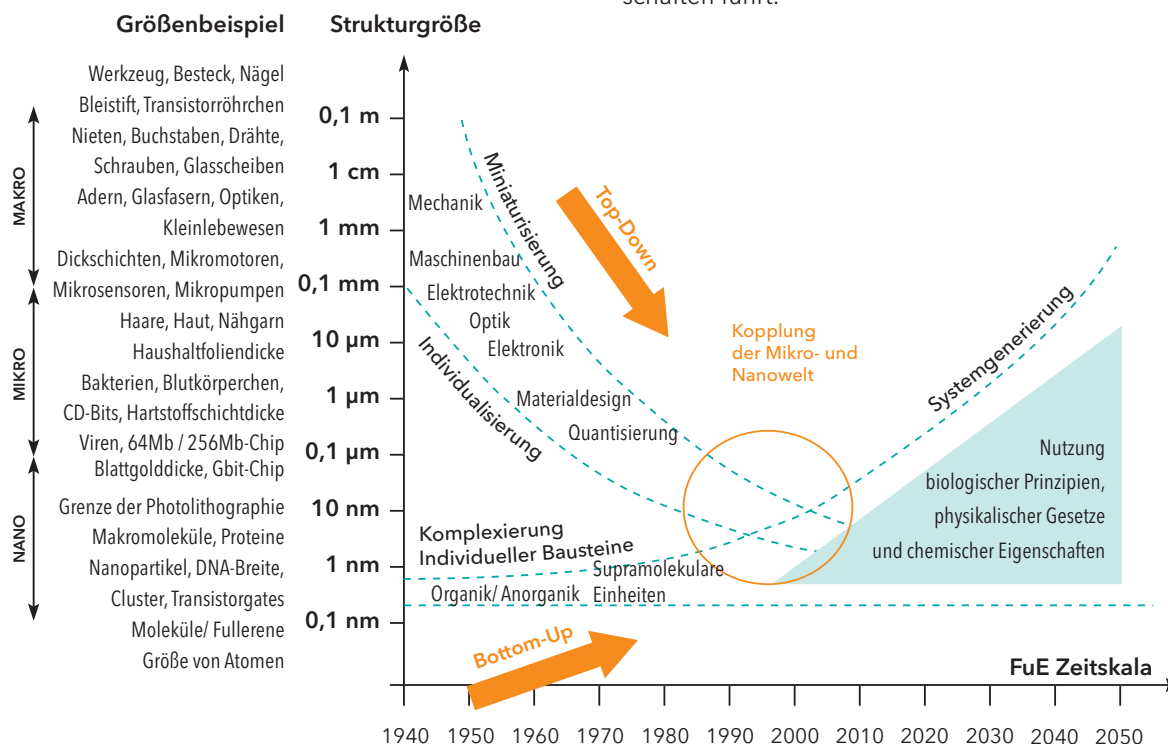


Abbildung 4: Beispiel für die Abhängigkeit der Materialoberfläche vom Partikeldurchmesser (bei konstantem Gesamtvolumen bzw. konstanter Gesamtmasse)

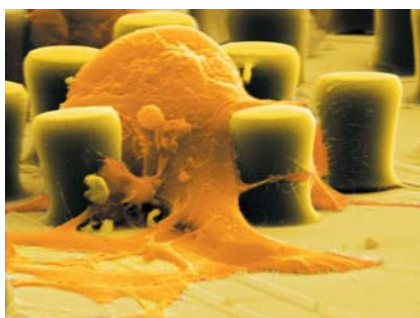
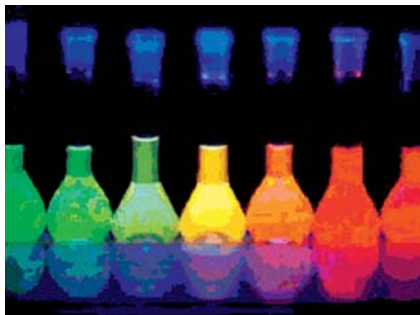
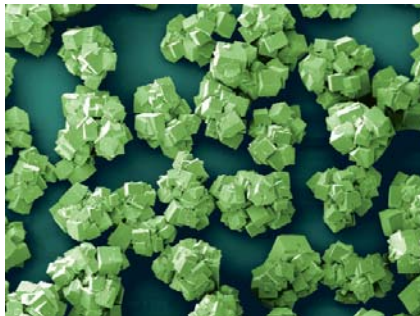
Der Vorstoß in den Nanobereich gelingt zum einen nur durch den interdisziplinären Zusammenschluss von Physik, Biologie und Chemie. Zum anderen werden zwei Gestaltungsansätze deutlich, die sich aus der Nanoforschung ergeben und die auch für die Umwelttechnologie neue Potenziale aufzeigen können (*Abbildung 5*). Gemäß des „Top-Down“-Zugangs dringt die Miniaturisierung immer stärker über die Mikrotechnik in nanoskalare Größenordnungen vor, während der gezielte Strukturaufbau auf molekularer Ebene über den „Bottom-Up“-Ansatz z. B. durch Selbstorganisation zum bewussten Aufbau von molekularen Strukturen und Eigenschaften führt.

Über den kontrollierten Aufbau makroskopischer Strukturen aus atomaren und molekularen Bausteinen (Bottom-Up) lassen sich deren Eigenschaften gezielt einstellen. Das Verständnis der molekularen Grundlagen neuer Materialien eröffnet Perspektiven u. a. für die Herstellung „schaltbarer“ Werkstoffe, die z. B. polare und unpolare Eigenschaften annehmen können. Die Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die so genannten Carbon Nano Tubes (CNT, *Abbildung 6*) sind ein Nanomaterial oder -werkstoff, auf den große Hoffnungen gesetzt werden. Sie können sowohl Leiter als auch Halbleiter sein.

Der Zusammenschluss von Physik, Biologie und Chemie ermöglicht wesentliche Eigenschaftsänderungen und neue Funktionalitäten

Durch den Zusammenschluss von Physik, Biologie und Chemie werden wesentliche Eigenschaftsänderungen von Materialien möglich, die maßgeblich die funktionalen Eigenschaften der Nanotechnologie bestimmen (*Bachmann 2004*). Unternehmen der Umwelttechnologie können sich z. B. die folgenden Eigenschaften zu Nutze machen:

- ▶ Die vergrößerte Oberfläche von Nanomaterialien ermöglicht **neue chemische Prozesse** durch die Änderung von Schmelz- und Siedepunkt, chemischer Reaktivität und katalytischer Ausbeute. Nano-Eisenpartikel werden z. B. zur Reduktion von Schadstoffen und in der Wassereinigung eingesetzt. Nanoskalige Zeolithe können in der Umweltanalyse oder zur Oxidation in Kationenaustauschern, Titandioxidpartikel als Nanopartikel in der Photokatalyse organischer Kontamination oder metallorganische Gerüste als Nanocubes zur Wasserstoffspeicherung zum Einsatz kommen.
- ▶ Quantenmechanisches Verhalten führt zu einer **neuen technischen Physik** von Partikeln und Werkstoffen z. B. durch Änderung von Farbe, Transparenz, Härte, Magnetismus, elektrischer Leitfähigkeit. So spielt die Leitfähigkeit eine große Rolle bei der Protonenaustauschermembran (PEM) in der Brennstoffzelle oder bei Chemosensoren zur Gasanalyse. Nanoskalige Partikel genügen oftmals den hohen Anforderungen an die Transparenz und bieten gleichzeitig neue Eigenschaften wie Wärmedämmung oder einen selbstreinigenden Effekt.
- ▶ Die molekulare Erkennung führt zu **neuen Bioanwendungen**, die biologische Bausteine einsetzen, auf Funktionsprinzipien der Natur zurückgreifen, biotechnologische Prozesse unterstützen oder biokompatible und biofunktionale Materialien herstellen (*TAB 2004*). So können z. B. biologisch reaktive Nanostrukturen auf einem Träger als Biosensor aufgebracht werden.



(Quelle oben: BASF AG, Ludwigshafen)

(Quelle mitte: Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg)

(Quelle unten: Max-Planck-Institut für Biochemie / Peter Fromherz)

Das Ziel ist eine höhere Spezifizierung, Selektivität und Funktionalisierung durch Nanotechnologie

Aus den in der Nanotechnologie erforschten neuen Materialeigenschaften ergeben sich große Erwartungen hinsichtlich Spezifizierung, Selektivität und Funktionalisierung sowie für den Aufbau von Partikeln, Werkstoffen und Komponenten.

Als wenig realistisches Zukunftsszenario können die Vorstellungen von Eric Drexler⁴ gelten. Er vertritt die Vision eines Maschinenbaus auf Nanometer-Ebene, auch molekulare Nanotechnologie genannt, und beschreibt darin Nanoroboter, die sich selbst replizieren und Material selbst herstellen können⁵. Dem steht eine weitaus realistischere Betrachtung vieler Forscher gegenüber. Demnach wird die Nanotechnologie in naher Zukunft Produkte und Prozesse effizienter gestalten, aber auch zu neuen Anwendungen und Funktionsweisen führen (z. B. Krebstherapie oder Speichermedien).

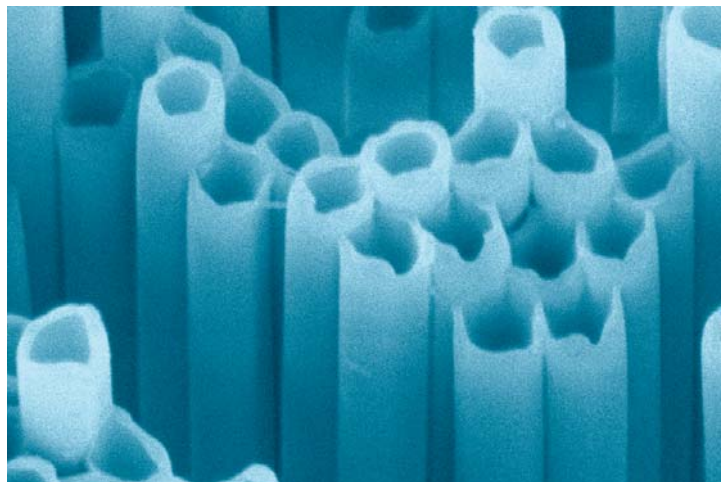
Die wesentlichen Potenziale der Nanotechnologie, die auch für die Umweltechnologie von Bedeutung sind, basieren hauptsächlich (*siehe Bachmann 1998*)

- ▶ auf der **Miniaturisierung** von Strukturgrößen und Systemen. Große Oberflächen kleinster Partikel können in katalytischen Prozessen genutzt werden.
- ▶ auf der **Nutzung revolutionärer Prinzipien der Selbstorganisation oder Replikation**. Das Ziel ist der Aufbau supramolekularer Funktionseinheiten oder biologischer Makromoleküle. Hierzu zählen zum Beispiel Sensoren, die sich an Funktionsprinzipien der Natur anlehnen oder Oberflächen, die sich während des Ordnungsprozesses ausbilden und zu spezifischen physikalisch-mechanischen oder chemischen Eigenschaften wie korrosionshemmenden oder reibungsarmen Oberflächen führen.

In den Bereichen Umwelt und Gesundheit sehen die Experten positive Effekte und Umsatzpotenziale für die Nanotechnologie, z. B. durch die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren oder neuer Medikamente und agro-chemischer Produkte. Umweltentlastende Effekte werden durch Ressourceneinsparung oder Effizienzsteigerungen im Energiebereich erwartet. So entspricht die mögliche Energieeinsparung durch den verstärkten Einsatz von LEDs mit Nanotechnologie als weiße LED für die Allgemeinbeleuchtung in Deutschland der Leistung von zwei Atomkraftwerken (*Bachmann 2004*).

Eine Schlüsselaufgabe für die Beherrschung der Strukturierungs- und Herstellungsmethoden im Nanoskalenbereich wird der Weiterentwicklung von Mess- und Manipulationswerkzeugen und -techniken zukommen, denn die Auflösung kleinster Strukturen im Nanomaßstab wird auch in der Zukunft erst die Forschung und Entwicklung in diesen Größenordnungen ermöglichen.

Abbildung 6: Bündel von Kohlenstoff-Nanoröhrchen
(Quelle: Philipps-Universität Marburg)



4 Forscher und Vorsitzender des Foresight Institute, USA (www.foresight.org/FI/Drexler.html).

5 Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology, Eric Drexler, 1986, und Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution von Eric Drexler und Chris Peterson, William Morrow and Company, Inc., New York 1991.

1.3 Funktionalitäten der Nanotechnologie

Nanotechnologie kann aufgrund ihrer Effekte und Funktionalitäten theoretisch in fast allen Branchen und Technologien – auch in der Umwelttechnologie – zum Einsatz kommen. Sie kann – im Gegensatz zu anderen Technologien wie z. B. der Biotechnologie – nur unzureichend über ihre Anwendungsfelder beschrieben werden.

Hinzu kommt, dass die Forschung in der Nanotechnologie noch in stärkerem Maße von den Möglichkeiten neuer Werkstoffe und Verfahren („Technology Push“) als von konkreten, an Kundenwünschen orientierten Anwendungsfällen („Market Pull“) vorangetrieben wird. Bisher ergeben sich praktische Anwendungen in vielen Fällen noch eher zufällig.

Die Funktionalitäten sind der Schlüssel für die anwendungsorientierte Annäherung an die Nanotechnologie

Die erforschten Funktionalitäten nanotechnologischer Materialien, Produkte und Verfahren bieten einen guten anwendungsorientierten Zugang zur Nanotechnologie für Unternehmen. Diese Phänomene sind eng mit Produktnutzen und -funktion und damit kundenorientierter Nachfrage verbunden und stellen das Bindeglied zwischen der Nanotechnologie und der Umwelttechnologie dar. Die Funktionalitäten werden im Folgenden vorgestellt (nach TAB 2004).

Mechanische Funktionalitäten

Die deutlich verbesserten mechanischen Funktionalitäten nanostrukturierter Festkörper sind höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen oder Superplastizität bei hohen Temperaturen. Grundlage der Effekte ist eine Verkleinerung der Korngröße, so dass Größen erreicht werden, unterhalb derer im Korn selbst keine plastischen Verformungsmechanismen mehr ablaufen können. Für Kunden ergeben sich hieraus Nutzen wie eine verlängerte Lebensdauer von Produktionswerkzeugen und Komponenten, oder auch ressourceneffizientere Schmiersysteme.

Geometrische Besonderheiten

Die geometrischen Besonderheiten von Nanostrukturen liegen in ihrem Raumbedarf in der Größenordnung von Atomen und Molekülen (siehe Abbildung 4). Daraus resultieren eine atomare Genauigkeit und extrem große Oberflächen/Volumen-Verhältnisse nanoporöser und nanopartikulärer Materialien. Kundennutzen sind z. B. einstellbare Porengrößen nanoporöser Membrane, molekülspezifische Separation und selektive Katalyse oder Ladungstrennungen und Adsorption in Verfahrensprozessen der Umwelttechnologie.

Elektrische Funktionalitäten

Die Verkleinerung der Partikelgröße und der Schichtdicken im unteren nm-Bereich führt zur Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände. Ein Elektron kann nur diskrete, durch Lücken getrennte einzelne Energieniveaus annehmen. Solche Partikel verhalten sich nicht wie Festkörper, sondern sind ähnlich wie Atome. Durch gezielte Beeinflussung der Struktur können sie hinsichtlich ihrer elektronischen und optischen Eigenschaften maßgeschneidert werden. Eine praktische Nutzung dieses Effekts findet sich z. B. in Elementen mit schaltbaren elektrischen Zuständen, optischen Schaltern, thermoelektrischen Materialien als Wärmetauscher oder antistatischen Oberflächen.

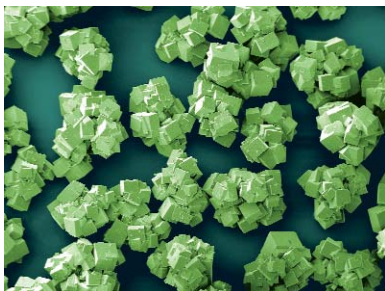


Magnetische Funktionalitäten

Die magnetische Funktionalität im nm-Bereich beruht auf paramagnetischen und ferromagnetischen Eigenschaften von Festkörpern. So lassen sich die makroskopischen magnetischen Eigenschaften beeinflussen, und Paramagnetismus tritt auf, der hier als Superparamagnetismus bezeichnet wird. In der Praxis genutzt wird der Magnetwiderstandseffekt (MR-Effekt), der in Magnetfeldsensoren zum Einsatz kommt, in magnetischen Speicherelementen (Magnetic RAM, MRAM) oder in Klebstoffen, die mit magnetischen Nanopartikeln so modifiziert sind, dass die Hafteigenschaften schaltbar werden.

Optische Funktionalitäten

Die optischen Funktionalitäten beruhen auf der deutlich kleineren Größe von Nanopartikeln gegenüber der Wellenlänge des sichtbaren Lichts: An ihnen tritt keine Reflexion auf. Durch das Maßschneidern der Größe lässt sich spezifisch ein scharf begrenzter Wellenlängenbereich (eine Farbe) einstellen, in dem das Material Licht absorbiert oder emittiert. Nanopartikel weisen neue optische Eigenschaften hinsichtlich Farbe, Fluoreszenz oder Transparenz auf. Genutzt wird dies in transparenten Dispersionen von Nanopartikeln oder in optisch funktionalen Oberflächen, wie z. B. bei der Entspiegelung von Solarzellen, oder im Bereich der optischen Analyse und der Informationsübertragung.



Chemische Funktionalitäten

Die chemische Funktionalität von Nanoobjekten beruht wesentlich auf deren Oberflächenstruktur: Nanostrukturierte Materialien weisen einen besonders großen Anteil an Oberflächenatomen auf (siehe *Abbildung 4, Seite 9*). Solche Atome sind aufgrund ihrer ungesättigten Bindungen besonders reaktiv. Gitterverspannungen bzw. verzerrte Bindungswinkel führen zu einer erheblich vergrößerten Oberflächenenergie. Nutzbar ist dies für Oberflächen mit maßgeschneidertem Benetzungsverhalten, zur räumlichen Anordnung von funktionellen Gruppen, zur Erhöhung der chemischen Selektivität und Reaktivität, aber auch der chemischen Stabilität in unterschiedlichen chemischen Verfahrensprozessen.

Biologische Funktionalitäten

Unter der biologischen Funktionalität nanoskaliger Materialien wird die Nutzung der Wechselwirkung mit komplexen biologischen Systemen wie Zellen, Organismen oder Biomolekülen verstanden. Wesentlich ist hierfür die Rauigkeit und Strukturierung im Mikro- und Nanometerbereich. Ein Nutzen ergibt sich zum einen durch die Transferrichtung „Nano2Bio“, d. h. die Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Materialien für die Untersuchung biologischer Fragestellungen wie z. B. in der Nanoanalytik. Zum anderen eröffnet die Transferichtung „Bio2Nano“ die Nutzung biotechnologischer Materialien und Baupläne zur Herstellung technischer Nanosysteme: Biologische Bausteine werden im Nanomaßstab als Komponenten für technische Systeme eingesetzt. Grundlage sind biologische Bausteine, Funktions- oder Organisationsprinzipien.

1.4 Forschungs- und Anwendungsstand

Der Anwendungsstand der Nanotechnologie stellt sich über die verschiedenen technologischen Felder sehr unterschiedlich dar (Hullmann 2001, Bachmann in VentureCapital 2002). In allen Anwendungsfeldern gibt es jedoch erste Materialien oder Produkte, die auf Nanotechnologie aufbauen (siehe Abbildung 8). Diese reichen von nanooptimierten Schichten über Elektronikbauteile wie die GMR-Sensoren (Giant Magnetoresistance) und Nanomembrane bis zu neuen Bearbeitungs- und Analysemethoden. Letztere stellen auch die Grundlage für weitere Arbeiten in der Nanotechnologie dar.

Der kommerzielle Einsatz von nanotechnologischen Grund- und Werkstoffen erfolgt bisher schon bei einer Reihe gut erforschter Materialien in beträchtlichem Maßstab, z. B. Titandioxid (TiO_2) in Farben und Sonnenschutzmitteln sowie Ruß (Carbon Black) für Autoreifen. Für Carbon Black wird ein Weltmarktvolumen für 2006 von acht Mrd. US \$ geschätzt und für die Carbon Nano Tubes (CNT) wird ein Volumen von 1,2 Mrd. Euro erwartet (VDI 2004/2). Erste konkrete Einsatzfelder zeichnen sich auch für CNTs in Verbundwerkstoffen ab. So sollen leitfähige Lacke mit CNTs in der elektrostatischen Sprühlackierung helfen, Lack und Lösemittel einzusparen. Die Erforschung grundlegender Mechanismen und Prinzipien im nm-Bereich ist die Ausgangsbasis, das große Potenzial neuer Materialien und Werkstoffe systematisch zu erschließen.

Das Marktpotenzial der Nanotechnologie liegt bis zum Jahr 2010 je nach Indikatoren bei 100 bis 1.000 Mrd. US \$ (VDI 2004/2). Diese Spanne zeigt auch die noch vorhandenen Unsicherheiten bezüglich der realistischen Abschätzung des Marktvolumens. Gründe dafür sind der Querschnittscharakter der Nanotechnologie und die Zuordnungsprobleme von Umsatzzahlen sowie die in manchen Bereichen noch frühen Entwicklungsphasen. Einigkeit herrscht jedoch über das enorme wirtschaftliche Potenzial der Nanotechnologie im 21. Jahrhundert.

Anwendungsbeispiele der Nanotechnologie

Erste Anwendungen mit Nanotechnologie sind am Markt verfügbar

Am Markt sind bereits erste Anwendungen mit Nanotechnologie verfügbar. Dazu zählen zum Beispiel (siehe TAB 2004):

- ▶ Nanotitanpartikel in Sonnencreme als UV-Schutz,
- ▶ kratzfeste Nanolacke für Automobile (z. B. DaimlerChrysler) und Farbanstriche mit Lotuseffekt (z. B. Lotusan® der sto AG, siehe Abbildung 1, Seite 6),
- ▶ Nanopartikel aus Platin, Rhodium und Palladium in Kfz-Abgaskatalysatoren und Brennstoffzellen,
- ▶ Eisenhydroxidgranulat mit nanostrukturierter Oberfläche zur Adsorption von Arsen in der Trinkwasserreinigung (Produkt Bayoxide® E33),
- ▶ nanostrukturierte Rußpartikel (Carbon Black) als Füllstoffe in Autoreifen,
- ▶ Kupfernanopartikel als Zusatz in Schmiermitteln zur Verschleißreduzierung,
- ▶ Imprägnier- und Reinigungsmittel mit Nanotechnologie zur besseren Schmutzabweisung, mit Anti-Beschlag-Funktion oder
- ▶ elektrochrome Schichten mit Nanotechnologie zur gesteuerten Abdunkelung von Spiegeln und Antireflexbeschichtung in Instrumententafeln oder Displays (siehe Abbildung 7).

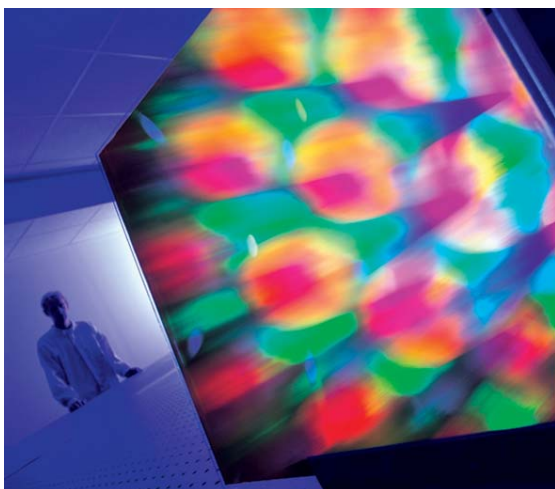
Die Beispiele machen deutlich, dass Nanotechnologie bisher noch hauptsächlich bestehende Produkte in klassischen Technologiefeldern, wie z. B. im Automobilbau oder der Elektronikindustrie optimiert und noch nicht zu revolutionär neuen Produkten oder Anwendungen geführt hat. Für das Jahr 2015 wird jedoch erwartet, dass eine Diffusion und Beeinflussung durch die Nanotechnologie in fast jeder Industriebranche stattgefunden hat (VDI 2004/2).

Entwicklungsstand

Abbildung 8 gibt einen zusammenfassenden Überblick über den Entwicklungsstand ausgewählter Anwendungsfelder der Nanotechnologie in unterschiedlichen Branchen.

Es wird erwartet, dass Nanotechnologie in der Umwelttechnologie am schnellsten in Membranen, Solarzellen und Wasserstoffspeichern zur Anwendung kommt

Aus Sicht der Energie- und Umwelttechnik werden nach einer Zusammenstellung von Bachmann (Abbildung 8, Bachmann und Rieke 2004) die größten Anwendungspotenziale von Nanotechnologie in Membranen, Solarzellen und Wasserstoffspeichern erwartet. Nanomembranen werden bereits heute für die Reinigung von Abwasser angewendet.



Farbstoffsolarzellen mit einem Wirkungsgrad von ca. acht Prozent befinden sich gegenwärtig im Prototypenstadium. Für sie sind vielfältige kostengünstige Einsatzfelder denkbar, z. B. in Form von elektronischen Preisschildern mit einem integrierten Farbstoffsolarzellenmodul (Hinsch 2004).

Wasserstoffspeicher auf Basis von Carbon Nano Tubes oder Metalloxiden und -legierungen sowie organischen Verbindungen wie z. B. Nanocubes (Altmann 2004) können in der Zukunft neue Möglichkeiten eröffnen, Brennstoffzellentechnologie mit entsprechenden Speichermedien für Wasserstoff auch in kleine Geräte wie Mobiltelefon, Digitalkamera, PDA oder Laptop zu integrieren. Nanostrukturierte Wasserstoffspeicher und Quantenpunktsolarzellen sind noch im Bereich der Prototypisierung oder Erforschung.

Für die zukünftige Forschung und Kommerzialisierung von Nanotechnologie sehen Experten die folgenden Herausforderungen und Chancen:

- ▶ deutlich verbesserte Produkteigenschaften bei gleichzeitig konstanten oder niedrigeren Kosten zu erzielen,
- ▶ sensibel, differenziert und möglichst frühzeitig mit den potenziellen Risiken der Technologie umzugehen, um eine ablehnende gesellschaftliche Haltung wie im Falle der Gen- und Biotechnologie zu vermeiden,
- ▶ Kompetenzen und Forschungsförderung in den wirtschaftlich vielversprechendsten Bereichen zu bündeln und
- ▶ Nanotechnologie als Qualitätssiegel für High-Tech-Forschung und innovative Produkte zu etablieren.

Abbildung 7: Nanostrukturierte Oberfläche als antireflektierende Oberfläche oder für kontrastreichere Displays (Quelle: Fraunhofer ISE / Bernd Müller)

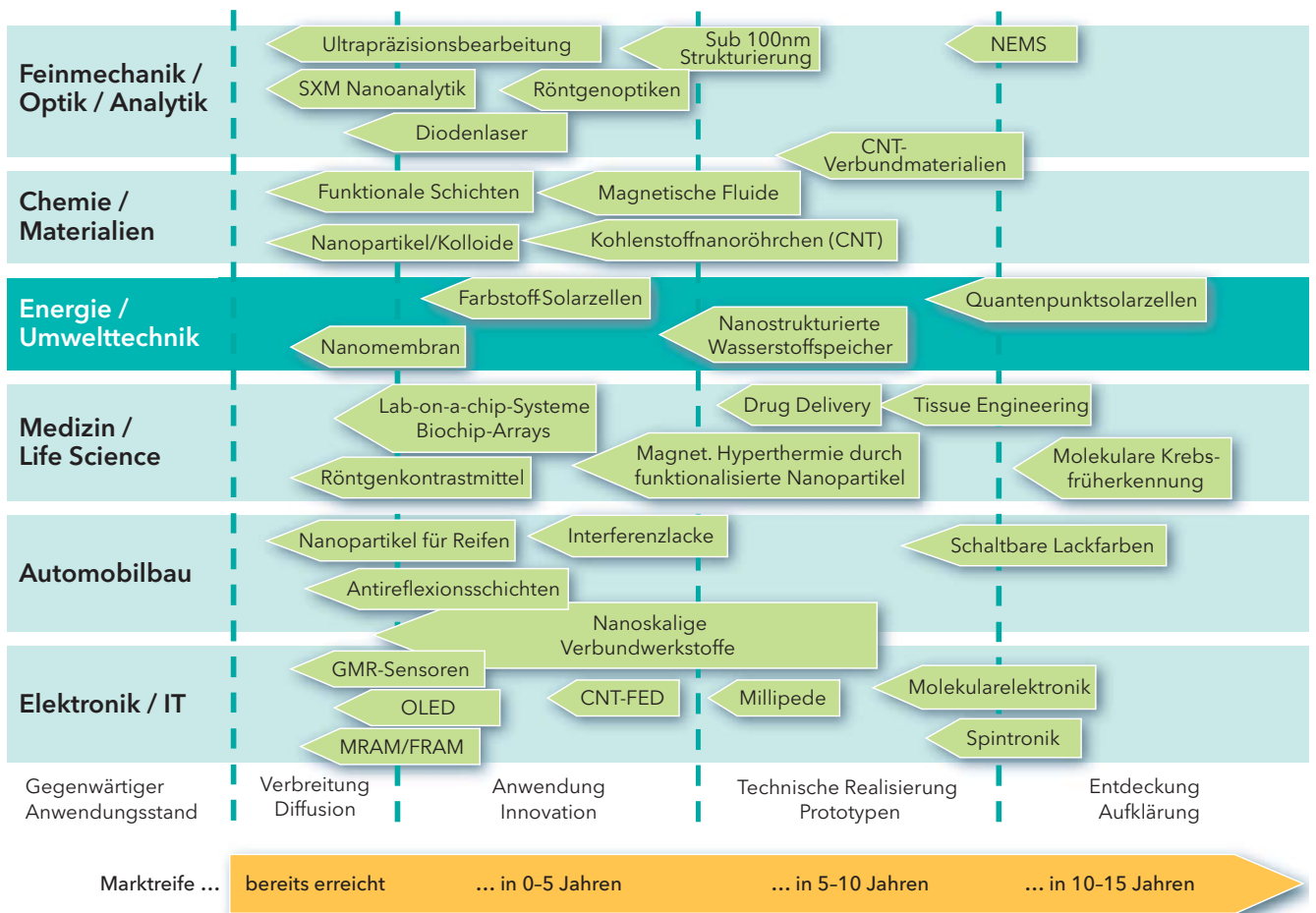


Abbildung 8: Gegenwärtiger Entwicklungsstand einzelner Nanotechnologien nach Anwendungsbranchen sowie Zeitspanne bis zur erwarteten Marktreife (Bachmann und Rieke 2004)

Nanotechnologieforschung

Deutschland hat international eine Spitzenstellung in der Nanotechnologieforschung

Deutschland steht nach den USA und Japan weltweit an dritter Stelle der Nanotechnologieforschung und nimmt damit international eine Spitzenposition ein (TAB 2004). Japan ist im Vergleich zu Deutschland besser in der Umsetzung der techno-

logischen Entwicklung. Dem steht eine höhere Forschungskompetenz Deutschlands gegenüber (Hullmann 2001). Ebenfalls eine Spitzenstellung besitzt Deutschland hinsichtlich der Publikationen und Patente⁶. Unter Berücksichtigung der Wertigkeit von Patenten in den verschiedenen Ländern liegt Deutschland bei den Patentanmeldungen zumindest gleichauf mit den USA und deutlich vor Japan (VDI 2004/2).

Akteure in Hessen

Hessen ist in allen Teilbereichen der Nanotechnologieforschung vertreten

Eine Bestandsaufnahme zu den materialbasierten Technologien in Hessen zeigt, dass Hessen in allen Teilbereichen der Nanotechnologieforschung durch Universitäten vertreten ist. Außerdem wurden rund 250 Unternehmen in Hessen identifiziert, die in den Bereichen Material- und Oberflächentechnologie, Mikrosystemtechnologie und Optische Technologien tätig sind, davon über 70 Unternehmen, die Nanotechnologien entwickeln und anbieten oder anwenden (FEH 2004, HA 2005).

Im Anhang (siehe Seite 49 / 50) sind die Ansprechpartner für Technologieberatung in der Nano- und der Umwelttechnologie in Hessen sowie speziell die Kompetenznetzwerke der Nanotechnologie in Hessen aufgeführt. Die Universitäten des neu gegründeten NanoNetzwerkHessen (NNH) mit deren Ansprechpartnern sind auf Seite 50 separat dargestellt. Seite 51 zeigt thematisch geordnet die universitäre Nanotechnologieforschung in Hessen. Die Seite 52 gibt einen Überblick über die hessischen Akteure an Nano-Kompetenzzentren des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

1.5 Forschungsprogramme und Markt

Die öffentlichen Fördermittel sind bis heute der wichtigste Treiber für die Nanotechnologieforschung. Viele Staaten haben eigene Förderprogramme aufgelegt, mit denen einzelne Forschungsgebiete der Nanotechnologie gefördert werden, gleichzeitig werden oftmals die Forschungsaktivitäten ebenfalls von staatlicher Seite koordiniert. In den USA wurden im Jahr 2004 über 800 Mio. Euro für die Nanoforschung bereitgestellt, in Deutschland waren es knapp 300 Mio. Euro, mit denen das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) Projekte und Institutionen förderte (VDI 2004/1). Neben den USA, die durch die Environmental Protection Agency (EPA) Umweltforschungsprojekte in der Nanotechnologie fördern, gibt es im 6. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union Aufrufe in dem Programm „Nanotechnologie, Materialien, Produktion (NMP)“, die Anwendungen der Nanotechnologie auch im Bereich Umwelttechnologie zum Inhalt haben (Trück 2004).

Mit dem 7. Forschungsrahmenprogramm (FRP) verfolgt die Europäische Kommission das Ziel, die wissenschaftliche Exzellenz in Europa zu stärken. Das Jahresbudget soll deutlich auf zehn Mrd. Euro erhöht werden, für die thematischen Prioritäten inklusive der „Technologie Initiativen“ sind jährlich über 4,5 Mrd. Euro vorgesehen. Nanowissenschaften und Materialien sowie die nachhaltige Entwicklung werden dabei eine der thematischen Prioritäten in dem 7. FRP sein. Mit ersten Aufrufen ist nach jetzigem Zeitplan Ende des Jahres 2006 zu rechnen⁷.

6 Hullmann (2001) untersuchte in einer Studie den internationalen Wissenstransfer anhand der Nanotechnologie. Hierzu wurden unterschiedliche Indikatoren wie die Anzahl der Publikationen, Patente etc. herangezogen.

7 Unter www.cordis.lu/era/fp7.htm finden sich weitere aktuelle Informationen zum 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Kommission.

Die industrieseitige Forschung und Entwicklung konzentriert sich in Deutschland zurzeit auf die Branchen Grundstoffe und Chemie (Harper 2002). Akteure der Industrie in der Nanotechnologie sind vor allem große Konzerne wie z. B. BASF, Degussa, Henkel oder Siemens (siehe Reitberger in Venture-Capital 2002, Hullmann 2001, eigene Recherche) sowie kleine Start-Up-Unternehmen. Diese haben sich häufig aus dem universitären und nichtuniversitären Forschungsbereich ausgegründet, oft besteht ein intensiver Wissens- und Personalaustausch zwischen Start-Ups und Universitäten. Mittelständische Unternehmen sind bisher weniger an der Nanoforschung beteiligt, Akteursnetzwerke wie z. B. die BMBF-Kompetenzzentren, der Fraunhofer Themenverbund Nanotechnologie oder andere Forschungsverbünde zielen darauf ab, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen einen Einstieg in die Nanotechnologie zu ermöglichen. Unternehmensnetzwerke wie Materials Valley e.V. für die materialbasierten Technologien, MST-Netzwerk Rhein-Main für die Mikrosystemtechnologie und Optence e.V. für die Optischen Technologien bieten hessischen Unternehmen eine ausgezeichnete Plattform zur Vernetzung und zum Know-how-Transfer. Auf den Seiten 42 bis 47 wird das Thema Forschungsprogramme und Markt für die Nanotechnologie ausführlich dargestellt.

1.6 Technikfolgenabschätzung

Mögliche Risiken und Folgen der Nanotechnologie werden untersucht und abgeschätzt

Die Abschätzung und Bewertung von möglichen Risiken und negativen Folgen der Nanotechnologie auf den Menschen und die Umwelt nimmt einen breiten Raum in der öffentlichen Diskussion und der wissenschaftlichen Forschung ein. Begleitende Innovations- und Technikanalysen (ITA) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in der Nanotechnologie oder toxikologische Untersuchungen zeigen mögliche Risiken, aber auch Chancen für den Einsatz von Nanotechnologie auf. Eine generelle Bewertung der Nanotechnologie ist jedoch noch nicht möglich. Vielmehr müssen und werden die spezifischen Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie jeweils gemäß ihrer Anwendung und den daraus folgenden Randbedingungen untersucht. Die große Chance im Vergleich zu anderen neuen Technologien wie z. B. der Gentechnik kann darin gesehen werden, dass es gelingt, Abschätzungen zu den Technikfolgen bereits in sehr frühen Stadien in die Bewertung einzubeziehen. Auf Seite 48 wird dieses Thema ausführlicher dargestellt.



2 Anwendungspotenziale und Anwendungsfelder der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie

2.1 Aufgaben und Anwendungsfelder der Umwelttechnologie

Der Bereich Umweltschutz und erneuerbare Energien zählt zu den wichtigsten Zukunftsbranchen. Mit deutschlandweit rund 3,8 Prozent der Beschäftigten sind dort mehr Menschen tätig als im Maschinenbau, Fahrzeugbau oder Ernährungsgewerbe. Hessen gehört in Sachen Umwelt- und Energietechnologie mit über 70.000 Beschäftigten in über 2.000 Betrieben zur Spitze in Deutschland.

Das Ziel der Umwelttechnologie ist der Schutz von Luft, Wasser, Boden, die Einsparung von Rohstoffen und die Vermeidung von Umweltproblemen

Ziel der Anwendung von Umwelttechnologie ist der Schutz von Luft, Wasser, Boden, die Einsparung von Rohstoffen und die Vermeidung von Umweltproblemen. In der Vergangenheit wurden Maßnahmen meist durch bestehende Umweltprobleme vorangetrieben; der Sachverhalt wurde ausgehend von einem Umweltproblem, z. B. der Eutrophierung von Gewässern, identifiziert. Darauf aufbauend wurden Handlungsoptionen und Lösungsmöglichkeiten ermittelt. Dieses Verständnis von Umwelttechnologie kann als klassische Umwelttechnologie bezeichnet werden.

Das medienbezogene und nachsorgende Verständnis von Umwelttechnologie hat sich hin zu einer vorsorgenden, ganzheitlichen Betrachtung gewandelt

Neben dem Erkennen und Beseitigen von Umweltbelastungen sowie der Vermeidung oder Minimierung von schädlichen Umweltauswirkungen – beispielsweise durch Filteranlagen – kommt dem Vermeiden und der Vorsorge eine große Bedeutung zu.

Die Diskussion um einen produktions- und produktintegrierten Umweltschutz sind Beispiele hierfür.

Umwelttechnologie ist eine Querschnittstechnologie, die sich Disziplinen wie Verfahrenstechnik, Biologie oder Chemie bedient

Umwelttechnologie ist zudem eine Querschnittstechnologie, die sich verschiedenster Basistechnologien und Disziplinen wie Verfahrenstechnik, Biologie, Chemie etc. bedient. Technologische Lösungen werden in Systeme integriert, die eine ökologisch und ökonomisch effiziente Lösung von Umweltproblemen unterstützen bzw. verhindern, dass diese entstehen. Grundlage hierfür sind zum einen Innovationen in Basistechnologien wie Werkstofftechnik, Verfahrenstechnik, Biotechnologie, Mikrotechnik und Informationstechnologie, zum anderen aber auch Schlüsseltechnologien wie die Nanotechnologie (Angerer et al. 1998). Neben den Basistechnologien als Treiber haben vor allem auch Umweltschutz-Zielsetzungen immer wieder Innovationen in der Umwelttechnologie angestoßen. Neue Richtlinien führten zu Weiter- und Neuentwicklungen im Bereich der Werkstoffe oder Prozesse. Die Unternehmensausrichtung an den Leitzielen der Nachhaltigkeit führt zu neuen, ökologisch sinnvollen Produkten.

Ein Beispiel für Innovationen in der Nanotechnologie, die durch das Setzen von Umweltzielen erreicht werden, sind die Forschungsprojekte bei der US-amerikanischen EPA zur Reduktion von Arsen im Trinkwasser. Sie haben zum Ziel, den gesetzlich verankerten Grenzwert von zehn Mikrogramm Arsen je Liter Trinkwasser mit Hilfe von nanotechnologie-basierten Filtersystemen zu erreichen (siehe z. B. Trogler 2002).



Abbildung 9: Anlage eines Festbettreaktors aus Eisenhydroxidoxid-Granulat Bayoxide® E33 mit sehr fein strukturierten Oberflächen im Nanobereich zur Arsenadsorption
(Quelle: Bayer AG, Severn Trents Services)

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Umwelttechnologiebereiche in Hessen dargestellt. Die Kategorisierung orientiert sich sowohl an den Umweltmedien als auch an der Zielrichtung von Maßnahmen des Umweltschutzes. (Zur besseren Übersicht sind mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie ebenfalls bereits aufgeführt, diese werden detailliert in den folgenden Kapiteln beschrieben.)

Tabelle 1: Technologiebereiche der Umwelttechnologie in Hessen, Anwendungsbeispiele und Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie

Wasser / Abwasser

- ▶ **Anwendungsbeispiele**
Wasseraufbereitungs- und Abwasserbehandlungsanlagen, Kanaltechnik und Klärtechnik
- ▶ **Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie**
Filtration, Membrantechnologie (Kolloid-Membran), Ab- / Adsorption, Ionenaustauscher, funktionalisierte Oberflächenbeschichtung, Füllkörper, selektive Katalysatoren / Katalyse, sensitiver Schadstoffnachweis

Abfall / Recycling

- ▶ **Anwendungsbeispiele**
Recycling, Abfallbehandlung und Abfallsorgung, Rauchgasreinigung, Deponietechnik
- ▶ **Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie**
Sensitiver Schadstoffnachweis, Filtration, hitzebeständige Wandverkleidung

Energie / Luftreinhaltung / Klimaschutz

- ▶ **Anwendungsbeispiele**
Solarenergie, Windenergie, Biomasse, Brennstoffzellentechnologie
- ▶ **Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie**
Farbstoffsolarzellen, organische Solarzellen, Brennstoffzelle (mobile Wasserstoffspeicherung, Trennung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser, katalytische Kraftstoffumwandlung und -umsetzung), miniaturisierte Batteriesysteme, kompakte Zeolithreaktoren

Integrierte Produktpolitik IPP

- ▶ **Anwendungsbeispiele**
Produktionstechnik, Materialauswahl, Effizienzsteigerung
- ▶ **Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie**
Gezieltes Materialdesign, neuartige Legierungen / Werkstoffe, leichtere Trag- und Strukturbauteile, präzise Bearbeitungsverfahren, Qualitätskontrolle auf atomarer Skala, schaltbare Werkstoffeigenschaften, umweltfreundliche Eigenschaften wie „Nicht-Verschmutzung“ etc., neuartige Klebtechnologien, Selbstorganisationsprozesse

Analytik / Mess-, Steuer- und Regeltechnik

- ▶ **Anwendungsbeispiele**
Wasser- und Abwasserwirtschaft, Analytik, Prozessüberwachung und -steuerung
- ▶ **Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie**
Lab-on-Chip-Sensorsysteme, kombinierte Sensoren / Aktuatoren

Zur Einschätzung der zukünftigen Entwicklung einzelner Umwelttechnologien und Handlungsfelder liegen bisher nur wenige Informationen vor. Ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung des Marktes von Umwelttechnologie, gerade in der Wasser- und Abwasserbehandlung sowie den Überwachungssystemen von Wasserverschmutzung, sind umweltrechtliche Vorgaben⁸. Wettbewerbsmerkmale in diesen weitgehend gesättigten Märkten in Deutschland sind die Produktdiversifikation, aber auch der Kostenfaktor.

Die dringendsten Herausforderungen für den globalen Umweltschutz sind der Ressourcenschutz und die Wasser- und Energieversorgung

Global betrachtet werden in der Zukunft die dringendsten Herausforderungen für den Umweltschutz der Ressourcenschutz und die Frage der Wasser- und Energieversorgung sein (*Europäische Kommission 2004/2*). So wurden auf dem Welt-Gipfeltreffen zur nachhaltigen Entwicklung der Vereinten Nationen in Johannesburg im Jahr 1992 weltweite Initiativen ins Leben gerufen, die auch von der Europäischen Union im Rahmen des Aktionsplans für Umwelttechnologie forciert werden.

Durch die **Wasserinitiative** sollen im Zuge der Bekämpfung von Armut sauberes Trinkwasser bereitgestellt und Sanitäreanlagen ausgebaut werden, welche durch in der EU entwickelte Technologien und Verfahren unterstützt werden sollen. Nach einer Marktanalyse von Frost & Sullivan wird allein für den globalen Markt der Meerentsalzung bis 2010 eine jährliche durchschnittliche Wachstumsrate von knapp zehn Prozent prognostiziert und der weltweite Markt im Jahr 2010 dann rund 2,4 Mrd. US \$ stark sein. Die größten Marktanteile werden in den Golfstaaten, in Saudi Arabien und Südeuropa gesehen (*Frost & Sullivan 2004/4*).

Für 2005 wird das Marktvolumen in der EU für Überwachungssysteme von Wasserverschmutzung auf über 420 Millionen US \$ geschätzt (*Frost & Sullivan 1999*). Technologietrends in diesem Markt sind präzise und über einen längeren Zeitraum zuverlässig arbeitende Systeme.

⁸ Eine Übersicht über künftig zu erwartende oder sich ändernde umweltrechtliche Vorgaben der EU, des Bundes und Hessens bietet das „Innovationsradar Umweltrecht“ (siehe unter www.hessen-umweltech.de). Dieses Projekt der

Aktionslinie hessen-umweltech zeigt frühzeitig die aus neuen Vorschriften resultierenden Marktchancen für Umwelttechnologieanbieter auf.

Es wird erwartet, dass der Markt für Wasserbehandlungsanlagen in Deutschland bis 2010 jährlich um immerhin zwei Prozent wächst. Das Marktvolumen in Deutschland wird für das Jahr 2010 dementsprechend auf über 115 Millionen US \$ geschätzt. Die Membrantechnologie wird mit mehr als der Hälfte des Umsatzes den Markt dominieren (*Frost & Sullivan 2004/2*).

Durch die **Energieinitiative** soll in Entwicklungsländern eine höhere Energieeffizienz durch die intelligenteren Nutzung fossiler Brennstoffe und traditioneller Biomasse erreicht und erneuerbare Energiequellen in verstärktem Umfang genutzt werden. Eine Koalition für **erneuerbare Energie** soll Ziele und Zeitpläne für die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energiequellen an dem Gesamtenergiemix festsetzen, wodurch auch ein erheblicher Bedarf an Umwelttechnologie geschaffen wird. Mit der Frage der Energieversorgung sind wesentliche gegenwärtige Umweltprobleme wie der Treibhauseffekt und die Luftverschmutzung verbunden.

Das schnelle Wachstum portabler, drahtloser Geräte wie Notebooks, Mobiltelefone u. a. ist wesentlicher Treiber für die Energieversorgungs- und -speichersysteme. Die Lithiumtechnologie stellt beispielsweise ein wichtiges Anwendungsfeld der Nanotechnologie dar. Hier werden Carbon Nano Tubes in die Elektrode eingearbeitet (*Frost & Sullivan 2004/1*). Ein weiteres Feld stellt die Entwicklung von Mikrobrennstoffzellen dar. Auch bei ihnen beruhen zentrale Komponenten wie z. B. die Membran auf Nanotechnologie. Der Direktmethanolbrennstoffzelle werden in diesem Rennen große Chancen eingeräumt. Erste Prototypen von Laptops, Handys, Kameras oder PDAs, ausgerüstet mit einer Brennstoffzelle, gibt es bereits (*siehe Rastogi 2004*). Für den globalen Markt der Mikrobrennstoffzellen für portable Geräte werden durchschnittliche Marktwachstumsraten von über 200 Prozent über die nächsten fünf Jahre erwartet (*Frost & Sullivan 2004/3*) – allerdings startet der Markt auf sehr niedrigem Niveau.

Neben dem direkten Einsatz in Energiesystemen ist der Einsatz der Nanotechnologie aber auch in solchen Bereichen interessant, in denen mit ihrer Hilfe der Energieverbrauch reduziert werden kann. Ein Beispiel hierfür stellen die auf Nanotechnologie basierenden weißen LEDs (Leuchtdiode) dar. Aufgrund ihrer hohen Effizienz können mit ihnen sowohl Energiekosten reduziert, als auch die CO₂-Emission halbiert werden. Die mögliche Energieeinsparung durch den Einsatz weißer LEDs in Deutschland entspricht theoretisch der Energieproduktion von zwei Kernkraftwerken. Sie sind um das zehnfache effizienter als herkömmliche Glühbirnen. Ihr Marktvolumen wird allein in Deutschland auf 500 Mio. Euro geschätzt. Für innovative Produkte in diesem Bereich werden Umsatzsteigerungen von zehn bis 15 Prozent pro Jahr prognostiziert (*Bachmann 2004*).

Eine Bestandsaufnahme unter hessischen Umwelttechnologieanbietern im Jahr 2002 ergab, dass relevante kurz- und mittelfristige Entwicklungstrends in der Brennstoffzellenentwicklung gesehen werden, und langfristig die Wasserstofftechnologie eine bedeutende Rolle spielen wird. Außerdem wurde festgestellt, dass der Markt der erneuerbaren Energien sich auf Wachstumskurs befindet. Eine verstärkte Nachfrage wurde für biologisch abbaubare Produkte angenommen, sodass ein Innovationsimpuls aus der Biochemie erwartet wird (*M-Result 2002*).

2.2 Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie

Die Nanotechnologie kann neue Technologien befähigen oder helfen, Betriebsmittel oder Energie einzusparen

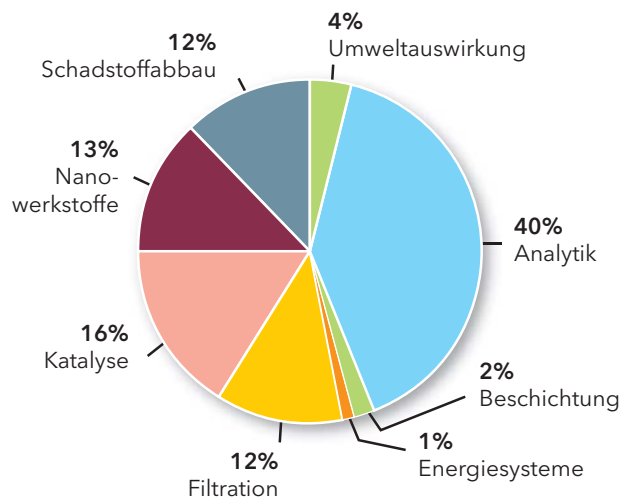
Für die zukünftigen Herausforderungen der Rohstoffknappheit, der Bereitstellung von sauberem Trinkwasser oder effizienten Produkten und Prozessen besitzt die Nanotechnologie ein wesentliches Problemlösungspotenzial. Dies zeigen Literaturanalyse und Expertengespräche. Die Nanotechnologie kann neue Technologien in der Umwelttechnologie befähigen („Enabler“) oder indirekt, z. B. durch die Einsparung von Betriebsmitteln oder Energie, den Umweltschutz unterstützen. Darüber hinaus kann Umwelttechnologie zum Einsatz kommen, um die Auswirkungen der Nanotechnologie zu bewerten und beherrschen. Dies kann Fragen der Arbeitssicherheit oder der Analyse betreffen.

Sowohl durch die Befragung von Experten als auch in der Literatur wurden erste konkrete Anwendungsbereiche der Nanotechnologie für Unternehmen der Umwelttechnologie identifiziert. So wurde darauf hingewiesen, dass nanostrukturierte Materialien bereits seit einiger Zeit in Anwendungen der Umweltschutztechnik eingesetzt werden (z. B. Metall-Nanopartikel in Katalysatoren und Partikelfiltern zur Abgasreduzierung (CO, NO_x, Kohlenwasserstoffe, Rußpartikel), aber auch Materialien für neue Anwendungen entwickelt werden (Solartechnik, Lab-on-Chip-Systeme). Umwelttechnologie wurde häufig als „indirektes“ Anwendungsfeld bezeichnet, d. h. Umwelttechnologieunternehmen können von Innovationen profitieren, die für andere Branchen oder Anwendungsfelder entwickelt wurden. Bekannte Einsatzschwerpunkte der Nanotechnologie im Umweltschutz sind demnach in den Bereichen Energie, reinigungsfreundliche Ober-

flächen, Membranen und der Analytik zu finden. In den Feldern der klassischen Umwelttechnologie bestehen hingegen noch viele Potenziale für konkrete und wirtschaftlich interessante Anwendungen der Nanotechnologie, zum Beispiel in der Emissionsminderung oder der Altlastensanierung. Im Bereich der Filtration gibt es erste Membranen auf Nanotechnologiebasis (beispielsweise Nanoweb® der Firma Hollingsworth & Vose).

Die oben genannte Schwerpunktlegung der Nanotechnologie auf einige Anwendungsbereiche in der Umwelttechnologie wird auch durch eine Analyse der Projektförderung des National Centers for Environmental Research (NCER) der US-amerikanischen EPA zu Nanotechnologie und Umwelttechnologie bestätigt (Abbildung 10)⁹.

Abbildung 10: Projektförderung der U.S. EPA zu Nanotechnologie und Umwelttechnologie nach Kategorie der Umwelttechnologie (eigene Recherche)



Im Folgenden werden die Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie anhand der Technologiebereiche Wasser/Abwasser und Abfall, Energie/Luftreinhaltung/Klimaschutz, Analytik/Mess-/Steuer- und Regeltechnik sowie Integrierte Produktpolitik aufgezeigt (siehe Tabelle 1, S. 20/21).

⁹ Recherche der Forschungsprojekte unter <http://es.epa.gov/ncer/index.html> (Stand 09.09.2004)

Technologiebereich Wasser / Abwasser

Im Bereich der Wasser-/Abwassertechnologie sowie in den Reinigungsverfahren kommen katalytische und trennende Verfahren, also chemische Verfahrenstechnik, zur Anwendung. Hier ist ein Einsatz der Nanotechnologie in der Membrantechnologie, katalytischen Oberflächen, Ionenaustauschern oder Elektrodentrennverfahren in der Reinigung und Aufbereitung von Wasser, Luft und Bodenkontamination in wissenschaftlichen Arbeiten gezeigt worden. In Kapitel 2.4 werden die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Filtration, Katalyse oder Schadstoffabbau detailliert dargestellt.

Technologiebereich Abfall / Recycling

Auch für den Bereich Abfall/Recycling spielen Reinigungs- und Trennverfahren für Wasser/Abwasser eine große Rolle, z. B. zur Reinigung von Prozessabwässern in der Produktion oder von Deponieabwässern.

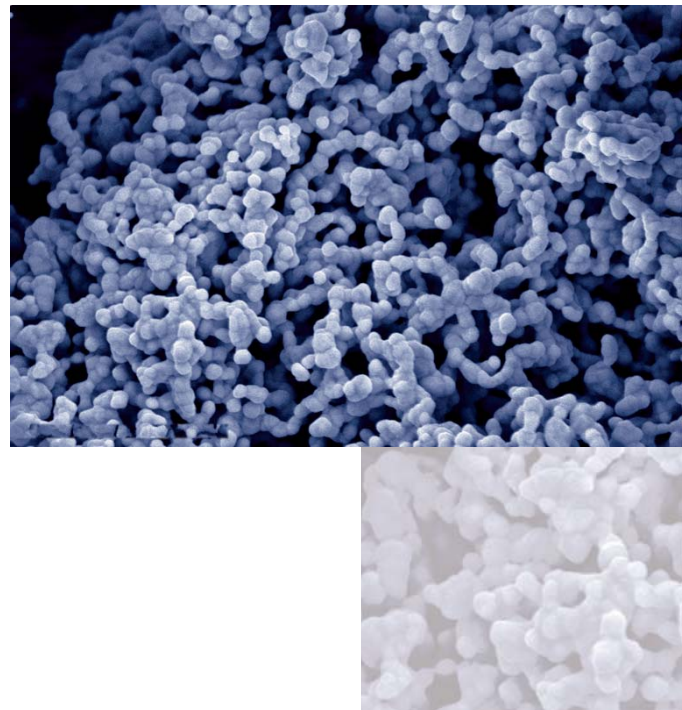
Anwendungsbeispiele oder -szenarien explizit für den Bereich Abfalltechnologie sind noch nicht bekannt. Interessant sind aber z. B. Klebeverbindungen, die sich wieder lösen lassen oder auch - in einer langfristigen Perspektive - neue Ansätze für Produktionsverfahren mit Nanotechnologie, die multifunktionale Materialien kosteneffizienter und mit einem geringeren Ressourcenverbrauch und Abfall herstellen. Und schließlich lassen die Visionen des Self Assembly (Bottom-Up, siehe *Abbildung 5, Seite 9*), in dem sich die Atome zum Aufbau von Strukturen selbst anordnen - vergleichbar dem Wachstum von Eis- oder Salzkristallen - einen großen Beitrag für ein Wirtschaften mit weniger Abfall und Energieverbrauch erwarten (*Royal Society 2004*).

Weitere Potenziale können durch den Einsatz der Nanotechnologie z. B. in Easy-to-clean Oberflächen gesehen werden. Sie können einen Beitrag zur Ressourceneinsparung und Abwasserreduktion liefern.

Technologiebereich Energie, Luftreinhaltung, Klimaschutz

Zum Bereich Energie, Luftreinhaltung und Klimaschutz zählen die Solarenergie, die Windenergie oder die Brennstoffzellentechnologie. Es wird bereits an Techniken zur mobilen Wasserstoffspeicherung, zur Trennung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser in der Brennstoffzelle, zur katalytischen Kraftstoffumwandlung und Verbrennung in der Brennstoffzelle sowie an Technologien in der Solarzellen- und Batterieentwicklung gearbeitet. Alle genannten Beispiele beinhalten nanotechnologische Werkstoffe. Mit Farbstoffsolarzellen und organischen Solarzellen wird an neuen Arten von Solarzellen mit Nanotechnologie geforscht. Sie eröffnen neue Designmöglichkeiten und Anwendungen (*Hinsch 2004*). Ebenfalls auf Nanotechnologie basiert die Grätzelzelle, auch eine kostengünstige Solarzelle (als Grundmaterial dienen TiO_2 -Nanopartikel, an deren Oberfläche Farbstoffmoleküle haften). Auf der Oberseite der Zelle befindet sich eine gläserne Elektrode, durch die das Sonnenlicht in das Innere der Zelle gelangt. Die Zwischenräume sind mit einem Elektrolyten gefüllt.

Abbildung 11: Nanosilber kann in verschiedene Werkstoffe eingearbeitet werden und schützt so vor Bakterien
(Quelle: Fraunhofer IFAM)



Technologiebereich Integrierte Produktpolitik (IPP)

Der Bereich der Integrierten Produktpolitik greift Maßnahmen und Technologien auf, die die Umweltfreundlichkeit von Produkten verbessert. Dies betrifft z. B. die Energieversorgung, die Auswahl der Materialien, Produktionsverfahren, aber auch den Ressourcenverbrauch in der Herstellungs- und Nutzungsphase sowie eine umweltfreundliche Demontage. Untersuchungen von Steinfeldt et al. (2004) zu den Nachhaltigkeitseffekten nanotechnologischer Produkte zeigen, dass sehr große Ökoeffizienzpotenziale durch den Einsatz nanotechnologischer Beschichtungen realisiert werden können. Die Verwendung von Nanotubes-Katalysatoren in der Styrolsynthese erzielt ein Energieeinsparpotenzial von knapp 50 Prozent auf der Prozessstufe der Styrolsynthese und ist somit ein Beispiel für die Bedeutung der Nanotechnologie für ein ressourceneffizientes Wirtschaften (Steinfeldt et al. 2004).

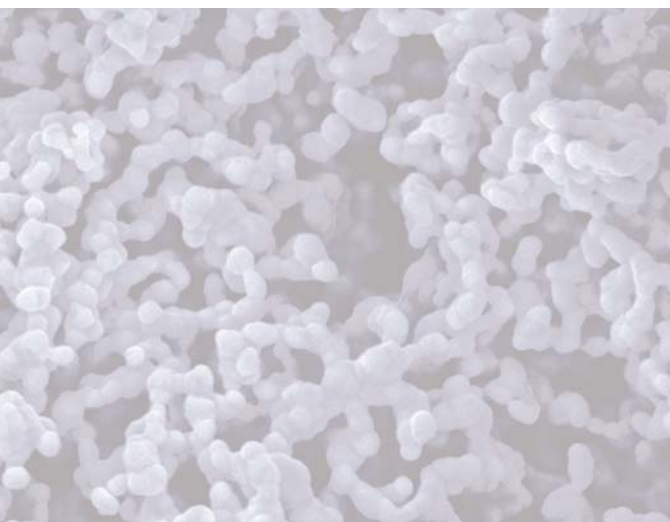
Interessant sind Oberflächen mit ausgewiesenen umweltverträglichen Eigenschaften: Oberflächen mit Nicht-Verschmutzungs- und Selbstreinigungseffekten (siehe Abbildung 1, Seite 6) oder mit Dämmungseigenschaften sowie Schutzmechanismen z. B. gegen IR / UV-Strahlung oder Korrosion sind möglich. Erste Produkte zur Behandlung von Oberflächen, wie Reinigungsmittel, Lacke und Farben für den Heimwerker (Glas, Holz), sind bereits auf dem Markt. Im Bereich der Materialien sind neue schaltbare Werkstoffe - z. B. wird an dem schaltbaren Benetzungsverhalten geforscht - und Klebeverbindungen denkbar, die auch für die Umwelt von Nutzen sind.

Technologiebereich Analytik, Mess- / Steuer- / Regeltechnik (MSR)

Im Bereich der Umwelt-Analytik sind sowohl miniaturisierte, auf Nanotechnologie basierende Sensoren denkbar als auch eine einfache, sparsame Vor-Ort-Analytik mit telemetrischen Fernabfragesystemen und dem Verbleib vor Ort (z. B. in einem Bohrloch). Arbeiten hierzu befinden sich im Forschungs- und Prototypenstadium. In Kapitel 2.4 werden die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Analytik detailliert dargestellt.

Bewertung der Funktionalitäten und der Technologiebereiche

Die Anwendungspotenziale der Nano-Funktionalitäten (siehe Erläuterungen ab Seite 14) werden den Umwelttechnologiebereichen in Tabelle 2 auf der nächsten Seite qualitativ gegenübergestellt und bewertet. Die Bewertung ist subjektiv und greift die Frage auf, in welchen Anwendungsgebieten nach derzeitigem Kenntnisstand der Einsatz aus technischer Sicht sinnvoll und naheliegend erscheint. Die Einschätzung ist eine Momentaufnahme der Autoren, die auf Literaturanalysen und Recherchen sowie Expertenbefragungen beruht.



			Umweltechnologie					
			Wasser / Abwasser	Abfall		MSR	Energie, Luft / Klimaschutz	
Verbesserte Eigenschaften hinsichtlich			Reinigung / Aufbereitung	Vermeidung	Behandlung	Monitoring / Analyse	Luftreinhaltung / Reinigung	
Nanotechnologie	Mechanische Funktionalität	Härte, tribologische Eigenschaften, Bruchfestigkeit, -zähigkeit, Superplastizität		Antikorrosion mechanisch-stabile Wandauskleidung				
	Geometrische Besonderheiten	atomare Genauigkeit, großes Oberflächen-/Volumenverhältnis	Katalysator Ionentauscher Filtersysteme Füllkörper			Reaktive Oberfläche	Filter Katalysator	
	Elektrische Funktionalität	diskrete Energieniveaus, elektrische maßgeschneiderte Eigenschaften				Lab-on-Chip Nanosensoren / -aktuatoren	Farbstoffe Org. S Brennstoffe Batterien	
	Magnetische Funktionalität	magnetische Eigenschaften (Superparamagnetismus)						
	Optische Funktionalität	Farbe, Fluoreszenz, Transparenz				Optische Messsysteme	Spektroskopie Sensoren	
	Chemische Funktionalität	Reaktivität, Selektivität, Oberflächenbenetzung, funktionale Gruppen	(Photo)Katalyse Oberflächenbeschichtung Ab- / Adsorption	Katalyse Oberflächeneigenschaft		Nano-Chemosensoren Lab-on-Chip	Katalysatoren	Farbstoffe Org. S Brennstoffe
	Biologische Funktionalität	Analyse Biosysteme, Bio-Baupläne für Nanosysteme	Bioreaktoren Katalyse	Bioreaktoren Katalyse		Nano-Biosensoren Bio-Lab-on-Chip	Biofilter	

Die Tabelle 2 gibt als eine Art Anwendungslandkarte einen ersten Zugang zu potenziellen Anwendungsgebieten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie. Umwelttechnologie-Firmen können in ihrem Bereich erkennen, welche Funktionalitäten der Nanotechnologie Prozesse und Produkte unterstützen und optimieren. Nanoforscher können ablesen, welche ihrer Funktionalitäten in der Umwelttechnologie zum Einsatz kommen können.

Tabelle 2: Anwendungslandkarte für Funktionalitäten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie

Technologiebereiche

Luftreinhaltung, Klimaschutz		IPP		
Energiesysteme	Energiespeicherung	Ressourceneffizienz	Werkstoffauswahl	Energieeffiziente Produkte
		Materialauswahl Verlängerung Lebensdauer Schutzschicht	Leichtere Materialien Neue Legierung Schutzschicht	
Batterie	Chemische H ₂ -Speicherung Zeolithe		Gezieltes Materialdesign Effiziente Materialien	
Photovoltaikzellen Solarzellen Wasserstoffzelle			Schaltbare Werkstoffe Klebertechnologie	
Elektronische Beschichtung			Glas-Substitution Schaltbare Beschichtung	
	Chemische H ₂ -Speicherung			
Photovoltaikzellen Solarzellen Wasserstoffzelle		Biozide Oberflächen Easy-to-Clean-Oberflächen		

2.3 Gegenüberstellung der Anwendungsfelder mit der Branchenstruktur der Umwelttechnologiefirmen in Hessen

Hessen ist auf allen wichtigen Technologiefeldern der Umwelttechnologie vertreten. 12,4 Mrd. Euro werden jährlich durch hessische Unternehmen in diesem Sektor umgesetzt. Die Abbildung 12 zeigt die Umsätze von hessischen Unternehmen der Umwelttechnologie nach Technologiebereichen für das Jahr 2001 (*M-Result 2002*). Der Bereich „Sontiges“ umfasst u. a. die integrierte Umwelttechnik, ressourcenschonende Produktentwicklung sowie Planung und Konstruktion von umweltverträglichen Produktionsanlagen und -verfahren. Die Darstellung zeigt, dass besonders viele hessische Umweltunternehmen im Bereich Wasser/ Abwasser tätig sind. Dieser Bereich ist auch ein großes Anwendungsfeld für die Nanotechnologie.

Die chemischen, biologischen und geometrischen sowie - mit etwas geringerer Bedeutung - die mechanischen und elektrischen Funktionalitäten (*siehe Tabelle 2*) haben ein großes Innovationspotenzial für die Umwelttechnologie. Dem steht in Hessen ein besonders starkes Angebot in den Technologiebereichen „Wasser / Abwasser“, „Abfall / Recycling“ und „Energie / Luftreinhaltung / Klimaschutz“ gegenüber (*siehe auch Tabelle 1 und Abbildung 12*). Dies zeigt, dass Hessen ein besonders großes Innovationspotenzial im Bereich Wasser und Abwasser hinsichtlich des Einsatzes der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie hat. Einzelne Anwendungen aus diesen Gebieten wie die Filtration, der Schadstoffabbau oder die Katalyse werden in Kapitel 2.4 detailliert dargestellt.

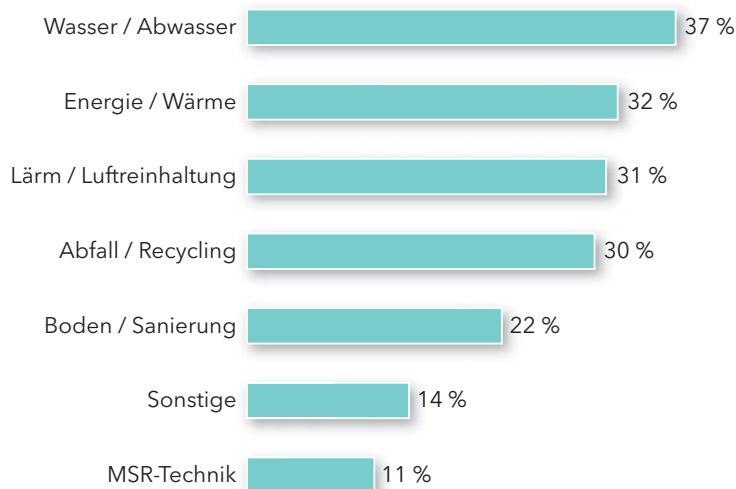


Abbildung 12: Anteil der Unternehmen je Technologiebereich ohne Sektor „Umweltmanagement / -recht / Öko-Audit“ und „Naturschutz/ Ökologie“ (Summe > 100 %, da Mehrfachnennung möglich, M-Result 2002)

In den Nano-Kompetenzzentren ist Hessen mit einigen Unternehmen vertreten, die in umwelttechnologisch relevanten Teilgebieten der Nanotechnologie forschen. Stark vertreten ist Hessen in den Kompetenzzentren „Nanoanalytik“, „Funktionalität durch Chemie“ und „Nanomaterialien“. Im Bereich der chemischen Industrie, die ein Treiber im Anwendungsfeld der Nanoforschung ist, ist Hessen besonders stark vertreten: Mit den Unternehmen Aventis Research & Technologies (jetzt z. T. Sanofi Aventis Gruppe), Degussa AG mit Creavis GmbH und Merck Patent GmbH sind vier hessische Unternehmen aus der Branche bzw. dem Produktschwerpunkt Chemie unter den Top-20 Nano-Patentanmeldern (FEH 2004).

Im Bereich der universitären Forschung werden insbesondere die Teilgebiete Nanomaterialien, Nanochemie, Nanoelektronik und Nanoanalytik abgedeckt: An Funktionswerkstoffen und Materialien wird unter anderem an der Technische Universität Darmstadt, der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, der Justus-Liebig-Universität Gießen

und der Universität Kassel geforscht. Nanochemie ist ein Schwerpunkt an der Justus-Liebig-Universität Gießen und der Philipps-Universität Marburg. Zur Nanosensorik wird an den Universitäten Darmstadt, Gießen, Kassel, Marburg sowie an den Fachhochschulen Gießen-Friedberg und Wiesbaden geforscht. Die Forschungskompetenz wird als gut bis sehr gut angesehen. Im März 2004 wurde die neue Initiative zur Vernetzung der universitären Nanoforschung im NanoNetzwerkHessen¹⁰ vorgestellt (siehe Seite 50). Ebenfalls auf Seite 50 sind die Kompetenznetzwerke in Hessen aufgelistet.

Zudem ist in Hessen die DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie - als Mittler zwischen Forschung und Industrie angesiedelt. Ihre Aufgabe ist es, die Entwicklung von chemischen Technologien und Verfahren zu begleiten und neue Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung für die Praxis aufzuarbeiten.

Mit dem TechnologieTransferNetzwerk-Hessen (TTN-Hessen) wird der Transfer von Wissen und technologischem Know-how zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen und insbesondere den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) aus Industrie und Handwerk gefördert. Übergeordnetes Ziel ist, das Technologieangebot in Hessen transparent zu machen und die Akteure zu vernetzen. Besonders kleinen und mittleren Unternehmen soll der Zugang zu innovativen Technologien und wissenschaftlichen Erkenntnissen erleichtert werden, indem z. B. die Suche nach geeigneten Partnern für die jeweiligen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben unterstützt wird. Zudem wird den Experten aus Hochschule und Forschung die Möglichkeit geboten, in dem virtuellen Technologie- und Kompetenzmarkt ihr technologisches Know-how zu präsentieren.

10 Siehe unter www.nanonetzwerkhessen.de

2.4 Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie

In den folgenden Abschnitten werden die Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie anhand ausgewählter Anwendungsfelder dargestellt. Diese Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Anwendungsgebiete können einem oder mehreren Technologiebereichen der Umwelttechnologie in Hessen (siehe Tabelle 1, Seite 20/21 und Tabelle 2, Seite 26/27) zugeordnet werden.

Anwendungsgebiet Filtration (Filter, Membran)

Technologiebereiche: Wasser / Abwasser, Luftreinhaltung, Integrierte Produktpolitik

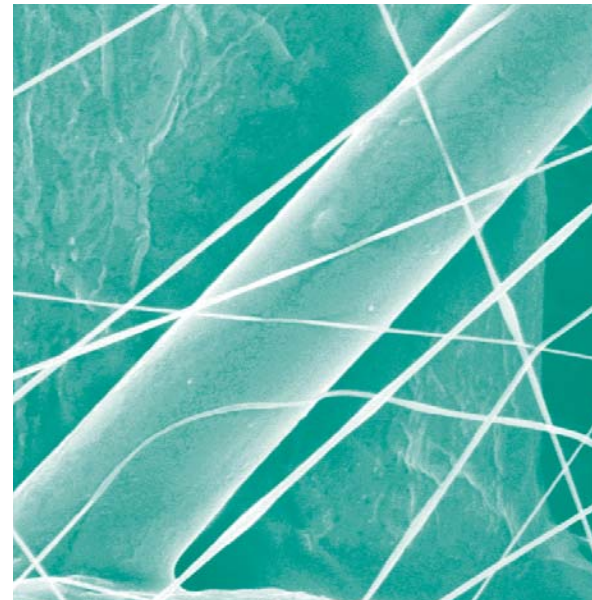
Nano-optimierte Membranen / Filter werden eingesetzt, um unerwünschte Stoffe aus Wasser oder Luft wesentlich effizienter als mit herkömmlichen Filtersystemen zu entfernen. Solche Filter bieten zum einen eine genauer einstellbare Porengröße, zum anderen wird eine Funktionserweiterung, z. B. als oberflächenaktive Membran, ermöglicht. Auf Nanotechnologie basierende Membranen können durch den Einbau reaktiver Zentren (Metalloxide) oder durch die Immobilisation von Biokatalysatoren zusätzlich katalytisch wirken (siehe Anwendungsgebiet katalytischer Schadstoffabbau Seite 31). Neue Materialien wie z. B. die Carbon Nano Tubes erweitern das Feld der Membrankomponenten. Generelle Einsatzgebiete sind die Abwasserreinigung, die Aufbereitung von Labor- und Trinkwasser, die Abtrennung von Viren, Bakterien, Pigmenten oder Kleinstpartikeln aus Luft und Wasser sowie die Nebenproduktabtrennung in chemischen Verfahren. Die **technologischen Grundlagen** sind anorganische Strukturen wie nanoporige Zeolithe sowie maßgeschneiderte Polymermembranen mit gesinterten Nanopartikeln oder Nanoporen in der Filtration.

Anwendungsbeispiele sind:

- ▶ Filtermembranen aus verformbaren Keramiken mit Nanopartikeln,
- ▶ Kohlenstoff-Nanofasermembranen oder CNTs für Filtration,
- ▶ mikroporöser Dünnschicht auf der Basis anorganischer kristalliner Materialien wie Zeolithe oder poröses Silizium,
- ▶ gestützte Polymermembranen, deren Poren mit einer funktionalen polymeren oder oligomeren Flüssigkeit ausgefüllt sind,
- ▶ Membranen aus organischem Kunststoff als Nanogewebe (Porendurchmesser und Faser der Membran im nm-Bereich) oder
- ▶ katalytische Membranen zur Trennung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff.

Vorteile des Einsatzes von Nanotechnologie in der Filtration sind maßgeschneiderte und wesentlich effizientere Membranen hinsichtlich Permeabilität, Selektivität, Reaktivität und geringer Verschmutzung durch enge Porengrößenstreuung, hohe Porosität, hohe spezifische Oberfläche und nanostrukturierte Asymmetrie. Die Wechselwirkung der Membranen findet nicht nur an ihrer äußeren Oberfläche, sondern durch das ganze Volumen des Materials hindurch statt.

Abbildung 13:
Bild eines „Nano-Filters“
Nanoweb® (Quelle:
Hollingsworth & Vose)



Praxisbeispiel Membran:

Nanofaserbeschichtung für Filterwerkstoffe

In einer Forschungs Kooperation der Philipps-Universität Marburg (Prof. Dr. Andreas Greiner, Prof. Dr. Joachim H. Wendorff) und dem Filterhersteller Hollingsworth & Vose wurde - mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) - an der Entwicklung von Filtermaterialien mit neuartiger Architektur gearbeitet. Grundlage ist ein Nanogewebe aus Fasern, die einen durchschnittlichen Durchmesser von 200 Nanometer oder geringer aufweisen. Der Filter „Nanoweb®“, dessen Entwicklung aus der Zusammenarbeit hervorging, beruht auf einer dünnen Schicht von Fasern auf einem Trägermaterial. Das Nanofasernetz bestimmt die Filterfeinheit. Der Vorteil dieses Filtermediums liegt in einem geringeren Gesamt-Druckverlust bei gleichzeitig hoher Aufnahmekapazität der abgetrennten Partikel. Austauschintervalle für den Filter erhöhen sich und die Energie zur Durchströmung der Filter verringert sich deutlich. Die Kunststoff-Nanofasern werden durch das Elektrospleinverfahren hergestellt. Der Filter kann für unterschiedliche Filterzwecke eingesetzt werden, das Marktvolumen wird auf mehrere hundert Millionen Euro geschätzt.

Erste Produkte befinden sich bereits in der Anwendung. Als Herstellungsmethoden für nanotechnologische Membranen dienen Ionenbeschuss und Ätzen, Selbstorganisation, das Elektronensplein oder das Molecular Imprinting.

Literatur: EPA (2002), Masciangioli, Zhang (2003), Siegel et al. (1999), TAB (2004)

Anwendungsgebiet Schadstoffrückhaltung

Technologiebereiche: Wasser / Abwasser, Abfall, Luftreinhaltung, Integrierte Produktpolitik

Nanopartikel und nanostrukturierte Oberflächen können zur Rückhaltung von Schadstoffen durch Absorption, Adsorption und Immobilisierung in der Abluftreinigung und Wasserreinigung genutzt werden. Die **technologische Grundlage** bilden Nanofestbettmatrizen aus Kohlenstoff, Zeolithen oder einer Membran mit hoher Selektivität, Oberfläche und Sorptionskapazität. **Anwendungsbeispiele** sind:

- ▶ dendritische nanoskalige Chelatbildner zur Rückhaltung von Metall-Ionen wie Cu(II)-Ionen von Industrieabwässern (z. B. Ultrafiltration) oder zur Reduktion von chlorinierten Alkenen wie z. B. Perchlorethylen (PCE) oder
- ▶ molekulares Siebmaterial aus porösem, aktivierten Nanokohlenstoff (Carbon Nano Tubes) als Sorptionsmittel für Dioxine oder zur Gasseparation.

Ein **wesentlicher Vorteil** ist u. a. die hohe Sorptionsenergie insbesondere von Carbon Nano Tubes (sie ist fast dreimal höher als die von Aktivkohle). Weitere Einsatzmöglichkeiten werden in der Immobilisierung von Schwermetallen oder Radionukliden gesehen. Allerdings sind Anwendungen im großen Maßstab in der nahen Zukunft noch durch geringe Verfügbarkeit und hohe Kosten beschränkt.

Erste Produkte sind schon am Markt erhältlich (nanoskalige Festbettmatrix zur Arsenreduktion), eine Vielzahl von Materialien wird zurzeit erforscht.

Literatur: EPA (2002), TAB(2004), Bachmann (1998), Masciangioli und Zhang (2003)

Anwendungsgebiet Katalytischer Schadstoffabbau

Technologiebereiche: Wasser / Abwasser, Luftreinhaltung, Integrierte Produktpolitik

Katalytische Prozesse können Schadstoffe durch Oxidation und Reduktion abbauen. Nanopartikel und nanostrukturierte Oberflächen können hier z. B. in der Katalyse der Abluft- und Abwassertechnik, der Boden- und Altlastensanierung, Geruchszerlegung, in der Brennstoffzelle oder in Verbrennungsprozessen (Benzinmotor) eingesetzt werden. Zum Teil werden die Katalysatoren durch Licht aktiviert (Photokatalyse). **Technische Grundlagen** und **Anwendungsbeispiele** sind:

- ▶ Katalysatoren mit Goldnanopartikeln als Geruchsfilter,
- ▶ katalytisch wirksame Nanopartikel in (keramischen) Folien von Brennstoffzellen oder zur Effizienzsteigerung in der Kraftstoffverbrennung,
- ▶ Bildung von katalytisch wirksamen Nanometalloxidpartikeln unter Verwendung der Proteinstruktur von Ferritin zur Reduktion von Chrom-VI zum unlöslichen Chrom-III im Grundwasser,
- ▶ Nanopartikel verschiedener Oxidations- und Reduktionsmittel (Titaniumdioxid, Zinkoxid, Eisenhydroxidoxid-Granulat oder Bimetalle wie Eisen / Palladium, Eisen / Silber oder Zink / Palladium, u. a.) können Schadstoffabbau und mikrobielles Wachstum anregen. Zinkoxid-Nanopartikel können als Photokatalysator für die Behandlung chlorierter Phenole und gleichzeitig als Sensor dienen,
- ▶ direkte Injektion von nanoskaligen Eisenpartikeln in den Untergrund zum Abbau chlorierter organischer Verbindungen wie Trichlorethylen.

Praxisbeispiel Schadstoffabbau:

Sonnenlicht ersetzt Chlor im Schwimmbad

In einer Kooperation zwischen der Technischen Universität Darmstadt (Dr. Thomas Mayer, Fachbereich Material- und Geowissenschaft, Fachgebiet Oberflächenforschung) und der Böhme Schwimmbadtechnik (Mario Böhme) wurde eine innovative Schwimmbadbeschichtung zur Reinigung des Beckenwassers entwickelt (JUSTadd-WATER® Technologie), die kurz vor der Markteinführung steht. Diese ressourcenschonende Technologie basiert auf den Reinigungseffekten der Natur und schont die Umwelt, indem die Wasserentkeimung auf die bei den etablierten Oxidationsverfahren benötigten Chemikalien wie z. B. Chlor verzichtet.

Grundlage der Technologie ist eine mikroskopisch dünne funktionale Beschichtung, die gleichmäßig über die Oberfläche des Schwimmbeckens verteilt ist. Die Beschichtung besteht aus einer speziellen, auf Nanotechnologie basierenden chemischen Verbindung, die zwei natürliche Reinigungsvorgänge nutzt: Zum einen werden Bakterien und Algen aller Art mit Hilfe von durch Licht angeregten Elektronen direkt an der Schwimmbeckenwand abgetötet. Anhaftender Schmutz wird durch die photokatalytische Reaktion in seiner chemischen Struktur gebrochen, vom Wasser unterspült und durch die Wasserbewegung im Schwimmbad abgewaschen. Zum anderen ermöglicht die Beschichtung, dass durch Licht aktiver Sauerstoff und Hydroxylradikale gebildet werden, die sich gleichmäßig im Wasservolumen des Schwimmbeckens verteilen und so zusätzlich für eine Entkeimung des Beckenwassers sorgen.

Vorteile und Nutzen des Einsatzes von Nanotechnologie können in der Erzeugung hochselektiver Katalysatoren für den Schadstoffabbau und die Prozessindustrie gesehen werden:

- ▶ Effizienzverbesserung vorhandener Technologien wie in-situ Schadstoffabbau, Ultrafiltration,
- ▶ Schadstoffabbau in chemischen Reaktionen oder im biologischen Schadstoffabbau ohne unerwünschte Nebenprodukte durch höhere Reaktivität von Nanopartikeln aufgrund ihrer Kristallform und Gitterordnung,
- ▶ nanoskalige Partikel können besser am gewünschten Verschmutzungsort ausgebracht werden und
- ▶ deutliche Ressourceneinsparungen durch den Einsatz maßgeschneiderter Katalysatoren in der Prozessindustrie, die die Reaktionsausbeute erhöhen und die Reaktionsenergie herabsetzen.

Die Nutzung von Nanotechnologie für die Herstellung von Katalysatoren ist zwar nicht neu, sie wird aber erst seit einigen Jahren mit der Entwicklung des technischen Fortschritts in der Grundlagenforschung gezielt und beschleunigt vorangetrieben. Zum Teil sind die Anwendungen noch im Pilotstadium. Die wesentlichen Herausforderungen dürften daher für die nächsten Jahre in einer Beschleunigung der Grundlagenforschung sowie einer verstärkten Applikation und Nutzung dieser grundlegenden Querschnittstechnologie liegen.

Literatur: Bachmann (1998), Masciangioli und Zhang (2003), TAB (2004)

Anwendungsgebiet Nanosensoren (Lab-on-Chip-Systeme)

Technologiebereiche: Analytik, Mess-, Steuer- und Regeltechnik

In der Umweltanalytik werden Stoffe oder Stoffgemische und deren Zusammensetzung analysiert oder deren physikalische Eigenschaften wie Löslichkeit, Dampfdruck, Schmelzpunkt, Siedepunkt oder Flammpunkt bestimmt.

Nanobasierte Sensoren können zur Detektion, Analyse und in-situ Überwachung eingesetzt werden, zum Teil können sie auch gleichzeitig als Katalysatoren dienen (siehe Anwendungsgebiet katalytischer Schadstoffabbau). **Technologische Grundlagen** bilden Reaktions-, Adsorptions- oder Bindungsprozesse in Sensoren zum Einsatz in der optischen, biologischen, chemischen oder physikalischen Analyse.

Chemosensoren bestehen aus einem Rezeptor (zum Beispiel aus Metallen, Halbleitern oder Polymeren), der Wechselwirkungen mit den zu analysierenden Stoffen eingeht. Diese werden über einen Transducer in elektrische Impulse umgewandelt und weitergeleitet. Folgende **Anwendungsbeispiele** von Chemosensoren auf Nanotechnologiebasis sind bekannt:

- ▶ konduktometrische, nanokristalline Metalloxidsensoren oder halbleitende Einzelwand-CNT als konduktometrische Gassensoren zur Detektion von Stickstoffdioxid oder Ammoniak,
- ▶ Palladium-Nanodraht als konduktometrischer Wasserstoffsensoren,
- ▶ adsorbierende, chemisch funktionalisierte oder mit nanoporösem Zeolithfilm beschichtete Sensoren mit Nanobiegebalken oder
- ▶ molekular geprägte Polymere (Nanoporen) oder Oberflächen (selbstorganisierte Monoschicht).

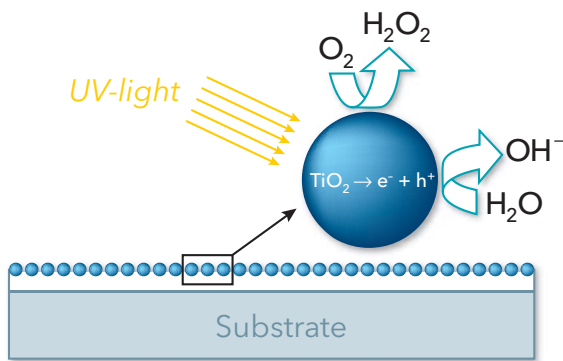


Abbildung 14: Neue Funktionalität durch Nanotechnologie: Photokatalyse mit TiO₂-Nanopartikeln (Quelle: NANO-X)

Auf Chemosensoren basierende Biosensoren sind mit Biomolekülen oder ganzen Zellen funktionalisiert und ermöglichen eine selektive Anbindung von Biomolekülen, Viren oder Zellen mittels molekularer Erkennung.

Lab-on-Chip-Systeme basieren auf:

- ▶ schaltbaren Molekularmembranen (Nanofluidik) auf der Basis von Lipiden in ultradünnen Schichten,
- ▶ selbstorganisierenden Monoschichten zur Biomolekül- oder Zell-Immobilisierung oder
- ▶ beschichteten Halbleiter-Quantenpunkten (Verbindungshalbleiter, Polymere) als Fluoreszenzmarker.

Vorteile und Nutzen bestehen in molekülspezifischen Lab-on-Chip Systemen, schneller und selektiver Detektion, miniaturisierten Analysesystemen, Nutzung großer und molekülselektiver Oberflächen auf Chip-Systemen, direkten „vor Ort“-Analyseergebnissen, großen Analysebereichen (Zellen, Moleküle, Metallverbindungen), zum Teil erheblich verbesserter Empfindlichkeit, Ansprechgeschwindigkeit und Selektivität sowie einem geringeren Energieverbrauch.

Herausforderungen ergeben sich aus der Beherrschung der kritischen Dimensionen und langzeitthermischen und -chemischen Stabilität des Materials. Teilweise bereitet die Ankopplung an elektrisch oder optisch auslesbare Strukturen noch Probleme. Die Entwicklung und Herstellung verlangt ein hohes Maß an Interdisziplinarität zwischen Chip-Industrie, Biochemie und Engineering.

Momentan befinden sich bereits einige Sensoren in der Anwendung. Der größte Teil der Konzepte, so z. B. die Entwicklung praktikabler Chemosensoren auf Basis molekular geprägter Polymere, ist noch im Forschungsstadium.

Praxisbeispiel Nanosensoren: Chemosensoren mit substanzselektiver Nanobeschichtung

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes hat die Thomas Recording GmbH in Gießen gemeinsam mit Kooperationspartnern an den Universitäten Gießen, Freiburg, Bochum und Southampton (UK) einen weltweit einzigartigen Multikanal-Chemosensor entwickelt, mit dem u. a. Botenstoffe wie Dopamin detektiert werden können. Möglich wurde diese Entwicklung durch den Einsatz spezieller Multikanalfasern. Diese Fasern weisen bis zu sieben voneinander isolierte Metalldrähte auf, wobei die gesamte Multifaser einen Durchmesser von nur 100 Mikrometer hat. Metallkontaktflächen an der Faserspitze werden mit einer wenige Nanometer dünnen Sensorschicht belegt. Speziell für den Einsatz in der Pflanzenforschung ist der Thomas Recording GmbH erstmals die Herstellung von wenigen Nanometer dünnen Elektroden gelungen, mit denen es möglich ist, in der Atemhöhle eines Blattes physiologische Messungen durchzuführen.

Literatur: EPA (2002), TAB (2004), Royal Society and Royal Academy of Engineering (2003), Roco und Tornellini (2002)

3 Innovationspotenziale und Ansatzpunkte des Technologietransfers

Die Nanotechnologie besitzt als Querschnittstechnologie ein großes Innovationspotenzial für eine Vielzahl technischer Anwendungen im Umweltschutz. Effizientere, selektivere oder miniaturisierte Lösungen sind durch den Einsatz von Nanotechnologie möglich. Ihr Einsatz kann direkt zur Ressourceneffizienz und indirekt zur Verbesserung und Weiterentwicklung von umwelttechnischen Anwendungen beitragen. Eine Kopplung beider Technologien kann somit zur weiteren Stärkung des hessischen Wissenschafts- und Wirtschaftsstandorts für Umwelt- und Nanotechnologie beitragen.

Nanotechnologie ist für hessische Unternehmen der Umwelttechnologie besonders dann interessant, wenn ...

Nanotechnologie bietet eine Vielzahl von Funktionalitäten für die Umwelttechnologie (siehe Tabelle 2, Seite 26 / 27). Ob der Einsatz der Nanotechnologie für Umwelttechnologiefirmen – für Produkte oder Prozesse – sinnvoll ist, kann anhand der Leitfragen abgeschätzt werden. Demnach ist die Nanotechnologie für hessische Unternehmen der Umwelttechnologie besonders interessant,

- ▶ wenn **physikalisch-chemische (Verfahrens-) Prozesse** eine wichtige Rolle spielen oder ein besonders großes Oberflächen / Volumenverhältnis den Prozess maßgeblich beeinflusst,
- ▶ wenn **biologische (Verfahrens-) Prozesse** eine große Bedeutung für die Produkte spielen, besonders die Schnittstelle zwischen biologischen und technischen Bauelementen,
- ▶ wenn die **Gestaltung und Funktionalisierung von Oberflächen oder Grenzflächen** eine große Bedeutung hat und deren Beeinflussung den Produktnutzen erhöht,

- ▶ wenn die **Miniaturisierung** weiter vorangetrieben werden soll bzw. kompakte Systeme (z. B. Sensorik und Energieversorgung) notwendig sind oder
- ▶ wenn Nanotechnologie eine **Relevanz als zusätzlicher Wettbewerbsfaktor** besitzt.

Startfragen, wie Nanotechnologie in eigenen Produkten Anwendung finden kann oder sich neue Geschäftsfelder ergeben können

Die für Umwelttechnologieunternehmen entscheidende Frage, ob und wie Nanotechnologie in eigenen Produkten und Prozessen Anwendung finden kann, oder sich neue Geschäftsfelder ergeben, kann an folgenden Punkten abgeprüft werden (Einteilung nach Bullinger 1994):



Kann die Nanotechnologie eine bisher eingesetzte Technologie ersetzen? (Technologiesubstitution)

Für Unternehmen der Umwelttechnologie ist zu prüfen, ob Nanotechnologie bekannte oder etablierte Technologien, die das Unternehmen einsetzt, ersetzen kann oder wird – und damit den Stand der Technik verbessert oder ob z. B. Innovationen durch Nanotechnologie zukünftig das eigene Produkt ersetzen werden.

Mögliche Beispiele

Nanostrukturierte Oberflächen zur Adsorption und Füllkörper in katalytischen Reaktoren ersetzen bisherige Adsorptionsmedien; Brennstoffzellen als neue Energiequelle für portable drahtlose Elektrogeräte ersetzen Batterien; biozide und / oder photokatalytische Oberflächenbeschichtung von Schwimmbädern ersetzt die Wasseraufbereitungsanlagen; Metallhydrid-Speicher als chemischer Wasserstoffspeicher ersetzt physikalischen Druckspeicher.



Ist die Nanotechnologie komplementär zu den bislang eingesetzten Technologien anzuwenden? (Komplementäre Technologie)

Für Unternehmen der Umwelttechnologie ist zu untersuchen, ob Nanotechnologie eigene Prozesse oder Produkte im Umweltschutz verbessern kann und damit deren Produktnutzen erhöht, oder ob z. B. eigene nanotechnologische Innovationen andere Produkte und Prozesse verbessern bzw. sich ein Geschäftsfeld entwickelt.

Mögliche Beispiele

Effiziente Energieversorgung durch kleinere Batteriesysteme oder Mikrobrennstoffzelle erlaubt neue Sensorsysteme; ressourcenschonendere Prozesse in der Prozessindustrie durch Easy-to-clean Oberflächen oder Lotus-Effekt; Steigerung des Wirkungsgrades von Solarzellen durch nicht-verschmutzende Oberfläche.



Ergibt sich aus der Nanotechnologie ein neues Technologiefeld?

Für Unternehmen der Umwelttechnologie ist zu untersuchen, ob sich aus der Nanotechnologie innovative Anwendungsmöglichkeiten mit bisher nicht gekannten Funktionalitäten und Einsatzfeldern ergeben. Hier ist neben der technologischen Kompetenz ebenso das Wissen um Markt und Kundenbedürfnisse von Bedeutung, d. h. die Kombination von Technologie-Push und Markt-Pull erzeugt neue Produkte.

Mögliche Beispiele

Künstliche Nachbildung der Photosynthese; neue Einsatzfelder für kostengünstigen Farbstoff- oder organische Solarzellen im Konsumgütermarkt oder als Solarlack; Rohrleitungssysteme mit integrierter Reinigungsfunktionalität; Integration von organischer Solarzelle und Sensorsystem auf Basis organischer Elektronik.

Gleichzeitig hilft diese Strukturierung der Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie, das Einsatzfeld Umwelttechnologie zu selektieren und eventuell entsprechende Kooperationen oder Partnerschaften einzugehen.

Die Beispiele (*siehe Kapitel 2.4*) zeigen das Innovationspotenzial der Nanotechnologie für Produkte und Prozesse in der Umwelttechnologie. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Frage des Langzeitverhaltens und der lebenszyklusweiten Effekte sowie potenzieller toxischer Eigenschaften von einigen nanotechnologischen Werkstoffen noch nicht abschließend beantwortet (*siehe Kapitel 1.6*). Solche Bedenken sollten von den Unternehmen möglichst frühzeitig und differenziert betrachtet werden, denn Angst vor der Nanotechnologie in der Gesellschaft - ob begründet oder nicht - hemmt Forschung und Entwicklung auf diesem technologischen Schlüsselfeld.

Die beschriebenen Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie beziehen sich zum größten Teil auf die Anwendung in etablierten Märkten, die teilweise nur ein geringes Wachstum aufweisen bzw. gesättigt sind. Marktanteile werden durch die Verdrängung anderer Mitbewerber gesteigert, so dass der Einsatz der Nanotechnologie sich gegenüber etablierten Technologien oder Verfahren durchsetzen muss. Differenzierung, Technologieführerschaft und Systemintegration sind Ansatzpunkte bzw. Teil der Strategie für hessische Umwelttechnologieunternehmen, mit Nanotechnologie im Wettbewerb zu bestehen oder neue Felder zu erschließen:

Differenzierung, Technologieführerschaft und Systemintegration sind Ansatzpunkte für die Unternehmensstrategie

► **Differenzierung über den Preis**

Der Einsatz von Nanotechnologie in der Umwelttechnologie führt zu deutlich kostengünstigeren und effizienteren Produkten und Verfahren (z. B. kostengünstige Solarzellen mit verbessertem Wirkungsgrad). Kosten entlang der Nutzung sind den Herstellungskosten gegenüberzustellen. Easy-to-clean Oberflächen sparen Reinigungskosten oder führen zu einem effizienteren Anlagenbetrieb, z. B. als Beschichtung von Solarzellen.

► **Differenzierung über Technologieführerschaft**

Durch den Einsatz von Nanotechnologie in der Umwelttechnologie wird der Stand der Technik qualitativ angehoben (z. B. autarke Messsensoren für Umweltschadstoffe mit hoher Genauigkeit oder hochselektive Membranen) oder eine Nische im Markt belegt. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) werden „Technology Enabler“ für Nanotechnologie und übernehmen damit eine Vorreiterrolle.

► **Systemintegration durch Systemanbieter**

Da Nanoforschung einen hohen Aufwand und qualifiziertes Personal erfordert, sind Kooperationen horizontal oder vertikal in der Wertschöpfungskette hilfreich und notwendig. Solche Kooperationen können wiederum am Markt als Systemanbieter auftreten und damit dem allgemeinen Trend auch in der Umwelttechnologie folgen. Dabei ist die Integrationsfähigkeit bei Umwelttechnologie-Firmen besonders ausgeprägt, da sie oftmals andere Technologien in ihre Produkte und Dienstleistungen integrieren und als System mit konkretem Kundennutzen anbieten. Kooperationen oder Betreibermodelle können eine neue Basis des Geschäfts sein und den hessischen KMUs als Teil der Wertschöpfungskette die Chance bieten, an der Nanotechnologie zu partizipieren.

Wissenstransfer und -austausch zwischen den Disziplinen treiben die Anwendung voran

Treiber eines Einsatzes der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie sind zudem der Wissenstransfer und Wissensaustausch zwischen den Disziplinen. Bisher fehlen noch die Berührungspunkte zwischen der möglichkeits- und forschungsgetriebenen Nanotechnologie und dem problemlösungsorientierten Vorgehen der Umwelttechnologie. In Unternehmen der Umwelttechnologie ist häufig nicht bekannt, welche Bandbreite Nanotechnologie bietet und wo ihre Einsatzgebiete liegen. Umgekehrt gilt, dass auch die Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Nanotechnologie nicht wissen, was die technologischen Problemfelder und Herausforderungen der Umwelttechnologie sind.

Die Lücke zwischen Technologie-Push und Markt-Pull muss geschlossen werden

Ziel und Ansatzpunkt für hessische Unternehmen der Umwelttechnologie – besonders in den Bereichen „Wasser / Abwasser“, „Energie“, „Luftreinhaltung“, „Mess-, Steuer- und Regeltechnik“ und Fragestellungen der Integrierten Produktpolitik – ist deshalb die Schließung dieser Lücke zwischen dem Technologie-Push und dem Markt-Pull.

Grundlegende Ansatzpunkte für einen Technologietransfer

Die Förderung des Technologie- und Informationstransfers zwischen Umwelt- und Nanotechnologie sollte in beiden Disziplinen bereits in frühen Phasen der Forschung realisiert werden. Die Grundlagenforschung sollte stärker als bisher die Möglichkeiten einer späteren Vermarktung berücksichtigen. Vertikale und horizontale Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette sind daher anzustreben, um Produktentwicklung und Praxis zusammenzuführen und besonders KMUs in den Entwicklungsprozess einzubinden.

Hessischen Unternehmen bieten sich hier unterschiedliche Möglichkeiten. Dies kann virtuell durch die Bildung von „Communities“ geschehen oder durch die Ansiedlung von Unternehmen einer Wertschöpfungskette bzw. eine Forschungs- und Entwicklungskooperation in einem bestimmten Technologie- und Gründerpark oder Industriepark.

Materials Valley e. V.¹¹, ein Kompetenznetzwerk für Materialforschung und Werkstofftechnik der Region Rhein Main, ist ein gutes Beispiel, wie sich durch ein thematisches Kompetenzcluster wichtige Impulswirkungen erzielen lassen und zur Profilierung einer Technologie und der Region beitragen können. Mit dem neu gegründeten Netzwerk „NanoNetzwerk-Hessen“¹² gibt es in Hessen eine Vernetzung der Nanowissenschaftler.

Die Aktionslinien „hessen-nanotech“ und „hessen-umwelttech“¹³ des hessischen Wirtschaftsministeriums unterstützen – z. B. durch Kompetenzatlanten, Informationsbroschüren, Veranstaltungen und Projekte – die Forschung und Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen der Nanotechnologie und der Umwelttechnologie und stellen die hessischen Kompetenzen sowohl landesintern als auch über die Landesgrenzen hinweg dar.

Die HA Hessen Agentur GmbH¹⁴ betreut diese Aktionslinien und ist Ansprechpartner für Nanotechnologieunternehmen und Unternehmen der Umwelttechnologie, die an der Nanotechnologie zur Verbesserung ihrer Produkte oder Prozesse interessiert sind. Sie berät bei Förder- und Standortfragen und leitet Interessierte zu den zuständigen Stellen des Technologietransfers zwischen Hochschule-Wirtschaft – in Zusammenarbeit mit dem Technologie TransferNetzwerk (TTN-Hessen)¹⁵ – sowie zu europäischen Partnern. Die Hessen Agentur gibt Kompetenzatlanten für einzelne Technologien heraus, um einen Überblick über die einzelnen Unternehmens- und Forschungsaktivitäten in Hessen zu geben.

Vor dem Hintergrund der Studie zu den Umwelttechnologieanbietern in Hessen (*M-Result 2002*) sind die folgenden Strategien hessischer Unternehmen der Umwelttechnologie auch für den Technologietransfer der Nanotechnologie von Bedeutung:

- ▶ **Forschung:** Gesetze und Förderprogramme stellten in der Vergangenheit wichtige Treiber des Umwelttechnologie-Marktes dar. Die großen Forschungsprogramme von Bund und EU bieten die Möglichkeit zur Förderung technologischer Forschung und Projektkonsortien.
- ▶ **Kooperation:** Die Bedeutung gemeinsamer FuE-Projekte ist bisher noch gering. Dem steht die besondere Forschungsintensität und Interdisziplinarität der Nanotechnologie gegenüber, sodass Unternehmen Kooperationen und Netzwerke entwickeln müssen, um Know-how in die eigene Forschung und Entwicklung einzubinden.

11 <http://materials-valley-rheinmain.de>

12 www.nanonetzwerk-hessen.de

13 www.hessen-nanotech.de und www.hessen-umwelttech.de

14 www.hessen-agentur.de

15 www.ttn-hessen.de

► **Differenzierung:** Die Strategie kleinerer Unternehmen setzt auf Differenzierung am Markt mit einem innovativen Produkt. Nanotechnologie kann hier ein Ansatz sein, die in Hessen vorhandenen Kompetenzen in der Nanotechnologieforschung für gemeinsame Innovationen in der Umwelttechnologie zu nutzen.

Darüber hinaus bieten Forschungsprogramme mit der Zielrichtung der großtechnischen Umsetzung vorhandener Forschungsergebnisse und der Förderung von entwicklungsreifen Produkten eine weitere Möglichkeit, Forschungs- und Entwicklungskooperation entsprechend zu steuern. Damit wird Unternehmen der Umwelttechnologie ein Einstieg in die Nanotechnologie über Forschungs- und Entwicklungskooperationen mit Universitäten und Nano-Start-Ups ermöglicht.

Die Industrie sollte ihre Anforderungsprofile verstärkt den Forschern an Hochschulen und Instituten zur Verfügung stellen, damit anschließend der Transfer der Ergebnisse gewährleistet werden kann. Hierfür muss die Vernetzung mit Forschung und Industrie noch weiter ausgebaut werden, um die spezifischen Expertisen zukünftig noch besser zu nutzen und zu integrieren. Die Aktionslinien „hessen-nanotech“ und „hessen-umweltech“ unterstützen Unternehmen und Forschungsinstitute dabei, indem Kontakte zur Forschung und Entwicklung hergestellt werden.

Es ist aber auch deutlich, dass Nanotechnologie – wie die Naturwissenschaften allgemein – ein internationales Forschungsthema ist. Die Netzwerke sind weltweit geknüpft. Entsprechend finden der Informationsaustausch und die Teilnahme an Forschungsprojekten international statt. Auf regionaler Ebene können jedoch die Randbedingungen für die Ansiedlung von Technologieunternehmen maßgeblich beeinflusst werden, um die internationale technologische Marktführerschaft zu behalten oder zu erlangen.

Literatur

Die fett gedruckte Literatur wird für eine vertiefende Analyse oder einen breiten umfassenden Überblick über die Nanotechnologie aus Sicht der Autoren empfohlen.

Altmann, Stephan (2004)

Chemical Nanotechnology for Sustainability, Vortrag von Dr. Stephan M. Altmann, BASF Polymer Research / Polymer Physics, BASF Ludwigshafen, auf dem Symposium „Nano meets Umwelttechnik“ am 2. Juli 2004 am Fraunhofer IAO in Stuttgart

Download unter www.bum.iao.fraunhofer.de/nano

Angerer, Gerhard; Bierhals, Rainer; Hipp, Christiane; Kalb, Henry; Lang, Jürgen; Marscheider-Weidemann, Frank; Nathani, Carsten; Reger, Guido; Schön, Michael (1998)

Innovationspotenziale von Umwelttechnologien: Innovationsstrategien im Spannungsfeld von Technologie, Ökonomie und Ökologie, Herausgegeben durch das Umweltbundesamt, Physika-Verlag, Heidelberg 1998

Bachmann, Gerd (1998)

Innovationsschub aus dem Nanokosmos - Technologieanalyse, Bericht des VDI-Technologiezentrum, Abteilung Zukünftige Technologie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf 1998

Bachmann, Gerd (2003/1)

Deutschland ist stark in den Nanowissenschaften, aber teils noch schwach in der Umsetzung, in: VentureCapital Magazin Sonderausgabe: Nano- / Mikrotechnologie - Märkte und Visionen, 4. Jahrgang, November 2003, Verlag GoingPublic Media AG, Wolfratshausen 2003

Bachmann, Gerd (2004)

Nanotechnologie - Kleine Dimensionen und großes Potential für die Umwelttechnik? Vortrag von Dr. Gerd Bachmann, VDI-Technologiezentrum GmbH Düsseldorf, Abt. ZT-Consulting auf dem Symposium „Nano meets Umwelttechnik“ am 2. Juli 2004 am Fraunhofer IAO in Stuttgart

Download unter www.bum.iao.fraunhofer.de/nano

Bachmann, Gerd; Rieke, Volker (2004)

Nanotechnologie erobert Märkte - Deutsche Zukunftsoffensive für Nanotechnologie, Herausgegeben durch das Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin 2004, Bezug unter www.bmbf.de

Bierhals, Rainer (2000)

Mikrosystemtechnik - wann kommt der Marktdurchbruch? Miniaturisierungsstrategien im Technologiewettbewerb zwischen USA, Japan und Deutschland, Physica-Verlag, Heidelberg 2000.

BMBF (2002)

Nanotechnologie in Deutschland - Standortbestimmung, Studie des Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn 2002

Bullinger, Hans-Jörg (1994)

Einführung in das Technologiemanagement: Modelle, Methoden, Praxisbeispiele, Teubner Verlag, Stuttgart 1994

Colvin, Vicki (2003)

Wie gefährlich ist Nanotechnologie - über Nutzen und Chancen von Nanomaterialien, in: MIT'S Magazine of Innovation - Technology Review (Deutsche Ausgabe), Nr. 1, Mai 2003, Heise Zeitschriften Verlag, Hannover 2003

Drexler, Eric; Peterson, Chris (1991)

Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution, New York 1991

EPA (2002)

Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications STAR Progress Review Workshop, August 28-29, 2002, Arlington, VA, U.S. National Center for Environmental Research.

Download unter

www.nano.gov/html/res/workshops.html

Europäische Kommission (2003)

Breaking down barriers to technologies to protect the environment and boost competitiveness, European Commission, Environmental Technology Consultation, DG Environment, Environmental Technology Action Plan Announcement 242, IP/03/430, Brüssel 2003

Europäische Kommission (2004/1)

Auf dem Weg zu einer europäischen Strategie für Nanotechnologie (KOM(2004) 338 endgültig), Mitteilung der Kommission der europäischen Gemeinschaft, Brüssel 2004

Europäische Kommission (2004/2)

Stimulation von Technologien für nachhaltige Entwicklung: Ein Aktionsplan für Umwelttechnologie in der Europäischen Union (KOM(2004) 38 endgültig), Mitteilung der Kommission der europäischen Gemeinschaft an den Rat und das Europäische Parlament, Brüssel 2004

Farkas, Robert et al (2004)

Nanotechnologie pro Gesundheit: Chancen und Risiken (Innovations- und Technikanalyse), Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch Aachener Gesellschaft für Innovation und Technologietransfer AGIT mbH (Aachen), Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik (Aachen), Fraunhofer Institut für Lasertechnik e.V. (ILT) (Aachen), Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie e.V. (IME) (Aachen) und IGES Institut für Gesundheits- und Sozialforschung GmbH (Berlin), Aachen 2004

Download unter www.bmbf.de/pub/nano_pro_gesundheit_bericht.pdf

Feder, Barnaby (2003)

As uses grow, tiny materials' safety is hard to pin down, New York Times vom 03.11.2003, New York 2003

FEH (2004)

Materialbasierte Technologien in Hessen: eine Bestandsaufnahme, Studie der Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft Hessen mbH (FEH), Wiesbaden, FEH-Report Nr. 665, Wiesbaden 2004

Frost & Sullivan (1999)

European Water Pollution Monitoring Markets, Report Nr. 3785-15, Frost & Sullivan Ltd, London 1999

Frost & Sullivan (2004/1)

Advanced Energy Storage Technologies, Report Nr. D289, Frost & Sullivan, Texas / USA 2004

Frost & Sullivan (2004/2)

European Municipal Water and Wastewater Treatment Equipment Markets, Report Nr. B391-15, Frost & Sullivan Ltd, London 2004

Frost & Sullivan (2004/3)

World Micro Fuel Cell Markets For Portable Devices - Consumer, Industrial and Military, Report Nr. A659-27, Frost & Sullivan, 2004

Frost & Sullivan (2004/4)

The Desalination Plant Markets in Europe, The Middle East & North Africa, Report Nr. B317-15, Frost & Sullivan Ltd, London 2004

Greenpeace (2003)

Future Technologies, Today's Choices: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics - A technical, political and institutional map of emerging technologies, von Alexander Huw Arnall, University of London, London 2003

HA (2005)

Nanotechnologie in Hessen - Eine Bestandsaufnahme auf Basis von Unternehmensbefragungen, Studie der HA Hessen Agentur GmbH (ehemals FEH), Wiesbaden 2005

Harper, Tim (2002)

The emerging cutting-edge Technology - Nanotechnology international, in: VentureCapital Magazin Sonderausgabe: Nanotechnologie - Märkte und Visionen, 3. Jahrgang, November 2002, Verlag GoingPublic Media AG, Wolfratshausen 2002

Hinsch, Andreas (2004)

Neue Potentiale in der Solarenergieforschung durch Nanotechnologie, Vortrag von Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE, Freiburg, auf dem Symposium „Nano meets Umwelttechnik“ am 2. Juli 2004 am Fraunhofer IAO in Stuttgart
Download unter www.bum.iao.fraunhofer.de/nano

Hullmann, Angela (2001)

Internationaler Wissenstransfer und technischer Wandel - Bedeutung, Einflussfaktoren und Ausblick auf technologische Implikationen am Beispiel der Nanotechnologie in Deutschland, Physika-Verlag, Heidelberg 2001

Masciangioli, Tina; Zhang, Wei-Xian (2003)

Environmental Technologies at the Nanoscale, Environmental Science & Technology, März 1, 2003
Download unter www.nano.gov/html/res/GC_ENV_PaperZhang_03-0304.pdf

M-Result (2002)

Umwelttechnologieanbieter in Hessen: eine Bestandsaufnahme, Studie der M-Result GmbH, Mainz, Dezember 2002

NNI (2002)

Small Wonders, Endless Frontiers - A Review of the National Nanotechnology Initiative (NNI, National Nanotechnology Initiative der USA), Committee for the Review of the National Nanotechnology Initiative, National Research Council, Washington 2002

Download www.nano.gov/html/res/smallwonder.html

Rastogi, A. K. (2004)

Anwendung von Mikro- und Nanostrukturen in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie - Eine Kurzstudie, Bericht Nr. BT 70046-01 für die Aktionslinie „hessenumwelttech“ des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden 2004

Roco, Mihail; Tomellini, Renzo (2002)

Nanotechnology - Revolutionary opportunities and societal implications, 3rd Joint EC-NSF Workshop on Nanotechnology, 31 January / 01 February 2002 in Lecce, European Commission, Research Directorate-General, Luxembourg 2002

Royal Society and Royal Academy of Engineering (2003)

Nanotechnology: views of Scientists and Engineers - Report of a workshop of the Nanotechnology study, June 2003, Royal Society (www.royalsoc.ac.uk) and the Royal Academy of Engineering (www.raeng.org.uk)

- Royal Society and Royal Academy of Engineering (2004)**
 Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties, Studie der Royal Society und der Royal Academy of Engineering, London, 2004
 (www.raeng.org.uk)
- Siegel, Richard; Hu, Evelyn; Roco, Mihail (1999)**
 Nanostructure Science and Technology - A Worldwide Study, by National Science and Technology Council (NSTC), The Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN), Dezember 1999, Maryland 1999
 Download unter <http://itri.loyola.edu/nano/final/>
- Steinfeldt, Michael (2003)
 Mit Nanotechnologie zur Nachhaltigkeit, Schriftenreihe des IÖW 166/03, Berlin 2003
- Steinfeldt, Michael; von Gleich, Arnim; Petschow, Ulrich; Haum, Rüdiger; Chudoba, Thomas; Haubold, Stephan (2004)**
 Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte, Schriftenreihe des IÖW 177/04, Berlin 2004
- TAB (2004)**
 Nanotechnologie, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages, März 2004, Deutscher Bundestag Drucksache 15/2713.
 Download unter <http://dip.bundestag.de/btd/15/027/1502713.pdf>
 Herausgegeben als Arbeitsbericht Nr. 92, Juli 2003
- Trogler, William (2002)
 Nanostructured Porous Silicon and Luminescent Polysiloles as Chemical Sensors for Carcinogenic Chromium(VI) and Arsenic(V), Proceeding des EPA Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications STAR Progress Review Workshop, August 28-29, 2002, Arlington, Virginia / USA
- Trück, Beate (2004)
 Nano meets Umwelttechnik - Förderprogramme der EU, Vortrag von Dr. Beate Trück, Büro Brüssel der Fraunhofer-Gesellschaft, auf dem Symposium „Nano meets Umwelttechnik“ am 2. Juli 2004 am Fraunhofer IAO in Stuttgart
 Download unter www.bum.iao.fraunhofer.de/nano
- VDI (2004/1)**
 Präsentationsmaterial „Reise in den Nanokosmos“ des VDI Technologiezentrum GmbH, Zukünftige Technologien Consulting,
 Download unter www.nanotruck.net/pdf/nanoTruck_Broschuere.pdf
- VDI (2004/2)**
 Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt - Innovations- und Technikanalyse, Zukünftige Technologien Nr. 53, Bearbeitung durch Wolfgang Luther, Norbert Malanowski, Gerd Bachmann, Andreas Hoffknecht, Dirk Holtmannspötter, Axel Zweck, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf 2004
- VentureCapital Magazin (2002)
 VentureCapital Magazin Sonderausgabe: Nanotechnologie - Märkte und Visionen, 3. Jahrgang, November 2002, Verlag GoingPublic Media AG, Wolfratshausen 2002
- Werner, Matthias (2004)
 Nanotechnologie und Nanomaterialien - Applikationen und Marktpotenzial, Vortrag von Dr. Matthias Werner, NMTc, Berlin, auf dem Symposium „Nano meets Umwelttechnik“ am 2. Juli 2004 am Fraunhofer IAO in Stuttgart
 Download unter www.bum.iao.fraunhofer.de/nano
- Zhang, Wei-Xian (2003)
 Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview, in: Roco, Mihail C. (Hrsg.): Journal of Nanoparticle Research 5: 323-332, 2003, Kluwer Academic Publishers, Arlington (VA) 2003

Forschungsprogramme und Markt

Die Nanoforschung, insbesondere die Grundlagenforschung, wird zu einem großen Teil aus öffentlichen Forschungsmitteln finanziert. Viele Staaten haben eigene Förderprogramme aufgesetzt. Die USA haben im Zeitraum 1997 bis 2002 insgesamt 1.857 Mio. US \$ für Forschung und Entwicklung im Bereich der Nanotechnologie ausgegeben und 2003 rund 770 Mio. US \$. Im selben Zeitraum wurden in West-Europa 1.281 Mio. US \$ in Forschung und Entwicklung investiert, eine Steigerung um 500 Prozent im Vergleich zu 1997 (Greenpeace 2003). Abbildung 15 stellt die Ausgaben für die Nanotechnologieförderung im Jahr 2004 im internationalen Vergleich dar.

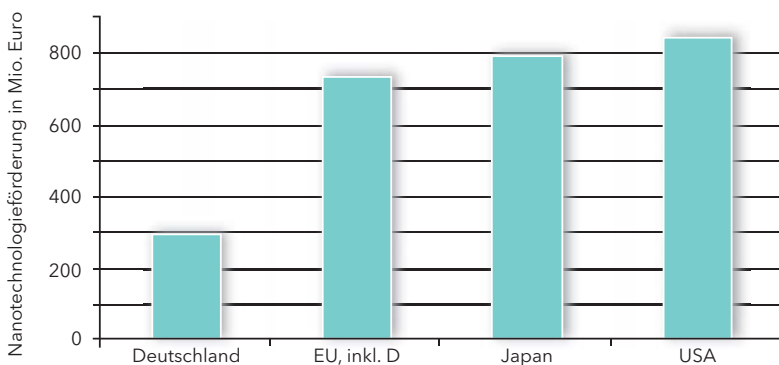


Abbildung 15: Nanotechnologieförderung im internationalen Vergleich (VDI 2004/1)¹⁶

rechts:

Tabelle 3: Internationale und nationale Forschungsprogramme mit Bezug zur Nanotechnologie und Relevanz für den Umweltschutz (eigene Recherche)

USA

National Nanotechnology Initiative (NNI),
www.nano.gov

Budget: 2002: 600 Mio. US \$
 2003: 770 Mio. US \$
 2004: 849 Mio. US \$
 2005: 982 Mio. US \$

21st Century Nanotechnology Development Act

Budget: 2005 bis 2008: knapp 3.700 Mio. US \$

Bezug im Forschungsprojekt zur Umwelttechnologie:

- ▶ Nanotechnologie im Umweltschutz
- ▶ Mögliche Auswirkungen der Nanotechnologie auf Umwelt und Gesellschaft

EU

Nanoforum, www.nanoforum.org

Budget: 6. Rahmenprogramm 2002 bis 2006:
 1.300 Mio. Euro
 7. Rahmenprogramm 2007 bis 2013:
 2.600 Mio. Euro

Bezug im Forschungsprojekt zur Umwelttechnologie:

- ▶ Neue öko-effiziente Produktionsverfahren
- ▶ Umwandlung / Behandlung von Produktionsabfällen

¹⁶ Summe für Deutschland: Projektförderung plus institutionelle Förderung des BMBF und Projektförderung des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)

D

Nanonet, www.nanonet.de

Budget: 2002: 88,5 Mio. Euro
2003: 112 Mio. Euro

Bezug im Forschungsprojekt zur Umwelttechnologie:

- ▶ Technikfolgenabschätzung, Risiken
- ▶ Nachhaltigkeit und Nanotechnologie (Steinfeldt 2003)
- ▶ Ökologische Implikationen aus Förderschwerpunkten

D

BMBF Rahmenprogramm WING - Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft

Budget: 2004 bis 2006: 250 Mio. Euro

Bezug im Forschungsprojekt zur Umwelttechnologie:

- ▶ Ressourcen- und energieeffizientere Produktion
- ▶ Batterien / Wasserstoffspeicher durch Nanostrukturen
- ▶ Ökologische Implikationen von Oberflächenbearbeitung
- ▶ Neue Werkstoffe für Produktinnovationen

D

BMBF Rahmenprogramm „Nanotechnologie erobert Märkte“: NanoMobile, NanoLux, Nano for Life, NanoFab, NanoChance

Budget: 2004: 250 Mio. Euro

Nanoforschung in den USA

In den USA werden die zentralen FuE-Programme und Aktivitäten im Themenfeld der Nanotechnologie in der Nationalen Nanotechnologie-Initiative (NNI) gebündelt (*NNI 2002*). Für 2005 wurden im US-amerikanischen Haushalt 982 Millionen US \$ für die Forschung in der Nanotechnologie beantragt. Das langfristige Engagement der USA wurde kürzlich durch den „21st Century Nanotechnology Development Act“ für den Zeitraum 2005-2008 gesichert, mit dem nahezu 3,7 Mrd. US \$ für die fünf Forschungsorganisationen NSF, DoE, NASA, NIST und EPA bereitgestellt werden (*Europäische Kommission 2004/1*). Abbildung 10 (*Seite 23*) zeigt eine Aufteilung der Fördermittel der EPA nach Umwelttechnologie-kategorien.

Während in den USA FuE-Programme für Nanotechnologie koordiniert bzw. zentralisiert werden, scheint sich in der Europäischen Forschungslandschaft mit unterschiedlichen, rasch voranschreitenden Programmen und Finanzquellen eher eine Aufsplitterung anzubahnen (*Europäische Kommission 2004/1*).

Nano-Forschungsprojekte beim National Center For Environmental Research der U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

(Auswahl, Stand 9. September 2004, siehe unter <http://es.epa.gov/ncer/index.html>)

<p>Anwendungsfeld: Analytik</p> <p>A Life Cycle Analysis Approach for Evaluating Future Nanotechnology Applications Carnegie Mellon University, Zeitraum: 05/2003 - 04/2005</p> <p>Advanced Nanosensors for Continuous Monitoring of Heavy Metals SUNY at Binghamton, New Mexico State University Zeitraum: 05/2003 - 04/2006</p> <p>Compound Specific Imprinted Nanospheres for Optical Sensing Clarkson University, University of New Hampshire - Main Campus, Zeitraum: 06/2003 - 05/2006</p> <p>In-Situ Measurement of Vehicle Exhaust Emissions Using Supramolecular Conducting Polymer Films Fractal Systems Inc., Zeitraum: 10/2002 - 07/2003</p> <p>Low Cost Organic Gas Sensors on Plastic for Distributed Environmental Monitoring University of California - Berkeley, Zeitraum: 05/2003 - 04/2006</p> <p>Multi-Analyte Nanoelectronic Air Pollutant Sensors Nanomix Inc., Zeitraum: 03/2004 - 08/2004</p> <p>Nanomaterial-Based Microchip Assays For Continuous Environmental Monitoring New Mexico State University, Zeitraum: 06/2003 - 05/2006</p> <p>Nanostructured Porous Silicon and Luminescent Polysiloles as Chemical Sensors for Carcinogenic Chromium(VI) and Arsenic(V) University of California - San Diego Zeitraum: 01/2002 - 12/2004</p> <p>Use of fullerenes as groundwater pollution tracers University of Arizona, Zeitraum: 01/1996 - 10/1999</p>	<p>Use of Ozonation in Combination with Nanocrystalline Ceramic Membranes for Controlling Disinfection By-products Michigan State University, Zeitraum: 05/2003 - 05/2006</p>
<p>Anwendungsfeld: Analytik / Schadstoffabbau</p> <p>Simultaneous Environmental Monitoring and Purification Through Smart Particles University of Florida, Zeitraum: 02/2002 - 02/2005</p>	<p>Anwendungsfeld: Filtration / Analytik</p> <p>Microbial Removal and Integrity Monitoring of High-Pressure Membranes Used For Water Treatment University of Illinois at Urbana, Zeitraum: 01/1997 - 01/1999</p>
<p>Anwendungsfeld: Beschichtung</p> <p>Biomimetic Nanostructured Coating for Dry Machining NanoMech LLC, Zeitraum: 03/2004 - 08/2004</p>	<p>Anwendungsfeld: Katalyse</p> <p>Engineering of Nanocrystal Based Catalytic Materials for Hydroprocessing of Halogenated Organics University of Texas at Austin, Zeitraum: 09/2000 - 08/2004</p> <p>Enhanced VOC Oxidation Compact Membrane Systems Inc. Zeitraum: 04/2002 - 09/2002</p> <p>Plasmon Sensitized TiO₂ Nanoparticles as a Novel Photocatalyst for Solar Applications Clemson University, Zeitraum: 07/2002 - 06/2005</p> <p>Removal and Disposal of Perchlorate From Drinking Water by Novel Capacitive Deionization Material Methods LLC, Zeitraum: 03/2004 - 08/2004</p>
<p>Anwendungsfeld: Filtration</p> <p>Development of High Surface Area Material and Filter Media eSpin Technologies Inc., Zeitraum: 04/2002 - 09/2002</p> <p>Nanocomposite-Based Filter for Arsenic Removal in Drinking Water Materials Modification Inc., Zeitraum: 10/2002 - 07/2003</p>	<p>Anwendungsfeld: Katalyse / Sanierung</p> <p>Dendritic Nanoscale Chelating Agents: Synthesis, Characterization, Molecular Modeling and Environmental Applications Howard University, California Institute of Technology, University of Michigan, Zeitraum: 12/2002 - 12/2004</p>
	<p>Anwendungsfeld: Sanierung</p> <p>Developing Functional Fe(0)-based Nanoparticles for In Situ Degradation of DNAPL Chlorinated Organic Solvents Carnegie Mellon University, Zeitraum: 05/2003 - 04/2006</p> <p>Nanoscale Bimetallic Particles for In Situ Remediation Lehigh University, Zeitraum: 01/2002 - 12/2004</p>
	<p>Anwendungsfeld: Umweltauswirkungen</p> <p>Green Engineering of Dispersed Nanoparticles: Measuring and Modeling Nanoparticle Forces Pennsylvania State University - Main Campus Zeitraum: 02/2002 - 01/2004</p> <p>Implications of Nanomaterials Manufacture and Use: Development of a Methodology for Screening Sustainability BRIDGES to Sustainability, Rice University Zeitraum: 05/2003 - 04/2005</p>

Nanoforschung in der EU

Im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union werden rund 1,3 Mrd. Euro, das sind 7,5 Prozent der beantragten Forschungsgelder, für die vorrangigen Themenbereiche Nanotechnologieforschung und Nanowissenschaften, wissensbasierte multifunktionale Werkstoffe, neue Produktionsprozesse und Geräte reserviert. Insgesamt werden 3,42 Mrd. Euro für Projekte im Bereich „Industrial Technologies“ und „Materialien“ zur Verfügung gestellt. Darin spielen umweltfreundliche Technologien, wozu auch Anwendungen der Nanotechnologie gezählt werden, eine zentrale Rolle (*Europäische Kommission 2003*).

Die Schwerpunkte der Nanotechnologieforschung im 6. Rahmenprogramm sind - neben der langfristigen interdisziplinären Forschung zur Erweiterung des Kenntnisstandes - Ingenieurtechniken zur Entwicklung von Materialien und Komponenten und die Entwicklung von Steuer- und Kontrollgeräten und -instrumenten Anwendungen in Bereichen wie Medizin, Chemie, Optik, Energietechnik und Umwelttechnik (*VDI 2004/1*).

Im Hinblick auf das nächste Forschungsrahmenprogramm hat die Kommission in einer Mitteilung vom 12. Mai 2004 u. a. das Fehlen einer harmonisierten Innovationspolitik auf europäischer Ebene und ungünstige Rahmenbedingungen für Innovationen festgestellt. Vor diesem Hintergrund hat die Kommission folgende Strategie festgelegt:¹⁷

- ▶ geplante Budgetverdopplung für Nanotechnologien / neue Materialien für das 7. Forschungsrahmenprogramm (Laufzeit 2007-2013) (bisherige Mittel im 6. Rahmenprogramm: 1,3 Mrd. Euro),
- ▶ transnationale Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen,
- ▶ Hightech-Zentren für Spitzenforschungsinfrastruktur und interdisziplinäre Forscherausbildung,

- ▶ bessere Koordination nationaler EU-Forschungspolitiken,
- ▶ günstige Rahmenbedingungen für Technologietransfer und Innovation: Überführung von Forschungsexzellenz in Produkte und Prozesse,
- ▶ Förderung der öffentlichen Wahrnehmung hinsichtlich der Nanotechnologie und
- ▶ Einbeziehung der Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekte in der Nanotechnologieforschung.

Nanoforschung in Deutschland

In Deutschland fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Nanotechnologie seit Beginn der 1990er Jahre im Rahmen der Programme „Materialforschung“ und „Physikalische Technologien“ sowie „Laserforschung“ und „Optoelektronik“. In den letzten sechs Jahren hat das BMBF Verbundprojekte im Bereich der Nanotechnologie mit insgesamt 340 Mio. Euro gefördert. Dabei wurden die Ausgaben kontinuierlich gesteigert.

Auf Initiative des BMBF wurden seit 1998 acht Nano-Kompetenzzentren gegründet, die neben der Verbundförderung die Vernetzung der Forschung verbessern sollen¹⁸. Zu den Aufgaben der Kompetenzzentren gehören die Öffentlichkeitsarbeit, die Aus- und Weiterbildung, die Schaffung eines wirtschaftlich attraktiven Umfeldes sowie die Beratung von Interessenten vor allem aus der Industrie auf dem jeweiligen Gebiet der Nanotechnologie. Von Seiten des BMBF wird eine erste Koordinierung von FuE-Aktivitäten und Projektskizzen, sowie die Beratung von Antragstellern über die Zentren als sinnvoll erachtet. Die Tabelle 4 zeigt die thematischen Schwerpunkte und Fördersumme der Nanotechnologieförderung des BMBF für den Zeitraum 2002 bis 2005 (*Bachmann und Rieke 2004*).

¹⁷ Mitteilung unter:

www.cordis.lu/nanotechnology/src/communication.htm

¹⁸ Siehe unter www.kompetenznetze.de

Themenfeld: Nanomaterialien Schwerpunkte: Nanoanalytik, Nanobiotechnologie, Nanostrukturmaterialien, Nanochemie, CCN, Nanonachwuchswettbewerb, Nanochance Fördersumme: 2002: 19,2 2003: 20,3 2004: 32,7 2005: 38,1	Themenfeld: Kommunikationstechnologien Schwerpunkte: Quantenstruktursysteme, photonische Kristalle Fördersumme: 2002: 4,3 2003: 4,0 2004: 3,6 2005: 3,4
Themenfeld: Produktionstechnologien Schwerpunkte: Ultradünne Schichten, ultrapräzise Oberflächen Fördersumme: 2002: 0,2 2003: 0,8 2004: 2,2 2005: 2,2	Themenfeld: Nanoelektronik Schwerpunkte: EUVL, Lithografie, Maskentechnologie, eBiochips, Magnetoelektronik, SiGe-Bektronik Fördersumme: 2002: 19,9 2003: 25,0 2004: 44,7 2005: 46,2
Themenfeld: Optische Technologien Schwerpunkte: Nanooptik, Ultrapräzisionsbearbeitung, Mikroskopie, photonische Kristalle, Molekularelektronik, Diodenlaser, OLED Fördersumme: 2002: 18,5 2003: 25,2 2004: 26,0 2005: 26,0	Themenfeld: Nanobiotechnologie Schwerpunkte: Manipulationstechniken, funktionalisierte Nanopartikel, Biochips Fördersumme: 2002: 4,6 2003: 5,4 2004: 5,0 2005: 3,1
Themenfeld: Mikrosystemtechnik Schwerpunkte: Systemintegration, Nano-Sensorik, Nano-Aktorik, Energiesysteme Fördersumme: 2002: 7,0 2003: 7,0 2004: 9,4 2005: 10,2	Themenfeld: Innovations- und Technikanalyse Schwerpunkte: ITA-Studien Fördersumme: 2002: 0,2 2003: 0,5 2004: 0,2 2005: –
Summe über alle Themenfelder (in Mio. Euro) 2002: 73,9 2003: 88,2 2004: 123,8 2005: 129,2	

Tabelle 4: Thematische Schwerpunkte und Fördersumme der Nanoförderung des BMBF von 2002 bis 2005, in Mio. Euro (Bachmann und Rieke 2004)

Schließlich wurden zur Stärkung der Nanokompetenz in Deutschland vom BMBF Leitinnovationen zur Nanotechnologie identifiziert und ein Förderprogramm mit 250 Mio. Euro für die kommenden Jahre aufgelegt. Darin werden die folgenden Schwerpunkte gefördert:

- ▶ **NanoFab:** Ultrapräzise Hochdurchsatzfabrikation für die Nanoelektronik,
- ▶ **NanoLux:** effiziente Strahlquellen für innovative Lichtenwendungen,
- ▶ **NanoMobil:** Nanomaterialien und Nanotechnologie im Auto, und

- ▶ **Nano for Life:** Nanomaterialien und Nanobiotechnologie für LifeSciences und Gesundheit.
- ▶ Innerhalb des Rahmenprogramms „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft - WING“ wird der Schwerpunkt **NanoChem:** Chemische Nanotechnologien für neue Werkstoffe und Produkte gefördert.

Eine Recherche zu Forschungsprojekten in Deutschland mit klarem Bezug zur Nanotechnologie und Anwendungen in der Umwelttechnologie brachte keine Ergebnisse. Allerdings gibt es Forschungsprojekte z. B. zu Nachweisverfahren oder Filtersystemen auf Grundlage der Nanotechnologie, die auch in der Umwelttechnologie Anwendung finden könnten.

Nanoforschung der Industrie

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Industrie konzentrieren sich hauptsächlich auf Grundstoffe und Chemie - in diesem Bereich sind deutsche Unternehmen traditionell stark vertreten (*Harper 2002*). Dies bestätigt eine Patentauswertung (*siehe Reitberger in VentureCapital 2002, Hullmann 2001, eigene Recherche*): Ein Großteil des Geschäfts entfällt auf etablierte Konzerne wie BASF, Degussa, Henkel oder Siemens, die eigene Forschungsabteilungen beschäftigen und durch Ausgründungen mit neuen Kompetenzen und Technologien auf den Markt treten. Daneben gibt es Ausgründungen als Start-Ups an den Universitäten sowie Kooperationen zwischen großen Konzernen und den Hochschulen, um Wissen und Infrastruktur gemeinsam nutzen zu können (*vgl. die Degussa Projekthäuser¹⁹*). Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind hingegen bisher noch keine treibende Kraft in der Forschung und Entwicklung von Nanotechniksystemen. Die Gründe liegen in den hohen Investitionskosten für Personal und Infrastruktur, sowie in einer unzureichenden Kooperation und Zusammenarbeit von Unternehmen. Aufgrund der besonderen Anforderungen, die die Nanotechnologie an die Interdisziplinarität stellt, liegt es jedoch für KMU nahe, sich zu kooperativen Verbänden mit Kompetenzaufteilungen zusammenzuschließen.

Einen wichtigen Beitrag leisten in Deutschland zahlreiche kleinere und auch mittlere Nano-Unternehmen, die als Start-Ups gegründet wurden und gezielt spezialisierte Entwicklung vorantreiben. Zu ihren Geschäftsfeldern zählen eher die Herstell-, Analyse- und Gerätetechniken, während die großen Unternehmen verstärkt an Systemlösungen mit hohen Umsätzen interessiert sind (*Bachmann 2003/1*).

Markt

Informationen zur Abschätzung von Märkten, Marktgrößen, Patentsituation und Zeitspannen bis zur Kommerzialisierung sind äußerst begrenzt. In einer aktuellen Studie des VDI „Zukünftige Technologien Consulting für das BMBF“ wurden Anwendungs- und Marktperspektiven der Nanotechnologie für Produkte und Produktgruppen analysiert und bewertet. Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem Marktpotenzial in ausgewählten Lead-Märkten Chemie, Automobilbau, Optik, Medizin / Life Sciences und Elektronik. Aus Patentdaten wurden ebenfalls Anhaltspunkte für das Marktpotenzial abgeleitet. Zudem wurde die Umsetzung der Nanotechnologie in den deutschen Unternehmen in einer Umfrage erhoben und ausgewertet (*VDI 2004/2*). Dabei zeigte sich, dass der Bereich Chemie, einschließlich der Materialien, eindeutig an der Spitze der Nanotechnologiefirmen in Deutschland steht. Zentrale funktionale Eigenschaften sind durchaus klassische und anwendungsnahe Anforderungen wie verbesserte Werkstoffeigenschaften und Oberflächenfunktionalisierung (*Werner 2004*). Nach einer Studie der Business Communications Company Inc. (BCC) wird für den Bereich Nanofiltration und Membranen in dem Zeitraum 2005-2010 eine Steigerung um das zehnfache gegenüber heute erwartet (*in Royal Society 2004*). Für die Meerwasserentsalzung durch Nanofiltrationstechniken gibt BCC ein Marktvolumen für die nächsten 20 Jahre in Höhe von 70 Mrd. US \$ an (*in TAB 2004*).

Ein Einfluss der Nanotechnologie wird aber in nahezu allen Branchen erwartet (*Werner 2004*). Deutschland hat im europäischen Umfeld sicherlich die besten Voraussetzungen, mittel- und langfristig im Bereich der Nanotechnologie erfolgreich tätig zu sein (*Werner 2004*).

19 Siehe unter: www.creavis.com/site_creavis/de/default.cfm?content=projecthouses/mission

Technikfolgenabschätzung

Die Technikfolgen, die mit der Nanotechnologie verbunden sein können, wurden und werden bereits zu einem frühen Zeitpunkt analysiert und bewertet. Neben den Unternehmen, die Untersuchungen für ihre Produkte, die Nanotechnologie enthalten, durchführen, hat das BMBF als begleitende Maßnahme zur Förderung der Nanotechnologie eine Studie zu „Nanotechnologie und Nachhaltigkeit“ (BMBF 2002, Steinfeldt 2003, Steinfeldt et al. 2004) sowie zu „Nanotechnologie pro Gesundheit – Chancen und Risiken“ in Auftrag gegeben. Letztere betrachtet medizinische Anwendungen und gesundheitliche Auswirkungen von Nanotechnologien in Diagnose, Therapie und Prävention unter Berücksichtigung möglicher Nebenwirkungen (Farkas et al. 2004). Die US-amerikanische EPA hat ein Programm von vier Mio. US \$ aufgelegt, um die Umweltauswirkungen der Nanotechnologie zu untersuchen. Dem stehen allerdings rund 849 Mio. US \$ gegenüber, die für Nanoforschung und -entwicklung im Jahr 2004 bereitgestellt werden (Feder 2003). Wie die Tabelle 4 (Seite 46) zeigt, wurden in Deutschland in dem Förderzeitraum 2002–2005 gerade einmal durchschnittlich knapp 0,3 Prozent der Nanotechnologie-Projektförderung durch das BMBF für Fragen der Technikanalyse ausgegeben.

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag führt in seinem Abschlussbericht „Stand und Perspektiven der Nanotechnologie“ aus, dass der Forschungsstand zu den potenziellen Umwelt- und Gesundheitswirkungen bei der Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Verfahren und Produkte noch unbefriedigend ist. Aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen können sich Hemmnisse für die Markteinführung von Nanotechnologien ergeben, da die Gesellschaft aufgrund von „Nicht-Wissen“ generell die Nanotechnologie ablehnen könnte (TAB 2004).

Die Auswirkungen von Nanopartikeln auf die menschliche Gesundheit stehen zurzeit im Mittelpunkt. Untersucht werden deren Ausbreitung und Auswirkungen auf die menschlichen Organe, so zum Beispiel die Überwindung der Blut-Hirn-Schranke oder die möglichen Auswirkungen auf Zellfunktionen. Zum jetzigen Zeitpunkt kann weder eine Aussage zu der Gefährlichkeit der Nanopartikel, noch zu deren Ungefährlichkeit gemacht werden (Colvin 2003). Aber auch Untersuchungen, welche Konsequenzen sich aus dem Gebrauch und der Entsorgung eines Produktes mit Nanotechnologie ergeben könnten, und eine Berücksichtigung von Aspekten der integrierten Produktpolitik (IPP) fehlen. Ein Forschungsprojekt bei der U.S. Environmental Protection Agency ist bekannt, das an einem Ansatz zur Anwendung der Life Cycle Analysis in der Nanotechnologie arbeitet (Royal Society 2004). Auch fehlen für einige potenzielle Anwendungen von Nanotechnologie teilweise noch Erkenntnisse über die – sowohl positiven wie negativen – Langzeiteffekte und das Produktverhalten. Zudem machen fehlende Standards und Normen eine Bewertung schwierig.

Für die weitere Entwicklung und Betrachtung möglicher Chancen und Risiken ist eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Anwendungsfelder geboten. Pauschale Bewertungen werden der Vielfalt der Nanotechnologie nicht gerecht, vielmehr sollten in Einzelprüfungen frühzeitig und objektiv potenzielle Chancen und Risiken vor dem konkreten Anwendungshintergrund abgeschätzt werden. Bei der DECHEMA hat sich z. B. der DECHEMA / VCI-Arbeitskreis „Responsible Production and Use of Nanomaterials“²⁰ mit dem Ziel gebildet, Chancen aber auch mögliche Risiken der Chemischen Nanotechnologie zu identifizieren und durch Initiierung geeigneter Maßnahmen die wirtschaftlich und technologisch erfolgreiche Umsetzung unter Berücksichtigung ethischer, ökologischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte zu fördern.

²⁰ Siehe unter www.dechema.de/NANOSAFETY.html

Informationen & Adressen

Ansprechpartner für Technologieberatung Umwelt- bzw. Nanotechnologie in Hessen

Aktionslinie hessen-umweltech

- ▶ Kompetenzdarstellung im In- und Ausland
- ▶ Informationsvermittlung zur Stärkung der Kompetenzen
- ▶ Vernetzung von Technologien
- ▶ Technologiemarketing
- ▶ Förder- und Standortberatung sowie Projektbegleitung

Kontakt:

www.hessen-umweltech.de

HA Hessen Agentur GmbH
Alfred Stein

Projektleiter hessen-umweltech
Abraham-Lincoln-Straße 38-42
D-65189 Wiesbaden
Telefon +49 (0) 6 11 / 7 74-86 48
Telefax +49 (0) 6 11 / 7 74-86 20
alfred.stein@hessen-agentur.de

Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung
Maria Rieping
Kaiser-Friedrich-Ring 75
D-65185 Wiesbaden
Telefon +49 (0) 6 11 / 8 15-24 72
Telefax +49 (0) 6 11 / 8 15-22 28
maria.rieping@hmvvl.hessen.de

Aktionslinie hessen-nanotech

- ▶ Kompetenzdarstellung im In- und Ausland
- ▶ Informationsvermittlung
- ▶ Projekt- und Unternehmensentwicklung
- ▶ Technologie- und Standortmarketing
- ▶ Förder- und Standortberatung

Kontakt:

www.hessen-nanotech.de

HA Hessen Agentur GmbH
Alexander Bracht

Projektleiter hessen-nanotech
Abraham-Lincoln-Straße 38-42
D-65189 Wiesbaden
Telefon +49 (0) 6 11 / 7 74-86 14
Telefax +49 (0) 6 11 / 7 74-86 20
alexander.bracht@hessen-agentur.de

Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung
Dr. Rainer Waldschmidt
Kaiser-Friedrich-Ring 75
D-65185 Wiesbaden
Telefon +49 (0) 6 11 / 8 15-24 71
Telefax +49 (0) 6 11 / 8 15-22 28
rainer.waldschmidt@hmvvl.hessen.de

TechnologieTransferNetzwerk TTN-Hessen

- ▶ Transparenz in Technologieangebot in Hessen
- ▶ Vernetzung des Angebots der Transfereinrichtungen, Abstimmung mit den Anforderungen der Unternehmen
- ▶ Unterstützung von Unternehmern bei der Optimierung des Innovationsprozesses
- ▶ Dialog zwischen Wissenschaftlern und Unternehmen
- ▶ Präsentation des technologischen Know-hows der Experten aus Hochschule und Forschung in einem virtuellen Technologie- und Kompetenzmarkt

Kontakt:

www.ttn-hessen.de

HA Hessen Agentur GmbH

Dr. Gerrit Stratmann
Projektkoordination
Abraham-Lincoln-Straße 38-42
65189 Wiesbaden
Telefon +49 (0) 6 11 / 7 74-86 91
Telefax +49 (0) 6 11 / 7 74-86 20
gerrit.stratmann@hessen-agentur.de

NanoNetzwerkHessen - NNH10⁹

- ▶ Abstimmung der Hochschul-Aktivitäten in Forschung und Lehre
- ▶ Gemeinsame Nutzung von Geräten und Infrastruktur
- ▶ Nutzung des Synergiepotenzials für gemeinsame Forschungsanträge
- ▶ Aufbau eines leistungsfähigen Nano-Forums Wissenschaft-Wirtschaft und Initiierung kooperativer Transferobjekte
- ▶ Gemeinsamer öffentlicher Auftritt

Kontakt:

www.nanonetzwerkessen.de

Dr. Beatrix Kohnke
Leitung der Geschäftsstelle
Mönchebergstraße 19
34109 Kassel
Telefon +49 (0) 5 61 / 8 04-22 19
Telefax +49 (0) 5 61 / 8 04-22 26

Kompetenznetzwerke der Nanotechnologie in Hessen

<p>NanoNetzwerkHessen</p> <p>Koordinierung der Forschung durch Vernetzung der hessischen Universitäten und Fachhochschulen</p> <p>www.nanonetzwerkhessen.de</p>	<p>WZMW - Wissenschaftliches Zentrum für Materialwissenschaften der Philipps-Universität Marburg</p> <p>Forschungsschwerpunkt Materialwissenschaften mit den Fachbereichen Chemie, Geowissenschaften und Physik an der Universität Marburg</p> <p>www.uni-marburg.de/wzmw/</p>
<p>CINsaT - Center for interdisciplinary Nanostructure Science and Technology</p> <p>Kooperation aus Wissenschaftler(innen) der Physik, Chemie, Biologie und Elektrotechnik an der Universität Kassel</p> <p>www.cinsat.uni-kassel.de</p>	

Universitäten und Fachhochschulen: Wissenschaftliche Koordinatoren für das NanoNetzwerkHessen

<p>Koordination</p> <p>Dr. Beatrix Kohnke Entwicklungsplanung, E2 Mönchebergstraße 19, 34125 Kassel Telefon 05 61 / 8 04-22 19, Telefax 05 61 / 8 04-22 26 beatrix.kohnke@uni-kassel.de</p>	<p>Philipps-Universität Marburg</p> <p>Prof. Dr. Andreas Greiner Fachgebiet Makromolekulare Chemie, Fachbereich Chemie Hans-Meerwein-Straße, Gebäude H, 35032 Marburg Telefon 064 21/28-25 573, -25 777, Telefax 0 64 21/28-25 785 greiner@staff.uni-marburg.de</p>
<p>Technische Universität Darmstadt</p> <p>Prof. Dr. Matthias Rehahn Fachgebiet Makromolekulare Chemie Fachbereich 07 Petersenstraße 22, 64287 Darmstadt Telefon 0 61 51 / 16-52 78, Telefax 0 61 51 / 16-46 70 mrehahn@dkf.tu-darmstadt.de</p>	<p>Fachhochschule Darmstadt</p> <p>Prof. Dr. Ralph Stengler Fachgebiet Automatisierungstechnik, Messtechnik, Werkstoffkunde im Fachbereich Kunststofftechnik Berliner Allee 61, 64295 Darmstadt Telefon 0 61 51 / 16 85 62, Telefax 06 61 / 16 89 77 stengler@fh-darmstadt.de</p>
<p>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main</p> <p>Prof. Dr. Robert Tampé Fachgebiet Chemie / Biologie Institut für Biochemie Marie-Curie-Straße 9, 60439 Frankfurt am Main Telefon 0 69/7 98-2 94 75/-2 94 76, Telefax 0 69/7 98-2 94 95 tampe@em.uni-frankfurt.de</p>	<p>Fachhochschule Frankfurt am Main</p> <p>Prof. Dr. Werner Liedy (Ansprechpartner) Fachbereich 2 Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main Telefon 0 69 / 15 33-22 89, Telefax 0 69 / 15 33-23 87 liedy@fb2.fh-frankfurt.de</p>
<p>Justus-Liebig-Universität Gießen</p> <p>Prof. Dr. Bruno K. Meyer Fachgebiet Experimentalphysik 1 I. Physikalisches Institut der Universität Gießen Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen Telefon 06 41 / 99-33 100, Telefax 06 41 / 99-33 109 Bruno.K.Meyer@exp1.physik.uni-giessen.de</p>	<p>Fachhochschule Gießen-Friedberg</p> <p>Prof. Dr. Ubbo Ricklefs Fachgebiet Technische Mechanik, Photonik, Bildverarbeitung Fachbereich Elektrotechnik I Wiesenstraße 14, 35390 Gießen Telefon 06 41 / 3 09 19 14 ubbo.ricklefs@ei.fh-giessen.de</p>
<p>Universität Kassel</p> <p>Prof. Dr. Hartmut Hillmer Fachgebiet Technische Elektronik Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik Heinrich-Plett-Straße 40, 34132 Kassel Telefon 05 61 / 8 04-48 85, Telefax 05 61 / 8 04-44 88 hillmer@uni-kassel.de</p>	<p>Fachhochschule Fulda</p> <p>Prof. Dr. Alexander Osipowicz Fachgebiet Physik Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik Marquardstraße 35, 36039 Fulda Telefon 06 61 / 96 40-5 56, Telefax 06 61 / 96 40-5 59 alexander.osipowicz@et.fh-fulda.de</p>
	<p>Fachhochschule Wiesbaden</p> <p>Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer Fachbereich 10 - Physikalische Technik Am Brückweg 26, 65428 Rüsselsheim Telefon 0 61 42 / 8 98-5 12, Telefax 0 61 42 / 8 98-5 28 bauer@physik.fh-wiesbaden.de</p>

Auswahl der universitären Forschung in Hessen auf dem Gebiet der Nanotechnologie

Nanosystemtechnik	Technische Universität Darmstadt Fachhochschule Wiesbaden
Nanofunktionswerkstoffe	Technische Universität Darmstadt Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main Universität Kassel
Nanostrukturierte Werkstoffe	Technische Universität Darmstadt
Materialentwicklung	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main
Nanomaterialien	Justus-Liebig-Universität Gießen Universität Kassel
Molekulare Materialien	Universität Kassel
Laterale Nanostrukturen	Universität Kassel
Nanostrukturierung	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main Universität Kassel
Ultradünne funktionale Schichten	Fachhochschule Wiesbaden
Molekulare Architekturen	Universität Kassel
Nanomaterialchemie	Philipps-Universität Marburg
Halbleiterstrukturen	Philipps-Universität Marburg
Theoretische Physik	Universität Kassel
Nanoelektronik	Technische Universität Darmstadt
Nanomagnetik	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main
Magnetische Nanosysteme	Universität Kassel
Optoelektronik	Philipps-Universität Marburg Universität Kassel
Nanooptik	Technische Universität Darmstadt Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main Justus-Liebig-Universität Gießen Fachhochschule Gießen-Friedberg
Nanosensorik	Technische Universität Darmstadt Justus-Liebig-Universität Gießen Universität Kassel Philipps-Universität Marburg Fachhochschule Gießen-Friedberg Fachhochschule Wiesbaden
Nanostrukturanalyse	Technische Universität Darmstadt
Vermessung und Analyse von Nanostrukturen	Universität Kassel
Nanochemie	Justus-Liebig-Universität Gießen
Formulierung von Photokatalysatoren	Fachhochschule Frankfurt
Chemie mesoskopischer Systeme	Universität Kassel
Prozessentwicklung und Analytik	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main
Nanoanalytik	Justus-Liebig-Universität Gießen Fachhochschule Wiesbaden
Nanobiotechnologie	Justus-Liebig-Universität Gießen Philipps-Universität Marburg
Nanomolekularmedizin	Justus-Liebig-Universität Gießen
Nanomedizin	Justus-Liebig-Universität Gießen Philipps-Universität Marburg
Mikrochips in der Diagnostik	Philipps-Universität Marburg
Nanopharmakologie	Justus-Liebig-Universität Gießen Philipps-Universität Marburg
VUV-Spektroskopie	Justus-Liebig-Universität Gießen
Nanophonetik	Universität Kassel
Vermessung von schwingenden Nano-Oberflächen	Fachhochschule Gießen-Friedberg

Teilnehmer aus Hessen in den Nano-Kompetenzzentren des BMBF

CC-NanoBioTech

Kompetenzzentrum Nanobiotechnologie

Akteure aus der Industrie / KMU: Keine

Kontakt:

www.cc-nanobiotech.de

CC-NanoBioTech

Universität Kaiserslautern

Fachbereich Physik

Prof. Dr. Christiane Ziegler

Erwin-Schrödinger-Straße 56

D-67663 Kaiserslautern

CC-NanoChem Kompetenzzentrum Nanotechnologie

Akteure aus der Industrie / KMU:

- ▶ Adam Opel AG, Rüsselsheim
- ▶ Degussa AG, Hanau
- ▶ Lurgi AG, Frankfurt am Main
- ▶ Merck KGaA, Darmstadt
- ▶ Siemens AG, Frankfurt am Main (ehemals Siemens Axiva)
- ▶ W.C. Heraeus GmbH, Hanau
- ▶ DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
- ▶ Technische Universität Darmstadt

Kontakt:

www.cc-nanochem.de

CC-NanoChem

c/o Leibniz-Institut für Neue Materialien

Prof. H. Schmidt

Im Stadtwald - Geb. 43

D-66123 Saarbrücken

Kompetenzzentrum Nanoanalytik

Akteure aus der Industrie / KMU:

- ▶ Nanosensors, Wetzlar
- ▶ Omicron NanoTechnology GmbH, Taunusstein-Neuhof
- ▶ Oxford Instruments GmbH, Wiesbaden
- ▶ Telekom Technologiezentrum, Darmstadt
- ▶ Focus GmbH, Hünstetten
- ▶ Universität Kassel

Kontakt:

www.centech.de

CeNTech GmbH - Münster

Dr. Frank Schröder-Oeynhausen

Gievenbecker Weg 11

D-48149 Münster

Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung

Akteure aus der Industrie / KMU:

- ▶ NTG Neue Technologien GmbH & Co. KG, Gelnhausen

Kontakt:

www.upob.de

CCN Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V. -

Braunschweig

Dr. Uwe Brand

Bundesallee 100

D-38116 Braunschweig

NanoMat

Akteure aus der Industrie / KMU:

- ▶ Degussa AG, Hanau
- ▶ DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
- ▶ Merck KGaA, Darmstadt
- ▶ SusTech, Darmstadt
- ▶ Technische Universität Darmstadt

Kontakt:

www.nanomat.de

Nanomat - Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Dr. Regine Hedderich

Postfach 3640

D-76021 Karlsruhe

NanOp - Nanotechnologie für die Optoelektronik

Akteure aus der Industrie / KMU:

- ▶ Akzo Nobel HPMO, Marburg

Kontakt:

www.nanop.de

Institut für Festkörperphysik

Technische Universität Berlin

Sekr. PN 5-6

Matthias Kuntz

Hardenbergstraße 36

D-10623 Berlin (Germany)

Ultradünne funktionale Schichten Sachsen

Akteure aus der Industrie / KMU:

- ▶ Merck KGaA, Darmstadt
- ▶ Leica Microsystems GmbH, Wetzlar
- ▶ Leybold Systems GmbH, Hanau
- ▶ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt am Main

Kontakt:

www.nanotechnology.de

Geschäftsstelle des Nano-CC-UFS im Fraunhofer IWS
Dresden

Dr. Ralf Jäckel

c/o Fraunhofer IWS Dresden

Winterbergstraße 28

D-01277 Dresden

(Stand 2004, z. T. aktualisiert)

Internetlinks zur Nanotechnologie

Aktionslinie „hessen-nanotech“	Kompetenznetzwerke in der Nanotechnologie in Deutschland
www.hessen-nanotech.de	www.kompetenznetze.de/navi/de/Innovationsfelder/nanotechnologie.html
Plattform zur Nanotechnologie in Hessen	Informationsserver (Cordis) der EU zur Nanotechnologie im 6. Rahmenprogramm
www.nanotech-hessen.de	www.cordis.lu/nanotechnology/
HA Hessen Agentur GmbH	Internetportal „Nanoforum“ zu den Nanotechnologieaktivitäten innerhalb der EU
www.hessen-agentur.de	www.nanoforum.de
NanoNetzwerkHessen	Internetportal der Nanotechnologie Gemeinschaft
www.nanonetzwerkhessen.de	www.nanoscout.de
TTN-Hessen - TechnologieTransferNetzwerk-Hessen	National Nanotechnology Initiative (NNI) in den USA
www.ttn-hessen.de	www.nano.gov
Portal des BMBF und VDI zur Nanotechnologie	Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN) in den USA
www.techportal.de/de/b/2/start,public,start/	www.ruf.rice.edu/~cben/
Publikationsseite des BMBF	News-Portal zur Nanotechnologie
u. a. Studien zu Nanotechnologie	www.nano.ivcon.org
www.bmbf.de/publikationen/index.php	Startseite des National Center For Environmental Research der U.S. Environmental Protection Agency (EPA)
Kompetenzzentrum des BMBF	http://es.epa.gov/ncer/
▶ „Anwendung von Nanostrukturen in der Optoelektronik“	
www.nanop.de	
▶ „Ultradünne funktionale Schichten“	
www.nanotechnology.de	
▶ „Nanotechnologie: Funktionalität durch Chemie“	
www.cc-nanochem.de	
▶ „Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung“	
www.upob.de	
▶ „Nanoanalytik“	
www.nanoscience.de	
▶ „Nanomaterialien“	
www.nanomat.de	

