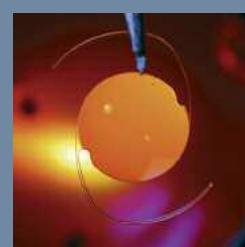
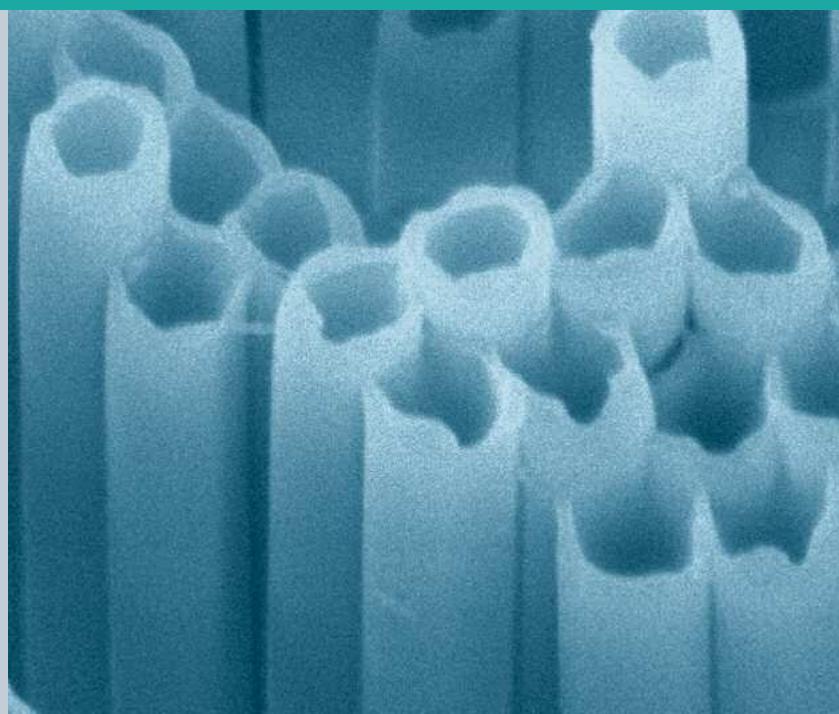




Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie

Innovationspotenziale für Unternehmen



An **Hessen** führt kein Weg vorbei.

Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie

Innovationspotenziale für Unternehmen

Band 1 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech
sowie der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Umwelttech

Impressum

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

Band 1 der Schriftenreihen 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:

Sebastian Hummel, Maria Rieping (HMWVL)
Dr. Carsten Ott, Dagmar Dittrich, (HA, Hessen-Umwelttech)
Alexander Bracht, Markus Lämmer, (HA, Hessen-Nanotech)

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 Veröffentlichung
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: Druckerei ausDRUCK, Kassel
Titelbild: Bündel von Nanoröhrchen
(Quelle: Philipps-Universität Marburg)

www.hessen-nanotech.de
www.hessen-umwelttech.de

2. aktualisierte Auflage: Oktober 2009



Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Umweltschutz und erneuerbare Energien gehören bereits heute zu den wichtigsten Zukunftsbranchen. Mit deutschlandweit rund 4,5 Prozent aller Erwerbstätigen sind dort mehr Menschen tätig als im Fahrzeugbau oder im Ernährungsgewerbe. Hessen gehört in Sachen Umwelt- und Energietechnologie mit über 77 000 Beschäftigten in über 2 400 Betrieben zur Spitze in Deutschland.

Die Nanotechnologie ermöglicht, diese erfolgreiche Entwicklung fortzusetzen. Die gezielte Nutzung und Beeinflussung physikalischer und chemischer Eigenschaften kann Innovationen hervorbringen, die in alle Lebensbereiche hineinwirken. Auf allen Teilgebieten 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) hessische Hochschulen bei der Initiierung von Kooperationen mit hessischen Unternehmen. Mit über 150 Nanotechnologieunternehmen und rund 80 forschenden Hochschulgruppen hat Hessen eine europäische Spitzenposition inne.

Die Nanotechnologie ist als Querschnittstechnologie in der Lage, anderen Technologien zu Entwicklungssprüngen zu verhelfen. In solchen Entwicklungssprüngen liegt der Schlüssel zum Erfolg in Zeiten wachsender und sich wandelnder Märkte. Deshalb wollen wir mit der vorliegenden Veröffentlichung getreu dem Motto „Stärken stärken“ die in Hessen vorhandenen Kompetenzen in der Nanotechnologie mit der herausragenden Marktposition der Umwelttechnologieunternehmen zusammenführen. Eine wichtige Rolle spielen dabei die mittelständischen Firmen. Ihre Innovationskraft und ihr Marktverständnis sind die Hebel, die wir ansetzen müssen. Nur gemeinsam mit dem Mittelstand kann Hessen auch zukünftig eine starke Position im internationalen Wettbewerb einnehmen.

Ich hoffe, dass wir Ihr Interesse an der Nanotechnologie wecken können und Sie die Möglichkeiten entdecken, auf ihrer Basis neue oder optimierte umwelttechnologische Produkte zu entwickeln.

Ihr

Dieter Posch

Hessischer Minister für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung

Inhalt

Vorwort	1
Zusammenfassung	4
Einleitung - Warum diese Unternehmerbroschüre?	7
1 Einführung in die Nanotechnologie	9
1.1 Definition der Nanotechnologie	9
1.2 Innovationspotenziale der Nanotechnologie	10
1.3 Funktionalitäten der Nanotechnologie	14
Mechanische Funktionalitäten	14
Thermodynamische / thermische Funktionalitäten	14
Geometrische Besonderheiten	14
Elektrische Funktionalitäten	15
Magnetische Funktionalitäten	15
Optische Funktionalitäten	15
Chemische Funktionalitäten	15
Biologische Funktionalitäten	15
1.4 Forschungs- und Anwendungsstand	16
Anwendungsbeispiele der Nanotechnologie	16
Entwicklungsstand	17
Nanotechnologieforschung	18
Akteure in Hessen	19
1.5 Forschungsprogramme und Markt	19
1.6 Technikfolgenabschätzung	20

2 Anwendungspotenziale und Anwendungsfelder der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie	21
2.1 Aufgaben und Anwendungsfelder der Umwelttechnologie	21
2.2 Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie	24
Technologiebereich Wasser/ Abwasser	25
Technologiebereich Abfall/ Recycling	25
Technologiebereich Energie, Luftreinhaltung, Klimaschutz	26
Technologiebereich Integrierte Produktpolitik (IPP)	26
Technologiebereich Analytik, Mess-/ Steuer-/ Regeltechnik (MSR)	27
Bewertung der Funktionalitäten und der Technologiebereiche	27
2.3 Gegenüberstellung der Anwendungsfelder mit der Branchenstruktur der Umwelttechnologiefirmen in Hessen	29
2.4 Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie	30
Anwendungsgebiet Filtration (Filter, Membran)	30
Anwendungsgebiet Schadstoffrückhaltung	32
Anwendungsgebiet Katalytischer Schadstoffabbau	33
Anwendungsgebiet Nanosensoren (Lab-on-Chip-Systeme)	35
3 Innovationspotenziale und Ansatzpunkte des Technologietransfers	36
Anhang	41
Literatur	41
Nano-Forschungsprojekte	45
Informationen & Adressen	48
Schriftenreihe	52

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 gezielt aufzubauen. Hierzu zählen z. B. mechanische, chemische oder geometrische Eigenschaften von Partikeln oder Oberflächen, die in Produktionsystemen 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 F&E-Arbeit notwendig. Erste Produktinnovationen haben aber bereits ihren Weg in den Markt gefunden (siehe Abbildung 9, Seite 18). Beispielsweise kommen in Antihaft-Beschichtungen in Klimaanlagen, Korrosionsschutz von Metallteilen oder in antimikrobiellen Ausrüstungen Nanotechnologien zum Einsatz, oder Nanofäden optimieren neue Filtersysteme.*

Die Umwelttechnologie ist mittlerweile eine treibende Kraft der Nano-Forschung. Forschungsprogramme des BMBF im Umweltschutz (NanoNature) oder die Innovationsallianzen zu den Lithium-Ionen-Batterien und den Carbon Nano Tubes wollen die Potenziale der Nanomaterialien gezielt für

umweltfreundliche Anwendungen und Fragen des Umweltschutzes wie Wasserreinigung, Energieversorgung, Leichtbau oder Sensorik nutzen. Verschiedene Indikatoren, die den Einfluss der Nanotechnologie für die Umwelttechnik verdeutlichen, wie Forschungsförderung, Patente, Wagniskapital oder die Anzahl von Start-Ups zeigen ein Wachstum an und machen deutlich, dass der bisher eher geringe Einfluss zunimmt und das „Spiel beginnt“ (Lux Research 2007).

Das Innovationspotenzial der Nanotechnologie für die Umwelttechnik greifen auch die folgende vielfältigen Initiativen und Studien auf: So hat bspw. das Bundesumweltministerium (BMU) in einem NanoDialog eine Nanokommission als dialogorientiertes Gremium für die Bundesregierung berufen. Diese Nanokommission mit Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Gewerkschaften, Verbraucher- und Umweltverbänden sowie staatliche Vertreter aus Bund und Ländern zeigte in Arbeitsgruppen die Chancen und mögliche Risiken der Nanotechnologie auf und gab Empfehlungen für den verantwortungsvollen Umgang mit der neuen Technologie. Ebenso werden in der Nano-Strategie der Bundesregierung, dargestellt in der „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“ des BMBF, Branchendialoge u. a. mit der Umweltbranche vorgeschlagen (BMBF 2006). Diese Dialoge adressieren die konkurrenzfähige Umsetzung von Erkenntnissen aus Forschung und Entwicklung in standortrelevante Produkte. Die Bekanntmachung des Förderprogramms „NanoNature“ des BMBF ist ein Umsetzungsbeispiel der Nanostrategie.

Auf EU-Ebene wurden z. B. zukünftige Anwendungen der Nanotechnologie in der Roadmap der Technologieplattform SusChem explizit adressiert. Entwicklungslinien werden darin für den Energie-, Transport- und Umweltbereich aufgezeigt, die auch auf Nanotechnologie aufbauen.

Und schließlich zählt Nanotechnologie nach einem Memorandum für einen „New Deal“ von Wirtschaft,

* Die Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech zeigt die verschiedenen Anwendungen der Nanotechnologie in den einzelnen Branchen und Anwendungsfeldern Medizintechnik und pharmazeutische Industrie, Automobil, Optik, Architektur und Bauwesen, Produktion und Energie, Mikrosystemtechnologie usw.

Umwelt und Beschäftigung explizit zu den Technologien mit echten Potenzialen für eine leitmarktorientierte ökologische Industriepolitik (BMU 2006). Aufgrund der Eigenschaften der Nanotechnologie sind viele technologische Innovationen in der Umwelttechnologie denkbar: Mechanische, chemische und biologische Funktionalitäten 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 3, Seite 28).

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,
- ▶ Umweltschadstoffe oder andere Substanzen gezielt und hochspezifisch erfasst und analysiert werden sollen, 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 Technologieeinrichtungen in Hessen (siehe Seite 50) durch das Unternehmen Wissen aufgebaut werden, um das Einsatzpotenzial abzuschätzen.

Untersuchungen für die erste Auflage 2005 dieser Unternehmerbroschüre haben gezeigt, dass die Nanotechnologie in der Umwelttechnologiebranche damals noch weitgehend unbekannt war. Heute besteht die Herausforderung darin, die vielfältigen konkreten Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie für die Umwelttechnik zu verdeutlichen und die relevanten Akteure zusammenzuführen. So ist die Forschung in der Nanotechnologie derzeit in vielen Teilen noch stark durch die technischen Möglichkeiten getrieben, während in der Umwelttechnologie problemorientiert vorgegangen wird. Beide Ansätze müssen in Wertschöpfungsketten zusammengeführt werden, um innovative Produkte und Dienstleistungen zu realisieren – die Potenziale dafür sind vorhanden.

Hessen ist sowohl in der Nano- als auch der Umwelttechnologie gut positioniert. Auf allen Teilstufen 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 10
- Abbildung 6, Seite 11

Was kann die Nanotechnologie?

- Kapitel 1.3, Seite 14

Welche Anwendungen gibt es bereits, und was kommt noch?

- Kapitel 1.4, Seite 16
- Abbildung 9, Seite 18

Welche Anwendungen sind in der Umwelttechnologie denkbar?

- Tabelle 2, Seite 22
- Tabelle 3, Seite 28

Was sind konkrete Anwendungsbeispiele in der Umwelttechnologie?

- Kapitel 2.4, Seite 30

Wie können Unternehmen der Umwelttechnologie vorgehen?

- Kapitel 3, Seite 36

Wer sind die Ansprechpartner in Hessen?

- Informationen & Adressen, Seite 48

Einleitung - Warum diese Unternehmerbroschüre?

Die Nanotechnologie wird zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gezählt. 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 beendet wird (ultraphob) und an der Flüssigkeiten und Schmutz nicht anhaftet. Dieser Effekt wird auch als Lotuseffekt bezeichnet, wenn auch die strukturierte und mit einer Wachsschicht versehene Oberfläche der Lotuspflanze sich im µm-Bereich bewegt. Ziel der Pflanze ist es, dass die Wassertropfen leicht abrollen können und so den Schmutz auf der Blattoberfläche „mitnehmen“. Durch neue Verfahren können diese Strukturen jedoch mittlerweile im nm-Bereich erzeugt werden (siehe Broschüre „NanoProduktion“, Band 6 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech) und so superhydrophobe Eigenschaften erzielt werden. Dieses bekannte Beispiel des Lotuseffekt zeigt aber auf anschauliche Art und Weise auf, wie Effekte der Natur durch Nanotechnologie nachgeahmt werden können. (siehe beispielhaft den Lotuseffekt in Abbildung 1).

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

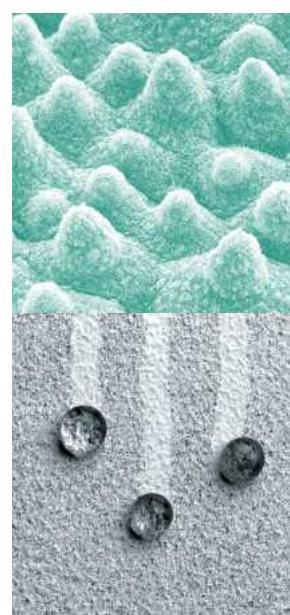
dann auf makroskopischer Ebene integriert werden und zu neuen komplexen Produktsystemen zusammengefügt werden können (Abbildung 3, Seite 8).

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.

Die Umwelttechnologie hat bereits heute ein weltweites Marktvolumen von rd. 1400 Mrd. Euro, bis zum Jahr 2020 werden dann 3100 Mrd. Euro vorausgesagt, mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von über 6,5 Prozent (BMU 2009). Ihr Einsatz- und Wachstumspotenzial macht die Umwelttechnologie damit zu einem attraktiven Anwendungsfeld und Wirtschaftsfaktor für die Nanotechnologie.

Der Export innovativer Umwelttechnologie bietet große Chancen für hessische Unternehmen. Innovationen der Nanotechnologie in den Bereichen Werkstofftechnik, Verfahrenstechnik, Biotechnologie, Mikrotechnik oder Informationstechnologie kommen zudem auch der Umwelttechnologie zugute. Hierzu zählen z. B. energieeffizientere Beleuchtungssysteme, festere und leichtere Materialien, deutlich verbesserte chemische und biologische Sensoren oder spezifische Oberflächeneigenschaften.

Abbildung 1: Oben: 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). Unten: Fassadenfarbe Lotusan®, die sich dank Lotus-Effect® mit Regen selbst reinigt (Quelle: sto AG)



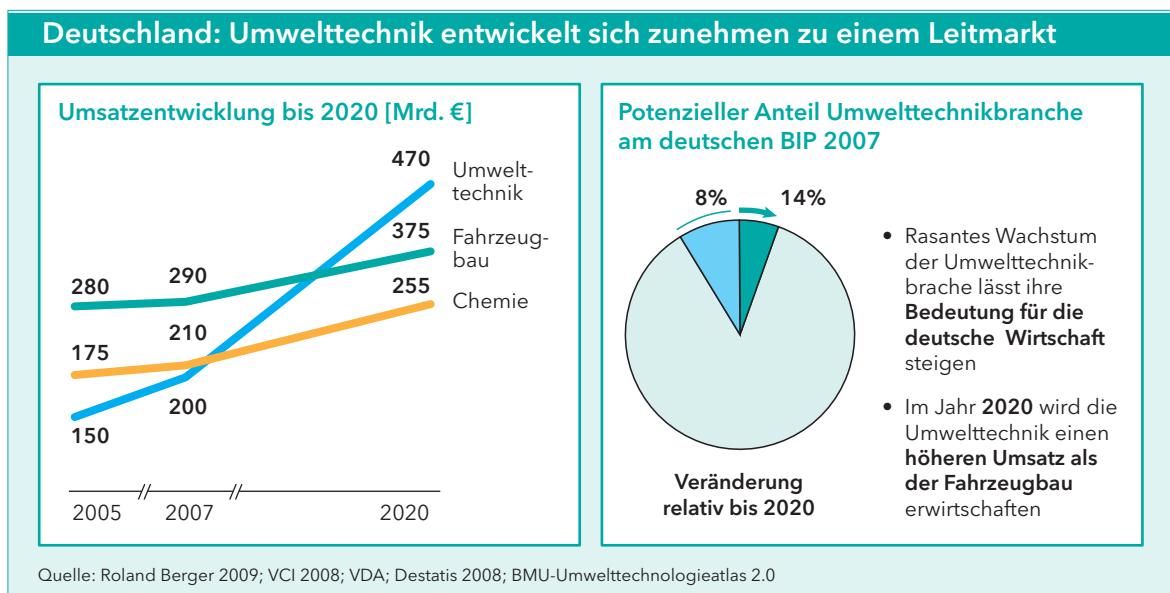


Abbildung 2:
Märkte für Umwelttechnologien
(Berger 2009)

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.

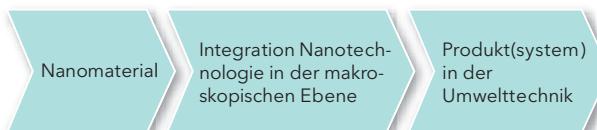


Abbildung 3: Wertschöpfungskette und Integration der Nanotechnologie

Für die erste Auflage der Unternehmerbroschüre wurden ausgewählte Experten aus der Nanotechnologie sowie der Umwelttechnologie zu ihren Erfahrungen befragt. Ihre Aussagen sind anonymisiert in Inhalten und Ergebnisse dieser Unternehmerbroschüre eingeflossen und geben einen Einblick in den Stand der Nanotechnologie sowie deren Anwendungsmöglichkeiten in der Umwelttechnologie in Hessen. In die nun vorliegende Auflage sind neue Erkenntnisse und Anwendungsbeispiele aus aktuellen Studien eingeflossen. Die Broschüre erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr soll die Anwendungsbreite und das Lösungspotenzial der Nanotechnologie für die Umwelttechnik aufgezeigt und so eine vertiefte Analyse der jeweiligen konkreten Anwendungsmöglichkeiten initiiert werden.

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“

Eine weitere Beschreibung findet sich in der neuen Internationalen Technischen Spezifikation ISO/TS 27687, die auch vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V. als DIN CEN ISO/TS 27687¹ mit dem Titel „Nanotechnologien - Terminologie und Begriffe für Nanoobjekte - Nanopartikel, Nanofaser und Nanoplättchen“ herausgebracht wurde: Darin wird der Maßstab der Nanoskaligkeit für den Größenbereich etwa 1 nm bis 100 nm angegeben. Ein Nanoobjekt ist ein Material mit einem, zwei oder drei Außenmaß(en) im Nanomaßstab. Hierzu zählen die Nanopartikel (in drei Dimensionen nanoskalig), Nanofasern (in zwei Dimensionen nanoskalig) und Nanoplättchen (in einer Dimension nanoskalig).

Nanotechnologie² beruht auf den Erkenntnissen und Möglichkeiten, die Eigenschaften und Strukturen von Materialien auf supramolekularer Ebene gezielt zu beeinflussen. Nanopartikel zeigen so bspw. das Verhalten von Materie im atomaren und subatomaren Bereich. Hierbei können sich elektrische Zustände, Transparenz, Farbe oder Reaktivität ändern. 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).

Gemeinhin wird die Beeinflussung von Strukturen unterhalb 100 nm Ausdehnung als Arbeitsbereich der Nanotechnologie angesehen (siehe Größenvergleich in Abbildung 4). 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 Raum³.

► **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 integrieren⁴.

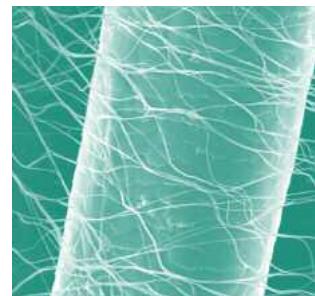


Abbildung 4: Nanofasern (quer verlaufend) im Vergleich zu einem menschlichen Haar (senkrecht) unter dem Elektronenmikroskop
(Quelle: Philipps-Universität Marburg)

1 Bezeichnung der DIN: DIN CEN ISO/TS 27687:2008-11: Nanotechnologien - Terminologie und Begriffe für Nanoobjekte - Nanopartikel, Nanofaser und Nanoplättchen (ISO/TS 27687:2008); Deutsche Fassung CEN ISO/TS 27687:2008, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

2 Die Bezeichnung „Nano“ leitet sich von der Größenordnung des betrachteten Bereichs ab, dem Nanometer (nm = 10⁻⁹ m). Das Wort „Nano“ kommt aus dem Griechischen und heißt „Zwerg“.

3 Der US-Amerikaner Richard Feynman (1918 – 1988), Professor für theoretische Physik, der 1965 den Nobelpreis für seine Arbeit auf dem Gebiet der Quantenelektro-

dynamik bekam, wies auf die unbegrenzten Möglichkeiten der Miniaturisierung hin: „There is plenty of room at the bottom“. In atomarer Dimension sei auf einem Stecknadelkopf genügend Platz für das gesamte Wissen der Menschheit (Hullmann 2001 und Bachmann 1998).

4 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.

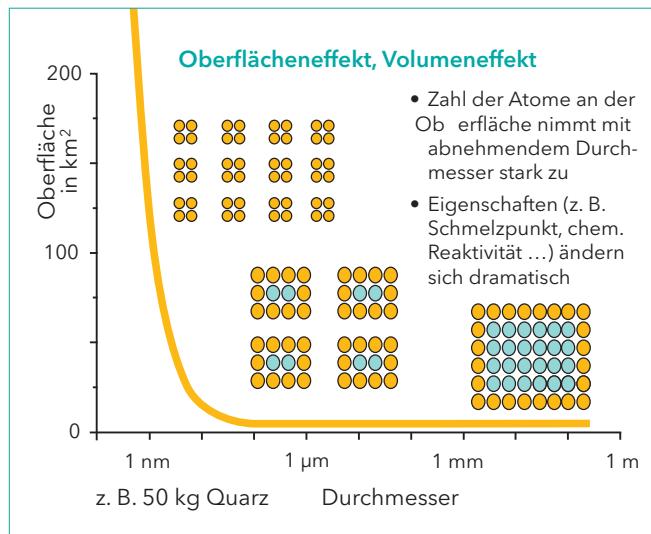


Abbildung 5: Beispiel für die Abhängigkeit der Materialoberfläche vom Partikeldurchmesser (bei konstantem Gesamtvolumen bzw. konstanter Gesamtmasse)

► **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 5).

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, d. h. Nanopartikel verlieren ihre typischen Festkörper-eigenschaften und können eher als großes Molekül mit neuen elektronischen, chemischen und optischen Eigenschaften betrachtet werden.

So können sich elektronische und magnetische Zustände, Transparenz oder Lichtstreuung ändern, oder es treten Tunneleffekte auf, indem Teilchen hohe Potenzialbarrieren durchdringen können. 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 5). 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.

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 (siehe Abbildung 6, Seite 11). 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 7, Seite 13) sind ein Nanomaterial oder -werkstoff, auf den große Hoffnungen gesetzt werden. Sie können sowohl Leiter als auch Halbleiter sein.

Größenbeispiel

MAKRO	Werkzeug, Besteck, Nägel Bleistift, Transistorröhren Nieten, Buchstaben, Drähte, Schrauben, Glasscheiben Adern, Glasfasern, Optiken, Kleinlebewesen
MIKRO	Dickschichten, Mikromotoren, Mikrosensoren, Mikropumpen Haare, Haut, Nähgarn Haushaltfoliendicke Bakterien, Blutkörperchen, CD-Bits, Hartstoffschichtdicke Viren, 64Mb/256Mb-Chip Blattgolddicke, Gbit-Chip
NANO	Grenze der Photolithographie Makromoleküle, Proteine Nanopartikel, DNA-Breite, Cluster, Transistorlänges Moleküle/Fullerene Größe von Atomen

Strukturgröße

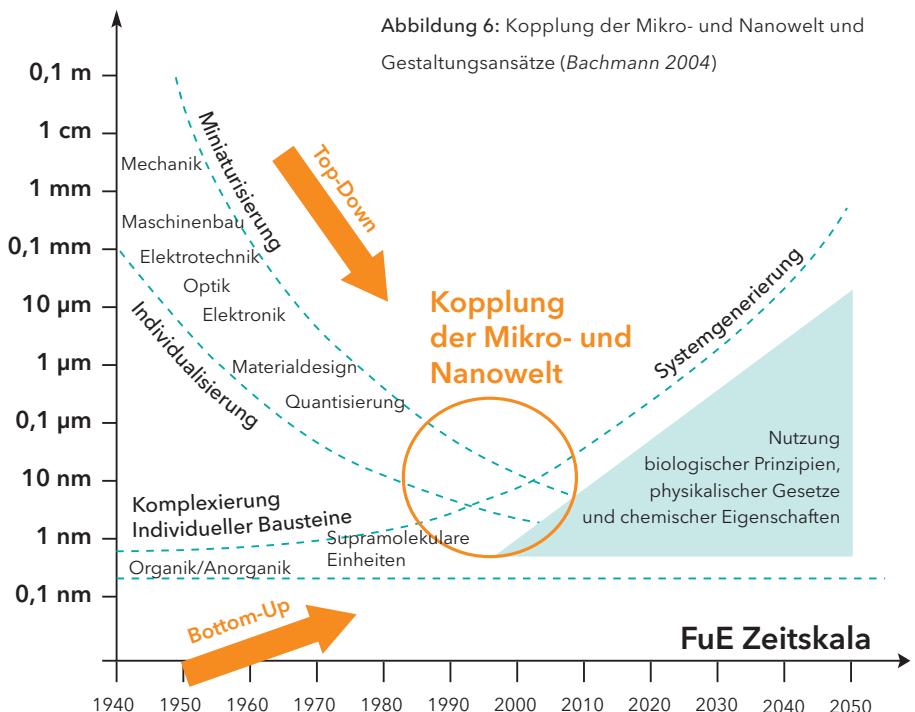


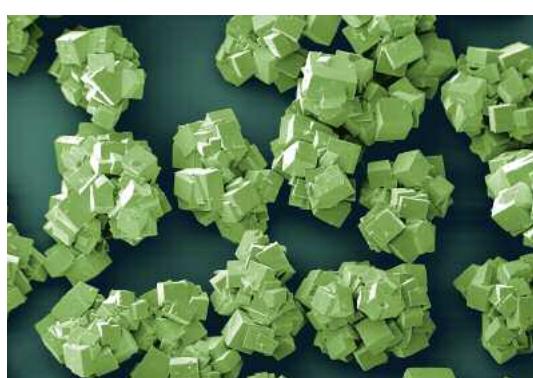
Abbildung 6: Kopplung der Mikro- und Nanowelt und Gestaltungsansätze (Bachmann 2004)

Der interdisziplinäre Ansatz vereint physikalische Gesetzmäßigkeiten, chemische Stoffeigenschaften und biologische Prinzipien und ermöglicht wesentliche Eigenschaftsänderungen und neue Funktionalitäten von Materialien und Strukturen.

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 zunutze machen:

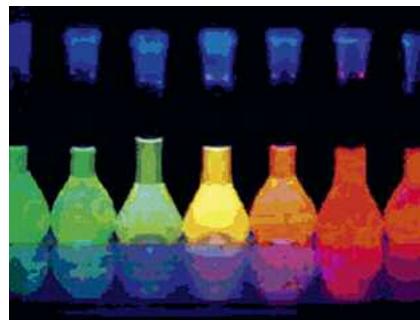
► Die vergrößerte Oberfläche von Nanomaterialien ermöglicht **neue chemische Prozesse** durch die Änderung von Schmelz- und Siedepunkt, chemischer Reaktivität und katalytischer Ausbeute. Nano-Eisenpartikel werden z. B. zur Reduktion von Schadstoffen und in der Wasserreinigung eingesetzt. Nanoskalige 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.

BASOLITE (TM) Metal Organic Framework (MOF) von BASF als ein Beispiel für die Nutzung neuer spezifischer chemischer Eigenschaften der Nanotechnologie. Anwendung für Absorption, Speicherung und wieder Abgabe (Desorption) von kleinen organischen Molekülen mit verbesserter Absorptionskapazität, Spezifität und Selektivität. (Quelle: BASF AG, Ludwigshafen)



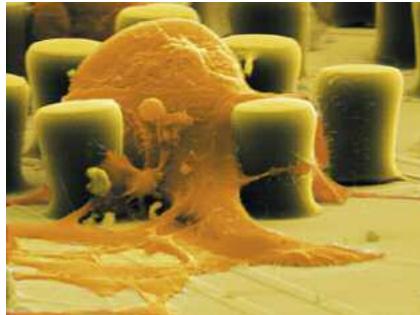
- Quantenmechanisches Verhalten führt zu einer **neuen technischen Physik** von Partikeln und Werkstoffen z. B. durch Änderung von Farbe, Transparenz, Härte, Magnetismus oder elektrischer Leitfähigkeit. So spielt die spezifische Leitfähigkeit eine große Rolle bei der Protonenaustauschermembran (PEM) in der Brennstoffzelle oder bei Chemosensoren zur Gasanalyse. Mit nanoskaligen Partikeln können oftmals die Anforderungen an die Transparenz erreicht werden.

Lösungen mit Cadmiumtellurid-Nanopartikeln mit unterschiedlicher Größe von 2-5 nm als ein Beispiel für die sich ändernden physikalischen Eigenschaften (Fluoreszenz). Die Farbe der Lösung wechselt dabei von grün bis rot. (Quelle: Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg)



- 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.

Aufnahme einer Nervenzelle, die auf einem Mikrochip fixiert wird als Beispiel für die Kopplung von biologischen und technischen Systemen. (Quelle: 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.

Mit Hilfe der Nanotechnologie werden Produkte und Prozesse effizienter gestaltet, z. B. den Spritzgussprozess oder die Reinigbarkeit von Oberflächen. Darüber hinaus wird die Nanotechnologie zu neuen Anwendungen und Funktionsweisen führen, z. B. in der Krebstherapie oder in Speichermedien (vgl. Abbildung 9).

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

- auf der **Miniaturisierung** von Strukturgrößen und Systemen. Große Oberflächen kleinstter 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 anleihen oder Oberflächen, die sich während des Ordnungsprozesses ausbilden und zu spezifischen physikalisch-mechanischen oder chemischen Eigenschaften wie korrosionshemmenden oder reibungsarmen Oberflächen führen.

In der Umwelttechnik sehen die befragten Experten, aber auch z. B. Roadmap-Studien der europäischen Technologieplattform SusChem (www.suschem.org) oder der chemischen Industrie positive Effekte und Umsatzpotenziale vor allem in den Bereichen Energie, Wasser, Transport und Messtechnik.

Nach der SusChem Roadmap bauen zahlreiche essentielle Produkte und Technologien für die **Energieerzeugung, -konversion und -transport**, auch auf Nanotechnologie auf. Dazu zählen Supercapacitors (Superkondensatoren), Wasserstoffspeicherung und Batterien, Brennstoffzelle, sowie neu-este Generationen von Photovoltaik und piezoelektrische Beschichtungen (*SusChem 2005*). Notwendige Grundlage für alternativen Energiequellen ist u. a. die effiziente Katalyse für eine saubere Energieerzeugung, bspw. basierend auf H₂. Für den Bereich **Lebensqualität** sind u. a. Umweltsensoren sowie Separationstechnik für Trinkwasser eine wichtige Grundlage. Im **Transportbereich** sind Katalysatoren für die COx- oder NOx-Reduktion sowie funktionale Beschichtungen wichtige Technologiefelder. Zur Realisierung **ökoeffizienter Produkte und Prozesse** wird an Lösungen zur Substitution organischer Lösemittel und an lösmittelfreien Prozessen oder Katalysatoren für die Boden- und Grundwassersanierung gearbeitet.

Die Roadmap „Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials By Design“ nennt im Bereich **Energie** als Schlüsselmärkte:

- Die Energieumwandlung durch neue Solarzellen-Typen (Grätzelzelle u. a.)
- Wasserstoffspeicherung (H₂)
- Batterien
- Brennstoffzellen
- Thermoelektrik
- Magnetokalorische Effekte
- Solid State Lighting (auf Basis von LED oder OLED)
- Supercaps
- Thermische Speicher
- effizientere Motoren
- Hochleistungskatalysatoren
- Beleuchtung und Displays mit geringerem Verbrauch

Zum **Umweltbereich** gehören:

- Chemische und biologische Sensoren
- Umweltsensorik
- Sanierung (TiO₂+UV, Katalysator, u. a.)
- Sauberes Wasser (Nanofiltration, Sorption, Ionen-Austausch)
- Saubere Luft (Adsorbents)
- Katalysatoren
- H₂-Speicherung für Brennstoffzelle
- „Grüne“ Produktionstechnologien

Eine Schlüsselaufgabe für die Beherrschung der Strukturierungs- und Herstellungsmethoden im Nanoskalenbereich wird der Weiterentwicklung von Mess- und Manipulationswerkzeugen und -techniken zukommen, denn die Auflösung kleinstter Strukturen im Nanomaßstab wird auch in der Zukunft erst die Forschung und Entwicklung in diesen Größenordnungen ermöglichen. Eine Darstellung aktueller Analyse- und Manipulationsmethoden findet sich in der Broschüre „NanoProduktion“, Band 6 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech.

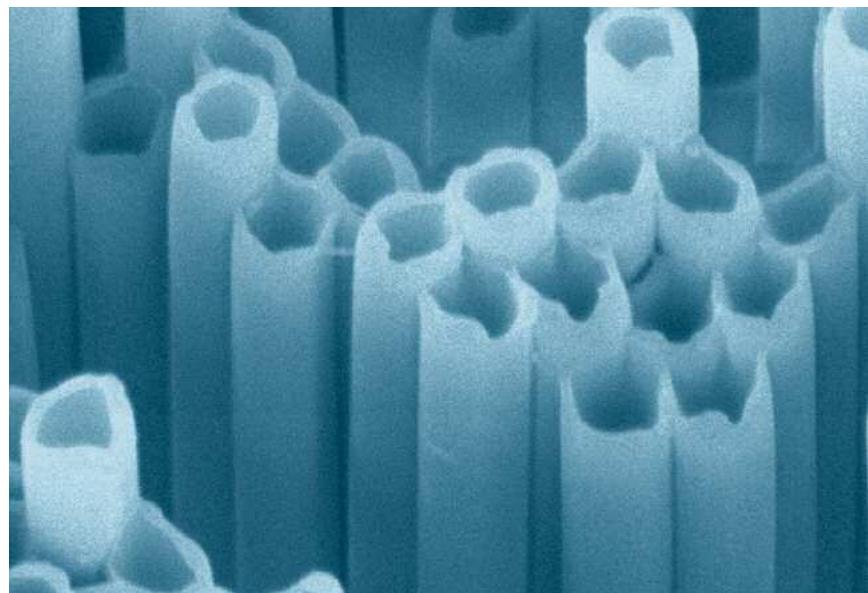


Abbildung 7: Bündel von Kohlenstoff-Nanoröhrchen
(Quelle: Philipps-Universität Marburg)

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. Experten schätzen, dass mittel- bis langfristig möglicherweise über die Hälfte aller weltweit produzierten Güter Nanotechnologie in den Herstellverfahren oder in einzelnen Komponenten einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit leisten wird.

Die Nanotechnologie kann jedoch – im Gegensatz zu anderen Technologien wie z. B. der Biotechnologie – aufgrund ihres Querschnittcharakters und der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten 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, sodass 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.

Thermodynamische / thermische Funktionalitäten

Die thermodynamischen Eigenschaften von Nanopartikeln und -systemen werden durch die hohe Oberflächenenergie beeinflusst. CNTs haben bspw. entlang der Röhrenachse bei Raumtemperatur eine hohe spezifische Leitfähigkeit, quer dazu sind sie thermische Isolatoren. Die Porengröße von nanoporösen Systemen (sog. Nanoschäume) beeinflusst wesentlich den Transport von Wärme. So stoßen bei sehr kleinen Poren die Gasmoleküle nicht mehr gegeneinander, sondern nur noch an die der Gefäßwand (Knudsen-Diffusion, d. h. die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle ist kleiner als der Poredurchmesser), sodass Konvektion als Wärmetransport entfällt.

Geometrische Besonderheiten

Die geometrischen Besonderheiten von Nanostrukturen liegen in ihrem Raumbedarf in der Größenordnung von Atomen und Molekülen (siehe Abbildung 5, Seite 10). Daraus resultieren eine atomare Genauigkeit und extrem große Oberflächen / Volumen-Verhältnisse nanoporöser und nanoparti-



kulärer 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 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. 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 Haft-eigenschaften 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 Maß-schneidern der Größe lässt sich spezifisch ein scharf begrenzter Wellenlängenbereich (eine Farbe) einstellen, in dem das Material Licht absorbiert oder emittiert. Nanopartikel weisen neue optische Eigen-schaften hinsichtlich Farbe, Fluoreszenz oder Trans-

parenz auf. Genutzt wird dies in transparenten Dis-persionen von Nanopartikeln oder in optisch funk-tionalen Oberflächen, wie z. B. bei der Entspiege-lung 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 beson-ders großen Anteil an Oberflächenatomen auf (siehe Abbildung 5, Seite 10). Solche Atome sind aufgrund ihrer ungesättigten Bindungen besonders reaktiv. Gitterverspannungen bzw. verzerrte Bin-dungswinkel führen zu einer erheblich vergrößer-ten Oberflächenenergie. Nutzbar ist dies für Ober-flächen mit maßgeschneidertem Benetzungsver-halten, zur räumlichen Anordnung von funktionel-ten Gruppen, zur Erhöhung der chemischen Selektivität und Reaktivität, aber auch der chemischen Stabilität in unterschiedlichen chemischen Verfah-rensprozessen.

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 Strukturie-rung im Mikro- und Nanometerbereich. Ein Nutzen ergibt sich zum einen durch die Transferrichtung „Nano2Bio“, d. h. die Nutzung nanotechnologi-scher Verfahren und Materialien für die Untersu-chung biologischer Fragestellungen wie z. B. in der Nanoanalytik. Zum anderen eröffnet die Transfer-richtung „Bio2Nano“ die Nutzung biotechnolo-gischer Materialien und Baupläne zur Herstellung technischer Nanosysteme: Biologische Bausteine werden im Nanomaßstab als Komponenten für technische Systeme eingesetzt. Grundlage sind biologische Bausteine, Funktions- oder Organisa-tionsprinzipien.

1.4 Forschungs- und Anwendungsstand

Der Anwendungsstand der Nanotechnologie stellt sich über die verschiedenen technologischen Felder sehr unterschiedlich dar. Die bisher eingesetzten Materialien können oftmals noch zur klassischen Nanotechnologie gezählt werden, wie Ruße, Pigmente, Filme und Lacke, die die Eigenschaften von Werkstoffen z. B. in der Chemie oder den Werkstoffwissenschaften verbessern. Es tauchen jedoch erste Anwendungen der neuen Nanotechnologie auf, wozu die neuen oder komplexeren Materialien wie die CNT oder Nanokomposite gezählt werden, auf. In allen Anwendungsfeldern gibt es erste Materialien oder Produkte, die auf Nanotechnologie aufbauen (siehe Abbildung 9). Diese reichen von funktionalisierten Beschichtungen wie Reinigungs-freundlichkeit, UV-Schutz oder Kratzfestigkeit, 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. Nanomaterialien und deren Anwendung z. B. in Beschichtungen haben aufgrund ihrer Universalität und vielfältigen Funktionalisierung einen breiten Anwendungsbe-reich und ein großes Marktvolumen (vgl. BBC Research 2008, Luther et al. 2004, Fhg-ISC/ Fhg-ISI 2003). Ihr Einsatz in Produkten und Prozessen kann von Unternehmen oftmals auch ohne längerfristige Forschung vollzogen werden. In anderen Bereichen wie der Elektroindustrie hingegen wird die Beherr-schung der Nanowelt z. B. für das Post-Silizium-Zeitalter wettbewerbsentscheidend sein.

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 CNTs betrug der Weltmarkt 2006 rund 50 Mio. US-Dollar, für 2009 soll er schon bei etwa 250 Mio. US-Dollar liegen. Die Prognosen erwarten dann für das Jahr 2020 einen Weltmarkt von bis zu 10 Mrd. US-Dollar (VDI TZ 2009). Anwen-dungsfelder der CNT werden im Leichtbau und den Kompositmaterialien erforscht, z. B. zur Verstärkung der Flügel von Windrädern, in Lithium-Ionen-Bat-terien und Brennstoffzellen, oder in der Membran-technologie für z. B. die Meerwasserentsalzung.

Gegenwärtige Marktprognosen sehen eine volks-wirtschaftlichen Hebelwirkung der nanooptimier-ten Produkte von bis zu 3 Billionen US\$ Weltmarkt-volumen bis zum Jahr 2015, andere Einschätzun-gen rechnen mit einem Weltmarktpotenzial von bis zu 1,5 Billionen US\$ (BMBF 2009). Diese Spanne zeigt einerseits die noch vorhandenen Unsicher-heiten bezüglich der realistischen Abschätzung des Marktvolumens, andererseits verdeutlicht sie aber die enorme Hebelwirkung der Nanotechnologie auf Anwendungsmärkte. Gründe dafür sind der Querschnittscharakter der Nanotechnologie und die Zuordnungsprobleme von Umsatzzahlen sowie die in manchen Bereichen noch frühen Entwick-lungsphasen. Einigkeit herrscht jedoch über das enorme wirtschaftliche Potenzial der Nanotechno-logic im 21. Jahrhundert.

Anwendungsbeispiele der Nanotechnologie

Erste Anwendungen mit Nanotechnologie sind am Markt verfügbar

Am Markt sind bereits erste Anwendungen und Produkte mit Nanotechnologie verfügbar. Dazu zählen zum Beispiel:

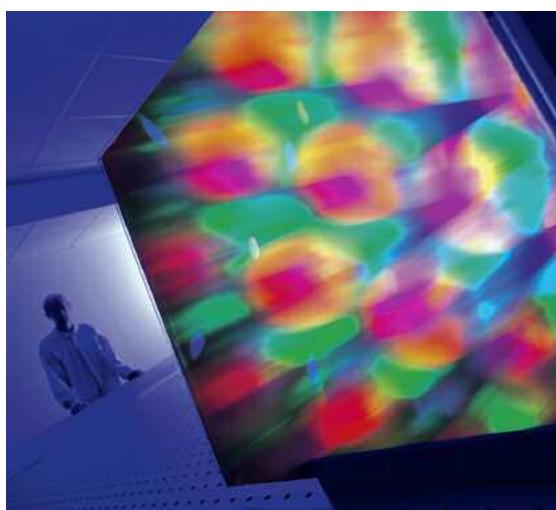
- ▶ Nanotitandioxidpartikel in Sonnencreme als UV-Schutz,
- ▶ kratzfeste Nanolacke für Automobile und Farbanstriche mit Easy-to-clean Effekt (siehe Abbildung 1, Seite 7),
- ▶ Nanopartikel aus Platin, Rhodium und Palladium in Kfz-Abgaskatalysatoren und Brennstoffzellen,
- ▶ Eisenhydroxidgranulat mit nanostrukturierter Oberfläche zur Adsorption von Arsen in der Trinkwasserreinigung,
- ▶ nanostrukturierte Rußpartikel (Carbon Black) als Füllstoffe in Autoreifen,
- ▶ CNTs in Tennis- oder Eishockyschlägern,
- ▶ Verstärkung von Spezialbeton (Ultra High Performance Concrete – UHPC) durch Nanoaprtikel,
- ▶ Eisennanopartikel zur Wasserreinigung,
- ▶ Nanoporöse Keramikfilter für die häusliche Grauwasseraufbereitung und kommunale Abwasserreinigung,
- ▶ Nanosilber für antimikrobielle Anwendungen.

- Korrosionsschutz mit Nanopartikel als Ersatz der bisherigen Zink- und Eisenphosphatierung
- Kupfernanopartikel als Zusatz in Schmiermitteln zur Verschleißreduzierung,
- Imprägnier-, Reinigungs- und Versiegelungsmittel mit Nanotechnologie zur besseren Schmutzabweisung, mit AntiBeschlag-Funktion, oder
- elektrochrome Schichten mit Nanotechnologie zur gesteuerten Abdunkelung von Spiegeln und Antireflexbeschichtung in Instrumententafeln oder Displays (siehe Abbildung 8).

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, allen voran die Bereiche Gesundheit, Informations- und Kommunikationstechnik sowie die Energie- und Umwelttechnik (vgl. VDI 2004/2, BMBF 2009).

Entwicklungsstand

Abbildung 9 gibt einen zusammenfassenden Überblick über den Entwicklungsstand ausgewählter Anwendungsfelder der Nanotechnologie in unterschiedlichen Branchen.



Wichtige Anwendungsfelder der Nanotechnologie betreffen die Wasserreinigung sowie die Energieerzeugung und -speicherung.

Nanostrukturierte Katalysatoren, Nanoschichten für Korrosions- und Verschleißschutz, Nanomembranen zur Abwasserreinigung sowie Antireflexschichten für Solarzellen werden heute bereits angewandt. In der „Forschungs-Pipeline“ befinden sich nanooptimierte Mikrobrennstoffzellen, die photokatalytische Luft- und Abwasserreinigung mit Nano-TiO₂, Hitzeschutz für Turbinen oder nanooptimierte Lithium-Ionen-Batterien, deren Markteintritt bevor steht. Mittel- und vor allem langfristig werden großflächige Polymer solarzellen, Nanosensorik für das Umweltmonitoring, thermoelektrische Abwärmenutzung, effiziente Wasserstofferzeugung, effiziente Stromleitung mit CNT-Kabeln, künstliche Photosynthese, hocheffiziente Quantumdot-Solarzellen sowie Konzepte zur ressourcenschonenden Produktion durch Selbstorganisation erwartet.

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 frühzeitig mit den potenziellen Risiken der Technologie umzugehen, um eine ablehnende gesellschaftliche Haltung wie im Falle der Gentechnologie 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 8: Nanostrukturierte Oberfläche als nicht reflektierende Oberfläche oder für kontrastreichere Displays
(Quelle: Fraunhofer ISE/Bernd Müller)

				Umwelt/ Energie
				Bau- technik
				Textil
• Nanostrukturierte Katalysatoren • Nanoschichten für Korrosions- und Verschleißschutz • Nanomembranen zur Abwasserreinigung • Antireflexschichten für Solarzellen	• Nanooptimierte Mikrobrennstoffzellen • Photokatalytische Luft- und Abwasserreinigung mit nano-TiO ₂ • Hitzeschutz für effiziente Turbinen • Nanooptimierte Li-Ionen-Batterien	• Großflächige Polymersolarzellen • Nanosensorik zum Umweltmonitoring • Thermoelektrische Abwärmenutzung • Effiziente Wasserstofferzeugung • Effiziente Stromleitung mit CNT-Kabeln	• Künstliche Photosynthese • Hocheffiziente Qdot-Solarzellen • Ressourcenschonende Produktion durch Selbstorganisation	
• Schmutzabweisende Anstriche/Farben • IR-reflektierende Nanoschichten für Wärmeschutzverglasungen • Photokatalytische Beschichtungen für Dachziegel, Markisen, PVC-Profile	• Antibakterielle Farben (Nanosilber) • Multifunktionale keramische Tapeten • Brandgeschützte Gläser und Baustoffe • Aerogelfassaden, Vakuum-Isolationspanele • Nanobasierte Versiegelungsschichten	• Nanoporöse Isolierschäume • Schaltbare Gläser (elektrochrom) • Großflächige, flexible Solarzellen • OLED-Beleuchtung • Ultrahochfester Beton	• Ultraleichtbaustoffe auf CNT-Basis • Multifunktionale adaptive Fassadelemente (Energiegewinnung, Verschattung, Beleuchtung) • Baustoffe mit Selbstreparaturmech.	
• Schmutzabweisende Textilien durch Nanopartikel/Strukturierung) • Antibakterielle Textilien durch Nanosilber • Duftimprägnierte Textilien auf Basis von Nanocontainern (z.B. Cyclodextine)	• UV geschützte Textilien durch nano-TiO ₂ • Thermoschutzbekleidung mit Aerogelen • Abriebbeständige Fasern durch keramische Nanopartikel • Antidihesive Wundauflagen	• Aktive Wärmeregulierung durch Phasen-Wechsel-Materialien • Elektrisch leitfähige Textilfasern für Smart Textiles, Elektrostatik, etc. • Integration von OLED in Textilien	• Textilintegrierte Sensorik/Aktorik für aktive Bewegungsunterstützung, Kontrolle von Körperfunktionen, etc. • Textilintegrierte digitale Assistenzsysteme (Human Interfaces)	
• Nanopulver-/Dispersionen(TiO ₂ , SiO ₂ , ...) • Nanostrukturierte Industrieroße • Nanostrukturierte Wirkstoffe/Vitamine • Polymerdispersionen • Effektpigmente	• Fullerene, CarbonNanotubes(CNT) • Nano-Polymerkomposite • Organische Halbleiter • Halbleiterquantenpunkte • Aerogelgranulat, Dendrimere, etc.	• Nanoschaumstoffe, -gasspeicher • Ferrofluide, schaltbare Klebstoffe • Funktionalisierte Nanomembranen • Künstliche Spinnenseide • Elektrogespinnene Nanofasern	• Selbstheilende Werkstoffe • Selbstorganisierte komplexe Materialien/Verbundstoffe • Molekulare Maschinen • Adaptive Multifunktionswerkstoffe	
• Nanostrukturierte Abgaskatalysatoren • Nanobeschichtete Dieselinjektoren • Antireflexschichten für Displays • Nanostrukturierte Additive für Reifen • Magnetoresistive Sensoren	• Nanopartikel für kratzfeste Lacke • Nanopartikel als Dieseladditive • LED-Frontscheinwerfer • Nanohartschichten für Polymerscheiben	• Dünndünnfilmsolarzellen für Autodächer • Nanooptimierte Brennstoffzellen • Thermoelektrische Abwärmenutzung • Ferrofluide für adaptive Stoßdämpfer • Nanoklebstoffe in der Produktion	• Schaltbare, selbstheilende Lacke • Adaptive Außenhaut für optimalen Luftwiderstand • Intelligente Fahrassistenz und Verkehrserkennung	
• Festplattenspeicher mit GMR-Lesekopf • Siliziumelektronik (Strukturen < 100 nm) • Flash-Speicher • Polymerelektronik z.B. für Funketiketten	• Siliziumelektronik mit 32 nm-Strukturen • CNT-Feldemissionsdisplays • MRAM-Speicher • Phase-Change-Speicher	• MEMS-Speicher („Millipede“) • CNT-Datenspeicher • Siliziumelektronik mit 22 nm-Strukturen • CNT-Interconnects in Schaltkreisen	• Molekularelektronik • Quantencomputing • Spintronik-Logiken • DNA-Computing	
• Nanoschichten für kratzfeste Kunststoffbrillengläser, • Ultrapräzisionsoptiken für Teleskope, etc. • Antireflexionsschichten für Glasentspiegelung	• Optische Mikroskope mit Nanoauflösung • Organische Leuchtdioden (OLED) • CNT-Feldemissionsdisplays • 2D photonische Kristalle für Lichtleiter	• EUV Lithographie-Optiken • Quantenpunktscanner • Quantenkryptografie • 3D photonische Kristalle	• All OpticalComputing • Optische Metamaterialien für „Tarnkappenanwendungen“	
• Nanopartikel als Kontrastmittel in der Diagnostik • Nanoskalige Drug-Carrier • Biochips zur In-Vitro-Diagnostik • Nanomembranen für die Dialyse	• Nano-Krebstherapie (Hyperthermie) • Nanostrukturiertes Hydroxyapatit als Knochenersatzmaterialien • Quantenpunktmarker für die Diagnostik • Kontroll. Wirkstoffabgabe bei Implantaten	• Biokompatible, optimierte Implantate • Nanosonden und -marker für molekulare Bildgebung/Diagnostik • Selektive Drug-Carrier	• Künstliche Organe durch Tissue-Engineering • Theranostics • Neurogekoppelte Elektronik für Mensch-Maschine-Schnittstellen	
Etablierte Nanoprodukte	Markteintritt	Prototyp	Konzept	 Jahre bis zur Kommerzialisierung
	0-5 Jahre	5-10 Jahre	> 10 Jahre	

Abbildung 9: Entwicklungsstand ausgewählter Anwendungsfelder der Nanotechnologie in unterschiedlichen Branchen

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.

Ebenfalls in der Spitzengruppe steht Deutschland hinsichtlich der Patentanmeldung (Rang 3 hinter den USA und Japan). Besonders bemerkenswert ist dabei die Spitzenreiterposition von Darmstadt - die OECD listet die Wissenschaftsstadt vor anderen deutschen Städten bzw. Regionen in den Top-30-Regionen weltweit in punkto Nano-Patentanmeldungen (OECD 2008). Das demonstriert eindrucksvoll die technologische Stärke der in Südhessen vertretenen Nanotech-Akteure.

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 etwa 400 Unternehmen in Hessen identifiziert, die in den Bereichen Material- und Oberflächentechnologie, Mikrosystemtechnologie und Optische Technologien tätig sind, davon rund 150 Unternehmen, die Nanotechnologien entwickeln und anbieten oder anwenden.

Im Anhang (siehe Seite 48 / 49) 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 NanoNetzwerkHessen (NNH) mit deren Ansprechpartnern sind auf Seite 49 separat dargestellt. Seite 50 zeigt thematisch geordnet die universitäre Nanotechnologieforschung in Hessen. Eine umfassendere Übersicht über die Aktivitäten der Hochschulen sowie zahlreicher hessischer Nanotechnologie-Unternehmen bietet der „Kompetenz- und Infrastrukturaltas Nanotechnologien Hessen“ (www.hessen-nanotech.de).

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. Von 1997 bis 2005 betragen die FuE-Aufwände der U.S.-amerikanischen Regierung knapp 5 Mrd. US-Dollar. Die EU hat im selben Zeitraum 1997 bis 2005 die Nanotechnologie mit knapp 4 Mrd. Euro gefördert. Große Fördersummen werden ebenso in Japan (1997-2005: 4,5 Mrd. US-Dollar) und China (1999-2005: 600 Mio. US-Dollar) investiert (Roco 2005). Deutschland hat im Zeitraum 2001-2008 über 2,3 Mrd. Euro in Projekt- und institutionelle Förderung durch Bund und Länder investiert. Im 6. Forschungsrahmenprogramm wurden im Zeitraum 2002-2006 Fördermittel von fast 1,4 Mrd. Euro für mehr als 550 Projekte im Bereich Nanowissenschaften und Nanotechnologie aufgewendet (Europäische Kommission 2007). Im 7. Rahmenprogramm (2007-2013) werden für den Bereich Nanowissenschaften, Nanotechnologien, Werkstoffe und neue Produktionstechnologien insgesamt 3,5 Mrd. Euro bereitgestellt.

Projektförderung durch BMBF und BMWi						
Nanotechnologieförderung in Deutschland (in Mio. Euro)	2001	2002	2003	2004	2005	Summe 2001-2005
BMBF-Projektförderung	54,9	73,9	88,2	96,5	125,9	439,4
BMW-Projektförderung	20,6	21,1	24,5	23,5	25,7	115,4
Institutionelle Förderung durch Bund und Länder						
Nanotechnologieförderung in Deutschland (in Mio. Euro)	2001	2002	2003	2004	2005	Summe 2001-2005
Förderung (Bund und Länder)	134,4	144,4	145,6	153	160,7	738,1
Summe über alle Jahre und Förderprogramme						1292,9

Tabelle 1: Projekt- und institutionelle Förderung der Nanotechnologie durch Bund und Länder

(Quelle: links: VDI TZ Techportal 2009, rechts: BMBF 2009)

Fördermittel (in Mio. Euro)	2006	2007	2008	2009*
Bundesressorts				
BMBF	141	168	165	165
weitere Ressorts	20	32	31,4	30,7
Summe	161	200	196	195,7

* Soll

Im Herbst 2008 hat das BMBF in der Bekanntmachung „NanoNature: Nanotechnologien für den Umweltschutz - Nutzen und Auswirkungen“ ein Förderprogramm aufgelegt, dass sowohl Anwendungen der Nanotechnologie für den Umweltschutz entwickeln, als auch Auswirkungen synthetischer Nanopartikel und -materialien auf die Umwelt untersuchen soll. Anwendungen sollen in den Bereichen

- ▶ Gewässer- und Luftreinigung, Bodensanierung, Trinkwasseraufbereitung,
- ▶ Produktaufbereitung, Wertstoffrückgewinnung und umweltschonende Trennprozesse,
- ▶ Verringerung von Stoffeinträgen in die Umwelt durch katalytische Verfahren und Trennprozesse sowie
- ▶ Aufbereitungstechnologien für Prozessmedien erforscht werden. Darüber hinaus sollen das Verhalten und die Wirkung von synthetischen Nanopartikeln bzw. -materialien sowie von Produkten mit integrierten funktionalen Nanomaterialien in der Luft, im Wasser und im Boden untersucht werden – unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Nanopartikel bzw. -materialien hinsichtlich einer möglichen Ökotoxizität.

Die industrie seitige Forschung und Entwicklung konzentriert sich in Deutschland vor allem auf die Branchen Grundstoffe und Chemie (Harper 2002). Akteure der Industrie in der Nanotechnologie sind vor allem große Konzerne wie z.B. BASF, Evonik, 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, die Fraunhofer-Allianz 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.

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 zeigten 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 Gen-technik kann darin gesehen werden, dass es gelingt, Abschätzungen zu den Technikfolgen bereits in sehr frühen Stadien in die Bewertung einzubeziehen. Auf der Informationsplattform Nano-Sicherheit.de finden sich aktuelle Informationen zum verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien (www.nano-sicherheit.de).

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 4,5 Prozent der Beschäftigten sind dort mehr Menschen tätig als im Maschinenbau, Fahrzeugbau oder Ernährungsgewerbe. Hessen gehört in Sachen Umwelt- und Energietechnologie mit über 77 000 Beschäftigten in über 2400 Betrieben zur Spitze in Deutschland. Die meisten Unternehmen in der Umwelttechnologie arbeiten in den Bereichen „Wasser/ Abwasser“ (46 %), „Abfall/ Recycling“ (37 %), und „Erneuerbare Energien“ (36 %), gefolgt von „Luftreinhaltung/ Lärm“ (18 %) sowie schließlich „klassische Energieerzeugungs- und Umwandlungstechnologien“ (18 %).

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

Ziel der Anwendung von Umwelttechnologie ist der Schutz von Luft, Wasser und 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 vor- sorgenden, ganzheitlichen Betrachtung gewandelt.

Neben dem Erkennen und Beseitigen von Umweltbelastungen sowie der Vermeidung oder Minimierung von schädlichen Umweltauswirkungen - bei-

spielsweise durch Filteranlagen - kommt dem Vermeiden und der Vorsorge eine große Bedeutung zu. Die Diskussion um einen produktions- und produkt-integrierten Umweltschutz sind ein Beispiel 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 Forschungsarbeiten in der Nanotechnologie, die durch das Setzen von Umweltzielen initiiert wurden, sind die Forschungsprojekte bei der US-amerikanischen EPA zur Reduktion von Arsen im Trinkwasser. Sie hatten zum Ziel, den gesetzlich verankerten Grenzwert von zehn Mikrogramm Arsen je Liter Trinkwasser mit Hilfe von nanotechnologie-basierten Filtersystemen oder Absorbermaterialien zu erreichen, mit teilweise vielversprechenden Ergebnissen (siehe z. B. Trogler 2002, Membrane Technology 2006).

In Tabelle 2 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.)

Die Abbildung 11 zeigt prognostizierte Wachstumsraten einzelner Umwelttechnologien bis zum

Jahr 2020. Ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung des Marktes von Umwelttechnologie sind auf der einen Seite, gerade in der Wasser- und Abwasserbehandlung, umweltrechtliche Vorgaben, auf der anderen Seite aber auch die gesellschaftlichen Bedürfnisfelder wie Mobilität, Gesundheit, sauberes Wasser etc.⁵.

In Deutschland mit seinen weitestgehend gesättigten Märkten findet der Wettbewerb über die Produktdiversifikation und die Kosten statt.

<p>Wasser / Abwasser</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 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 	<p>Integrierte Produktpolitik IPP</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Anwendungsbeispiele Produktionstechnik, Materialauswahl, Effizienzsteigerung ▶ Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie Gezieltes Materialdesign, neuartige Legierungen / Werkstoffe, leichtere Trag- und Strukturauteile, präzise Bearbeitungsverfahren, Qualitätskontrolle auf atomarer Skala, schaltbare Werkstoffeigenschaften, umweltfreundliche Eigenschaften wie „Nicht-Verschmutzung“ etc., neuartige Klebetechnologien, Selbst-organisationsprozesse, Substitution, Lebensdauerverlängerung, dünnerne Schichten (Materialeinsparung)
<p>Abfall / Recycling</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Anwendungsbeispiele Recycling, Abfallbehandlung und Abfallentsorgung, Rauchgasreinigung, Deponietechnik ▶ Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie Sensitiver Schadstoffnachweis, Filtration, hitzebeständige Wandverkleidung 	<p>Analytik / Mess-, Steuer- und Regeltechnik</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Anwendungsbeispiele Wasser- und Abwasserwirtschaft, Analytik, Prozessüberwachung und -steuerung ▶ Mögliche Einsatzfelder der Nanotechnologie Lab-on-Chip-Sensorsysteme, kombinierte Sensoren / Aktuatoren
<p>Energie / Luftreinhaltung / Klimaschutz</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 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 	

Tabelle 2: Technologiebereiche der Umwelttechnologie in Hessen, Anwendungsbeispiele und Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie

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

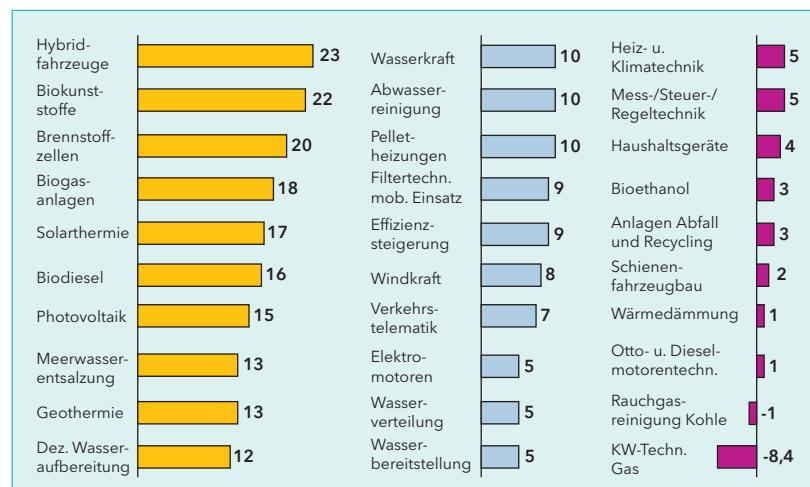
Global betrachtet werden in der Zukunft die dringendsten Herausforderungen für den Umweltschutz der Ressourcenschutz und die Frage der Wasser- und Energieversorgung sein (Europäische Kommission 2004/2). So wurden auf dem Welt-Gipfeltreffen zur nachhaltigen Entwicklung der Vereinten Nationen in Johannesburg 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 Sanitäranlagen ausgebaut werden, welche durch in der EU entwickelte Technologien und Verfahren unterstützt werden sollen. Der Weltmarkt für die Meerwasserentsalzung soll von derzeit 3 Mrd. US\$ auf 70 Mrd. US\$ im Jahr 2020 anwachsen, hauptsächlich im Mittleren Osten, Nordafrika und Asien (VDI TZ 2007). Der weltweite Markt in der Wasserversorgung wird für das Jahr 2010 auf über 400 Mrd. US-Dollar geschätzt, mit Innovationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit den Schritten Wassergewinnung, -transport, -verteilung bis zur -entsorgung und -reinigung. Die Membran-technologie nimmt dabei eine herausragende Rolle ein (BMU, UBA 2009)⁶.

Durch die **Energieinitiative** soll in Entwicklungsländern eine höhere Energieeffizienz durch die intelligenter 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.



Abbildung 10: Anlage eines Festbettreaktors aus Eisenhydroxidoxid-Granulat Bayoxide® E33 mit sehr fein strukturierten Oberflächen im Nano-bereich zur Arsenadsorption (Quelle: Bayer AG, Severn Trents Services)



1) CAGR = Cumulated average growth rate = durchschnittliches jährliches Wachstum
Quelle: Marktstudien, Experteninterviews

Abbildung 11: Wachstumsraten einzelner Umwelttechnologien (2005-2020, in %)

Mit der Frage der Energieversorgung sind wesentliche gegenwärtige Umweltprobleme wie der Treibhauseffekt und die Luftverschmutzung verbunden.

5 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-umwelttech.de). Dieses Projekt der Aktionslinie Hessen-Umwelttech zeigt frühzeitig die aus neuen Vorschriften resultierenden Marktchancen für Umwelttechnologieanbieter auf.

6 In der Studie „Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie“ im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) werden Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie für den Zukunftsmarkt „Wasser“ aufgezeigt.

Für die Nanotechnologie ergeben sich hier vielfältige Anwendungsoptionen – von der Energieerzeugung bzw. -umwandlung, der Speicherung, dem Transport sowie der Energieeinsparung. In einigen Feldern kommen relevante technische Impulse von der Nanotechnologie, bspw. für die Lithium-Ionen-Batterie. In der Broschüre „Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor“, Band 9 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech, werden Forschungsfragestellungen und Anwendungen aufgezeigt. Laut „neue Bestandsaufnahme 2007“:

Eine Bestandsaufnahme unter hessischen Umwelttechnologieanbietern im Jahr 2007 ergab, dass die Zukunftsmärkte und größten Wachstumspotenziale bis 2011 in den Umwelttechnologien „Energieerzeugung durch neue, effiziente Umwandlungs-technologien“ sowie „Erneuerbare Energien“ gesehen werden, gefolgt von „Abfall, Recycling“ und „Luftreinhaltung, Lärm“ (Hessen Agentur 2008).

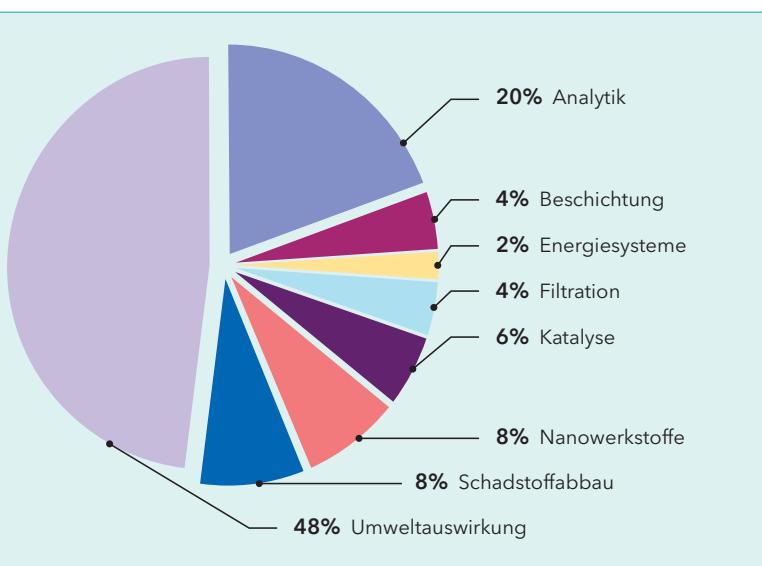
2.2 Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie

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 Lösungspotenzial. Entsprechend positiv ist die Bevölkerung dem Einsatz der Nanotechnologie im Umweltschutz gegenübergestellt (BfR 2008). 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 für die erste Auflage 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, NOx, 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, rei-nigungsfreundliche Oberflächen, Membranen und der Analytik zu finden. In den Feldern der klassischen Umwelttechnologie bestehen hingegen

Abbildung 12: Projektförderung der U.S. EPA zu Nanotechnologie und Umwelttechnologie im Zeitraum 1999 bis 2012 nach Kategorie der Umwelttechnologie (eigene Recherche)





noch viele Potenziale für konkrete und wirtschaftlich interessante Anwendungen der Nanotechnologie, zum Beispiel in der Emissionsminderung oder der Altlastensanierung. In Bornheim bei Köln wird z. B. mit Hilfe von Nano-Eisenoxid-Partikeln ein mit Perchlorethylen verseuchtes Grundwasser saniert, nachdem die bisherigen Verfahren noch eine Sanierungszeit von rund 50 Jahren erfordern würden. Im Bereich der Filtration gibt es erste Membranen auf Nanotechnologiebasis (beispielsweise Nanoweb® der Firma Hollingsworth & Vose oder poröse Keramikfilter von ItN Nanovation).

Die oben genannte Schwerpunktlegung der Nanotechnologie auf einige Anwendungsbereiche in der Umwelttechnologie wird auch durch eine Analyse der Projektförderung im Zeitraum 1999 bis 2012 des National Centers for Environmental Research (NCER) der US-amerikanischen EPA zu Nanotechnologie und Umwelttechnologie bestätigt (Abbildung 12)⁷. Dabei zeigt sich, dass die Forschungsausgaben im genannten Zeitraum zu Chancen und Risiken sich ungefähr die Waage halten.

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 2, S. 22).

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 und in einigen Bereichen auch schon in Produkte und Anwendungen umgesetzt worden. In Kapitel 2.4 werden die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich Filtration, Katalyse und 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 6, Seite 11), 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 oder als antimikrobielle Ausrüstung gesehen werden. Sie können einen Beitrag zur Ressourceneinsparung und Abwasserreduktion liefern.

7 Recherche der Forschungsprojekte unter <http://es.epa.gov/ncer/>

(Suchbegriff „nano“, eigene Zuordnung der Projekte zu den Kategorien, Stand 17.2.2009)

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 (MOF-Nanocubes von BASF), 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 (z. B. Separion(R)-Membran in Lithium-Batterien) 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). Die Farbstoffsolarzelle basiert auf TiO₂-Nanopartikeln, 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.



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 nanotechnologiebasierter 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 Selbstreinigungs effekten (siehe Abbildung 1, Seite 7) 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 Heimanwender (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.⁸

8 In der Broschüre „Materialeffizienz durch den Einsatz von Nanotechnologien und neuen Materialien“ der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech werden ausführlich die Potenziale für die Verringerung oder Vermeidung des Ressourceneinsatzes dargestellt.



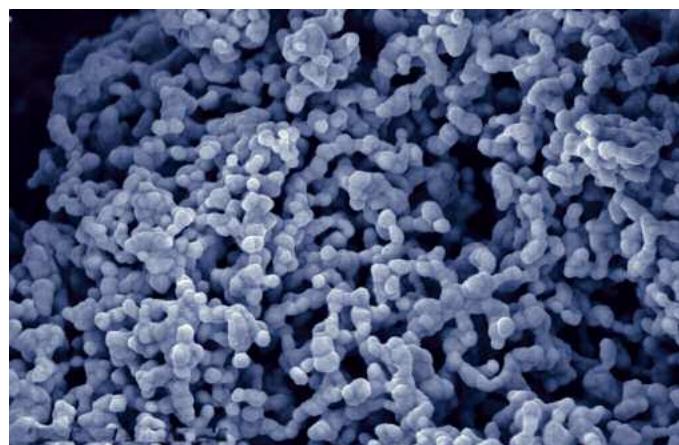
Technologiebereich Analytik, Mess- / Steuer- / Regeltechnik (MSR)

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 3 auf der nächsten Seite qualitativ gegenübergestellt und bewertet. Die Bewertung ist subjektiv und greift die Frage auf, in welchen Anwendungsbereichen 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.

Abbildung 13: Nanosilber kann in verschiedene Werkstoffe eingearbeitet werden und schützt so vor Bakterien
(Quelle: Fraunhofer IFAM)

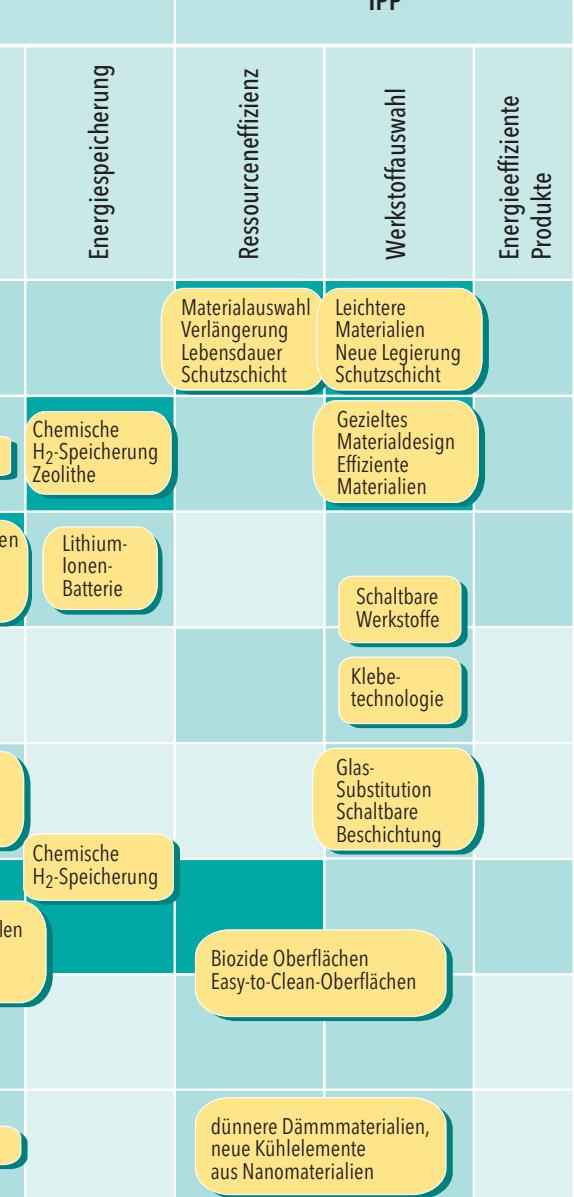


		Verbesserte Eigenschaften hinsichtlich	Umwelttechnologiebereiche					
			Wasser / Abwasser	Abfall		MSR	Energie, Luftreinhaltung, Klimaschutz	
Nanotechnologie	Mechanische Funktionalität	Härte, tribologische Eigenschaften, Bruchfestigkeit, -zähigkeit, Superplastizität	Reinigung / Aufbereitung	Vermeidung	Behandlung	Monitoring / Analyse	Luftreinhaltung / Reinigung	Energiesysteme
	Geometrische Besonderheiten	atomare Genauigkeit, großes Oberflächen-/ Volumenverhältnis	Katalysator Ionen-tauscher Filtersysteme Füllkörper			Reaktive Oberfläche	Filter Katalysator	Batterie
	Elektrische Funktionalität	diskrete Energieniveaus, elektrische maßgeschneiderte Eigenschaften			Lab-on-Chip Nanosensoren / -aktuatoren			Farbstoffsolarzell Org. Solarzellen Brennstoffzelle Batterie
	Magnetische Funktionalität	magnetische Eigenschaften (Superparamagnetismus)						
	Optische Funktionalität	Farbe, Fluoreszenz, Transparenz				Optische Messsysteme		Spektral selektive Beschichtung
	Chemische Funktionalität	Reaktivität, Selektivität, Oberflächenbenetzung, funktionale Gruppen	(Photo)Katalyse Oberflächenbeschichtung Ab- / Adsorption	Katalyse Oberflächen-eigenschaft	Nano-Chemo-sensoren Lab-on-Chip	Katalysatoren		Farbstoffsolarzell Org. Solarzellen Brennstoffzelle
	Biologische Funktionalität	Analyse Biosysteme, Bio-Baupläne für Nanosysteme	Bioreaktoren Katalyse	Bioreaktoren Katalyse	Nano-Bio-sensoren Bio-Lab-on-Chip		Biofilter	
	Thermodynamische Funktionalität	Wärmeleitfähigkeit und -isolation						Thermoelektrik

Tabelle 3: Anwendungslandkarte für Funktionalitäten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie

Die Tabelle 3 gibt als eine Art Anwendungslandkarte einen ersten Zugang zu potenziellen Anwendungsgebieten der Nanotechnologie in der Umwelttechnologie. Umwelttechnologie-Firmen können in ihrem Bereich erkennen, welche Funktionali-

täten der Nanotechnologie Prozesse und Produkte unterstützen und optimieren. Nanoforscher können ablesen, welche ihrer Funktionalitäten in der Umwelttechnologie zum Einsatz kommen können.



2.3 Gegenüberstellung der Anwendungsfelder mit der Branchenstruktur der Umwelttechnologiefirmen in Hessen

Hessen ist auf allen wichtigen Technologiefeldern der Umwelttechnologie vertreten. 12,5 Mrd. Euro werden jährlich durch hessische Unternehmen in diesem Sektor umgesetzt. Die Abbildung 14 zeigt die Verteilung der hessischen Unternehmen der Umwelttechnologie nach Technologiebereichen für das Jahr 2007 (*Hessen Agentur 2008*). Der Bereich „Sonstiges“ 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 3) 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 2 und Abbildung 14). 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.

Einen Überblick über die im Bereich der Nanowissenschaften und Nanotechnologien tätigen Hochschulen, Forschungseinrichtungen, Netzwerke, Unternehmen und Dienstleister bietet der „Kompetenz- und Infrastrukturatlask Nanotechnologien in Hessen“ der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Wirtschaftsministeriums (www.hessen-nanotech.de).

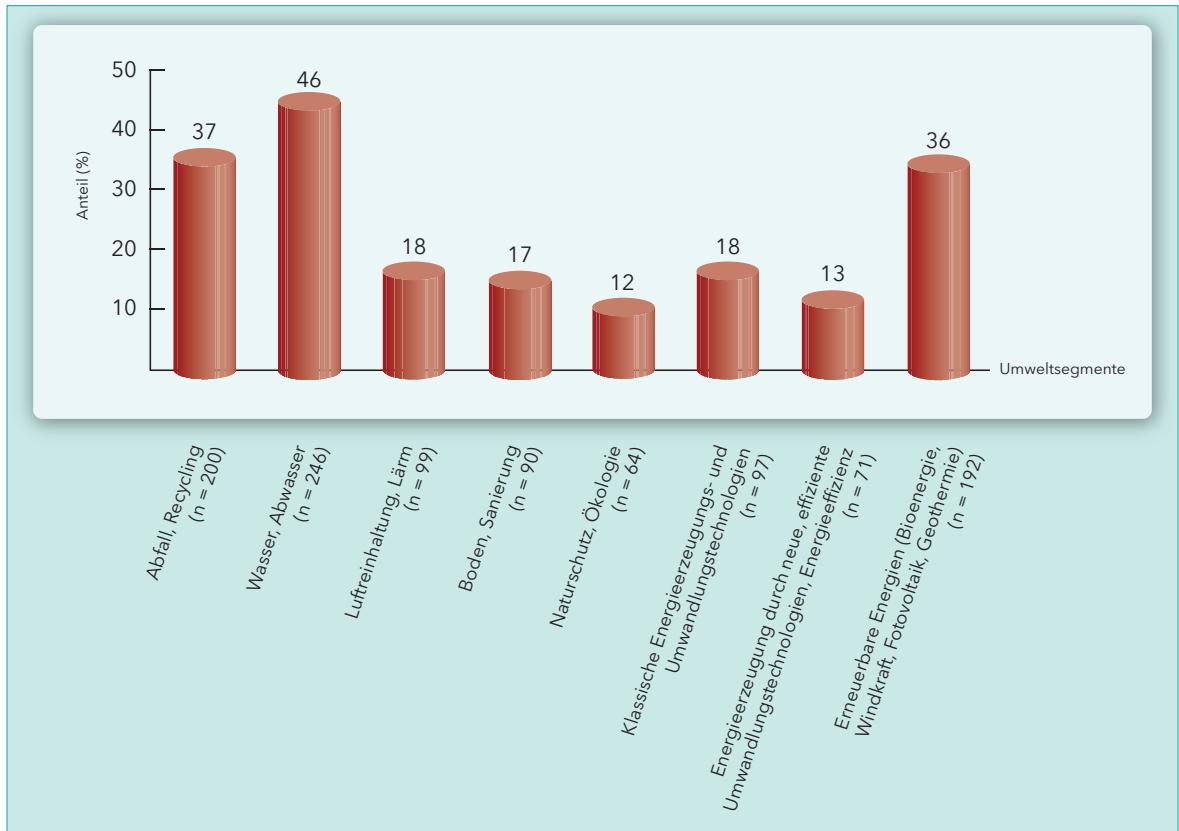


Abbildung 14: Anteil der Unternehmen je Technologiebericht ohne Sektor „Umweltmanagement/-recht /Öko-Audit“ und „Naturschutz /Ökologie“ (Summe > 100 %, da Mehrfachnennung möglich, Hessen Agentur 2008)

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 Anwendungsbereiche können einem oder mehreren Technologieberichten der Umwelttechnologie in Hessen (siehe Tabelle 2, Seite 22 und Tabelle 3, Seite 28/29) zugeordnet werden.

Anwendungsgebiet Filtration (Filter, Membran) Technologieberiche: Wasser / Abwasser, Luftreinhaltung, Integrierte Produktpolitik

Nano-optimierte Membranen / Filter werden eingesetzt, um unerwünschte Stoffe aus Wasser oder Luft wesentlich effizienter als mit herkömmlichen Filter-

systemen 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 33). 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 Dünnpfilm 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.

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

Literatur: EPA (2002), Masciagioli, Zhang (2003),

Siegel et al. (1999), TAB (2004)

Praxisbeispiel Membran:

Nanofaserbeschichtung für Filterwerkstoffe

In einer Forschungskooperation 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 abgeschiedenen Partikel. Austauschintervalle für den Filter erhöhen sich und die Energie zur Durchströmung der Filter verringert sich deutlich. Die Kunststoff-Nanofasern werden durch das Elektrospinnverfahren hergestellt. Der Filter kann für unterschiedliche Filterzwecke eingesetzt werden, das Marktvolumen wird auf mehrere hundert Millionen Euro geschätzt.

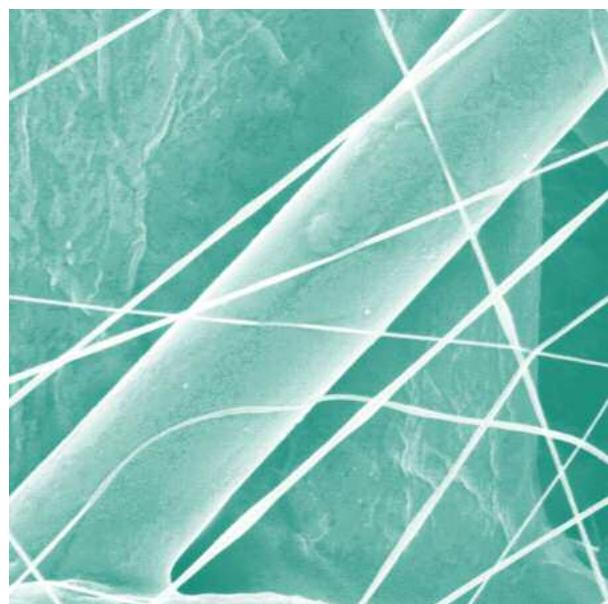


Abbildung 15:
Bild eines „Nano-Filters“ Nanoweb®
(Quelle: Hollingsworth & Vose)

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, aktivierte 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)

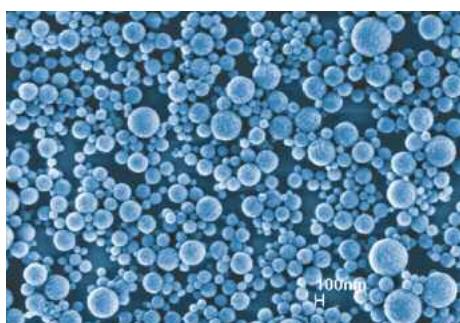


Abbildung 16:
Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von geprägten Nanopartikeln
(Quelle: Fraunhofer IGB)

Anwendungsbeispiel „Spezifische Adsorption von Micropollutants aus Abwässern mit molekular geprägten Polymernanopartikeln“

Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) werden molekular geprägte Polymernanopartikel (NanoMIPs) als hochspezifische Adsorber entwickelt. Ein Anwendungsgebiet sind Spurenstoffe in Abwässern, denn pharmazeutische Wirkstoffe werden z. B. in den biologischen Stufen in Kläranlagen nicht oder nicht effektiv abgebaut, sodass sie vermehrt in Oberflächengewässern und von dort bis in das Grundwasser gelangen.

Hierfür wurde am Fraunhofer IGB ein Verfahren entwickelt, um Nanopartikel mittels Miniemulsionspolymerisation herzustellen, die biomimetisch, d. h. die Natur nachahmend, andere Stoffe aufgrund ihrer einzigartigen molekularen Oberflächenstruktur ähnlich dem Schlüssel-Schloss-Prinzip erkennen und an sich binden können. Hierzu hinterlässt ein Template - das mit dem Zielmolekül oder Abschnitten davon identisch ist - während der Polymerisation der Nanopartikel einen Abdruck in den nanoskaligen Kugelchen.

Diese NanoMIPs können als hochspezifisches Adsorbermaterial z. B. in der Wirkstoffaufreinigung in der Pharmazie oder eben der Reinigung bzw. Rückhaltung von Spuren-Schadstoffen, sogenannten Micropollutants, in Abwässern eingesetzt werden. Hierzu wird gegenwärtig eine Filtereinheit mit den NanoMIPs in einer Versuchsanlage am Robert-Bosch-Krankenhaus Stuttgart zur Reinigung der Krankenhaus-Abwässer entwickelt und getestet. Als geeignete Modellsubstanzen wurden die Arzneimittelwirkstoffe Carbamazepin, Oxcarbazepin, Diclofenac und Pentoxifyllin ausgewählt.

Die ersten Adsorptionsversuche, die mit Pentoxifyllin und Diclofenac durchgeführt wurden, zeigten, dass die molekular geprägten Nanopartikel eine größere Menge an Pentoxifyllin bzw. Diclofenac im Vergleich mit den ungeprägten Polymeren binden. Um die geprägten Polymernanopartikel nach der Anwendung leichter aus den Abwässern abzutrennen, sollen diese mit einem magnetisierbaren Kern synthetisiert werden.

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, Geruchszersetzung, 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 zur Effizienzsteigerung in der Kraftstoffverbrennung,
- ▶ Bildung von katalytisch wirksamen Nano-Metallocidpartikeln 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 chlorinierter Phenole und gleichzeitig als Sensor dienen,
- ▶ direkte Injektion von nanoskaligen Eisenpartikeln in den Untergrund zum Abbau chlorierter organischer Verbindungen wie Trichloräthylen. Z. B. sind nanoskalige, nullwertige Eisenpartikel (Fe(0)) wegen ihrer höheren Reaktivität und dem damit verbundenen Potenzial für die Grundwasser- und Altlastensanierung von großem Interesse, oder so genanntes „Carbo-Iron“, mit Fe(0) belegte kolloidale Aktivkohle.

Grundwassersanierung mit Nano-Eisenoxidpartikeln

Im Rhein-Sieg-Kreis hat der Altlastensanierungsverband Nordrhein-Westfalen zusammen mit einem Unternehmen im Jahr 2007 begonnen, in Bornheim bei Köln mit Hilfe von Nano-Eisen ein mit dem Reinigungsmittel „Per“ (Tetrachlorethen) verseuchtes Grundwasser unter dem Gelände einer bereits seit langem geschlossenen Wäscherei zu sanieren.

Nachdem bereits vor 15 Jahren mit herkömmlichen Verfahren wie Abpumpen des Grundwassers und Bodenluftabsaugung begonnen wurde, das Grundwasser zu reinigen, konnte zwar eine deutliche Verbesserung der Belastung erreicht werden - jedoch hätte die weitere Behandlung nach Angabe der Sanierer noch weitere 50 Jahre gedauert.

Vor diesem Hintergrund kam deshalb nun ein Sanierungsverfahren zum Einsatz, das 70 nm große Eisenpartikel zum katalytischen Abbau des Schadstoffes direkt im Boden (in-situ) nutzt. Hierzu wurde nanoskaliges $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$, das in Wasser suspendiert wurde, über Injektionsrohre in das Grundwasser gepumpt. Dabei zersetzt das Nano-Eisen den Schadstoff deutlich wirksamer als bisher eingesetzte Eisenspäne. Die Nanopartikel sollen gleichzeitig im Erdboden an Ort und Stelle verbleiben und sich im Laufe der Zeit in mineralische Eisensedimente, die auch natürlich im Untergrund vorkommen, verwandeln.

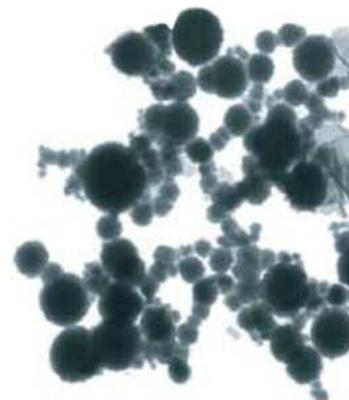


Abbildung 17:
Nano-Eisen (Quelle:
Golder Associates)

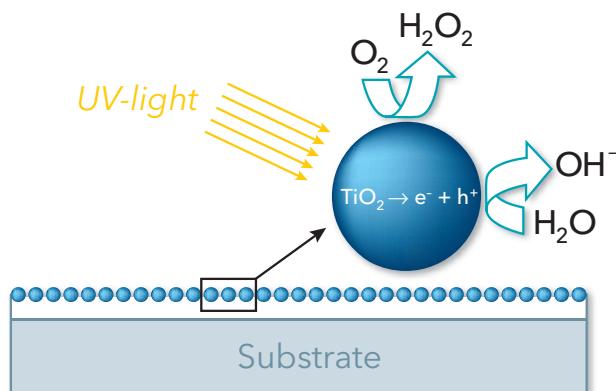


Abbildung 18: Neue Funktionalität durch Nanotechnologie: Photokatalyse mit TiO_2 -Nanopartikeln (Quelle: NANO-X)

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 maßgeschneideter 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), Masciagioli und Zhang (2003), TAB (2004), Köber und Kopinke (2007), BMU und UBA (2009), VDI TZ (2007), BMBF (2009)

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 Nanotechnologieberbasis sind bekannt:

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

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 verbesserte Empfindlichkeit, Ansprechgeschwindigkeit und Selektivität sowie einem geringeren Energieverbrauch.

Herausforderungen ergeben sich aus der Beherrschung der kritischen Dimensionen und langzeit-thermischen 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.

Literatur: EPA (2002), TAB (2004),
Royal Society and Royal Academy of Engineering (2003),
Roco und Tomellini (2002, VDI TZ 2007)

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 3, Seite 28/29). 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?

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 bekannten 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. Diese sind in Deutschland teilweise gesättigt oder zeigen ein geringes Wachstum, was an den bereits erzielten hohen Umweltstandards und dem damit verbundenen Technologieeinsatz liegt. Marktanteile werden durch die Verdrängung anderer Mitbewerber gesteigert, sodass der Einsatz der Nanotechnologie sich gegenüber etablierten Technologien oder Verfahren durchsetzen muss. Große Potenziale liegen gerade für deutsche Unternehmen jedoch im Export der Umwelttechnologie (vgl. Kap 2.1). 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 kann zu deutlich kosten-günstigeren und effizienteren Produkten und Verfahren führen (z. B. kostengünstige Solarzellen mit verbessertem Wirkungsgrad). Kosten entlang der Nutzung sind den Herstellungskosten gegenüberzustellen. Easy-to-clean Oberflächen sparen Reinigungs-kosten 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 Mess-sensoren für Umweltschadstoffe mit hoher Genauigkeit oder hochselektive Membranen) oder eine Nische im Markt belegt. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) werden „Tech-nology Enabler“ für Nanotechnologie und übernehmen damit eine Vorreiterrolle.

► **Systemintegration durch Systemanbieter**
Da Nanoforschung einen hohen Aufwand und qualifiziertes Personal erfordert, sind Koopera-tionen 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 Technolo-gien 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 bie-ten, an der Nanotechnologie zu partizipieren.

Hinweise zur Vorbereitung und Durchführung erfolgreicher Kooperationen für KMUs im Nano-tech-Bereich bietet die Broschüre Nanotech-Kooperationen (Band 12 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech, www.hessen-nano-tech.de/veroeffentlichungen).

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 Diszipli-nen. Bisher fehlen noch zu oft die Berührungs-punkte zwischen der möglichkeits- und for-schungsgetriebenen Nanotechnologie und dem problemlösungsorientierten Vorgehen der Um-welttechnologie. In Unternehmen der Umwelttech-nologie ist häufig nicht bekannt, welche Bandbreite Nanotechnologie bietet und wo ihre Einsatzgebiete liegen. Umgekehrt gilt, dass auch die Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Nanotechnolo-gie nicht wissen, was die technologischen Pro-blemfelder und Herausforderungen der Umwelt-technologie sind.

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

Ziel und Ansatzpunkt für hessische Unternehmen der Umwelttechnologie - besonders in den Berei-chen „Wasser/ Abwasser“, „Energie“, „Luftreinhaltung“, „Mess-, Steuer- und Regeltechnik“ und Fra-gestellungen 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. 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.⁹, 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 Netzwerk „NanoNetzwerkHessen“¹⁰ gibt es in Hessen eine Vernetzung der Nanowissenschaftler.

Die Aktionslinien „Hessen-Nanotech“ und „Hessen-Umwelttech“¹¹ 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.

Vor dem Hintergrund der Studie zu den Umwelttechnologieanbietern in Hessen (Hessen Agentur

2008) 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 Bund¹² und EU¹³ bieten die Möglichkeit zur Förderung technologischer Forschung und Projektkonsortien. In Hessen wurde speziell das Programm ModellProjekte der Hessen Agentur aufgesetzt, um kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) unterstützen und beraten zu können, die gemeinsam mit weiteren Partnern aus dem privatwirtschaftlichen Umfeld, mit Hochschulen oder Forschungsinstituten technologieorientierte Vorhaben mit hohem Forschungs- und Entwicklungsaufwand realisieren möchten. Hierzu stehen derzeit drei Maßnahmenlinien zur Verfügung:¹⁴

1. Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz mit der Förderlinie 3: LOEWE-KMU-Verbundvorhaben. Bezuschusst werden darin Forschungsvorhaben, die durch kleine und mittlere Unternehmen aus Hessen im Verbund mit Hochschulen und öffentlichen Forschungseinrichtungen realisiert werden.
2. Hessen ModellProjekte für technologieorientierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zwischen KMU (unter möglicher Einbeziehung öffentlicher Forschungseinrichtungen) mit Vorrang in Nord- und Mittelhessen sowie der Odenwaldregion. Hierzu stehen Mittel des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) zur Verfügung.

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

10 www.nanonetwerkhessen.de

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

12 Aktuelle Bekanntmachungen von Förderprogrammen und Förderrichtlinien des BMBF finden sich unter www.bmbf.de/foerderungen/677.php

13 Aktuelle Aufrufe der EU im 7. Rahmenprogramm finden sich unter <http://cordis.europa.eu/fp7/dc/index.cfm>

14 Weitere Informationen siehe Band 12 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung: „Nanotech-Kooperationen: Erfolgreiche Kooperationen für kleine und mittlere Nanotechnologie-Unternehmen“.

[www.hessen-nanotech.de/mm/NanoKoop_final_Web.pdf]

3. Modellhafte Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit dem Schwerpunkt Automotive (ebenfalls mit EFRE- und Kofinanzierung durch das Land Hessen). Dieses Programm ist als Ergänzung zu Programm 2 mit einem fachlichen Schwerpunkt zu verstehen.

► **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.

► **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-Umwelttech“ 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

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 Zukunfts offensive für Nanotechnologie, Herausgegeben durch das Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin 2004, Bezug unter www.bmbf.de

BBC Research (2008)

NANOTECHNOLOGY: A REALISTIC MARKET ASSESSMENT (Report NAN031C), BCC Research, Wellesley 2008 (www.bccresearch.com/pressroom/NAN031C.html)

Berger (2009)

Wachstumsstrategien in der Umwelttechnik. Green Tech made in Austria. Roland Berger Strategy Consultants, Wien, Mai 2009

BfR (2008)

Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung - Repräsentativerhebung und morphologisch-psychologische Grundlagenstudie. Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Herausgegeben von René Zimmer, Rolf Hertel, Gaby-Fleur Böll. BfR-Wissenschaft 05/2008. Berlin 2008

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

BMBF (2006)

Nano-Initiative - Aktionsplan 2010. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Bonn, Berlin 2006

BMBF (2009)

Schadstoffabbau: Grundwassersanierung mit Nano-Eisen. Webseite der „Initiative nanoTruck“ des BMBF (Hightech aus dem Nanokosmos > Themen > Umweltschutz), Webseite: www.nanotruck.de/hightech-aus-dem-nanokosmos/themen/umweltschutz/schadstoffabbau-bodenreinigung-mit-nano-eisen.html, Aufruf am 16.02.2009

BMBF (Hrsg.) (2009)

nano.DE-Report 2009 - Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Bonn 2009

BMU (2006)

Ökologische Industriepolitik - Memorandum für einen „New Deal“ von Wirtschaft, Umwelt und Beschäftigung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin 2006

BMU (Hrsg.) (2009)

GreenTech made in Germany 2.0 - Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin 2009

BMU, UBA (Hrsg.) (2009)

Umweltwirtschaftsbericht 2009. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Umweltbundesamt (UBA). Januar 2009. Berlin, Dessau-Roßlau 2009

BMU, UBA (Hrsg.) (2009)

Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie. Fallstudie im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern (Förderkennzeichen 206 14 132/05) von Fraunhofer ISI und Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) der VDI Technologiezentrum GmbH. Berlin, Dessau-Roßlau 2009

Bullinger, Hans-Jörg (1994)

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

- Chemical Industry (2003)
 Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials By Design: From Fundamentals to Function. Chemical Industry Vision2020 Technology Partnership Energetics, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy
- 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
- Europäische Kommission (2007)
 Nanowissenschaften und Nanotechnologien: Aktionsplan für Europa 2005-2009. Erster Durchführungsbericht 2005-2007. KOM(2007) 505 endgültig. Brüssel 2007
- 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 Technologie-transfer 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

- Hessen Agentur (2005)
 Nanotechnologie in Hessen - Eine Bestandsaufnahme auf Basis von Unternehmensbefragungen, Studie der 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
- Hessen Agentur (2008)
 Umwelttechnologie-Anbieter in Hessen - Bestandsaufnahme 2007, Band 6 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Umwelttech, Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden 2008
- 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
- Karn, Barbara (2008)
 The Road to Green Nanotechnology. Journal of Industrial Ecology. 12(3): S. 263-266.
- Köber, Ralf; Kopinke, Frank-Dieter (2007)
 Sanieren mit Nanoeisen - Nullwertiges Eisen in Form kolloidalen Partikel zur Quellen- und Fahnensanierung im Grundwasser. TerraTech 6/2007, S.17-20
- Lux Research (2007)
 Nanotech's Impact on Energy and Environmental Technologies. Lux Research. Report NTS-R-07-004. June 2007.
 New York
- Masciagioli, 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
- Membrane Technology (2006)
 News: Nano-rust removes arsenic from drinking water.
 Membrane Technology, Vol 2007, Issue 3, Seite 6
- 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
- OECD (2008)
 Compendium of Patent Statistics 2008
 Download www.oecd.org/dataoecd/5/19/37569377.pdf
- Rastogi, A. K. (2004)
 Anwendung von Mikro- und Nanostrukturen in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie - Eine Kurzstudie, Bericht Nr. BT 70046-01 für die Aktionslinie „hessen-umwelttech“ des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden 2004
- René Zimmer, Rolf Hertel, Gaby-Fleur BöI (Hrsg.) (2008)
 Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung - Repräsentativerhebung und morphologisch-psychologische Grundlagenstudie. Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR). BfR-Wissenschaft 05/2008. Berlin 2008
- Roco, M. (2005)
 International Perspective on Government Nanotechnology Funding in 2005. Journal of Nanoparticle Research. 7(6): S. 707-712.
- Roco, Mihail; Tomellini, Renzo (2002)
 Nanotechnology - Revolutionary opportunities and social 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 Nano-Science, 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
- SusChem (2005) Sustainable Chemistry Strategic Research Agenda 2005 - Anhang. European Technology Platform (ETP) for Sustainable Chemistry (SusChem). Brüssel 2005
www.suschem.org
- 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 Polysiloxanes 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
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2007) Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes (UFOPLAN 206 14 132/04), durch geführt von Roland Berger Strategy Consultants. Berlin 2007. Download unter www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3337.pdf
- 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
- VDI TZ (2007) Nanotechnologien für den Umweltschutz. Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg.). Band 71, Düsseldorf 2007
- VDI TZ (2009) Kohlenstoff-Nanoröhren - Technologieanalyse, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg.), Autoren: Brand, L.; Hoffknecht, A.; Wagner, V.; Zweck, A. et al. Band Nr. 79, Januar 2009, Düsseldorf.
Download unter www.zukuenftigetechnologien.de/detail.php?c=469&s=1
- 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

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

(Auswahl, Stand Februar 2009, siehe unter <http://es.epa.gov/ncer/index.html>)

Anwendungsfeld: Analytik	Anwendungsfeld: Beschichtung
Conducting-Polymer Nanowire Immunosensor Arrays for Microbial Pathogens University of California – Riverside Zeitraum: Juni 2005-März 2008	The Effect of Surface Coatings on the Environmental and Microbial Fate of Nanoiron and Feoxide Nanoparticles Carnegie Mellon University, Chapman University, Rice University Zeitraum: September 2006-August 2009
Anwendungsfeld: Analytik	Anwendungsfeld: Energiesysteme
Development of an In Vitro Test and a Prototype Model to Predict Cellular Penetration of Nanoparticles Arizona State University – Main Campus, Technische Universität at Dresden, University of Georgia Zeitraum: Juli 2008-Juni 2011	Advancing Hybrid Solar Technology by New Nano-Material Investigation University of California – Berkeley, Zeitraum: September 2005-August 2008
Anwendungsfeld: Analytik	Anwendungsfeld: Energiesysteme
Nanocavity sensor array for the isolation, detection and quantitation of engineered nanoparticles SUNY at Binghamton Zeitraum: Dezember 2008-November 2011	Comparative Life Cycle Analysis of Nano- and Bulk-materials in Photovoltaic Energy Generation Columbia University Zeitraum: Juni 2007-Mai 2009
Anwendungsfeld: Analytik	Anwendungsfeld: Energiesysteme
Nanosensor for Detection of Saxitoxin University of Arkansas at Fayetteville Zeitraum: August 2005-Juli 2008	Highly Bright, Heavy Metal-Free and Stable Doped Semiconductor Nano-Phosphors for Economical Solid State Lighting Alternatives Nanomaterials & Nanofabrication Laboratories Zeitraum: Mai 2008-April 2010
Anwendungsfeld: Analytik	Anwendungsfeld: Filtration
Rapid and Quantitative Detection of Helicobacter Pylori and E. Coli O157 in Well Water Using a Nano-Wired Biosensor and QPCR Michigan State University Zeitraum: November 2006-Oktober 2009	Developing New Membranes Based on Nanostructured Block Copolymers University of North Dakota Zeitraum: August 2008-April 2010
Anwendungsfeld: Analytik	Anwendungsfeld: Katalyse
Sensitive, Quantitative, and Portable Anatoxin Assay Using Apatamers and Quantum Dot Nanoshell Reporting BioTex Inc. Zeitraum: März 2008-August 2008	Design and Fabrication of High Surface Area Photocatalytic Nanostructures for High Efficiency Solar Degradation of Environmental Pollutants University of California – Santa Barbara Zeitraum: Januar 2006-Dezember 2008
Anwendungsfeld: Beschichtung	Anwendungsfeld: Katalyse
Enabling Electrostatic Painting of Automotive Polymers With Low Cost Carbon Nanofibers Applied Sciences, Inc. Zeitraum: Mai 2007-April 2009	Synthesis and Application of a New Class of Stabilized Nanoscale Iron Particles for Rapid Destruction of Chlorinated Hydrocarbons in Soil and Groundwater Auburn University Main Campus Zeitraum: August 2005-Juli 2008
Anwendungsfeld: Beschichtung	Anwendungsfeld: Nanowerkstoffe
Impact of Physiochemical Properties on Skin Absorption of Manufactured Nanomaterials North Carolina State University Zeitraum: September 2006-August 2009	Environmentally Benign Injection Molding University of Wisconsin – Milwaukee Zeitraum: August 2007-Juli 2010

Anwendungsfeld: Nanowerkstoffe**Environmentally Benign Lead-Free Electrically Conductive Adhesive for Electronic Packaging Manufacturing**

Georgia Institute of Technology

Zeitraum: Dezember 2003-Dezember 2008

Anwendungsfeld: Nanowerkstoffe**Nanostructured Material Design for Hg, As, and Se Capture**

Worcester Polytechnic Institute, Stanford University

Zeitraum: Juli 2007-Juni 2008

Anwendungsfeld: Nanowerkstoffe**Nanotechnology: A Novel Approach to Prevent Biocide Leaching**

Michigan Technological University, Michigan State University, West Virginia University

Zeitraum: Juli 2005-Juni 2008

Anwendungsfeld: Nanowerkstoffe**Sustainable Polymeric Nanocomposites**

PolyNew, Inc.

Zeitraum: Mai 2007-April 2009

Anwendungsfeld: Schadstoffabbau**Fate and Transformation of C₆₀ Nanoparticles in Water Treatment Processes**

Georgia Institute of Technology

Zeitraum: September 2005-August 2008

Anwendungsfeld: Schadstoffabbau**Nanocrystalline Materials for Removal of Reduced Sulfur and Nitrogen Compounds From Fuel Gas**

NanoScale Materials, Inc.

Zeitraum: Mai 2008-April 2010

Anwendungsfeld: Schadstoffabbau**Nanomaterial Solutions for Hot Coal Gas Cleanup**

nGimat Co.

Zeitraum: März 2008-August 2008

Anwendungsfeld: Schadstoffabbau**Nanostructured Materials for Environmental Decontamination of Chlorinated Compounds**

Tulane University

Zeitraum: August 2005-Juli 2008

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Acute and Developmental Toxicity of Metal Oxide Nanoparticles in Fish and Frogs**

Southern Illinois University - Edwardsville, Clemson University, Texas Tech University

Zeitraum: Oktober 2005-Oktober 2008

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Aquatic Toxicity of Carbon-Based Nanomaterials at Sediment-Water Interfaces**

University of Missouri - Columbia, Columbia Environmental Research Center, USGS

Zeitraum: April 2007-März 2010

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Bioavailability and Fates of CdSe and TiO₂ Nanoparticles in Eukaryotes and Bacteria**

University of California - Santa Barbara, McGill University

Zeitraum: Mai 2007-Mai 2010

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Bioavailability, Environmental Transformation, and Detoxification of Core/Shell Nanomaterials**

Brown University,

Zeitraum: Juli 2008-Juni 2011

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Characterization of the Potential Toxicity of Metal Nanoparticles in Marine Ecosystems Using Oysters**

University of North Carolina at Charlotte,

Wake Forest University

Zeitraum: April 2007-April 2010

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Ecotoxicology of Underivatized Fullerenes (C60) in Fish**

University of Tennessee - Knoxville

Zeitraum: Mai 2007-Mai 2010

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Effects of Nanomaterials on Human Blood Coagulation**

West Virginia University, SUNY at Stony Brook

Zeitraum: Februar 2006-Januar 2009

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Environmental Transport, Biodegradation, and Bioaccumulation of Quantum Dots and Oxide Nanoparticles**

University at Buffalo

Zeitraum: Juli 2008-Juni 2011

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Evaluating the Impacts of Nanomanufacturing via Thermodynamic and Life Cycle Analysis**

Ohio State University - Main Campus

Zeitraum: Januar 2006-Dezember 2008

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung**Functionalized Metal Oxide Nanoparticles: Environmental Transformations and Ecotoxicity**

University of Wisconsin

Zeitraum: Juli 2008-Juni 2011

Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	Anwendungsfeld: Umweltauswirkung
Genomics-based Determination of Nanoparticle Toxicity: Structure-function Analysis Oregon State University, Rice University Zeitraum: Mai 2007-Mai 2009	Structure-function Relationships in Engineered Nanomaterial Toxicity Rice University Zeitraum: Dezember 2005-November 2008
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	Anwendungsfeld: Umweltauswirkung
Impact of Nanomaterial Zinc Oxide on Microbe Communities Texas Tech University Zeitraum: August 2008-April 2010	Sustainability Assessment of Nanotechnology Manufacturing Processes Washington University Zeitraum: September 2006-September 2009
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	Anwendungsfeld: Umweltauswirkung
Iron Oxide Nanoparticle-Induced Oxidative Stress and Inflammation University of Rochester Zeitraum: September 2004-Februar 2008	The Bioavailability, Toxicity, and Trophic Transfer of Manufactured ZnO Nanoparticles: A View from the Bottom Savannah River Ecology Laboratory, University of Georgia, Dartmouth College Zeitraum: Oktober 2005-September 2008
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	Anwendungsfeld: Umweltauswirkung
Methodology Development for Manufactured Nanomaterial Bioaccumulation Test Arizona State University - Main Campus, University of Delaware Zeitraum: September 2006-August 2009	Transformation and Fate of Manufactured Metal Oxide and Metal Nanoparticles in Aqueous Environments University of Iowa Zeitraum: Januar 2009-Januar 2012
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	
Microbial Impacts of Engineered Nanoparticles Rice University Zeitraum: Dezember 2005-Dezember 2008	
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	
Nanoparticle Stability in Natural Waters and its Implication for Metal Toxicity to Water Column and Benthic Organisms Colorado School of Mines, Dartmouth College Zeitraum: April 2007-April 2010	
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	
Photochemical Fate of Manufactured Carbon Nanomaterials in the Aquatic Environment Purdue University - Main Campus Zeitraum: Mai 2007-April 2009	
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	
Quantum Dot Weathering and its Effects on Microbial Communities Rice University Zeitraum: Juli 2008-Juni 2011	
Anwendungsfeld: Umweltauswirkung	
Role of Particle Agglomeration in Nanoparticle Toxicity New York University: Nelson Institute of Environmental Medicine - Tuxedo Zeitraum: Oktober 2005-September 2008	

Informationen & Adressen

Ansprechpartner für Technologieberatung Umwelt- bzw. Nanotechnologie in Hessen

Aktionslinie Hessen-Umwelttech

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

Kontakt:

www.hessen-umwelttech.de

HA Hessen Agentur GmbH

Dr. Carsten Ott

Projektleiter Hessen-Umwelttech

Abraham-Lincoln-Straße 38-42

D-65189 Wiesbaden

Telefon +49 (0) 611 774-8648

Telefax +49 (0) 611 774-8620

carsten.ott@hessen-agentur.de

Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung

Maria Rieping

Kaiser-Friedrich-Ring 75

D-65185 Wiesbaden

Telefon +49 (0) 611 815-2472

Telefax +49 (0) 611 815-2228

maria.rieping@hmvw.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) 611 774-8614

Telefax +49 (0) 611 774-8620

alexander.bracht@hessen-agentur.de

Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Verkehr und Landesentwicklung

Sebastian Hummel

Kaiser-Friedrich-Ring 75

D-65185 Wiesbaden

Telefon +49 (0) 611 815-2471

Telefax +49 (0) 611 815-2228

sebastian.hummel@hmvw.hessen.de

TechnologieTransferNetzwerk TTN-Hessen

- ▶ Transparenz in Technologieangebot in Hessen
- ▶ Vernetzung des Angebots der Transfereinrichtungen, Abstimmung mit den Anforderungen der Unternehmen
- ▶ Unterstützung von Unternehmen 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

D-65189 Wiesbaden

Telefon +49 (0) 611 774-8691

Telefax +49 (0) 611 774-8620

gerrit.stratmann@hessen-agentur.de

NanoNetzwerkHessen - NNH10⁻⁹

- ▶ 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.nanonetwerkhessen.de

Dr. Beatrix Kohnke

Leitung der Geschäftsstelle

Mönchebergstraße 19

D-34109 Kassel

Telefon +49 (0) 561 804-2219

Telefax +49 (0) 561 804-2226

Kompetenznetzwerke der Nanotechnologie in Hessen

NanoNetzwerkHessen

Koordinierung der Forschung durch Vernetzung der hessischen Universitäten und Fachhochschulen
www.nanonetwerkhessen.de

CINSaT - Center for interdisciplinary Nanostructure Science and Technology

Kooperation aus Wissenschaftler(innen) der Physik, Chemie, Biologie und Elektrotechnik an der Universität Kassel
www.cinsat.uni-kassel.de

WZMW - Wissenschaftliches Zentrum für Materialwissenschaften der Philipps-Universität Marburg

Forschungsschwerpunkt Materialwissenschaften mit den Fachbereichen Chemie, Geowissenschaften und Physik an der Universität Marburg
www.uni-marburg.de/wzmw/

Universitäten und Fachhochschulen: Wissenschaftliche Koordinatoren für das NanoNetzwerkHessen

Koordination

Dr. Beatrix Kohnke
Entwicklungsplanung, E2
Mönchebergstraße 19, 34125 Kassel
Telefon 0561 804-2219, Telefax 0561 804-2226
beatrix.kohnke@uni-kassel.de

Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr. Matthias Rehahn
Fachgebiet Makromolekulare Chemie
Fachbereich 07
Petersenstraße 22, 64287 Darmstadt
Telefon 06151 16-5278, Telefax 06151 16-4670
mrehahn@dki.tu-darmstadt.de

Goethe-Universität Frankfurt am Main

Prof. Dr. Robert Tampé
Fachgebiet Chemie / Biologie
Institut für Biochemie
Marie-Curie-Straße 9, 60439 Frankfurt am Main
Telefon 069 798-29475/-29476, Telefax 069 798-29495
tampe@em.uni-frankfurt.de

Justus-Liebig-Universität Gießen

Prof. Dr. Bruno K. Meyer
Fachgebiet Experimentalphysik 1
I. Physikalisches Institut der Universität Gießen
Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen
Telefon 0641 99-33100, Telefax 0641 99-33109
Bruno.K.Meyer@exp1.physik.uni-giessen.de

Universität Kassel

Prof. Dr. Hartmut Hillmer
Fachgebiet Technische Elektronik
Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik
Heinrich-Plett-Straße 40, 34132 Kassel
Telefon 0561 804-4885, Telefax 0561 804-4488
hillmer@uni-kassel.de

Philipps-Universität Marburg

Prof. Dr. Andreas Greiner
Fachgebiet Makromolekulare Chemie, Fachbereich Chemie
Hans-Meerwein-Straße, Gebäude H, 35032 Marburg
Telefon 06421 28-25573, -25777, Telefax 06421 28-25785
greiner@staff.uni-marburg.de

Fachhochschule Darmstadt

Prof. Dr. Ralph Stengler
Fachgebiet Automatisierungstechnik, Messtechnik,
Werkstoffkunde im Fachbereich Kunststofftechnik
Berliner Allee 61, 64295 Darmstadt
Telefon 06151 168562, Telefax 0661 168977
stengler@fh-darmstadt.de

Fachhochschule Frankfurt am Main

Prof. Dr. Werner Liedy
Fachbereich 2, Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main
Telefon 069 1533-2289, Telefax 069 1533-2387
liedy@fb2.fh-frankfurt.de

Fachhochschule Gießen-Friedberg

Prof. Dr. Ubbo Ricklefs
Fachgebiet Technische Mechanik, Photonik, Bildverarbeitung
Fachbereich Elektrotechnik
Wiesenstraße 14, 35390 Gießen
Telefon 0641 3091914
ubbo.ricklefs@ei.fh-giessen.de

Fachhochschule Fulda

Prof. Dr. Alexander Osipowicz
Fachgebiet Physik
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Marquardstraße 35, 36039 Fulda
Telefon 0661 9640-556, Telefax 0661 9640-559
alexander.osipowicz@et.fh-fulda.de

Fachhochschule Wiesbaden

Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer
Fachbereich 10 - Physikalische Technik
Am Brückweg 26, 65428 Rüsselsheim
Telefon 06142 898-512, Telefax 06142 898-528
bauer@physik.fh-wiesbaden.de

Auswahl der universitären Forschung in Hessen auf dem Gebiet der Nanotechnologie

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

Internetlinks zur Nanotechnologie

Aktionslinie „Hessen-Nanotech“	Kompetenznetzwerke in der Nanotechnologie in Deutschland
www.hessen-nanotech.de	
Informationsplattform zur Nano-Sicherheit	
www.nano-sicherheit.de	www.kompetenznetze.de/navi/de/Innovationsfelder/nanotechnologie.html
Plattform zur Nanotechnologie in Hessen	Informationsserver (Cordis) der EU zur Nanotechnologie im 6. Rahmenprogramm
www.nanoportal-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.nanonetwerkhessen.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	

Schriftenreihe der Aktionslinie

des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

Hessen

Umwelttech

Band 1 **Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie**
Innovationspotenziale für Unternehmen

Band 2 **Mittel- und Osteuropa - Zukunftsmärkte für hessische Umwelttechnologie**
Beispiel Abwassermarkt der Slowakei

Band 3 **Auslandsmärkte - Zukunftspotenziale für hessische Umwelttechnologieunternehmen**

Band 4 **Unternehmenskooperation am Beispiel des Recyclings gemischter Bau- und Abbruchabfälle**

Band 5 **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS) für KMU in Hessen**
Umwelt schützen - Kosten senken

Band 6 **Umwelttechnologie-Anbieter in Hessen - Bestandsaufnahme 2007**
Zusammenfassung

Band 7 **Umwelttechnologieforschung für die Unternehmenspraxis**
Beispiele anwendungsnaher Forschung an hessischen Hochschulen

Band 8 **Praxisleitfaden - Energieeffizienz in der Produktion**

Band 9 **Strömungssimulation in der Umwelttechnologie**
Effiziente Versuchsplanung mit CFD (Computational Fluid Dynamics)

Informationen / Download / Bestellungen:
www.hessen-umwelttech.de

Schriftenreihe der Aktionslinie

Hessen Nanotech

Nanotech

des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

- | | | | |
|---------------|---|----------------|---|
| Band 1 | Einsatz von Nanotechnologie in der hessischen Umwelttechnologie
Innovationspotenziale für Unternehmen

Uses of Nanotechnology in Environmental Technology in Hessen
Innovation potentials for companies | Band 8 | NanoNormung
Normung im Bereich der Nanotechnologien als Chance für hessische Unternehmen |
| Band 2 | Nanomedizin
Innovationspotenziale in Hessen für Medizintechnik und Pharmazeutische Industrie | Band 9 | Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor

Nanotechnology Applications in the Energy Sector |
| Band 3 | Nanotechnologie im Auto
Innovationspotenziale in Hessen für die Automobil- und Zuliefer-Industrie | Band 10 | Werkstoffinnovationen aus Hessen
- Potenziale für Unternehmen |
| Band 4 | NanoKommunikation
Leitfaden zur Kommunikation von Chancen und Risiken der Nanotechnologien für kleine und mittelständische Unternehmen in Hessen

Supplement zum Leitfaden NanoKommunikation
Innovationsfördernde Good-Practice-Ansätze zum verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien | Band 11 | Sichere Verwendung von Nanomaterialien in der Lack- und Farbenbranche
- Betriebsleitfaden |
| Band 5 | Nanotechnologien für die optische Industrie
Grundlage für zukünftige Innovationen in Hessen | Band 12 | Nanotech-Kooperationen
Erfolgreiche Kooperationen für kleine und mittlere Nanotechnologie-Unternehmen |
| Band 6 | NanoProduktion
Innovationspotenziale für hessische Unternehmen durch Nanotechnologien im Produktionsprozess | Band 13 | Mikro-Nano-Integration
Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik |
| Band 7 | Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen | Band 14 | Materialeffizienz
durch den Einsatz von Nanotechnologien und neuen Materialien |
| | | Band 15 | Nanotechnologie in Kunststoff
Innovationsmotor für Kunststoffe, ihre Verarbeitung und Anwendung |
| | | Band 16 | NanoAnalytik
Anwendung in Forschung und Praxis |
| | | Atlas | Kompetenz- und Infrastrukturatlas Nanotechnologien in Hessen |
| | | Atlas | Kompetenzatlas Photonik in Hessen |

Informationen / Download / Bestellungen:
www.hessen-nanotech.de/veroeffentlichungen

Hessen

Nanotech

www.hessen-nanotech.de

Hessen

Umwelttech

www.hessen-umwelttech.de



www.iao.fraunhofer.de

Projektträger der Aktionslinien **Hessen-Nanotech**
und **Hessen-Umwelttech** des Hessischen Ministeriums
für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung



HessenAgentur

HA Hessen Agentur GmbH