

Abschlussbericht der AG 1

Nanomaterialien – Chancen für Umwelt und Gesundheit

NanoDialog 2006 – 2008 / Fraunhofer-Gesellschaft, München

0. Einleitung

Die Zielsetzung der Arbeitsgruppe 1 »Chancen für Umwelt und Gesundheit« war es, Entlastungspotenziale zu identifizieren, die sich aus dem Einsatz von Nanomaterialien ergeben. Die Aufgabenstellung der Arbeitsgruppe beinhaltet, die Potenziale und Chancen von Nanomaterialien speziell für den Umwelt- und Gesundheitsschutz herauszuarbeiten und diese mit Hilfe von konkreten Produktbeispielen zu verdeutlichen. Der Fokus der weiteren Arbeit wurde nach einer ersten inhaltlichen Sondierungsphase auf folgende Schwerpunkte gelegt:

- **Energiespeicherung**
- **Energie- / Ressourceneffizienz**
- **Umweltschutz**
- **Gesundheitsschutz**

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe aus Industrie, anwendungsorientierter Forschung, Umwelt- und Verbraucherschutzverbänden sowie Behörden haben konkrete und praxisnahe Produktbeispiele zusammengetragen, die anschaulich die bereits erreichten und zukünftig zu erwartenden Potenziale dieser Querschnittstechnologie verdeutlichen sollen. Dieses Vorgehen diente dazu, die tatsächlichen Entlastungseffekte, aber auch die Möglichkeiten für die Zukunft besser verstehen und einschätzen zu können. Die Potenziale und Chancen in den Themenfeldern werden unten konkret dargestellt.

Die Arbeitsgruppe diskutierte auch über Möglichkeiten einer nachhaltigen Produktgestaltung und Technologieentwicklung. Hierzu haben die Bundesumweltbehörden Kriterien mit dem Ziel erarbeitet, positive Effekte und mögliche Potenziale von Produkten mit Nanomaterialien entlang ihres Lebensweges im Vergleich zu bisher genutzten Produkten zu identifizieren. Wesentliche Kriterien im Sinne von Umwelt- und Gesundheitsschutz sind z.B.

- mögliche oder tatsächliche **Energieeffizienz** im Vergleich zum bisherigen Produkt
- Beiträge zum **Klimaschutz**, z.B. Einsparung an Treibhausgasen
- **Ressourceneffizienz**: Einsparung von Stoffmengen bei Herstellung sowie Ge- und Verbrauch eines neuen Produkts. Welche Potenziale bestehen für die Abfallminimierung oder die Schonung von Rohstoffen?
- **Ersatz gefährlicher Stoffe** (z.B. Gifte, Schwermetalle, Chlorverbindungen, organische Lösemittel) durch den Einsatz von gesundheits- und umweltverträglichen Stoffen mit Hilfe von Nanomaterialien
- Beitrag zum Arbeits-, Verbraucher- und Umweltschutz durch die **Erhöhung der Sicherheit** in der Herstellung (Prozessführung) und Anwendung eines Produktes
- **Verbesserte Reinigungsleistung** (z.B. in der Abwasser-/ Grundwasserbehandlung, Abgasreinigung)

Die Diskussion um die konkrete Anwendung der Kriterien wurde in der AG 1 nicht abgeschlossen. Die Kriterien könnten angesichts des frühen Stadiums der Technologieentwicklung eine Richtschnur für eine nachhaltige Technologieentwicklung sein. So sollten vor allem künftige Produkte und Anwendungen mit Nanomaterialien dem Prinzip der Nachhaltigkeit folgen und Innovationen speziell im Sinne des Umwelt- und Gesundheitsschutz entwickelt und umgesetzt werden.

1. Chancen und Potenziale der Nanotechnologie für optimierte Energiespeicherung, Ressourceneffizienz sowie den Schutz von Umwelt und Gesundheit

Nanotechnologie ist nicht grundsätzlich neu. In der Elektronik z.B. gehört die nanoskalige Strukturierung bei der Chipherstellung oder bei der Entwicklung neuer Festplatten für Computer schon heute zum Handwerk. Der NanoDialog findet jedoch auch vor dem Hintergrund statt, dass Nanomaterialien eine immer breitere Anwendung in alltäglichen Produkten finden und zudem eine schnelle und dynamische Entwicklung für die Zukunft erwartet wird.

Dass es sich bei der Nanotechnologie um eine Querschnittstechnologie mit einem sehr breiten Anwendungsradius handelt, ist allgemein bekannt. Dabei stellt sich die Frage, welche neuen Qualitäten diese Materialien und Produkte nun konkret für unser alltägliches Leben und für den Schutz unserer Umwelt und Gesundheit bergen. Immer mehr Anwendungen entstehen beispielsweise in der Energie- und Umweltechnik sowie bei der Optimierung von verschiedensten Materialien und Oberflächen. Das Prinzip ist Folgendes: Die Nanotechnologie nutzt die besonderen Eigenschaften, die für viele Nanostrukturen charakteristisch sind. Diese hängen nicht allein von der Art des Ausgangsmaterials ab, sondern in besonderer Weise von ihrer Größe und Gestalt. Neue Verfahren ermöglichen die Herstellung, Verarbeitung und weitergehende Nutzung dieser winzigen Materialien und versprechen dadurch neue Qualitäten, auch für alltägliche Produkte (z.B. Kratzfestigkeit, Hitzebeständigkeit, leicht und zugleich sehr stabile Materialien, Leitfähigkeit).

Im Folgenden werden die Potenziale der Nanotechnologie in den vier Anwendungsfeldern konkreter beschrieben. Dies sind die Anwendungsfelder Energiespeicherung, Energie-/Ressourceneffizienz, Umweltschutz und Gesundheitsschutz. Es wird versucht, neben den neuen Produkteigenschaften oder intelligenten Funktionslösungen den Mehrwert des Produktes sowie den aktuellen Entwicklungsstand der nanotechnologischen Anwendung und sich abzeichnende Trends zu beschreiben.

1.1. Verbesserte Energiespeicherung durch Nanostrukturen

Die derzeit größte Entwicklungsdynamik bei aufladbaren Batterien ist bei **Lithium-Ionen-Akkus** zu beobachten. Sie können von einer Vielzahl potentieller nanostrukturierter Elektrodenmaterialien profitieren.

Produkte
Hohe
Leistungsdichte,
Convenience

Nanostrukturierte Lithium-Eisenphosphat-Kathoden beispielsweise erreichen hohe Leistungsdichten. Aus diesem Grund kann dieser Batterietyp auch bei Anwendungen mit hohen Leistungsanforderungen (wie bei Elektrowerkzeugen, z.B. Bohrmaschinen für Heimwerker) die bislang verwendeten NiCd-Batterien ablösen.

Ein anderes nanostrukturiertes Elektrodenmaterial besteht aus Lithiumtitanat. Im Gegensatz zur üblicherweise verwendeten Graphit-Elektrode verändert sich das Volumen der Lithiumtitanat-Elektrode beim Einlagern von Lithium-Ionen kaum. Diese Eigenschaft bietet besondere Sicherheit. Eine weitere wesentliche Verbesserung besteht darin, dass diese Batterie mit Nanokompositen aus Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) und Nanopartikeln aus Metall und Oxiden hohe Energiedichten und hohe Zyklendauern realisiert. Somit eignen sich diese Komponenten für den Bau großer Batterien z.B. für Elektrofahrzeuge und Elektro-Hybridfahrzeuge, in denen bislang noch bevorzugt Nickel-Metallhydrid-Batterien von deutlich geringerer Energiedichte verwendet werden.

Folglich kann die Entwicklung einer neuen Generation von leistungstärkeren und zugleich sicheren, preisgünstigen und leichten Batterien als eine der Voraussetzungen für die breitere Nutzung regenerativer Energien, zum Beispiel auch für die Energiezwischenlagerung in Windkraftanlagen oder wie bereits erwähnt für den Einsatz energieeffizienter Hybrid- und Elektroantriebstechnologien in Fahrzeugen, angesehen werden. Eine aktuell durch das Umweltbundesamt in Auftrag gegebene Studie zeigt, dass bei Bussen (eingesetzt im ÖPNV) mit Hybridantrieb in Kombination mit Lithium-Ionen-Batterien der Kraftstoffverbrauch bis zu 25% unter dem konventionell angetriebener Stadtbusse liegt (vgl. Steinfeldt/v. Gleich, Bremen 2008). Um diese ressourcen- und umweltschonende Technologie voranzutreiben hat das BMBF über die Innovationsallianz "LIB2015 (Lithium-Ionen-Batterie 2015)" 60 Millionen Euro Forschungsförderung in den nächsten vier Jahren bereitgestellt. Gleichzeitig hat ein Konsortium der Industrie mit den Unternehmen BASF, BOSCH, EVONIK, LiTec und VW ein finanzielles Engagement von insgesamt 360 Millionen Euro zugesagt.

Bei der **regenerativen Brennstoffzelle** führen nanoporöse Membranen und nanostrukturierte Katalysatoren (Platin) zu einer erhöhten Leistungsdichte. Die regenerative Brennstoffzelle ist ein Sonderfall der Brennstoffzelle, die auch als Akku verwendet werden kann, sofern der Wasserstoff für die Wiederverstromung gespeichert wird.

Für die **mobile Nutzung von Wasserstoff** als Energieträger kommt seiner **Speicherung** große Bedeutung zu. Für die Speicherung von Wasserstoff in nanostrukturiertem Kohlenstoff (Buckyballs, Nanoröhren) werden inzwischen nur noch geringe Speicherdichten für realistisch gehalten. Höhere Speicherdichten werden inzwischen mit nanostrukturierten Wasserstoffspeichern aus synthetischen metallorganischen Gerüsten erreicht. Durch die Wahl der Komponenten sind die Porenvolumina maßschneiderbar. Ein Beispiel sind sog. Nanocubes aus Terephthalsäure und Zinkoxid. Vielversprechend ist auch die Speicherfähigkeit reiner nanokristalliner anorganischer Materialien (z.B. Magnesium, Magnesiumalanat) oder Speichermaterialien auf Basis von ionischen Flüssigkeiten.

Prototyp
Produkte
Effiziente und
sichere
Energiespeicher
ist Voraussetzung für
breite Nutzung
regenerativer
Energien

Prototyp
Energiespeicher
ermöglicht 25%
Kraftstoff-
einsparung

Produkte
Material-
reduktion und
Mobilitätsgewinn

Prototyp
Mobilitätsgewinn,
Convenience

1.2. Optimierung der Energie-/Ressourceneffizienz mit Nanotechnologie

Im **Bereich der Photovoltaik** können mittels Nanotechnologie die bereits lange kommerziell verfügbaren Halbleitersolarzellen verbessert werden. Im Vergleich hierzu wird man die notwendigen technischen Durchbrüche bei den noch in der Forschungs- bzw. Entwicklungsphase befindlichen organischen Solarzellen und Farbstoffsolarzellen erst mit nanotechnischen Methoden erreichen.

Halbleitersolarzellen: Mit Beimengungen von Nanokristallen versucht man die sonst relativ niedrigen Wirkungsgrade von Dünnschicht solarzellen zu erhöhen. Für die Entspiegelung des vorderseitigen Abdeckglases von Silizium solarzellen werden mittels Sol-Gel-Verfahren nanoporöse Schichten aufgebracht oder mittels spezieller Techniken bessere Strukturen erzeugt. Überdies lässt sich durch Beschichtung mit Silber-Nanopartikeln der photovoltaisch nicht genutzte Teil des Lichtes selektiv ausblenden, der sonst zur Aufheizung der Solarzelle führt und damit deren Wirkungsgrad verringert.

Produkte
Wirkungsgrad-
steigerung um
5-10%

Farbstoffsolarzellen sind elektrochemische Dünnschicht solarzellen mit einer nanokristallinen TiO₂-Elektrode. Auf diese hochporöse Struktur ist ein metallorganischer Farbstoff aufgebracht, in dem die Lichtenergiekonversion stattfindet. Da die Energiekonversion direkt von der Fläche der mit Farbstoff belegten Elektrode abhängt, wäre dieser Solarzellentyp ohne die hohe Oberfläche der nanostrukturierten Elektrode nicht denkbar.

Produkte
Energie-
effizienz,
Concencie

Organische bzw. Polymersolarzellen bestehen aus polymeren Halbleitermaterialien und können prinzipiell sehr preisgünstig in Druckverfahren hergestellt werden. Mit Kompositverbindungen aus leitenden Polymeren mit Fullerenen in der photoaktiven Schicht und mittels Optimierung ihrer Nanomorphologie versucht man den geringen Wirkungsgrad dieser Zellen zu erhöhen.

Prototyp
Produkte
Kosten- und
Material-
einsparung

In speziellen **Brennstoffzellen mit Polymerelektrolytmembran** ist Nanotechnologie zunehmend in allen Komponenten vertreten. Bei Brennstoffzellen, denen Wasserstoff zur Verfügung gestellt wird, dienen für Protonen durchlässige Kunststoffmembranen mit Nanopartikeln oder ca. 100nm dicke Pd-Membranen dem Zurückhalten von gasförmigen Nebenprodukten. Auf diese Weise lässt sich die Energieeffizienz der Brennstoffzelle mit der hohen Energiedichte flüssiger Brennstoffe kombinieren.

Produkte
Energie-
effizienz,
Mobilitäts-
gewinn

Einsatz von Nanomaterialien zur Wärmeisolierung: Aerogele sind hochporöse Festkörper, die zu bis zu 95 % aus Poren mit Größen im Nanometerbereich bestehen und hohe optische Transparenz, sehr geringe Wärmeleitfähigkeiten und niedriges Gewicht aufweisen. Besonders Silicat-Aerogele zeigen hier sehr gute Eigenschaften für die Verwendung als transparente Wärmedämmung. Meistens wird eine transparente Wärmedämmung direkt vor einer massiven Außenwand eingebaut. Diese wird dann durch Sonneneinstrahlung aufgeheizt und führt die gespeicherte Energie in den dahinter liegenden Raum ab. Transparente Wärmedämmungen kann man auch direkt zum Fassadenausbau einsetzen, um zusätzlich das Tageslicht zur diffusen Beleuchtung nutzen zu können.

Produkte
Energie-
einsparung,
Reduktion CO₂
Belastung,
Kostenreduk-
tion für Nutzer

Mittels nanometerdünner Beschichtungen lassen sich die **optischen Eigenschaften von Fenstern zur Klima- und Beleuchtungsregelung** nach Bedarf schalten (Energieeinsparung bei Klimaanlage und Beleuchtung). Durch Ioneneinbau oder Ionenausbau (z.B. von Wasserstoffionen) können die Beschichtungen von einem transparenten Zustand in einen absorbierenden oder reflektierenden Zustand überführt werden. Die geringe Schichtdicke der Komponenten wie Farbschicht und Elektroden führt zu einer Transmission, die der von unbeschichtetem Fensterglas entspricht.

Produkte
Energie-
einsparung,
Convenience

Displays aus Organischen Leuchtdioden (OLEDs) zeichnen sich durch erheblich geringeren Energieverbrauch (und damit auch geringere Wärmeentwicklung) als herkömmliche LCD-Displays aus, da sie keine Hintergrundbeleuchtung benötigen. Sie sind außerdem dünner und damit leichter und mit geringerem Materialeinsatz herstellbar. Zudem verbraucht die Herstellung weniger Energie. Werden herkömmliche LEDs durch OLEDs substituiert, entfallen überdies die bisher für rote LEDs nötigen toxischen Arsenverbindungen.

Produkte
Energie-
einsparung,
verbesserte
Mobilität,
Kosten-
ersparnis,
Arsen-
Vermeidung

Kleine OLED-Displays sind bereits im Handel. Die Markteinführung großflächiger OLED-Displays wird derzeit noch durch technische Probleme verzögert, wie dem unterschiedlich schnellen Altern verschiedener Farben, dem notwendigen Wasser- und Sauerstoffabschluss bei flexiblen Anwendungen sowie der aufwändigeren Ansteuerung der Pixel im Vergleich zu LCDs.

Neben der Ressourcen-/Energieeffizienz von Displayanwendungen durch OLEDs, lassen sich noch größere Energiemengen (und damit auch CO₂-Mengen) durch die Verwendung von **OLEDs zu Beleuchtungszwecken** einsparen. Sie sind im Gegensatz zu Energiesparlampen quecksilberfrei. Weiße Quantenpunkt-LEDs ermöglichen bis zu 100% Quanteneffizienz, d.h. minimalen Stromverbrauch. Die Entwicklung solcher Hochleistungs-LED-Module ist zwar noch nicht abgeschlossen, allerdings sind erste marktfähige Produkte wie Innenraumbeleuchtungen oder Kraftfahrzeugscheinwerfer (beispielsweise entwickelt von OSRAM Opto Semiconductors gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik) bereits im Einsatz¹.

Prototyp
Produkte
Energie-
einsparung,
Kosten-
ersparnis,
Convenience

Die Entwicklung von immer empfindlicheren, selektiveren, kostengünstigeren und kleineren **nanobasierten Sensoren** erschließt auch **Effizienzpotenziale durch Erhöhung der Intelligenz technischer Systeme**. Durch bedarfsabhängige Regelung von Geräten kann der Energieverbrauch minimiert werden. Denkbare Beispiele sind Dunstabzugshauben, deren Ventilator Drehzahl abhängig von der Geruchsintensität ist oder Staubsauger die abregeln, wenn die Staubsaugerdüse angehoben wird. Sogar im Bereich der **Informationstechnologie (IT)** lässt sich mittels nanotechnischer Komponenten eine erhebliche Ressourceneinsparung realisieren. Neben einer weiter steigenden Rechenleistung kann von einigen Ansätzen nanotechnologiebasierter IT ein deutlich geringerer Energieverbrauch im Vergleich zu den bisherigen Systemen erwartet werden.

Prototyp
Vision
Energie-
einsparung,
Convenience

¹ Für die praxisorientierte gemeinsame Entwicklung von LED-basierten Beleuchtungsmodulen wurden Wissenschaftler von OSRAM Opto Semiconductors und dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF mit dem Deutschen Zukunftspreis 2007 (Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation) ausgezeichnet.

Datenverarbeitung durch Einzelelektronentransistoren oder Molekularelektronik, nichtflüchtige Arbeitsspeicher sowie Massenspeicher ohne mechanische Bewegung (MRAM, Phasenwechselfpeicher, optische/holographische Speicher) sollten zukünftig mit deutlich weniger Stromverbrauch als heutige IT realisierbar sein. Dabei werden Fortschritte in der Nanooptik und Nanophotonik zu weitergehender Umstellung auf optische Datenübertragung und -verarbeitung führen, möglicherweise auch innerhalb von Computern. Damit lassen sich in Zukunft erhebliche Mengen Kupfer einsparen.

Prototyp
Material /
Rohstoff-
ersparnis
(Kupfer)

Des Weiteren ermöglicht die Nanotechnologie in der Produktionstechnik und der Chemie **alternative Produktionsprozesse**, die mit weniger Energie und Ressourcen auskommen. So erlaubt Nanopulver als Ausgangsmaterial für Fertigungsprozesse niedrigere Temperaturen beim Sintern oder Löten, nanopulverbasierte Papierbeschichtungen sparen Wasser, Energie und Chemikalien bei der Beschichtung ein und Nanopartikel als Fließmittel in Polymerschmelzen ermöglichen Spritzgießen und Extrudieren bei niedrigeren Temperaturen.

Produkte
Einsparung
von:
Wasser,
Energie,
Chemikalien
und
Ressourcen

Zur Entsalzung von organischen Produktlösungen bzw. allgemein für die Trennung von organischen und anorganischen gelösten Stoffen (Lebensmittel-, Metallverarbeitungs-/ Galvano-, Pharmaindustrie, Biotechnologie, Umwelttechnik) ist die **Nanofiltration** ein Prozess, der erheblich weniger Energieaufwand erfordert als andere Verfahren. Auch die Herstellung von Nanomaterialien selbst ist auf Niedrigtemperaturrouten möglich (Beispiel Sol-Gel-Verfahren). In der chemischen Industrie erlauben insbesondere neue Nanokatalysatoren alternative Reaktionspfade, die häufig bei niedrigeren Temperaturen und damit energiesparender verlaufen und durch ihre Selektivität (geringe Mengen von Nebenprodukten) einen optimalen Stoffeinsatz ermöglichen (siehe auch unter Abschnitt „Umweltschutz – **Grüne Chemie**“). Ein weiteres Beispiel für den Einsatz der Nanofiltration zur Ressourceneinsparung ist ein in Entwicklung befindliches Membranbioreaktor-Verfahren für die Ethanolfermentation. Damit sollen pflanzliche Rohstoffe für die Biokraftstoffproduktion erschlossen werden, die nicht der Nahrungsmittelproduktion dienen. Der Energieeinsatz bei der kontinuierlichen Abtrennung des durch Fermentation entstehenden Ethanol mittels Nanofiltration ist gering.

Produkte
Verfahren mit
geringem
Energie-
aufwand
(Niedrig-
temperatur),
Gesundheit,
optimierter
Stoffeinsatz

Ein sehr alltagsnahes Beispiel für die Nutzung von Nanomaterialien ist der **Autoreifen** mit Carbon Black als Füllstoff. Das ist seit langem Stand der Technik. Die Verwendung neuartiger nanoskaliger Carbon Black-Typen führt im Betrieb zu einer Reduzierung des Rollwiderstandes und in der Folge zur Einsparung von Kraftstoff sowie zu einer Erhöhung der Haltbarkeit. Diese beiden Eigenschaftsverbesserungen gelingen unter Beibehaltung des guten Verhaltens der Reifen auf nassen Straßen, was unter Sicherheitsaspekten unerlässlich ist. Inzwischen Stand der Technik bei allen höherwertigen PKW-Reifen, insbesondere bei Winterreifen, ist eine weitere Verbesserung des Nassrutschverhaltens durch Zusatz nanoskaliger, oberflächenmodifizierter hydrophiler Silica (Kieselsäuren) im Verbund mit Silanen in der Lauffläche. Darüber hinaus sorgt das Silica-Netzwerk für geringeren Hitzeaufbau im Reifen, reduziert dadurch die Alterungseffekte in der Polymerstruktur und sorgt so für längere Haltbarkeit der Reifen.

Produkte
Sicherheit,
Haltbarkeit,
Kraftstoff-
einsparung

Auch bieten Nanotechnologien einen "added value" im **Bauwesen**. Auch in diesem auf lange Produktzyklen und hohe Sicherheitsanforderungen ausgerichteten Wirtschaftszweig,

bieten nanobasierte Werkstoffe Optimierungspotenziale in Bezug auf Funktionalität, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz. Durch funktionsoptimierte Asphaltmischungen lassen sich die mechanische Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Straßenbelägen – auch vor dem Hintergrund spezifischer klimatischer Anforderungen – signifikant erhöhen. Ebenso lässt sich durch die Einbringung von Nanopartikeln die Tragfähigkeit und Festigkeit von sogenanntem Ultrahochleistungsbeton um das zehnfache gegenüber Normalbeton steigern. Neben der Gewichtseinsparung und den reduzierten Abmessungen lässt sich durch die mikro- und nanopartikulären Zementbestandteile auch die Korrosionsbeständigkeit signifikant erhöhen.

Produkte
Sicherheit,
Wirtschaftlich-
keit,
Lebenszyklus-
Verlängerung
und
Umweltschutz

Als abschließendes Beispiel für den energie-/ressourceneffizienten Einsatz von Nanotechnologie seien noch die Bereiche **Leichtbauwerkstoffe und Oberflächen** genannt. Insbesondere **Bauteile aus nanotechnisch optimierten Kunststoffen** bieten erhebliches Potenzial zur Gewichtseinsparung. Die Beladung mit geringen Gewichtsanteilen an Nanopartikeln, üblicherweise 2–5%, können ihre mechanischen und thermischen Eigenschaftswerte häufig um wenigstens 50% verbessern. Dadurch treten sie zunehmend in Konkurrenz zu metallischen Werkstoffen. Durch Einsatz von Leichtbauwerkstoffen entstehen Energieeinsparpotenziale sowohl bei Fahrzeugen und Flugzeugen als auch bei transportierten Waren.

Produkte
Energie-
einsparung,
Sicherheit,
durch
Leichtbau
hohes
Reduktions-
potenzial für
CO₂ Belastung

Neben nanotechnisch optimierten Schmiermitteln können auch **nanotechnisch verbesserte Oberflächen und tribologische Schichten** für deutlich geringeren Reibungsverlust und Verschleiß an beweglichen Bauteilen sorgen. Eine interessante Möglichkeit ist die Erzeugung ultraharter Beschichtungen durch die atomlagengenaue Stapelung von Schichten mit jeweils leicht voneinander abweichenden Gitterkonstanten. Dies führt zu sehr hoher Härte der Materialien. Neben der Oberflächenhärtung ist insbesondere die Erzeugung selbstschmierender Oberflächen, z.B. durch Einbau von nanopartikulärem Graphit oder Molybdändisulfid, interessant, die Schmierstoffe einzusparen helfen.

Schließlich lässt sich auch die Materialtrennung beim Recycling durch **lösbare Klebeverbindungen** vereinfachen und verbessern. Dieses ermöglicht der Einsatz magnetischer Nanopartikel in Klebeverbindungen. Die Erwärmung dieser Partikel durch anhaltende schnelle Ummagnetisierung wird sowohl zur Aushärtung thermisch aktivierbarer Polymerverbindungen als auch zur Zerstörung der Klebeverbindungen genutzt.

Prototyp
Recycling-
management

1.3. Beitrag nanotechnischer Anwendungen für den Umweltschutz

Die Nanotechnologie ermöglicht eine Vielzahl neuartiger Sensoren, die für die kontinuierliche und zeitnahe Messung vieler Umweltmessgrößen (u. a. Aufspüren und Anzeigen von Schadstoffen in noch „unschädlichen“ Konzentrationen) genutzt werden können (**Umweltmonitoring**). Hier kommen neben Temperatur- und Feuchtesensoren hauptsächlich Chemo- und Biosensoren zur Detektion von Schadstoffen, Pathogenen usw. in Wasser, Boden oder Luft in Betracht. Nanobasierte Sensoren zeichnen sich durch eine Empfindlichkeit und Selektivität aus, die mit herkömmlichen Sensorprinzipien meist nicht realisierbar ist. Gleichzeitig kann häufig in Nahezu-Echtzeit ein (elektrisches) Signal

Prototyp
Sensoren zur
Früherkennung
von Umwelt-
belastungen,
Gezielte
Umweltvorsorge

ausgelesen werden. Die Lab-on-a-Chip-Technologie (bei der ebenfalls nanotechnische Beschichtungen zum Einsatz kommen) ermöglicht eine schnelle, energie- und kostengünstige Probenaufbereitung vor Ort. In Entwicklung befinden sich künstliche Nasen, d.h. Arrays unterschiedlicher Sensoren, die mit Mustererkennungsverfahren ausgewertet werden. Mit nanobasierter Informations- und Kommunikationstechnik (und der dazugehörigen nanobasierten Energieversorgung) ausgestattete Sensoren können zukünftig zu drahtlosen Sensornetzwerken kombiniert werden, die ein weite Flächen abdeckendes Umweltmonitoring ermöglichen.

Unterschiedlich konzipierte **nanoporöse Membranen** lassen sich zur **Ultra- bzw. Nanofiltration oder als Ionenaustauscher für die Aufarbeitung von Produktions-, Siedlungs- und Deponieabwässern** sowie die Reinigung und völlige Entkeimung von Trinkwasser bis hin zur Wasserentsalzung nutzen. Auch die Immobilisierung von Schwermetallen, Dioxinen und Radionukliden ist möglich. Dabei können Trenngenaugigkeit und Durchsatz erheblich genauer gesteuert werden, als bei herkömmlichen Verfahren. Die Nanotechnologie ermöglicht die hochpräzise Einstellung der selektiven Durchlässigkeit für bestimmte Moleküle, so dass eine maßgeschneiderte Trennung unterschiedlicher Substanzen sehr genau möglich ist. Die bereits bewährte Membran-Bioreaktor-Technologie ermöglicht eine komplette Desinfektion des gereinigten Wassers sowie auch eine verbesserte Eliminierung von Spurenstoffen und Schadstoffen. In den USA wird daran gearbeitet, mittels nanobasierter Filtersysteme den Arsengehalt im Trinkwasser zu senken. Auch für Bodensanierung und Atemluftreinigung können maßgeschneiderte nanoporöse Membranen eingesetzt werden.

Produkte
Sauberes Wasser,
Gesundheits-
schutz,
Maßge-
schneiderte
Trennung
unterschiedlicher
Substanzen

Nanomaterialien ermöglichen auch die **Absorption und Adsorption von Schadstoffen**. Magnetische Nanopartikel, ggf. geeignet beschichtet, können sehr effektiv bestimmte Schadstoffe (z.B. Arsenverbindungen) aus Gewässern adsorbieren und anschließend durch Magnetseparation abgetrennt werden. Für die Arsenentfernung steht bisher kein effektives konventionelles Verfahren zur Verfügung. Zum Herausfiltern von Öl ist ein nanoporöses Vlies aus speziell beschichteten Nanodrähten geeignet, das sich derzeit im Forschungsstadium befindet. Es ist zur Aufnahme eines Vielfachen seines Eigengewichts an organischen Lösemitteln, Öl und ähnlicher Substanzen in der Lage und kann daher zum Reinigen von ölverseuchtem Wasser oder Boden eingesetzt werden. Die Nanotechnologie ermöglicht hier schaltbare Benetzungseigenschaften von superhydrophil bis superhydrophob, eine enorme Oberfläche sowie Kapillarkräfte, die die Aufnahmefähigkeit nicht nur erheblich beschleunigen, sondern auch erhöhen. Das Vlies kann auf einfache Weise regeneriert werden, so dass extrahierte Schadstoffe isoliert und ggf. wiederverwertet werden können. Auch lassen sich absorbierte Stoffe chromatographisch auftrennen.

Produkt
Umweltschutz,
gezielte
Nachsorge /
Beseitigung
von Umwelt-
belastungen

Bei der Schadstoffbeseitigung und Grundwasser- sowie Bodensanierung können **nanopartikuläre Katalysatoren Schadstoffabbau** und mikrobielles Wachstum anregen. Die direkte Injektion von Eisen-Nanopartikeln in den Untergrund kann den Abbau chlorierter organischer Verbindungen wie Trichlorethylen stark beschleunigen. Untersuchungen laufen derzeit auf ihre Fähigkeit zur (bisher kaum möglichen)

Produkte
Eliminierung
von Nitraten
aus
Grundwasser

Eliminierung von Nitraten aus dem Grundwasser. Spezielle Metalloxid-Nanopartikel katalysieren die Reduktion von Cr(VI) zum unlöslichen Cr(III) im Grundwasser.

Nanobasierte Photokatalysatoren werden bereits vereinzelt zur Schwimmbaddesinfektion ohne Chlorierung eingesetzt. Sie zersetzen Bakterienfilme und Schmutz an Oberflächen, aktiver Sauerstoff und Hydroxyl-Radikale desinfizieren das Wasser. Zusätzlich können Nanomembranen das Umlaufwasser reinigen. Solche Photokatalysatoren kommen bereits an Fassaden, Verglasungen, Fensterrahmen und in Baumaterialien zum Verhindern von Verschmutzung (und damit längerer Haltbarkeit und Einsparung von Reinigungsmitteln) sowie für die Reinigung schadstoffbelasteter Luft (etwa durch Zigarettenrauch) zum Einsatz.

Produkte
Hygiene,
Gesundheits-
schutz,
Reinigungs-
mittel-
einsparung,
Convenience

In der **Chemischen Industrie** findet Nanotechnologie zunehmend breite Anwendung.

Verschiedenste Nanokatalysatoren (z.B. Nanopartikel/Quantenpunkte, maßgeschneiderte Oberflächen, Zeolithe, Interkalate, Dendrimere, MIPs², Nanozyme³, immobilisierte heterogene Katalysatoren, Nano-Katalysatorträger) sowie Nanoreaktoren (z.B. Mikroemulsionen, Nanokapseln) helfen zunehmend bei der Entwicklung einer **"Grünen Chemie"**. Sie ermöglichen neue Reaktionspfade mit milderen Reaktionsbedingungen, umweltfreundlicheren Lösemitteln und weniger umweltbelastenden Nebenprodukten (also auch erhöhter Ressourceneffizienz). Neben der starken Reduktion von Schwermetallemissionen ist hier auch eine erhebliche Energieeinsparung möglich. Hierzu gehört beispielsweise die neu entdeckte Fähigkeit von Gold-Nanopartikeln auf einem Graphitträger, organische Verbindungen mit Luftsauerstoff direkt zu oxidieren. Damit sind gegenüber bisherigen Verfahren große Einsparungen an Energie und toxischen Chemikalien möglich. Auch das katalytische Potenzial verschiedener Formen nanoskaligen Kohlenstoffs steht erst am Beginn seiner Erschließung.

Produkte
"Grüne Chemie"
= neue
Reaktionspfade,
mildere
Reaktions-
bedingungen,
umweltfreund-
lichere
Lösemittel,
weniger
Nebenprodukte

Die **im Automobilbereich verwendeten Abgasreinigungskatalysatoren** beruhen bereits seit über 30 Jahren auf Nanotechnologie. Sie werden daraufhin weiterentwickelt, die verwendeten teuren Edelmetallpartikel zu substituieren. Hinzu kommen, v.a. bei Dieselfahrzeugen, nanoporöse Partikelfilter. Nanopartikeläre Kraftstoffadditive können die Verbrennung verbessern helfen und so geringere Emissionen bewirken. Gasdichte Treibstofftanks aus nanoplättchenverstärktem Kunststoff vermeiden die erheblichen Kraftstoffemissionen durch Diffusion durch die Tankhülle. Nanolacke (mittels Sol-Gel-Prozess aufgebracht anorganisch-organisches Hybridpolymer) erlauben minimalen Stoffeinsatz und den Verzicht auf Chromatierung bei der Leichtmetalllackierung.

Produkte
hohes
Reduktions-
potenzial für
CO₂ Belastung

Produkte
Minimierter
Stoffeinsatz

Easy-to-clean- und selbstreinigende Beschichtungen können Reinigungsmittel- und Wassereinsatz verringern sowie die Haltbarkeit z.B. von Außenanstrichen erhöhen. Nanobasierte Anti-Fouling-Beschichtungen z.B. von Bootsrümpfen ersetzen z. B. zinnhaltige Beschichtungen und kommen ohne Schadstoffemission aus.

Produkte
Saubere Luft,
Gesundheit

Holzschutzmittel mit Silber-Nanopartikeln helfen, Emissionen von toxischen Bioziden zu vermeiden.

² MIPs = Molecularly Imprinted Polymers, molekular geprägte Polymere

³ „Nanozyme“: mit Oligomeren funktionalisierte Nanopartikel, die zu einer ähnlich guten „molekularen Erkennung“ in der Lage sind wie Enzyme.

Mittels Nanotechnologie gelingt auch ein **zielgerichteter Einsatz von Pflanzenbehandlungsmitteln in der Landwirtschaft**. Mikro-/nanoverkapselte Wirkstoffe werden z.B. abhängig von den Umweltbedingungen kontrolliert freigesetzt. Nanobasierte drahtlose Sensornetzwerke erlauben sehr genau aufgelöstes „Precision Farming“. Beide Anwendungsgebiete können einen minimierten Einsatz von herkömmlichen Agrochemikalien bewirken.

Prototyp
Kontrollierte
Freisetzung
von
Wirkstoffen

1.4. Potenziale der Nanotechnologie im Gesundheitsschutz

Im Bereich Gesundheitswesen (Krankenhausanwendungen) bietet der Einbau **permanenter Antimikrobika** in Oberflächen die Möglichkeit einer Verringerung gesundheitlicher Gefährdung durch Keime. Hierzu werden z.B. nanopartikuläres Titandioxid oder Silber an den Kontaktflächen vom Gegenstand (z.B. Flächen oder Katheter) zur Umwelt verankert und zersetzen dort durch unterschiedliche chemische Mechanismen organische Substanz, wodurch das Risiko sog. Krankenhausinfektionen verringert wird.

Produkte
Hygiene,
Gesundheits-
schutz,
vermindertes
Infektionsrisiko

Bereits weit verbreitet ist der **UV-Schutz** unter Einsatz von Nanopartikeln, die in geeigneter Emulsion in Form von Cremes oder Sprays aufgetragen werden. Durch die Wahl des Partikelmaterials und die Beladungsdichte lässt sich der Lichtschutzfaktor genau einstellen. Zulassungsstudien und EU-Projekte wie "Nanoderm" belegen, dass Nanopartikel aus konkreten, zugelassenen Produkten nicht in die Haut bzw. nicht in lebende Hautschichten eindringen. Durch dem Umstand, dass die oberen Hautschichten aus bereits abgestorbener Hornhaut bestehen und die eingesetzten physikalischen UV-Filter zusätzlich ummantelt vorliegen, wird bei diesen Produkten somit ein direkter Kontakt der TiO₂-Partikel und ein Eindringen in lebende Hautzellen verhindert.

Produkte
Convenience,
Gesundheits-
schutz

Ein weites Einsatzgebiet eröffnet sich in Bezug auf **Nanofilter**. Sowohl im Bereich **Luftfilter und Gasaustauschmembran** (Masken, Naseneinsätze, Kleidung, Lüfter, Laserdrucker, Klimaanlage etc.) als auch im Bereich Flüssigkeits-/Wasserfilter (Abscheider, Recycling, Abwasseraufbereitung etc.) sind vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Untersuchung (siehe oben im Abschnitt „Umweltschutz - Nanoporöse Membranen“).

Produkte
Umweltschutz,
Gesundheits-
schutz

Eine (In-vivo-) Sensorik für das **Biomonitoring** vitaler Körperfunktionen ermöglicht das frühzeitige Erkennen von physiologischen wie psychologischen Störungen. Die entsprechenden Signale können elektrisch sowie nicht-elektrisch (z.B. Farbänderung) vermittelt werden. Hier ermöglicht die Nanotechnologie sowohl eine qualitativ wie quantitativ hochgenaue und vor allem reizselektive Auflösung spezifischer Funktionsmerkmale und erlaubt so eine direkte und zweckoptimierte Reaktion. Andererseits ermöglicht sie auch eine neuartige Signalgebung (z.B. Farbänderung bei einem subkutanen Indikator durch leichte Variation der Elektrolytkonzentration) oder elektrische Signale, die zu keinerlei physiologischen Irritationen führen.

Vision
Prototyp
Geundheits-
schutz, zweck-
optimierte
Reaktion

2. Beispiele für den Einsatz von Nanomaterialien

Im Folgenden werden Produktbeispiele und konkrete aktuelle Anwendungen der Technologie auf Basis von Nanomaterialien beschrieben. Diese praxisnahen Beispiele stammen aus Unternehmen, die sich in der AG 1 engagieren. Die Auswahl der Beispiele zu den in diesem Bericht beleuchteten vier Anwendungsfeldern (Energiespeicherung, Energie- / Ressourceneffizienz, Umweltschutz und Gesundheitsschutz) erfolgte pragmatisch und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Bei der Betrachtung der Beispiele wurde besonderes Augenmerk auf folgende Aspekte gelegt:

- Worin zeigt sich die Funktionalität bzw. die besondere Eigenschaft des Produktes durch den Einsatz von Nanomaterialien / Nanotechnologie unter Berücksichtigung der Vorteile gegenüber dem bisherigen Stand der Technik (Vorteile gegenüber bisherigen Produkten)?
- Wird durch den Einsatz der besonderen nanotechnologischen Eigenschaft des Produktes / der Anwendung ein Mehrwert bzw. ein positiver Beitrag für den Schutz der Umwelt, unserer Gesundheit oder ein Beitrag zur Effizienzsteigerung beim Umgang mit Ressourcen bzw. Energie geleistet?
- Wie ist der Status der Produktentwicklung / der Anwendung und welchem Kundenbedürfnis wird Rechnung getragen?
- Kann bereits eine Einschätzung zur Sicherheit, Nachhaltigkeit und Recyclingfähigkeit vorgenommen werden?

2.1. Energiespeicherung: Leistungsfähigere Akkus durch Nanostrukturen

Beispiel: Leistungsstarke mobile Energieversorgung - Akkus auf Li-Ionen Technologie, Produktentwicklung der Evonik Industries AG zusammen mit der Li-Tec Battery GmbH & Co. KG	
Nanoform	Dünne, poröse Kompositmembran, die nanoskalige Oxidpartikel enthält
Produkt	Separatoren für Li-Ionenbatterien
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	Hohe Temperaturstabilität durch Verwendung der Oxidpartikel
Erzielter Mehrwert	Sicherheit der Batterien durch temperaturstabile Trennung der Elektrodenräume Kraftstoff-Einsparungspotenzial bei Hybridfahrzeugen von bis zu 25%
Befriedigtes Kundenbedürfnis	Sicherheit, Mobilität bei niedrigen Kosten
Produktstatus	Kommerziell verfügbar und Prototypen

Ein Praxisbeispiel für die Verwendung von nanoskaligen Oxiden in einem aus Polymerträger und keramischer Verstärkung entwickelten Kompositprodukt ist der von EVONIK Industries AG angebotene SEPARION® Separator. Durch diesen Separator wird sowohl die Sicherheit, die Langlebigkeit als auch die Zyklenfestigkeit (Beitrag zur Leistungsfähigkeit) von grossformatigen Lithiumbatterien entscheidend verbessert. Konventionelle Polymerseparatoren sind für kleinere Konsumenten Anwendungen wie Mobiltelefone und Laptop Computer ausreichend, in grossformatigen Batterien ist eine hohe thermische Stabilität aber unverzichtbar, welche vor allem durch nanoskalige Oxide erzielt wird.

Die Anwendung ist seit einigen Jahren kommerziell verfügbar, ebenso gehen derzeit bereits entsprechende grossformatige Lithiumbatterien bei Evonik's Partner LiTec in die Massenfertigung. Lithiumbatterien sind umweltfreundlich, da sie kein Blei oder Kadmium enthalten. So besteht auch für die Lithiumbatterie ein vollständiges Recycling System, wodurch sichergestellt wird, dass aus diesem Batterietypus keine (Nano)Materialien in die Umwelt austreten können. Beispielsweise sparen mit dieser Technologie ausgestattete Hybridfahrzeuge bis zu 25% Kraftstoff gegenüber Fahrzeugen auf Basis von herkömmlichen Verbrennungsmotoren ein.

Aktuell sind weitere Nanomaterialien zum Einsatz in Lithiumbatterien in Entwicklung oder bereits integriert. Nanoskaliges Lithiumeisenphosphat beispielsweise erhöht die Sicherheit und Leistungsfähigkeit der Zellen, Nanosilizium erhöht die Energiedichte der Batterien entscheidend.

2.2. Energie- und Ressourceneffizienz

Beispiel: Energieeinsparung durch OLEDs, Produktentwicklung der BASF Gruppe	
Nanoform	dünne aktive Schichten
Produkt	OLED-Beleuchtungssysteme
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	wenig elektrische Energie bei gleichzeitig sehr hoher Lichtausbeute durch Nanostrukturen
Erzielter Mehrwert	Energieeinsparung
Befriedigtes Kundenbedürfnis	geringe Kosten, Convenience
Produktstatus	Prototypen, Produkte

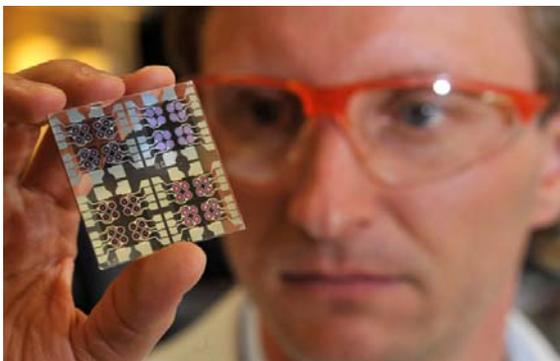
Der Verbrauch an elektrischer Energie macht mehr als 12% der globalen Primärenergie aus. Der Anteil des Stromverbrauchs für Beleuchtung betrug im Jahr 2005 weltweit 2651 TWh. Technisch ist es machbar 30-50% dieser Energie durch hocheffiziente Beleuchtungssysteme einzusparen. Dies würde zu einer Reduktion von mehr als 450 Millionen Tonnen CO₂-Emission weltweit führen. Die Lichtquellen mit dem höchsten Potential sind dabei anorganische und organische Leuchtdioden. Organische Leuchtdioden aus halbleitenden Materialien sind Flächenstrahler, die ohne komplizierte und die Effizienz verringernde externe Reflektoren auskommen. Nach einem im Dezember 2006 vom US Department of Energy veröffentlichten Report "Energy Savings Potential of Solid State Lightning in General Illumination Applications" wird für **OLEDs (Organische**



Leuchtdioden) eine nahezu zweifach höhere Effizienz im Energieverbrauch gegenüber konventionellen Leuchtstoffen bei gleicher Lebensdauer prognostiziert. Solche Beleuchtungssysteme werden innerhalb der nächsten Jahre und Dekaden traditionelle Lampensysteme teilweise ersetzen und vollkommen neue Anwendungen erschließen. Neben der Erzeugung flächigen Lichtes, was deutlich angenehmer für den Nutzer ist, sind sie wesentlich einfacher zu recyceln, da sie -

im Gegensatz zu Leuchtstoffröhren - kein giftiges Quecksilber enthalten. Die Erforschung stabiler und effizienter Halbleitermaterialien für die hauchdünnen Leuchtdioden bilden einen Schwerpunkt der öffentlichen Forschung in Deutschland. So werden beispielsweise in der OLED-Initiative der Bundesregierung (u. a. die vom BMBF mit 100Mio. Euro geförderte Innovationsallianz OLED) Materialien und Produktionsprozesse bis zur Marktreife entwickelt, die für vollphosphoreszente Leuchtdioden innerhalb der nächsten 2 Jahre geplant ist.

Auch spielt **Nanotechnologie in der organischen Photovoltaik** eine entscheidende Rolle. Bei der BASF wird an zwei organischen Photovoltaik-Konzepten gearbeitet. In der sogenannten hetero-junction Solarzelle (siehe Bild) werden durch thermische Verdampfung im Vakuum dünne Schichten organischer Materialien übereinander gestapelt. Wegen der geringen Ladungsträger- und Exzitonenmobilitäten organischer



Materialien müssen die Schichtmorphologien so entwickelt werden, dass die Schichtdicken im Bereich unter hundert Nanometern liegen.

Bei der Farbstoffsolarzelle, dem zweiten bei der BASF entwickelten Photovoltaik-Konzept, wird eine poröse TiO_2 -Schicht mit einer Monolage eines organischen Farbstoffs belegt und anschließend mit einem Halbleiter ausgefüllt. Um eine möglichst hohe Lichtabsorption zu

erhalten, müssen hierzu die TiO_2 -Oberflächen der Poren sehr groß sein. Wegen der geringen Ladungsträgermobilitäten im TiO_2 und dem organischen Halbleiter müssen hier die Schichtdicken sehr klein sein. Diese Anforderungen können nur durch mesoporöse TiO_2 -Schichten, d.h. TiO_2 -Schichten mit Porengrößen im Bereich von 10-100nm, erfüllt werden.

Bei beiden Zelltypen werden momentan noch nicht zufriedenstellende Effizienzen erreicht. Für eine Nutzung als "saubere Energietechnologie", die einen wesentlichen Beitrag im Strom-Mix der Zukunft leisten soll, müssen die Effizienzen gegenüber heutigem Stand verdoppelt werden. Der Schlüssel auf dem Weg dorthin sind optimierte Schichtstrukturen im Nanometerbereich.

Die BASF arbeitet auf diesem sehr anspruchsvollen Gebiet im Rahmen der durch das BMBF mit 60Mio. Euro geförderten "Innovationsallianz Organische Photovoltaik" mit Partnern aus der Forschung (MPI für Polymerforschung Mainz), den Hochschulen (z.B. TU Braunschweig und Universität Stanford) und der Industrie (z.B. Heliatek und Bosch) zusammen. Nur gemeinsam, so die Überzeugung, wird man die organische Photovoltaik zu einer marktfähigen Energieerzeugungstechnologie entwickeln, die im Erfolgsfall ein Marktpotenzial von 10 Mrd USD im Jahre 2020 und einem darüber hinaus weiteren starken Wachstum besitzt (Quelle: IDTechEx).

Beispiel: CNT Produktentwicklungen der Bayer MaterialScience AG - Leichtbau durch CNT	
Nanoform	Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT), allgemein polymer-, metallbasierte Verbundwerkstoffe mit Nanofasern, Nanopartikeln, Nanotubes als Füllstoffe
Produkt	Verbundwerkstoffe auf Polymerbasis oder Metallbasis (für Sportgeräte wie Tennisschläger, Strukturbauteile für Luftfahrt, Automobil, Flügel von Windkraftwerken)
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	Verbesserte elektrische oder mechanische Eigenschaften bei kleinen Füllstoffgehalten (z.B. verbesserte mechanische Elastizität bei Tennisschlägern) Gleiche elektrische oder mechanischen Kennwerte bei reduziertem Gewicht (Materialeinsparung) durch Nanofüller
Erzielter Mehrwert	Energieeinsparung, Ressourcen- bzw. Materialeinsparung, Reduktion CO2-Belastung (hier große Potenziale), neue Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen, höhere Effizienz, Kostenminderung
Befriedigtes Kundenbedürfnis	Geringere Kosten, optimale Eigenschaftskombinationen, erhöhte Effizienz (z.B. bei der Stromerzeugung aus Wind)
Produktstatus	Produkte, Entwicklungen und Prototypen

Die effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen und Energiequellen stellt eine der wesentlichen Herausforderungen für eine nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft dar. Hierbei können die Nanotechnologie im Allgemeinen - und die Nutzung von mit Nanopartikeln modifizierten Verbundmaterialien im Besonderen - einen wesentlichen Beitrag leisten. Das BMBF fördert die Weiterentwicklung dieser Verbundwerkstoffe mit Nanopartikeln/-fasern im Rahmen der Innovationsallianz "CNT erobern Märkte", um eine nationale Technologieplattform für eine Vielzahl von hiermit induzierten Wertschöpfungsketten zu etablieren. Durch Forschung und Produktentwicklung in diesem Bereich leistet auch die BAYER AG mit dem Teilkonzern Bayer MaterialScience AG einen entscheidenden Beitrag zur Bewältigung der anspruchsvollen Aufgabe einer Effizienzsteigerung im Umgang mit limitierten Ressourcen.

Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nanotubes – CNT) bieten durch ihre hohe mechanische Belastbarkeit (ein Vielfaches höher als Stahl) mit hoher Flexibilität sowie durch ihre sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit das Potenzial, durch ihre Zugabe Werkstoffe in einzigartiger Weise zu modifizieren. Im Bereich Leichtbau können durch den Einsatz weniger Prozent CNT-modifizierter Verbundmaterialien - bei hohen mechanischen Festigkeiten und reduzierten Materialdicken - erhebliche Gewichtseinsparungen im Vergleich zu konventionellen Kompositen erzielt werden. Zudem weisen diese CNT-

Nanokomposite oft auch ein antistatisches Verhalten auf, das z.B. im Automobilbereich neben Gewichtseinsparungen auch Einsparungen von Prozessschritten (z.B. beim elektrostatischen Lackieren) ermöglicht und somit im Gesamtprozess den Verbrauch von Energie und Material reduziert.

Die Foliendicke von antistatischen Verpackungsfolien für elektronische Bauteile kann unter Beibehaltung der Leitfähigkeit und der mechanischen Stabilität der Folie durch Beimischung weniger Prozente CNT im Vergleich zu herkömmlichen Folien mit konventionellen Füllstoffen um 10-20 % reduziert werden. Besonders durch den geringeren Materialbedarf ergibt sich eine Reduktion des Energieverbrauchs (17% weniger Energieverbrauch) sowie der CO₂-Emission (ca. 20 % weniger Emission) (vgl. Bericht Steinfeldt/v.Gleich, Bremen 2008).

Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von CNT in Kompositen mit erhöhter mechanischer Belastbarkeit und verringertem Gewicht bei der Herstellung von Windkraftwerksflügeln. Die Kohlenstoffnanoröhrchen ermöglichen die Realisierung von Windkraftwerksflügeln mit erhöhter Spannweite (bzw. geringerem Gewicht und höherer mechanischer Belastbarkeit), die zu einer effizienteren Umwandlung der Windenergie in elektrischen Strom führt. In allen genannten Anwendungen werden die CNT in einer Matrix gebunden eingesetzt, so dass eine Freisetzung und damit eine Exposition der reinen Nanoobjekte nicht erfolgen kann. In vielen Fällen z.B. bei thermoplastischen Nanokompositen ist eine stoffliche Wiederverwertung der hochwertigen Werkstoffe möglich. Bei nicht wieder aufschmelzbaren Materialien ist eine weitgehend rückstandsfreie thermische Verwertung möglich, bei denen die CNT ohne Nebenprodukte oxidiert werden.

Beispiel: Ökoeffiziente Spritzgusskunststoffe durch Nanopartikel, Produktentwicklung der BASF Gruppe	
Nanoform	Nanopartikel als Prozesshilfsmittel in Polymerschmelzen
Produkt	Verarbeitungshilfsmittel für Spritzgussteile
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	Fliessfähigkeit wird verbessert, PBT-Kunststoff sind dadurch bei reduzierten Temperaturen verarbeitbar
Erzielter Mehrwert	Energieeinsparung, verringerte Zykluszeiten, dünnwandige Bauteile (Materialersparnis), Ausschussreduzierung
Befriedigtes Kundenbedürfnis	geringere Kosten
Produktstatus	Produkte

Mit dem Spritzgussverfahren wird eine Vielzahl von Kunststoffbauteilen hergestellt, angefangen bei Haushaltsgegenständen wie Bügeleisen, Duschkopf und Friteusedeckel, bis hin zu Industriebauteilen wie Außenspiegel, Stecker und Elektronikboxen für die Automobilindustrie. Das Ausgangsmaterial für ihre Herstellung sind Kunststoffgranulate, die nach dem Schmelzvorgang in eine Form eingespritzt und nach dem Abkühlen entnommen und weiterverarbeitet werden. Eine wichtige Klasse thermoplastischer Kunststoffe für das Spritzgießen ist Polybutylenterephthalat (PBT), bei dem von einer jährlichen Produktionsmenge von knapp einer Million Tonnen ausgegangen werden kann. Etwa 30% hiervon werden in Europa produziert.

Ultradur® High Speed ist ein PBT-Kunststoff der BASF, bei dem durch Zugabe eines Nano-Additivs die Fließfähigkeit deutlich verbessert wurde. Dies kann der Anwender nutzen, um die Verarbeitungstemperatur sowie den Einspritz- und Haltedruck in der Spritzgießmaschine zu senken. Dadurch sind Energieeinsparungen bis zu 20% gegenüber herkömmlichen Werkstoffen und Verfahren möglich. Alternativ lässt sich die Zykluszeit um bis zu 30% reduzieren. Da die Bauteile auch dünnwandiger sein können und die Ausschussmenge sinkt, wird überdies eine deutliche Materialersparnis erzielt. Da die Nanopartikel mit Durchmessern von 50-300 nm fest in die PBT-Matrix eingebunden sind können sie nicht gesundheits- bzw. umweltschädigend ausgespült werden.

Die folgende fiktive Hochrechnung hilft, die mögliche Ressourceneffizienz beim Einsatz von ökoeffizienten



Spritzgusskunststoffen auf Nanobasis anschaulich zu verdeutlichen: würden weltweit alle PBT-Kunststoffe durch Ultradur® High Speed ersetzt, könnten jährlich 220.000 Tonnen CO₂ eingespart werden. Dies entspricht dem durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ausstoß von 75.000 Autos.

Ultradur® High Speed (Quelle: Pressefoto BASF) wurde Ende 2004 in

den Markt eingeführt. In der Zwischenzeit ist es den BASF Forschern auch gelungen, das Konzept auf einen weiteren Kunststoff zu übertragen: das Polyamid.

Beispiel: Nanoschäume als Dämmmaterial, Produktentwicklung der BASF Gruppe	
Nanoform	Schaum mit Nanoporen
Produkt	Wärmedämmung mit polymeren Nanoschäumen
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	verringerte Wärmeleitung dadurch bessere Wärmeisolation
Erzielter Mehrwert	Energieeinsparung, Reduktion CO₂-Belastung
Befriedigtes Kundenbedürfnis	geringe Kosten
Produktstatus	polymere Nanoschäume bislang nur Prototypen

Der Schlüssel zum energieeffizienten Wohnen ist in erster Linie die richtige Dämmung. 2005/2006 verheizten die Deutschen durchschnittlich etwa 15 Liter Heizöl pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr, so eine Studie der Techem in Eschborn. Bewohner eines unsanierten Altbauhauses verbrauchen leicht das 1,5-fache bis Doppelte dieses Wertes. Der gebräuchlichste polymere Dämmstoff ist heute immer noch das auf Basis von Polystyrol hergestellte Styropor, gefolgt von Materialien wie Neopor und extrudiertem Polystyrol. Diese haben im Vergleich zu Styropor schon deutlich bessere Dämmeigenschaften, die derzeit besten polymeren Dämmmaterialien sind Polyurethanschäume.

Ein Dämmmaterial der Zukunft mit noch erheblich verbesserten Eigenschaften könnten nanoporöse Schäume sein. Im Styropor bewegen sich die Abmessungen der Poren im Mikrometer-Bereich. Nanoschäume sind hingegen Kunststoffe mit nanometergroßen Poren. Da die Poren in Nanoschäumen kleiner als die freie Weglänge der Gasteilchen sind, können Luftmoleküle im Inneren der Poren nicht aufeinander stoßen, womit die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Styropor nochmals deutlich reduziert wird. Damit Nanoschäume als Dämmmaterial konkurrenzfähig werden, müssen großtechnische Verfahren entwickelt und ihre Herstellkosten weiter gesenkt werden. Das sind zwei der Herausforderungen, denen sich die BASF-Forscher stellen.

2.3. Umweltschutz

Beispiel: Wasseraufbereitung durch Filtrationssysteme der ItN Nanovation AG	
Nanoform	Membran mit Nanoporen
Produkt	Filtermembran zur Wasserreinigung
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	bessere Abtrennbarkeit durch gezielt einstellbare Nanoporosität
Erzielter Mehrwert	sauberes Wasser, Ressourceneinsparung
Befriedigtes Kundenbedürfnis	Gesundheit, Hygiene
Produktstatus	Produkte auf Markt

Die ItN Nanovation AG bietet Filtrationssysteme für die biologische Abwasserreinigung und Wasseraufbereitung an, die auf speziell entwickelten keramischen Flachmembranen basieren. Somit werden erstmalig die Eigenschaften einer Plattenmembran mit den Materialeigenschaften einer keramischen Membran vereint, woraus sich besondere Vorteile ergeben. Die keramischen Flachmembranen werden in einem speziellen Produktionsverfahren mit einer dauerhaft haltbaren und hochbelastbaren Nano-Beschichtung versehen. Die aktive Filterschicht der asymmetrisch aufgebauten keramischen Flachmembran ist auf der Außenseite angeordnet - einzigartig für keramische Membranen.

Das System erlaubt stabile und hohe Filtrationsraten, reduziert somit die investitionsrelevante Membranfläche und ermöglicht den Bau Platz sparender Hochleistungskläranlagen - so genannter Membranbioreaktoren - sowie die Steigerung der Leistungsfähigkeit bestehender Kläranlagen. Es bietet eine feststofffreie und keimfreie Ablaufqualität und erlaubt die gefahrlose Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser, die Versorgung mit hochwertigem Trinkwasser oder die universelle Aufbereitung von Oberflächenwassern.

Infolge der Resistenz gegen chemische, physikalische und thermische Einflüsse ist die Haltbarkeit einer keramischen Membran sehr gut und wird von organischen Membranen nicht erreicht. Nach den bisherigen Erfahrungen und der materialtechnischen Expertise liegen die Standzeiten von bei 15 bis 20 Jahren.

2.4. Gesundheitsschutz: Verbesserte Krankenhaushygiene durch Nanotechnologie

Beispiel: Desinfektion mit Nanotechnologie, Produktentwicklung der sarastro GmbH	
Nanoform	Silber Nanopartikel in Reinigungslösungen und Hygieneprodukten sowie Lacken oder Bauteilen (Nanopartikel in einer Matrix)
Produkt	Antibakterielle Ausrüstung von Oberflächen in Krankenhäusern (Beseitigung von Keimen auf Oberflächen oder Kathetern), auch Anwendungen im Haushalt
Eigenschaft durch Nano = Vorteil gegenüber bisherigen Produkten	antibakterielle Aktivität schon bei geringen Füllgraden schon relativ hoch, mittelfristig anhaltender antimikrobieller Effekt auf behandelten Oberflächen zur Inaktivierung von Bakterien, Pilzen und Viren
Erzielter Mehrwert	Infektionsreduktion durch Krankenhauskeime, Reduzierung von Desinfektionsmaterial bei gleiche Leistung, Kostenreduktion
Befriedigtes Kundenbedürfnis	Gesundheitsschutz, Hygiene
Produktstatus	Produkte

In der Bundesrepublik Deutschland infizieren sich etwa 500.000 Patienten im Krankenhaus, 26% dieser Infektionen stammen von multiresistenten Keimen, d.h. diese Keime lassen sich mit einer Antibiotikatherapie nicht oder nur schwer behandeln. Etwa 50.000 Patienten sterben an dieser Infektion. Die Gründe für die immer weiter steigende Zahl dieser Infektionen sind sehr vielschichtig und komplex. U.a. besteht das Problem der aktuell verwendeten Desinfektionsmittel darin, dass sie nur kurz wirken. Das heißt, sie verlieren ihre Wirkung, nachdem die Flüssigkeit verdampft ist.

Die sarastro GmbH hat in der jüngsten Vergangenheit ein Desinfektionsmittel auf der Basis der chemischen Nanotechnologie entwickelt, das einen lang anhaltenden antimikrobiellen Effekt auf behandelten Oberflächen zur Inaktivierung von Bakterien, Pilzen und Viren etabliert.

Dieser Effekt ist so ausgeprägt, dass Keime auch 10 Tage nach Aufbringung nahezu vollständig abgetötet werden und das bei nachgewiesener Verträglichkeit für den Menschen. Das Prinzip, das dieser Wirkung zugrunde liegt, ist einfach: Während die Flüssigkeit des Produkts verdampft, entsteht im Rahmen eines Selbstorganisationsprozesses ein nur wenige hundert Nanometer dünner Film, der sich durch eine hohe dreidimensionale offene Porosität auszeichnet. In dieser Porosität lagern sich Biozidkristalle ein, die solange von der Struktur geschützt werden, bis keimhaltige Flüssigkeiten auf die Oberfläche gelangen. In diesem Moment bildet das Wasser Brücken in die Tiefe der Schicht und löst die Biozide so effizient aus, dass sie die Keime und Viren innerhalb kürzester Zeit abtöten.

Zwischenzeitlich konnte diese Eigenschaft in umfangreichen Laboruntersuchungen und klinischen Studien nachgewiesen werden. Dies führte und führt dazu, dass das Produkt zunehmend Eingang in Krankenhäuser aber auch die Industrie findet.

3. Entwicklungsperspektiven für den Innovationsstandort Deutschland

Zusammenfassend bietet die Nanotechnologie Chancen für eine Vielzahl an neuen Produkten. Bei deren Diskussion sollte nicht nur der jeweilige Verbrauchernutzen, sondern auch der Nutzen von Nanoprodukten für die Umwelt herausgestellt werden. Dieser kann ein unmittelbarer sein (durch Einsatz von Nanotechnologie für Umweltschutz), aber auch ein indirekter (z.B. durch Verringerung von Energie- und Ressourcenverbrauch). Selbstverständlich sollten Risiken der Nanotechnologie für Umwelt und Gesundheit ebenfalls erforscht und bedacht werden. Da es sich bei der Nanotechnologie eher um eine Fortschrittsstufe einer Vielzahl etablierter Hochtechnologiefelder, als um eine geschlossen darstellbare Technologie handelt, ist eine pauschale Bewertung nicht angemessen. Die notwendige Diskussion risikoreicher Teilbereiche muss in diesem Bewusstsein geführt werden.

Eine ausführliche Analyse und Interpretation zu den Risiken der Nanotechnologie hat die Arbeitsgruppe 2 im Rahmen ihrer Ausarbeitung durchgeführt und zugehörige Empfehlungen abgegeben.

Es wird dringender Bedarf an weiteren, öffentlich getragenen Forschungsprojekten gesehen, um gesicherte Erkenntnisse zur Verbreitung, Weitertransport und Abbau von nicht gebundenen Nanoteilchen in der Umwelt sowie in der Nahrungskette zu gewinnen und die Akzeptanz und das Vertrauen der Bevölkerung für/in die Nanotechnologie durch basierte Erkenntnisse weiter zu steigern.

Die neue Fördermaßnahme "NanoNature" des BMBF (seit Mitte Juli 2008 unter der Rahmenausschreibung WING veröffentlicht) ist hierfür ein Beispiel. So werden hier folgende drei Themenkreise mit der Ausschreibung angesprochen:

- Nanotechnologie für den Umweltschutz
- Auswirkungen synthetischer Nanopartikel und -materialien auf die Umwelt
- Entwicklung von Messmethoden zur Charakterisierung von Nanopartikeln in Luft, Wasser und Boden

Im Sinne einer nachhaltigen Produktgestaltung und Technologieentwicklung wird angeregt, zukünftig die positiven Effekte und möglichen Potenziale von Produkten mit Nanomaterialien entlang ihres Lebensweges im Vergleich zu bisher genutzten Produkten anhand eines unter des beteiligten Interessengruppen noch abzustimmenden Kriterienkatalogs zu identifizieren und diesen als „Qualitäts-Check“ für bereits auf dem Markt befindliche Produkte zu nutzen. Ziel sollte sein, die Chancen eines Produktes konkret mit Zahlen, Daten, Fakten aufzuzeigen und auch die Abwägung möglicher Risiken zu integrieren.

Diejenigen Chancen und Potenziale der Anwendungen der Nanotechnologie, welche sich nicht marktgetrieben und somit "als Selbstläufer" erschließen (z.B. die Einsatzmöglichkeiten im Energiesparbereich vor dem Hintergrund steigender Energiepreise), sollten durch eine engagierte Umwelt- und Klimapolitik zielgerichtet gefördert, vorgehalten und bei Bedarf zur Umsetzung gebracht werden.

Grundsätzlich könnte die Nanotechnologie wesentliche Antworten auf eine zentrale Frage der Medizin und Biologie bereithalten, nämlich die Aufklärung und Nutzung des Zusammenhangs zwischen der Struktur / Faltung von Biomolekülen und ihrer physiologischen wie pathophysiologischen Funktion im lebenden Körper.

Alle die in diesem Bericht aufgezählten Chancen, welche die Nanotechnologie bietet, sollten genutzt und die Antworten auf bislang ungelöste Fragestellungen sollten durch intensive Forschungsförderung am Standort Deutschland gefunden werden.