

# Nanomaterialien: Anwendungen im Umweltbereich





# Nanomaterialien: Anwendungen im Umweltbereich



|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>HERAUSGEBER</b> | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<br>76231 Karlsruhe, Postfach 100163; <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a> |
| <b>BEARBEITUNG</b> | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<br>Jochen Leve<br>Gerhard Ott   |
| <b>REDAKTION</b>   | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg<br>Arbeitsgemeinschaft Nanomaterialien (ARGE Nano), Leitung Ulrich Wurster  |
| <b>BEZUG</b>       | Download unter <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>  |
| <b>STAND</b>       | Januar 2011  |
| <b>TITELBILD</b>   | Nano-Zinkoxid (Quelle: BASF)   |



Berichte und Anlagen dürfen nur unverändert weitergegeben werden. Eine auszugsweise Veröffentlichung ist ohne schriftliche Genehmigung der LUBW nicht gestattet.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ZUSAMMENFASSUNG</b>                             | <b>7</b>  |
| <b>1 EINLEITUNG</b>                                | <b>9</b>  |
| <b>2 GRUNDLAGEN/DEFINITIONEN: NANOMATERIALIEN</b>  | <b>10</b> |
| 2.1 WICHTIGE NANOMATERIALIEN                       | 11        |
| 2.2 BEISPIELE FÜR ANWENDUNGEN                      | 12        |
| <b>3 ANWENDUNGEN IM UMWELTBEREICH</b>              | <b>15</b> |
| 3.1 BEREICH WASSER                                 | 15        |
| 3.1.1 WASSERAUFBEREITUNG/ABWASSERBEHANDLUNG        | 15        |
| 3.1.2 GRUNDWASSERSCHUTZ                            | 18        |
| 3.1.3 WASSEREINSPARUNG/VERMINDERTE WASSERBELASTUNG | 19        |
| 3.2 BEREICH LUFT                                   | 20        |
| 3.3 BEREICH BODEN                                  | 22        |
| 3.4 BEREICH ENERGIE/KLIMA                          | 23        |
| 3.5 BEREICH RESSOURCEN- UND MATERIALEFFIZIENZ      | 27        |
| <b>4 FAZIT / AUSBLICK</b>                          | <b>30</b> |
| <b>GLOSSAR</b>                                     | <b>32</b> |
| <b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>                       | <b>33</b> |
| <b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>                       | <b>34</b> |
| <b>TABELLENVERZEICHNIS</b>                         | <b>34</b> |
| <b>QUELLENANGABEN</b>                              | <b>35</b> |
| <b>INTERNETADRESSEN ZUM THEMA NANOTECHNOLOGIE</b>  | <b>38</b> |



# Zusammenfassung

Die Nanotechnologie gilt als Schlüsseltechnologie, von der innovative Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen und gesellschaftlichen Anwendungsfeldern erwartet werden. Es werden bedeutende Umsatzpotenziale in vielen Bereichen der Wirtschaft durch den Einsatz von Nanomaterialien gesehen. Neuartige Produkte und Verfahren können ganze Technologiefelder nachhaltig verändern.

Diese Broschüre stellt Beispiele für den Einsatz von Nanomaterialien vor, die zu deutlichen Umweltentlastungen führen können. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf praxisreifen oder bereits etablierten Anwendungen. Nanomaterialien im Umweltschutz sind jedoch ein relativ junges Technologiefeld, daher werden in dieser Broschüre auch innovative Lösungsansätze vorgestellt, die sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden.

In der Wasseraufbereitung sind Filter mit nanoskaliger Porosität bereits seit Jahren etabliert und werden durch neue nanotechnologische Verfahren optimiert. Zur selektiven Entfernung von Arsen aus Trink- und Abwasser werden nanoskalige Sorptionsmittel aus Eisenhydroxid eingesetzt. Nanopartikuläres Titandioxid kann einen UV-Licht induzierten photokatalytischen Schadstoffabbau bewirken. Zur Beseitigung von Grundwasserkontaminationen befindet sich Nano-Eisen in der Erprobung. Nanoskalige Zusätze erzeugen unter Ausnutzung des „Lotus-Effektes“ selbstreinigende Oberflächen z. B. von Gebäuden oder Badkeramiken.

Zur Reduzierung von Schadstoffemissionen aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden bereits seit Jahrzehnten mit Nanopartikeln beschichtete Katalysatoren verwendet. Nanoporöse Partikelfilter vermindern den Ausstoß von Rußpartikeln bei Dieselmotoren. Industrielle Filtersysteme zur Abtrennung schädlicher Gase und Stäube können mit nanoporösen Membranen in ihrer Effizienz optimiert werden. Photokatalytisch aktives Nano-Titandioxid wird in Baustoffe für Gebäude oder Pflastersteinen eingebunden. So entstehen Oberflächen, die in innerstädtischen Bereichen zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen können.

In der Landwirtschaft trägt eine gezielte und bedarfsgerechte Ausbringung von Pestiziden und Düngemitteln auf Basis nanotechnologischer Wirkstofftransportsysteme zu einer Reduzierung des Verbrauchs bei. Weitere nanotechnologische Entwicklungen dienen der Verbesserung der Wasserspeicherkapazität von Böden sowie der Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit von Oberflächen im Straßen- und Wegebau.

Viele nanotechnologische Lösungsansätze befinden sich im Bereich Energie und Klimaschutz noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Windkraftanlagen können z. B. durch die Verwendung von nanoskaligen Polymerkompositen zur Konstruktion leichterer Rotorblätter effizienter gebaut werden. Vielfältige Ansätze zur Optimierung sind zudem in der Solarzellentechnologie zu sehen. Hier können Nanomaterialien zu einer Erhöhung des Wirkungs-

grades oder zu einer Reduzierung der Herstellungskosten beitragen. Energieeffiziente LED (Light Emitting Diode) bzw. OLED (Organic Light Emitting Diode) sind ohne nanoskalige Bestandteile nicht herzustellen. Der Umbau des Individualverkehrs hin zur Elektromobilität ist eng gekoppelt an mobil einsetzbare Technologien zur Energieerzeugung oder -speicherung, die durch Nanotechnologien effizienter gestaltet werden können. Die Reibungsverluste durch bewegliche Bauteile in Verbrennungsmotoren können durch nanokristalline Beschichtungen vermindert werden. In vielen industriellen Prozessen der chemischen Synthese können darüber hinaus Nano-Katalysatoren die Reaktionsbedingungen mildern und so zu einer Reduzierung der notwendigen Energie- und Stoffmengen beitragen. Neuartige Dämmstoffe auf Basis nanotechnologischer Verfahren ermöglichen eine verbesserte Gebäudeisolierung.

In der industriellen Produktion können konventionelle Korrosionsschutzverfahren zukünftig durch nanokeramische Beschichtungen ohne toxische Schwermetalle ersetzt werden. Modifizierte Nano-Keramiken in Autolacken erzeugen eine kratzfeste Oberfläche und tragen so zu einer längeren Nutzungsdauer bei. Oberflächenbeschichtungen mit elektrisch leitenden Nanomaterialien ermöglichen eine lösemittelfreie Pulverlackierung auch nicht leitender Werkstücke. Nano-Ferrite in Industrieklebstoffen können durch induktive Anregung die zur Aushärtung benötigte Wärme direkt im Klebstoff erzeugen. Der Klebprozess ist schaltbar und zudem reversibel, wodurch ein Recycling der Materialien nach Nutzungsende erleichtert wird.

Die Ressourceneffizienz von Herstellungsprozessen und Produkten kann durch Nanomaterialien wesentlich gesteigert werden, indem Werkstoffe bei gleichbleibenden oder gesteigerten Qualitätsmerkmalen ein geringeres Gewicht aufweisen oder mit weniger Material hergestellt werden können (z. B. nanoporöse Metallschäume). Insbesondere im Luft- und Kraftfahrzeugbau resultieren diese Bestrebungen in einer Gewichtsoptimierung und einem in der Folge verringerten Treibstoffverbrauch.

Erste nanotechnologische Anwendungen mit Umweltentlastungseffekten und hohem Innovations- und Wertschöpfungspotenzial lassen sich in unterschiedlichsten Bereichen identifizieren. Viele Anwendungen befinden sich allerdings noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Der konkrete Beitrag von Nanomaterialien zu Umweltentlastungseffekten ist außerdem oftmals schwer zu bemessen, da sie häufig nur einen Teil eines Gesamtsystems darstellen und nicht allein ausschlaggebend sind. Insbesondere vor dem Hintergrund vieler ungeklärter Fragen zur Bedeutung von Nanopartikeln für Umwelt und Gesundheit ist der Einsatz von Nanomaterialien im Umweltbereich im Vergleich zu bestehenden konventionellen Lösungen einer objektiven Nutzen-Risiko-Analyse zu unterziehen.



# 1 Einleitung

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala befassen. Sie gilt als Schlüsseltechnologie, von der auch zukünftig Anstöße zu innovativen Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen und gesellschaftlichen Anwendungsfeldern erwartet werden. Nanomaterialien sind in den letzten Jahren immer häufiger in Produkten und technischen Anwendungen anzutreffen. Die Entwicklung neuartiger Nanomaterialien eröffnet eine Reihe von innovativen Nutzungsmöglichkeiten und Produktverbesserungen. Es finden sich vielfältige Anwendungen in Bereichen wie Automobilbau, Elektronik, Medizin/Pharmazie, Optik oder Chemie. Zum Teil werden nanotechnologische Verfahren und Materialien schon seit Jahrzehnten eingesetzt, in anderen Bereichen steht deren Entwicklung hingegen erst am Anfang (Abbildung 1). Mit der Nanotechnologie verbindet sich die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in vielen Bereichen der Wirtschaft, ihr Einsatz wird jedoch in der gesellschaftlichen Diskussion teilweise kritisch gesehen. Die Wahrnehmung und Akzeptanz nanotechnologischer Entwicklungen in der Öffentlichkeit wird daher zukünftig entscheidend von konkreten nutzbringenden Anwendungen beeinflusst werden.

Diese Broschüre stellt Beispiele für nanotechnologische Verfahren und Produkte vor, die zu deutlichen Umweltbelastungseffekten führen können. Der Schwerpunkt liegt auf Beispielen bereits realisierter Anwendungen und Verfahren. Des Weiteren werden auch interessante Aspekte nanotechnologischer Anwendungen im Umweltbereich angesprochen, die sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden.

Trotz des hohen Potenzials, das die Nanotechnologie für Anwendungen im Umweltschutz besitzt, darf der Blick auf die Risiken, die mit dem Einsatz von Nanomaterialien möglicherweise verbunden sind, nicht verstellt werden. Bislang liegen kaum Erkenntnisse darüber vor, ob und in welchem Umfang es zu Freisetzungen von Nanopartikeln in die Umwelt kommt. Zudem ist das Wissen über das Verhalten von Nanomaterialien in der Umwelt und im menschlichen Körper bislang nur unzureichend. Einen guten Einblick gibt die von der LUBW erstellte Broschüre „Nanomaterialien: Toxikologie/Ökotoxikologie“ [LUBW, 2010]. Aspekte des Arbeitsschutzes werden in der Broschüre „Nanomaterialien: Arbeitsschutzaspekte“ [LUBW, 2009] behandelt. Beide Broschüren können über das Internet unter <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/55700/> eingesehen bzw. heruntergeladen werden.

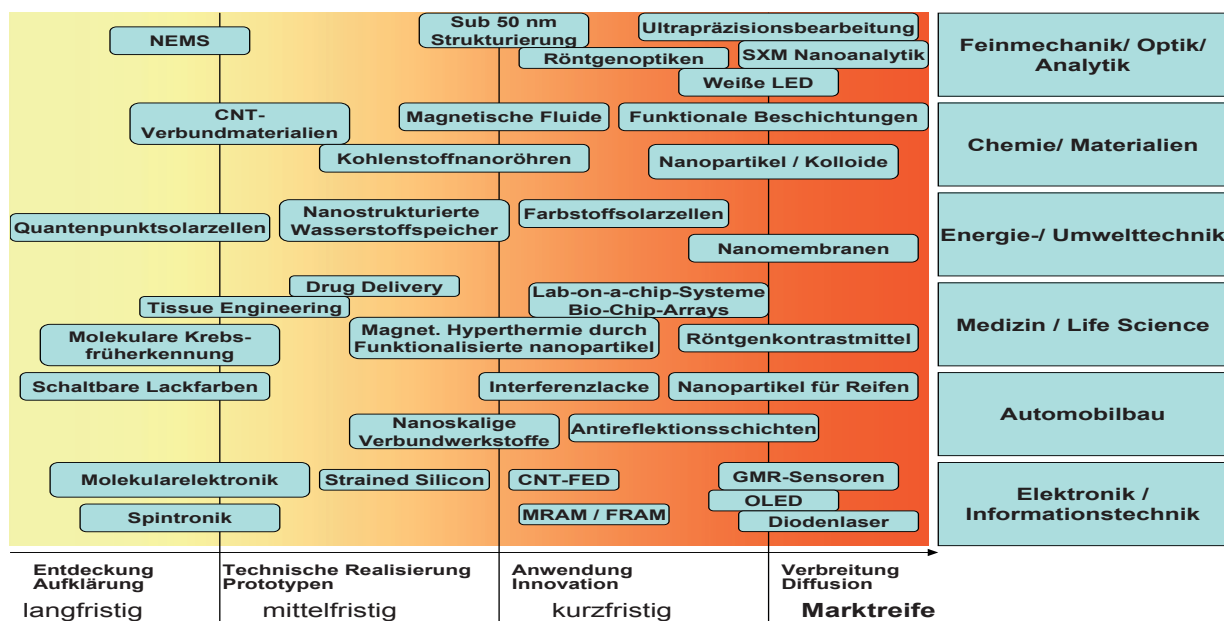


Abbildung 1: Entwicklungsstand und Anwendungsfelder der Nanotechnologie nach [RIEKE, BACHMANN, 2004]

## 2 Grundlagen/Definitionen: Nanomaterialien

Was sind Nanomaterialien, was ist Nanotechnologie? Nanotechnologie umfasst ein weites Spektrum an Technologien und Materialien, die sich mit Strukturen im nanoskaligen Bereich beschäftigen. Eine allgemeingültige Definition des Begriffs „Nanotechnologie“ existiert bislang nicht. Die Bundesregierung definiert den Begriff im Rahmen der „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“ folgendermaßen:

„Nanotechnologie beschreibt die Untersuchung, Anwendung und Herstellung von Strukturen, molekularen Materialien und Systemen mit einer Dimension oder Fertigungstoleranz typischerweise unterhalb von 100 Nanometern. Allein aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten resultieren dabei neue Funktionalitäten und Eigenschaften zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Produkte und Anwendungsoptionen“ [BMBF, 2006].

„Nanotechnologie“ bezeichnet damit einen Oberbegriff für Verfahren und Stoffe im Größenbereich unterhalb von 100 Nanometern. Unter „Nanomaterialien“ werden Stoffe, Teilchen oder Strukturen verstanden, die im Größenbereich zwischen 1 und 100 Nanometern (nm) liegen. 1 Nanometer (griechisch nanos: Zwerg) entspricht einem millionsten Millimeter ( $1\text{nm} = 10^{-6}\text{mm}$ ). Zum Vergleich: Nanomaterialien sind etwa 1000 Mal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares. Ihr Größenbereich

liegt damit jeweils eine Größenordnung oberhalb von Atomen bzw. unterhalb von Bakterien.

Die Bezeichnungen für die Strukturen von Nanomaterialien variieren stark – auch aufgrund der ständig steigenden Anzahl neu synthetisierter Materialien und Strukturen. Folgende Basisstrukturen können jedoch abgegrenzt werden [PASCHEN ET AL., 2004]:

- punktförmige Strukturen mit Höhe, Breite und Länge kleiner als 100 nm
- linienförmige Strukturen mit Breite und Länge kleiner als 100 nm
- Schichtstrukturen mit Höhe kleiner als 100 nm
- „inverse“ Nanostrukturen mit Poren im nanoskaligen Bereich
- komplexe Strukturen (supramolekulare Einheiten, Dendrimere)

Abbildung 2 stellt wichtige Begriffe und ihre Beziehung untereinander dar; siehe auch die Definition von Partikelgrößen in [LUBW, 2009].

Materialien im Nanomaßstab werden nicht nur gezielt synthetisch hergestellt, sondern kommen auch natürlicherweise in der Umwelt vor (ultrafeine Partikel). Sie entstehen z. B. bei Vulkanausbrüchen oder finden sich in Böden oder Sedi-

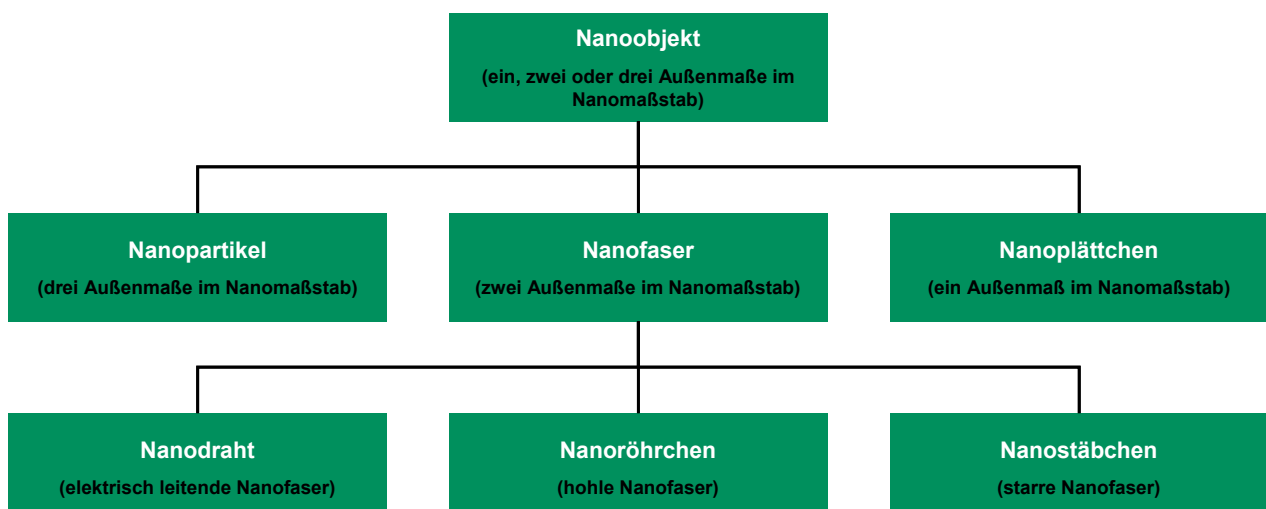


Abbildung 2: Nanotechnologische Begriffe [LUBW, 2009]

menten. Zudem entstehen sie ungewollt u. a. bei Verbrennungsprozessen von Kraftstoffen in Dieselmotoren (Ruß). Für die meisten Produkte und Anwendungen werden Nanomaterialien jedoch gezielt hergestellt. Hierbei bestehen Nanomaterialien oftmals nicht aus neuartigen Verbindungen und Stoffen, sondern altbekannte Materialien entwickeln aufgrund der gezielt herbeigeführten Nanoskaligkeit und -struktur neuartige Eigenschaften und ermöglichen dadurch innovative Anwendungen.

Die Reduzierung der Partikelgröße in den nanoskaligen Bereich geht allgemein mit einer drastischen Änderung der physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften eines Stoffes einher (Tabelle 1). Die spezifische „innere“ Oberfläche der Teilchen erhöht sich enorm (mehrere 1000 m<sup>2</sup> pro Gramm Material). Die Grenzflächeneigenschaften eines Nano-Stoffes treten damit gegenüber den Volumeneigenschaften des Stoffes im höherskaligen Bereich in den Vordergrund. Es findet eine Funktionalisierung von Oberflächen statt. Dies führt generell zu einer Steigerung der chemischen Reaktivität und der Effizienz von katalytischen Eigenschaften. Weitere Stoffeigenschaften wie Härte, Elastizität, Festigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Magnetismus, Fluoreszenz oder Lichtabsorption ändern sich. Neuartige und bislang unbekannte Effekte können auftreten. Zudem neigen manche Nanomaterialien dazu, sich selbständig zu neuen Strukturen zusammenzufügen, sie organisieren sich selbst. Unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen diese Selbstorganisations-Phänomene neue Herstellungsverfahren.

Tabelle 1: Geänderte Sichtweise beim Übergang zur Nanoskala nach [PASCHEN ET AL., 2004]

| Makro-Welt                | Nano-Welt                          |
|---------------------------|------------------------------------|
| klassische Physik         | Quantenmechanik                    |
| Festkörpereigenschaften   | Bindungseigenschaften              |
| Volumen dominierend       | Oberfläche dominierend             |
| homogene Materialien      | inhomogene Materialmischungen      |
| einfache Miniaturisierung | Kombination mit Selbstorganisation |
| statistische Ansammlungen | individuelle Teilchen              |



## 2.1 WICHTIGE NANOMATERIALIEN

Eine Gesamtschau der verschiedenen Nanomaterialien würde den Rahmen dieser Broschüre sprengen - eine gute Übersicht über verschiedene Einsatzmöglichkeiten von gezielt hergestellten Nanomaterialien geben ELSNER ET AL. [2009]. Wichtige und zumindest teilweise in größeren Mengen hergestellte und eingesetzte Gruppen von Nanomaterialien sind:

- Kohlenstoff basierte Nanomaterialien [Carbon Black (Industrie-Ruß), Fullerene, Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nano Tubes, CNT)]
- Metall- und Halbmetalloxide [Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>), Titandioxid (TiO<sub>2</sub>), Eisenoxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Zinkoxid (ZnO), Zeolithe]
- Halbleiter [Cadmiumtellurid (CdTe), Cadmiumselenid (CdSe), Silizium]
- Metalle [Gold (Au), Silber (Ag), Platin (Pt), Eisen (Fe)]

Insbesondere Fullerene und Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT) weisen neu synthetisierte Strukturen ohne Entsprechungen in der Natur auf.

Fullerene sind käfigförmige Moleküle, die ausschließlich aus Kohlenstoff-Atomen bestehen. Ein bekanntes Fulleren ist das C<sub>60</sub>-Fulleren, das aus 60 Kohlenstoffatomen besteht und eine geschlossene Kugel aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken bildet (Form eines Fußballs, Abbildung 3). Neben Diamant und Graphit stellen Fullerene die dritte Element-Modifikation des Kohlenstoffs dar. Sie können aus einer Schicht („cage“) oder aus mehreren Schichten („onion“ oder „Hyperfulleren“) aufgebaut sein [ELSNER ET AL., 2009]. Verwendung finden sie als Katalysatoren, als Schmiermittel, zur Herstellung künstlicher Diamanten, in der Medizin, als Halbleiter und als Supraleiter [LUBW, 2009].

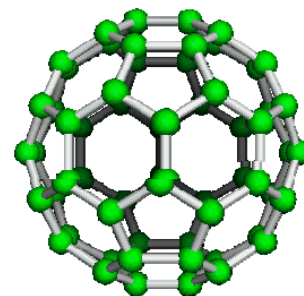


Abbildung 3: C<sub>60</sub>-Fulleren [WIKIPEDIA (II), 2010]

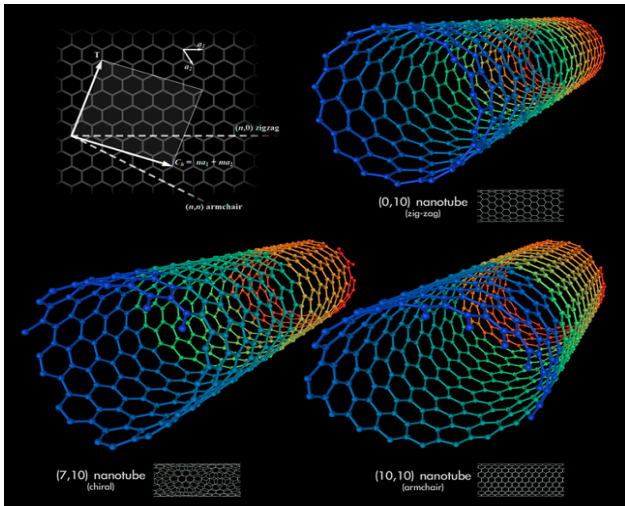


Abbildung 4: Verschiedene Typen von CNT [WIKIPEDIA (III), 2010]

Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nano Tubes, CNT) bestehen aus zu Röhren zusammengerollten Lagen aus Graphit. Hierbei können einschalige Nanoröhren (Single Walled Nano Tubes, SWNT) und mehrschalige Nanoröhren (Multi Walled Nano Tubes, MWNT) unterschieden werden (Abbildung 4). Kohlenstoff-Nanoröhren weisen bemerkenswerte Eigenschaften auf: Ihre Zugfestigkeit ist doppelt so groß wie die von Stahl und sie widerstehen 1000-fach höheren Stromdichten als Kupfer. Sie besitzen entweder metallische oder halbleitende Eigenschaften. CNT werden aufgrund vielfältiger Einsatzmöglichkeiten ein hohes Anwendungspotenzial eingeräumt, z. B. in der Herstellung von elektronischen Bauteilen (Computer), Displays, Lithium-Ionen-Batterien, Sensoren und hochfesten Komposit-Materialien.

Quantenpunkte bestehen aus Halbleiter-Nanokristallen (Indiumgalliumarsenid (InGaAs), Cadmiumselenid (CdSe)). Mehrere 1000 Atome bilden dabei etwa 100 nm große pyramidenförmige Strukturen (Quantenpunkt bzw. Quantentrog). Die elektrischen Ladungsträger (Elektronen) in einem Quantenpunkt sind in allen drei Raumrichtungen in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt, ihre Energie kann nur noch diskrete Werte annehmen. Quantenpunkte verhalten sich demzufolge nicht mehr wie Festkörper sondern zeigen ähnliche Eigenschaften wie Atome und Moleküle [PASCHEN ET AL., 2004]. Die Form, die Größe oder die Anzahl von Elektronen kann in ihnen jedoch gelenkt werden. Auf diese Weise lassen sich ihre optischen und elektronischen Eigenschaften beeinflussen [LUBW, 2009]. Dies

macht sie für eine Verwendung z. B. als Marker in der Biologie oder in Displays und Lasern interessant [WIKIPEDIA (V), 2010].

## 2.2 BEISPIELE FÜR ANWENDUNGEN

Aufgrund der ständig zunehmenden Vielfalt der Nanomaterialien und ihrer Anwendungsbereiche ist es unmöglich, eine Gesamtübersicht zu geben. Der nano.DE-Report 2009 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung [BMBF, 2006] enthält einen guten Überblick über den derzeitigen Stand der Anwendungen von Nanotechnologie und Nanomaterialien. An dieser Stelle werden daher lediglich einige Beispiele für marktgängige Anwendungen außerhalb des Umweltschutzes angeführt. Im Internet frei verfügbare Datenbanken zu Produkten im Bereich der Nanotechnologie können als weitere Informationsquellen hinzugezogen werden, z. B. unter

- <http://www.nanoproducts.de> [NANOPRODUCTS, 2010]
- <http://www.nanotechproject.org> [PEN, 2010]
- [http://www.nanowerk.com/phpscripts/n\\_dbsearch.php](http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php) [NANOWERK, 2010]

In der Automobilindustrie wird z. B. seit einigen Jahren Carbon Black (nanoskaliger Industrie-Ruß) in der Reifenherstellung zur Optimierung von Rollwiderstand, Abrieb und Haftung verwendet. Daneben werden bei Fahrzeuglackierungen der obersten Lackschicht (Klarlackschicht) nanoskalige Keramikpartikel zur Erhöhung der Kratzfestigkeit beigemischt. Instrumenten- und Windschutzscheiben werden mit Antireflexbeschichtungen auf Basis hoch und niedrig lichtbrechender Schichten in Schichtdicken von Bruchteilen der Wellenlänge des Lichts ausgestattet. Antibeschlagbeschichtungen werden mittels superhydrophiler (hydrophil = wasseranziehend) Titandioxid-Nanopartikel realisiert. Verschiedene neuartige Nanokompositmaterialien ermöglichen zukünftig Gewichtsreduzierungen im Karosserie- und Motorenbau [BMBF, 2009]. Mit Nanofasern beschichtete Kabinenluftfilter führen zu einer verbesserten Entfernung von Partikeln (Staub, Pollen) und Gerüchen aus der Innenraumluft von Fahrzeugen [MARTENS ET AL., 2010].

Nano-Silber findet zunehmend Einsatz als antibakterielle Ausrüstung in Textilien, Farben und Keramiken (Badflie-

sen). Die Verwendung von Nano-Silber-Partikel in Waschmaschinen oder Textilien wird aufgrund des Silber-Austrags mit dem Waschwasser in die Umwelt als ökologisch nicht unbedenklich angesehen [HUND-RINKE ET AL., 2008].

Nanopartikuläres Polytetrafluorethylen (PTFE) wird als wasserdichte Membran in Textilien eingesetzt. Imprägnierungen von Textilien mit PTFE wirken schmutz- und wasserabweisend [BMBF, 2009]. Durch Beschichtung mit PTFE erhalten Kochgeräte eine nicht haftende Oberfläche („Teflon-Pfanne“).

Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) und Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) bieten Schutz vor der UV-Strahlung der Sonne und sind seit längerem Bestandteil von Sonnenschutzcremes und anderen Kosmetika. Zudem werden sie Farben und Lacken als Pigmente zugesetzt.

In der Medizin bewirken erste nanobasierte Wirkstofftransportsysteme (Drug Delivery Systems) eine zielgenaue Medikamentenabgabe im Körper. Der Wirkstoff wird dabei mit einer Nanokomponente gekoppelt. Das Wirkstofftransportsystem ermöglicht durch eine spezifische Anlagerung der Nanokomponente an das Zielgewebe eine exakte Anreicherung des Wirkstoffs. Nebenwirkungen von Medikamenten beruhen häufig darauf, dass sich der Wirkstoff

nach Verabreichung unspezifisch im Körper verteilt und nicht nur im kranken Gewebe wirkt, sondern seinerseits Beschwerden verursacht. Gezielter Wirkstofftransport kann die therapeutisch notwendige Dosis eines Wirkstoffs reduzieren und somit Nebenwirkungen verringern. Zudem können durch solche Wirkstofftransportsysteme biologische Barrieren (Blut-Hirn-Schranke) überwunden werden. Des Weiteren wird durch Anwendung nanotechnologischer Verfahren in der Diagnostik eine verbesserte Gesundheitsvorsorge durch Früherkennung von Krankheiten erwartet. Die zukünftige Entwicklung von Biomaterialien unter Einsatz von Nanotechnologie und Nanomaterialien als Ersatz für krankes oder zerstörtes Körpergewebe ist ein weiterer Bereich in der medizinischen Forschung [BMBF, 2009].

In der Bauindustrie werden beispielsweise Siliziumdioxid-Nanopartikel zur Verbesserung von Beton-/Mörteleigenschaften kommerziell eingesetzt. Hierdurch werden Druckfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit des Betons gesteigert. Andere nanotechnologische Produkte werden in der Funktionalisierung von Außenfassaden und Dächern verwendet, z. B. zur Optimierung von Gebäudedämmungen. Fassaden und Glasflächen erhalten einen Selbstreinigungseffekt durch hydrophob (wasserabweisend) funktionalisierte Oberflächen. Tabelle 2 enthält weitere Beispiele für Nano-Anwendungen.

Tabelle 2: Anwendungsbeispiele zum Einsatz von Nanopartikeln in Produkten (verändert nach [LUBW, 2007])

| Bereich                                 | Nanoskalige Partikel   | Produkte                                      | Zweck  |
|---|--|---|--|
| Kosmetik                                | Titandioxid (TiO <sub>2</sub> ), Zinkoxid (ZnO)  | Sonnenschutzpräparate, Hautcreme              | UV-Schutz  |
|   | Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )  | Haarpflegemittel                              | Stabilisator   |
|   | Calciumphosphat (Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )   | Zahncreme                                     | Wirkstoff  |
| Nahrungsmittel                          | Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> )   | Raffinierte Speisesalze                       | verbesserte Rieselfähigkeit  |
|   |  | Hart- und Schmelzkäse                         | verbesserte Sämigkeit  |
|   |  | Ketchup                                       | Verringerung der Haftfähigkeit   |
|   | Carotinoide  | Limonaden                                     | Farbstoff und Frischhaltung  |
|   | Titandioxid (TiO <sub>2</sub> )  | Zuckerguss, Bonbons, Kaugummi                 | Farbstoff  |
| Lebensmittelverpackungen                | Schichtsilikate, Titandioxid (TiO <sub>2</sub> )   | Frishaltefolie                                | Reduzierung des Feuchtigkeitsverlustes, Vermeidung von Sauerstoffeintritt, UV-Schutz |
|   | innwändige Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> )-Beschichtung   | PET-Flaschen                                  | Diffusionssperre   |
| Papier                                  | Titandioxid (TiO <sub>2</sub> )  | Dekor- und Zigarettenpapier                   | Erhöhung der Opazität (Lichtundurchlässigkeit)                                       |
| Farben                                  | Titandioxid (TiO <sub>2</sub> )  | Holzfarben, Lacke, Autolacke                  | UV- und Korrosionsschutz, Erhöhung der Kratzfestigkeit                               |
| Putzmittel                              | Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Titandioxid (TiO <sub>2</sub> ), Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> ) | Glas- und Keramikreinigungsmittel             | Oberflächenversiegelung  |
| Sanitärkeramik                          | Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> ), Silber                          | Waschbecken, Badewannen, WC, Duschen, Fliesen | Oberflächenveredelung (Abriebfestigkeit, Hitzeresistenz, antibakterielle Ausrüstung) |
| Pharma/Medizin                          | gecoatetes hochdisperses Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> )  | Medikamente                                   | Wirkstofftransportsystem, Wirkstoffdepot   |
| Landwirtschaft                          | Pflanzenschutzmittel in Kapseln mit nanotechnologischer Oberfläche   |   | Pflanzenschutz, Schädlingsbekämpfung   |
| Automobilindustrie                      | „carbon black“ (Industrie-Ruß)   | Autoreifen                                    | Haftungsverbesserung, Verschleißminderung  |
|   | Kupfer   | Schmiermittel                                 | Verschleißreduzierung  |
|   | chemische Verbindungen mit hohem Fluor-Anteil  | Lack- und Scheibenreiniger                    | schmutz- und wasserabweisende Oberflächen  |
|   | Platin, Palladium  | Abgaskatalysatoren                            | Abgasreinigung   |
| Textilien                               | Silber   | Kleidung, Schuhinnenausstattung               | antibakterielle Wirkung  |
|   | Silikonbeschichtungen, PTFE, Anastas-Fasern (TiO <sub>2</sub> -Modifikation)   | Textilveredelung                              | schmutz- und wasserabweisende Ausrüstung   |
| Informations- und Kommunikationstechnik | Silicium, Siliciumcarbide  | elektronische Bauelemente                     | Leistungssteigerung, Verminderung des Ressourcenverbrauchs                           |
| Sport                                   | glasfaserverstärkte Kunststoffe  | Sportgeräte                                   | Verschleißminderung, Gewichtsreduzierung   |
|   | Carbon Nano Tubes (CNT)  | Tennis-, Golfschläger                         | höhere Stabilität, Gewichtsreduzierung   |

# 3 Anwendungen im Umweltbereich

Die im nanoskaligen Bereich veränderten stofflichen Eigenschaften ermöglichen innovative Lösungen für Produkte und Verfahren, die zu deutlichen Umweltentlastungseffekten führen können. So sind durch die erhöhte Reaktivität nanoskaliger Partikel z. B. katalytische Verfahren zur Wasser- und Luftreinigung so effizient zu gestalten, dass sie wirtschaftlich eingesetzt werden können. Vielfach erschließt sich der Entlastungseffekt für die Umwelt auch erst in zweiter Linie. Etwa, wenn aufgrund einer technischen Verbesserung durch den Einsatz von Nanomaterialien eine Erhöhung der Lebensdauer eines Produktes oder der Effizienz eines Verfahrens erzielt werden kann, wodurch sich der Ressourcenverbrauch reduziert. Nanotechnologische Entwicklungen können entscheidend zu einer nachhaltigen Gestaltung von Wirtschaft und Gesellschaft, z. B. im Bereich der regenerativen Energien oder der Elektromobilität, beitragen.

In den folgenden Abschnitten werden nanotechnologische Beiträge mit Umweltentlastungseffekten beispielhaft dargestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf bereits etablierten oder praxisreifen Anwendungen. Wegen der ausgeprägten Dynamik der Nanotechnologie werden darüber hinaus interessante Lösungsansätze erwähnt, die sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden. Aufgrund der starken Expansion dieses Technologiefeldes kann diese Zusammenstellung jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

## 3.1 BEREICH WASSER

Der Zugang zu Wasser in ausreichender Menge und einwandfreier Qualität ist für den Menschen von zentraler Bedeutung: u. a. als Nahrungsmittel, in der Landwirtschaft und für industrielle Fertigungsprozesse. Sauberes Trinkwasser ist jedoch in weiten Teilen der Welt keine Selbstverständlichkeit. Während in den meisten Industriestaaten die Versorgung mit Trinkwasser gewährleistet ist, steht ca. 1,2 Milliarden Menschen insbesondere in den Entwicklungs- und Schwellenländern nicht genügend sauberes Trinkwasser zur Verfügung. Dies kann zu gesundheitlichen

Beeinträchtigungen, hoher Kindersterblichkeit, sozialen Problemen und (internationalen) Konflikten führen [BACHMANN ET AL., 2007].

Global gesehen ist Wasser in ausreichendem Maß vorhanden. Lediglich etwa 2,5 % des globalen Wasservorkommens sind jedoch Süßwasser, wovon wiederum nur etwa 30 % unmittelbar einer Nutzung als Trinkwasser zugänglich sind (Gewässer und Grundwasser, Abbildung 5) [BMU/UBA, 2008]. Zum weitaus größeren Teil wird Grundwasser zur Trinkwasserversorgung herangezogen. Häufig muss das Wasser vor der Verwendung aufwändig aufbereitet werden, damit es die erforderliche Qualität aufweist. Der Schutz der begrenzten Süßwasser-Ressourcen ist folglich von besonderer Wichtigkeit. Die Nanotechnologie kann hierzu einen wichtigen Beitrag in den Bereichen Wasseraufbereitung, Abwasserbehandlung, Grundwasserschutz und Reduzierung des Wasserverbrauchs bzw. des Abwasseraufkommens leisten.

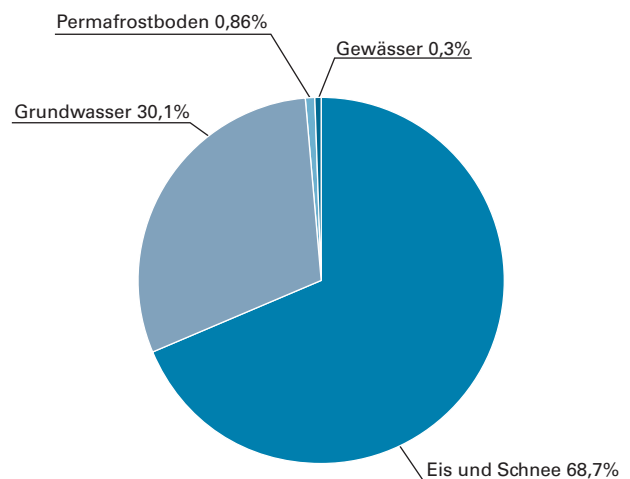


Abbildung 5: Verteilung der Süßwasserressourcen der Erde (verändert nach [BMU/UBA, 2008])



### 3.1.1 WASSERAUFBEREITUNG/ABWASSERBEHANDLUNG

Grundwasser sowie als Uferfiltrat aus Gewässern entnommenes Wasser muss häufig in technischen Prozessen aufbereitet werden, bevor es als Trinkwasser genutzt werden kann. Abwässer müssen vor einer Einleitung in Gewässer

aufwändig behandelt werden. Daher ist man bestrebt, das Abwasseraufkommen durch Aufbereitung und Rückgewinnung von Prozesswässern in der Industrie zu reduzieren. Abwasser, das nicht entsteht, muss auch nicht behandelt werden. In beiden Bereichen gewinnen nanotechnologische Prozesse zunehmend an Bedeutung.

Filter werden zur Trennung von Stoffgemischen verwendet und in der Wasseraufbereitung seit Anfang der 1970er Jahre eingesetzt [MARTENS ET AL., 2010]. Eine Komponente des Gemisches kann die Membran des Filters passieren, während andere Komponenten zurückgehalten werden. Die Trennbereiche grenzen die einzelnen Filterverfahren voneinander ab. Es wird in Mikro-, Ultra-, und Nanofiltration sowie Umkehrosmose unterschieden. Abbildung 6 verdeutlicht die Trennbereiche der einzelnen Verfahren. Mit der Nanofiltration können niedermolekulare organische Verbindungen sowie mehrwertige Ionen entfernt werden. Einwertige Ionen sind lediglich durch Umkehrosmose ab-

zutrennen (z. B. bei der Meerwasserentsalzung) [LUTHER ET AL., 2007]. Es werden fast ausschließlich druckbetriebene Filtrationseinheiten betrieben, d. h. das Stoffgemisch passiert das Filter nicht der Schwerkraft folgend, sondern wird mit Druck durch das Filter „gepresst“.

In der Wasseraufbereitung werden Filtermembranen mit nanoskaliger Porosität als Alternative zu herkömmlichen Verfahren wie Flockung und Sandfiltration zur Enthärtung oder zur Beseitigung natürlicher organischer Stoffe eingesetzt. Sie bieten dabei im Vergleich zur Umkehrosmose ein niedrigeres Druckniveau ( $< 10$  bar) und somit ein vergleichsweise schonendes und kostengünstiges Verfahren [MARTENS ET AL., 2010]. Darüber hinaus werden Nanofiltrationsverfahren beispielsweise in den Bereichen Lebensmittelherstellung und Textil- und Farbstoffindustrie zur Rückgewinnung von Prozesswässern sowie zum Recycling von Säuren aus Bädern eingesetzt [MARTENS ET AL., 2010].

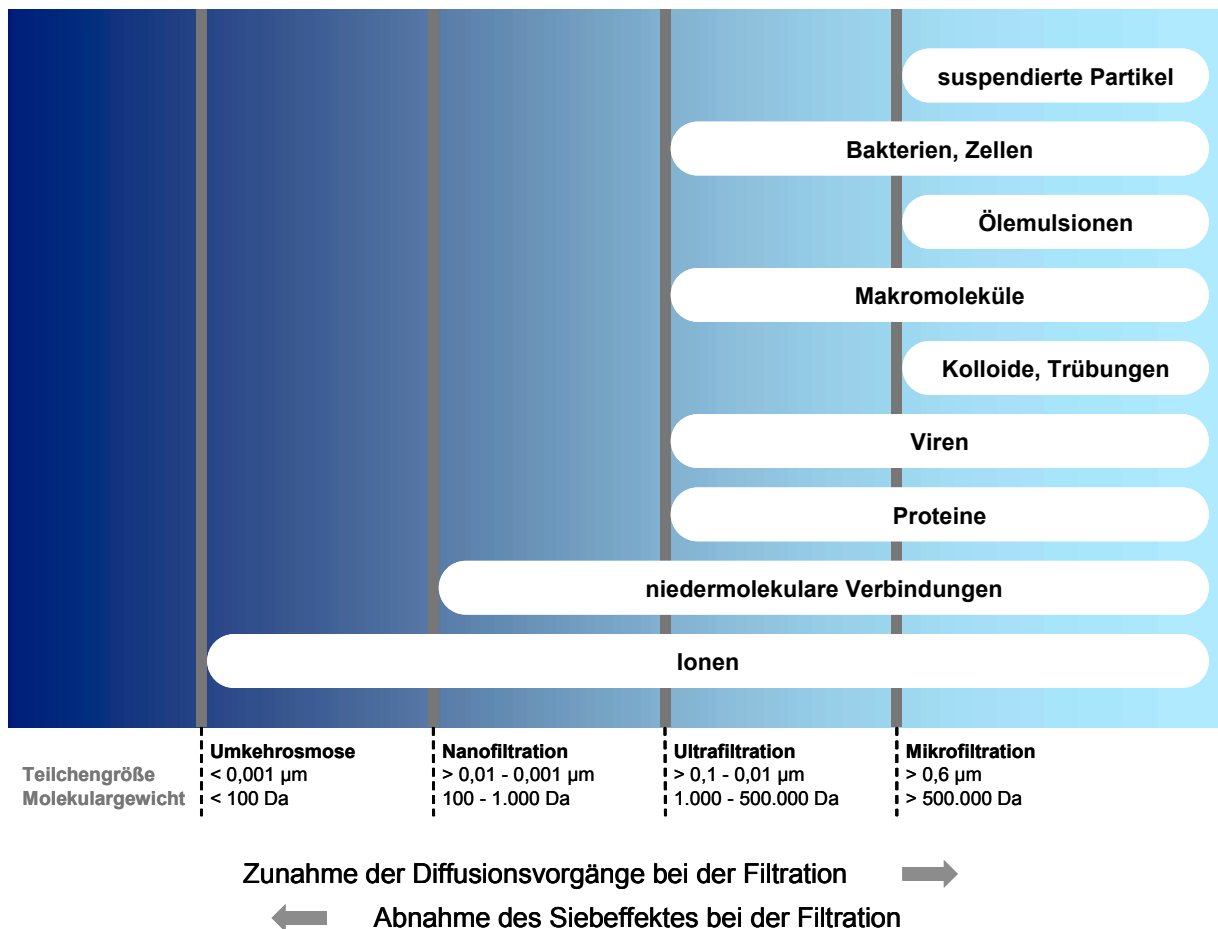


Abbildung 6: Trennbereiche von Membranen - Teilchengrößen und Molekulargewicht für die Mikro-, Ultra- und Nanofiltration und Umkehrosmose (verändert nach [MARTENS ET AL., 2010])



Eine Filtermembran soll möglichst lange betrieben werden können und eine möglichst hohe Durchlässigkeit bei gleich bleibender Filterwirkung aufweisen. Anlagerungen von Partikeln (Scaling) und Bewuchs durch Mikroorganismen (Fouling) reduzieren die Standzeit eines Filters. Neuartige Beschichtungen der Filtermembranen mit nanoskaligen Partikeln sollen diese Probleme minimieren und sind derzeit Gegenstand der Forschung [LUTHER ET AL., 2007].

Insbesondere in Entwicklungsländern sowie bei Katastrophenfällen besteht wegen fehlender zentraler Wasseraufbereitungsanlagen oftmals kein Zugang zu Trinkwasser in ausreichender Menge und Qualität. Hier können Ein-Personen-Wasserfilter mit nanotechnologisch weiterentwickelten Filtermembranen zu einer verbesserten Trinkwasserversorgung beitragen. Sie ermöglichen eine technisch einfache Handhabung und können ohne elektrische Energie betrieben werden. Die Nanofilter werden hierbei z. B. in Kunststoffrohre eingebaut, durch die ungereinigtes Wasser wie mit einem Strohhalm direkt angesaugt werden kann und nach der Passage durch den Wasserfilter Trinkwasserqualität erreicht [VESTERGAARD-FRANDSEN, 2010]. Ein anderes Produkt integriert die Nanofiltrationseinheit in eine Flasche bzw. einen Kanister [LIFESAVER, 2010]. Beide Systeme sind dafür ausgelegt, etliche hundert Liter Wasser zu reinigen. Von Nachteil ist der für den Einsatz in Entwicklungsländern relativ hohe Preis der Produkte (ca. 2,50 € bzw. 115 €). Eine südafrikanische Universität hat aktuell einen Wasserfilter entwickelt, der ähnlich wie ein Teebeutel aufgebaut ist und mit einem Einsatz in einer herkömmlichen Trinkflasche verwendet werden kann. Das Beutelmateriale ist mit Nanofasern ausgerüstet, die antimikrobiell wirken. Aktivkohle im Innern des Beutels beseitigt Verunreinigungen und schädliche Wasserinhaltsstoffe wie z. B. Schwermetalle. Der Beutel ist für den Einmalgebrauch konzipiert und reinigt ca. einen Liter Wasser. Großer Vorteil des Beutels ist der relativ niedrige Preis von voraussichtlich unter einem Euro-Cent pro Beutel (Angaben des Entwicklers). Das Produkt befindet sich zurzeit im Zulassungsverfahren [STELLENBOSCH UNIVERSITY, 2010].

Nanoskalige Sorptionsmittel werden ebenfalls zur selektiven Entfernung unerwünschter Wasserinhaltsstoffe angewendet. Zur selektiven Entfernung von Arsen aus Trink- und Abwasser wurde ein Sorptionsmittel aus nanopartiku-

lärem Eisenhydroxid ( $\alpha\text{-FeO(OH)}$ ) entwickelt, welches eine sehr hohe spezifische Oberfläche aufweist. Arsen wird vom Eisenhydroxid mit hohem Wirkungsgrad absorbiert. Die Nanopartikel wurden so modifiziert, dass sie stabil gegen einen Abrieb im Wasserstrom bleiben [MARTENS ET AL., 2010; LANXEES, 2010]. Der Einsatz von nanoporösen Polymeren aus Cyclodextrinen als Sorptionsmittel zur selektiven Entfernung von organischen endokrinen und persistenten Substanzen, wie z. B. Benzol, Aceton, Dünger und Pflanzenschutzmitteln (Pestiziden), wird gegenwärtig untersucht [LUTHER, 2007].

Zur **photokatalytischen Wasseraufbereitung** kann nanoskaliges Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) als Katalysator eingesetzt werden.  $\text{TiO}_2$  bietet den Vorteil, dass Licht aus dem Wellenbereich zwischen etwa 200 - 400 nm die photochemische Reaktion initiieren kann. Damit kann als UV-Lichtquelle nicht nur künstliches Licht herangezogen werden, sondern auch die natürliche UV-A-Strahlung (Wellenlänge: 300 - 400 nm) der Sonne. Da der Anteil der UV-A-Strahlung mit 5 % der gesamten Sonnenstrahlung jedoch relativ gering ist, werden großflächige Anlagen benötigt, was eine breite Einführung des Verfahrens bislang verhindert hat. Im Rahmen des Projekts SOWARLA (Solare Wasserreinigungsanlage Lampoldshausen) wurde ein so genannter Solar-Receiver entwickelt, der durch seine Modularität entsprechend den Erfordernissen zu großflächigen Anlagen zusammenschaltet werden kann. Das zu behandelnde Abwasser (mit Hydrazinderivaten, Cyanid und Nitrit belastetes Kühlwas-



Abbildung 7: SOWARLA-Pilotanlage (Quelle: DLR)

ser aus Raketenantriebsteils) wird dabei durch transparente Glasröhrchen geleitet und durch Sonnenlichteinwirkung behandelt (Abbildung 7). Aufgrund der guten erzielten Abbauleistungen wurde die Anlage im Frühjahr 2010 in den Routinebetrieb überführt. Denkbare weitere Einsatzfelder werden in der Behandlung von belasteten Grundwässern (z. B. mit Chlorkohlenwasserstoffen), der Aufbereitung von Prozesswässern, im Abbau pharmazeutischer Wirkstoffe (Antibiotika, Röntgenkontrastmittel) oder als Vorbehandlungsstufe in Kleinkläranlagen [JUNG, 2010] gesehen. Insbesondere für Länder mit hoher Sonneneinstrahlung ist die photokatalytische Wasserbehandlung als kostengünstiges Verfahren zur Behandlung geringerer Wasservolumina oder von Wasser mit niedrigem Verschmutzungsgrad interessant [MARTENS ET AL., 2010].

Unter Verwendung magnetischer Nanopartikel lassen sich ebenfalls Schadstoffe aus dem Wasser entfernen. Magnetische Nanopartikel (Magnetit,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) binden dabei selektiv den zu entfernenden Schadstoff (z. B. Arsen). Durch Anlegen eines Magnetfeldes können die Nanopartikel zusammen mit dem gekoppelten Schadstoff anschließend aus dem Wasser entfernt werden (Magnetseparation). Entsprechende Verfahren befinden sich in der Entwicklung [LUTHER ET AL., 2007].

### 3.1.2 GRUNDWASSERSCHUTZ

Boden und Grundwasser sind infolge vorwiegend industrieller und gewerblicher Tätigkeiten vielerorts mit Schadstoffen belastet. In der Mehrzahl der Fälle werden zur Sanierung von kontaminiertem Grundwasser pump-and-

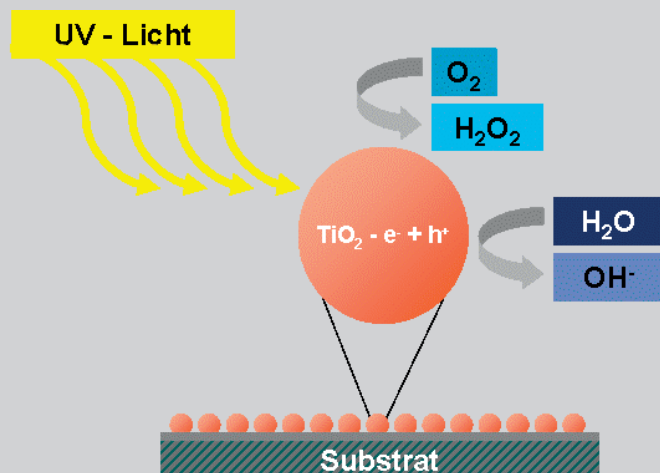
treat-Verfahren eingesetzt, bei denen das Grundwasser an die Oberfläche gepumpt, in entsprechenden technischen Anlagen (häufig Aktivkohle-Filter) behandelt und anschließend wieder in den Untergrund geleitet wird. Wesentliche Nachteile dieser Verfahren können lange Betriebszeiten (Jahre bis Jahrzehnte) und damit verbunden hohe Sanierungskosten sein. Zudem können häufig Sanierungsziele (Beseitigung der Kontamination oder geringe Restbelastung des Grundwassers) nicht nachhaltig erreicht werden.

Als Alternative zu pump-and-treat-Verfahren insbesondere bei Kontaminationen mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) - einer sehr häufig anzutreffenden Schadstoffgruppe im Grundwasser - bietet sich der Einsatz nullwertigen Eisens ( $\text{Fe}^0$ ) als in situ-Verfahren an. Metallisches Eisen eignet sich sehr gut als Reduktionsmittel. CKW werden z. B. zu chlorfreien Kohlenwasserstoffen abgebaut. Als Granulat wird Eisen in permeable reaktive Wände eingebaut, die - im Untergrund installiert - vom Grundwasser durchflossen werden. Die CKW im Grundwasser werden dabei während der Passage durch die Wand durch Reaktion mit dem Eisen abgebaut. Nachteil dieser Methode ist der relativ hohe Investitionsaufwand zur Erstellung des Bauwerks sowie Einschränkungen in der Realisierbarkeit durch Überbauung des zu sanierenden Geländes.

Nano-Eisen (nanopartikuläres nullwertiges Eisen) stellt hier eine Weiterentwicklung dar. Dabei wird Nano-Eisen als Suspension direkt in den kontaminierten Grundwasserkörper eingebracht. Aufwändige Tiefbauarbeiten entfallen. Der Reaktionsraum ist folglich nicht mehr auf die reaktive

## Photokatalyse

Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) bewirkt photokatalytisch den Abbau organischer Wasser- und Luftinhaltsstoffe. Durch den Einfluss von UV-Licht (Bestandteil des Sonnenlichts oder künstlich erzeugt) katalysiert Titandioxid in Gegenwart von Luftsauerstoff und Wasser die Entstehung reaktiver freier Hydroxyl-Radikale. Diese Hydroxyl-Radikale können einen Abbau von Schadstoffmolekülen unter Bildung von Kohlendioxid, Wasser und weiteren ungiftigen oder leichter abbaubaren Produkten bewirken [LUTHER ET AL., 2007].



Prinzip der Photokatalyse (nach [LUTHER ET AL., 2007])

Wand beschränkt, sondern wird durch den gesamten Grundwasserkörper gebildet. Dabei macht die geringe Partikelgröße des Nano-Eisens seine Verteilung im Grundwasserkörper erst möglich. Zudem besitzt Nano-Eisen im Vergleich zu Eisengranulat aufgrund der um ein Vielfaches höheren spezifischen („inneren“) Oberfläche eine wesentlich höhere Reaktivität [MÜLLER ET AL., 2006]. Der Einsatz dieser Technologie in ersten Pilotprojekten zeigte viel versprechende Ergebnisse. Problematisch sind zurzeit noch die Langzeitreaktivität des Nano-Eisens, die im Untergrund noch nicht befriedigend gewährleistet ist, sowie die Immobilisierung der Nano-Eisenpartikel im Untergrund. Die Eisenpartikel neigen im Untergrund zur Agglomeration. Dadurch wird die Ausbreitung der Eisenpartikel im Grundwasserkörper und damit die Bildung eines ausreichend großen Reaktionsraums eingeschränkt. Zur Lösung beider Probleme wird an Modifikationen des Nano-Eisens gearbeitet [KÖBER, KOPINKE, 2007].

### 3.1.3 WASSEREINSPARUNG/VERMINDERTE WASSERBELASTUNG

Nanoskalige Zusätze ermöglichen selbst reinigende Oberflächen unter Ausnutzung des „Lotus-Effektes“ (Abbildung 8). In Fassadenanstrichen von Gebäuden erzeugen diese Zusätze eine selbstreinigende Oberfläche, die in einem geringeren Wasser- und Reinigungsmittelverbrauch bei der Fassadenreinigung resultiert. Anhaftende Partikel (Schmutz, Staub, Ruß) werden mit dem nächsten Regen von der Fassade abgespült [MARTENS ET AL., 2010]. Entsprechende Fassadenfarben sind am Markt erhältlich und erweitern die Schutzwirkung bei Gebäudeanstrichen. Erste Autolacke werden ebenfalls mit nanoskaligen Zusätzen versehen, die neben einer erhöhten Kratzfestigkeit einen Selbstreinigungseffekt aufgrund des Lotus-Effektes aufweisen. Auch bei Sanitärkeramiken wird durch Einsatz von nanoskaligen Zusätzen eine selbstreinigende Oberfläche erzeugt, die einen geringeren Reinigungsaufwand benötigt und dadurch Wasser und Reinigungsmittel einspart (z. B. wasserloses Urinal, Fliesen, Waschbecken).

Nanoskalige Antifouling-Mittel sollen zu einer Bewuchsminderung an Schiffskörpern beitragen. Fouling bedeutet im Zusammenhang mit Schiffen und Booten die Anhaftung von Organismen (z. B. Muscheln) am

Schiffskörper unterhalb der Wasserlinie. Der Bewuchs kann erhebliche Dimensionen annehmen und zu einer Erhöhung des Strömungswiderstandes und damit des Treibstoffverbrauchs sowie zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit von Schiffen führen. Der Bewuchs muss daher regelmäßig vom Schiffskörper entfernt werden. Um dem Bewuchs vorzubeugen werden so genannte Antifouling-Anstriche als Bewuchshemmende Beschichtung als Endanstrich auf den Schiffskörper aufgebracht. Die verwendeten Produkte enthalten in der Regel Biozide, die eine Anhaftung der Organismen verhindern. Die Biozide gelangen jedoch mit dem Abrieb durch das vorbeiströmende Wasser nach und nach in die Gewässer. Dadurch entfalten sie eine Fernwirkung und können sich in den Meeren und Gewässern anreichern. Die ökologischen Auswirkungen dieser Verbreitung von biozidhaltigen Antifouling-Anstrichen werden seit einigen Jahren untersucht. Die Verwendung einer Reihe von Antifouling-Bioziden wurde in der Folge bereits verboten, weitere Verbote bzw. Regulierungen sind in der Diskussion. Als Alternative zu herkömmlichen Antifouling-Anstrichen wurde eine Beschichtung auf Silikon-Basis entwickelt, die allerdings nur bei Schiffen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit höher 15 Knoten (ca. 27 km/h) und mit geringen Liegezeiten eine ausreichende Wirkung erzielt. Zudem gelangen auch bei bestimmungsgemäßer Verwendung durch den Abrieb Silikonpartikel und Silikonöle in die Gewässer. Silikone sind nicht abbaubar, reichern sich in der Umwelt an und können negative Auswirkungen auf das Ökosystem entfalten.

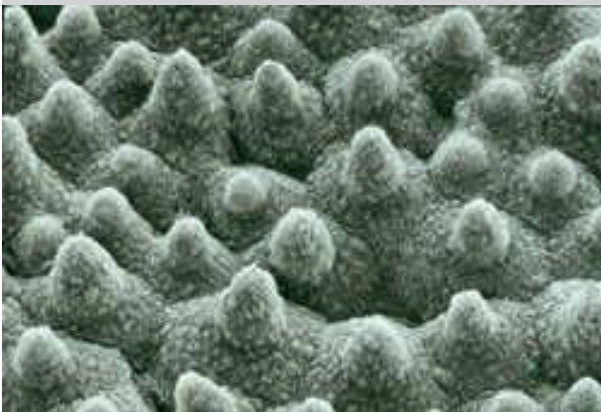


Abbildung 8: Selbstreinigende Fassade unter Nutzung des Lotus-Effektes [NEES-INSTITUT, 2010]

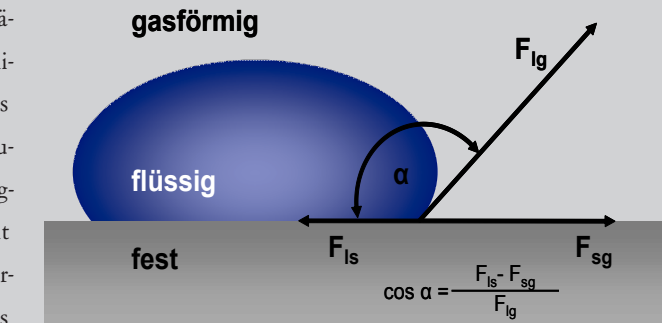
## Lotus Effekt

Die technische Nachahmung der Hydrophobie von Oberflächen wird als „Lotus-Effekt“ bezeichnet. Wassertropfen minimieren aufgrund der hohen Oberflächenspannung des Wassers ihre Oberfläche. Die geringste Oberfläche bei gegebenem Volumen bietet die Form einer Kugel. Wassertropfen streben folglich danach, eine Kugelform einzunehmen. Beim Kontakt mit einer Oberfläche wirken Adhäsionskräfte zwischen dem Wassertropfen und der Oberfläche, die dem Bestreben des Wassers entgegenwirken, eine Kugel zu bilden. Die Oberfläche wird mit Wasser benetzt [WIKIPEDIA (IV), 2010]. In Abhängigkeit von

der Beschaffenheit der Oberfläche unterscheidet sich der Grad der Benetzung. Der Kontaktwinkel  $\alpha$  zwischen Wassertropfen und Oberfläche wird als Maß für das Benetzungsverhalten des Wassers auf der Oberfläche verwendet. Ein Kontaktwinkel von über  $150^\circ$  kennzeichnet eine kaum benetzbare Oberfläche, sie ist superhydrophob. Ein auf der Oberfläche aufgebracht Wasserfilm bricht auf und das Wasser zieht sich zu kleinen Tropfen zusammen. Dabei nimmt es auf der Oberfläche befindliche Partikel auf, die zu-



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Blattoberfläche der Lotusblume [NEES-INSTITUT, 2010]



Schemazeichnung zum Lotuseffekt (nach [HEUBACH, ANGERER, 2007])

zusammen mit dem Wasser bei geeignetem Neigungswinkel von der Oberfläche abfließen. Die Oberfläche reinigt sich selbst [HEUBACH, ANGERER, 2007]. Der Name „Lotus-Effekt“ leitet sich von der Lotusblume (*Nelumbo nucifera*, *Nelumbo lutea*) ab, bei der dieser Effekt beobachtet wurde. Die Blattoberfläche der Lotuspflanze bildet hierzu mikrofeine  $5 - 10 \mu\text{m}$  hohe Noppen aus, die wiederum eine durch Wachskristalle ausgebildete Nanostruktur aufweisen. Neben der Lotusblume zeigen auch einige andere Pflanzenarten (z. B. Kapuzinerkresse (*Tropaeolum*), Schilfrohr (*Phragmites*), Weißkohl (*Brassica oleracea* convar. *capitata* var. *alba*) oder Akelei (*Aquilegia*)) und auch Tiere (z. B. Insektenflügel) diesen Effekt [WIKIPEDIA (IV), 2010].

Aus diesen Gründen werden derzeit Beschichtungssysteme unter Einsatz von Nanomaterialien entwickelt, die bei hoher Haltbarkeit, Abriebfestigkeit und Wirksamkeit eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Antifouling-Beschichtungen bieten. Erste Produkte, die bereits am Markt verfügbar sind, zielen darauf ab, eine möglichst glatte Oberfläche zu bilden. Andere wiederum enthalten Biozide (z. B. Kupfer, Silber, Siliziumdioxid, Titandioxid) in nanopartikulärer Form, die aufgrund ihrer höheren Reaktivität in geringeren Mengen eingesetzt werden und folglich während des Betriebes eine geringere Freisetzung aufweisen. Die Wirksamkeit dieser Antifoulingssysteme konnte bislang allerdings nicht eindeutig nachgewiesen werden, zudem ist die ökotoxikologische Bedeutung der Nanopartikel ihrerseits in aquatischen Systemen bislang nicht ausreichend geklärt und Gegenstand der aktuellen Forschung. Trotzdem ist zu erwarten, dass zukünftig die Bedeutung nanotechnologischer Verfah-

ren in der Entwicklung von Antifouling-Beschichtungen auf der Grundlage anderer methodischer Ansätze zunehmen wird [WATERMANN ET AL., 2010].

Nanoemulsionen können dazu beitragen, den Verbrauch von organischen Lösungsmitteln zu senken. Organische Lösungsmittel können Gewässer belasten, lösungsmittelhaltige Abwässer müssen daher vor einer Einleitung in Gewässer gereinigt werden. Nanoskalige Öl-Wasser-Gemische (Nanoemulsion) werden in der Kosmetik und der Pharmazie bereits zur Wirkstoffapplikation eingesetzt. Weitere Einsatzbereiche als Lösungsmittlersatz werden untersucht [BACHMANN ET AL., 2007].

## 3.2 BEREICH LUFT

Die Freisetzung (Emission) von Schadstoffen in die Luft

hat aufgrund der weiten räumlichen Verteilung eine besondere Bedeutung im Umweltschutz. Schadstoffemissionen können die menschliche Gesundheit (z. B. durch Atemwegs- und Herzerkrankungen) beeinträchtigen, führen zu einer Schädigung von Gebäuden und Kulturdenkmälern und haben negative Auswirkungen auf Ökosysteme und auf die Gewässerqualität („saurer Regen“). Beispiele für global zu beobachtende Beeinträchtigungen durch Schadstoffemissionen in Luft sind die Schädigung der Ozonschicht der oberen Troposphäre durch halogenierte Kohlenwasserstoffe (FCKW) oder der Klimawandel, verursacht durch Treibhausgasen (insbesondere Kohlendioxid und Methan). Hauptquellen der klassischen Luftschadstoffe (Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickoxid und Ammoniak) sind Industrie, Verkehr, Kraftwerke, Haushalte (Heizung) und die Landwirtschaft. Während die Emissionen der klassischen Luftschadstoffe rückläufig sind (Abbildung 9), gewinnt die Freisetzung von Feinstäuben und flüchtigen organischen Verbindungen an Bedeutung [BACHMANN ET AL., 2007].

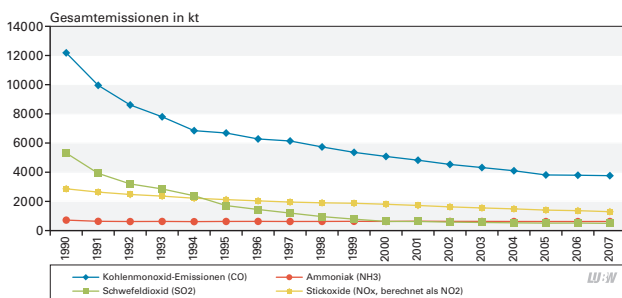


Abbildung 9: Gesamtemissionen ausgewählter Luftschadstoffe [in Kilo-Tonnen, kt] in Deutschland (eigene Abbildung mit Daten aus [UBA, 2010])

Klassische technische Verfahren zur Emissionsminderung verfolgen häufig einen End-of-Pipe-Ansatz, versuchen also, Schadstoffe durch Filterung, Rauchgasentschwefelung, Nassentstaubung, elektrostatische Verfahren oder durch Katalysatoren aus dem Abgasstrom zu entfernen, ohne bereits während des Produktionsprozesses auf eine verringerte Entstehung schädlicher Abgase hinzuwirken. Aktuelle Entwicklungen gehen hingegen in Richtung produktionsintegrierter Vermeidungsstrategien, die dazu beitragen sollen, Schadstoffe im Abgas gar nicht erst entstehen zu lassen.

Kraftfahrzeugkatalysatoren mit katalytisch wirkenden Metall-Nanopartikeln sind bereits seit Jahrzehnten (serienmä-

ßig erstmals 1975 in den USA, in Europa ab 1986 [MARTENSET AL., 2010]) in Fahrzeugen eingebaut (3-Wege-Kat). Ein Kraftfahrzeugkatalysator besteht aus einem temperaturstabilen Wabenkörper, meist aus Keramik oder Metall, auf dem sich die katalytisch aktiven Edelmetalle Platin, Rhodium und Palladium in nanopartikulärer Form befinden (Abbildung 10). Der Katalysator bewirkt die Oxidation bzw. Reduktion von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Stickoxiden zu ungiftigem Kohlenstoffdioxid, Wasser und Stickstoff. Bei optimalen Betriebsbedingungen, die eine aufwändige Motor-Regelungstechnik erfordern, können Konvertierungsraten von bis zu 100 % erreicht werden [WIKIPEDIA (I), 2010].

Mit dem Abgasstrom verlassen auch Katalysator-Partikel den Katalysator und gelangen in die Umwelt. Als Alternative zu den relativ teuren und ökologisch nicht unbedenklichen Edelmetallen sollen zukünftig verstärkt Oxide wie Zirkonoxid, Ceroxid oder Aluminiumoxid in nanopartikulärer Form in Katalysatoren eingesetzt werden. Zudem wird daran gearbeitet, den keramischen oder metallenen Wabenkörper durch Schäume zur Erhöhung der wirksamen Oberfläche und damit zur Effizienzsteigerung zu ersetzen [ELSNER ET AL., 2009]. Ein weiteres Problem ist, dass der Katalysator erst bei hohen Betriebstemperaturen wirksam wird. Während der Kaltlaufphase eines Motors werden daher nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe mit dem Abgasstrom freigesetzt. Hier wird versucht, die unverbrannten Kohlenwasserstoffe durch vor dem Katalysator angeordnete und aus nanoporösen Materialien (z. B. Zeolithe) bestehende Adsorbereinheiten zu entfernen, bevor sie in den Katalysator gelangen. Sobald das System seine Betriebstemperatur erreicht, werden die Kohlenwasserstoffe wieder abgegeben und im nachfolgenden Katalysator abgebaut



Abbildung 10: Aufgeschnittener Katalysator; deutlich zu erkennen ist die Wabenstruktur [WIKIPEDIA (I), 2010]

[ELSNER ET AL., 2009]. Nanoporöse Partikelfilter werden bei Dieselmotoren eingesetzt, um die beim Verbrennungsvorgang von Diesel entstehenden Rußpartikel aus dem Abgasstrom zu entfernen.

**Nano-Titandioxid (TiO<sub>2</sub>)** wird u. a. in der Luftreinigung zum photokatalytisch induzierten Abbau von Schadstoffmolekülen verwendet. Es findet zunehmend Verwendung in Baustoffen und wird in Zement oder Pflastersteinen, Fassadenelementen und -farben sowie Kacheln eingesetzt. So entstehen Oberflächen, die in innerstädtischen Bereichen zur Verbesserung der Luftqualität beitragen können. Die Stadt Fulda beispielsweise verlegt mit nanoskaligem Titandioxid versehene Pflastersteine, um so die Stickoxidkonzentration in der Luft an hoch belasteten Plätzen zu reduzieren [FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT, 2010]. In Fassaden eingesetzt lassen sich mit nanoskaligem Titandioxid selbstreinigende Oberflächen realisieren. Schmutzpartikel werden photokatalytisch zersetzt und mit dem nächsten Regen von den Oberflächen abgespült (Lotus-Effekt). In Innenraumfarben kann Titandioxid zur Verbesserung der Raumluft beitragen. Aufgrund seiner ebenfalls gegebenen bioziden Wirkung [ELSNER ET AL., 2009] wird der Einsatz von mit Titandioxid dotierten Anstrichen und Kacheln im medizinischen Bereich untersucht. Tests zeigten, dass durch mit nanoskaligem Titandioxid beschichtete Kacheln 99,9 % der untersuchten (penicillinresistenten) Bakterienstämme abgetötet werden können [BACHMANN ET AL., 2007].

**Nanoporöse Membranen** werden ähnlich wie in der Wasseraufbereitung zur Abtrennung schädlicher Gase und Stäube aus der Luft verwendet. Sie bestehen z. B. aus Zellulose-Nanofasern, Nanofaser-Netzen, polymeren Nanofasern und nanoporösen Zeolithen und Keramiken, Aerogelen und weiteren Materialien [BACHMANN ET AL., 2007].

### 3.3 BEREICH BODEN

Böden sind als Teil von Ökosystemen von grundlegender Bedeutung für das Leben auf der Erde. Als Standort und Substrat für Pflanzen sind sie von außerordentlicher Wichtigkeit für die Landwirtschaft und die Nahrungsmittelproduktion. Sie fungieren als Nährstoff- und Wasserspeicher. Als Schadstofffilter bewirken sie außerdem die Reinigung

von Niederschlägen während der Versickerung ins Grundwasser (Trinkwasserreservoir). Böden leisten zudem als Kohlenstoffspeicher einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung des Klimaschadstoffs Kohlendioxid. Sie dienen darüber hinaus als Standorte für Siedlungen, Verkehrsflächen, industrielle Produktionsflächen und Erholungsgebiete. Nicht zuletzt ist Boden eine Rohstoffquelle für Steine und Baustoffe, Energieträger und Metalle. Da ihre Entwicklung häufig über einen Zeitraum von mehreren 1000 Jahren erfolgt, gelten Böden als nicht erneuerbare Ressource. Böden sind vielfachen Beeinträchtigungen ihrer Funktionen ausgesetzt, u. a. durch Bodendegradation bzw. -zerstörung aufgrund von intensiver landwirtschaftlicher Nutzung [UBA, 2010; BACHMANN ET AL., 2007], durch Altlasten und durch Bodenversiegelung.

**Nanotechnologische Entwicklungen in der Landwirtschaft** wirken darauf hin, Pestizide und Düngemittel gezielter und bedarfsgerechter auszubringen (Smart Delivery Systems) und dadurch den Verbrauch und infolgedessen die Belastung des Bodens zu reduzieren. Durch Kopplung bzw. Kapselung der Wirkstoffe an/in Nanomaterialien können die Wirkstoffe nach der Ausbringung hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien freigesetzt werden, wie z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Wert oder die gleichmäßige Abgabe des Wirkstoffs über einen längeren Zeitraum. Denkbar ist auch eine gezielte, zeitlich zur Ausbringung versetzte, technische Freisetzung des Wirkstoffs durch Ultraschall oder Magnetfelder [BACHMANN ET AL., 2007]. Zu bedenken ist, dass das Verhalten von Nanopartikeln im landwirtschaftlichen Einsatz und deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt bislang kaum untersucht wurden.

Nanoskalige Bodenmaterialien mit hoher Wasserspeicherkapazität sollen zur Verbesserung der Bodenstruktur und des Wasserhaltevermögens von Böden beitragen. Dadurch werden Wasserverluste in der landwirtschaftlichen Bewässerung und eine Versalzung der Böden durch Wasserverdunstung reduziert. Entsprechende Bodenmaterialien werden auch als „Superabsorber“ bezeichnet und können insbesondere in trockenen Gebieten und bei sandigen Böden zu einer Verbesserung der Bodenfeuchte beitragen und auf diese Weise eine landwirtschaftliche Nutzung der Böden erst ermöglichen. Ein solcher Superabsorber wurde von einem deutschen Unternehmen aus nanoskaligen Sili-

katen und Gesteinsmehl entwickelt [BACHMANN ET AL., 2007] und in ersten Projekten in Saudi-Arabien, Ägypten sowie Tunesien eingesetzt.

Nanoskalige Eisen-, Eisenoxid- oder Titanoxid-Partikel sowie Nanofiltrationsverfahren werden zur Reinigung kontaminierter Böden häufig zusammen mit analogen Verfahren zur Grundwassersanierung eingesetzt (vgl. Kapitel 3.1).

Zur Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit im Straßen- und Wegebau werden erste nanobasierte Produkte mit einem optimierten Wasserrückhalte- und Drainagevermögen eingesetzt. Laut Herstellerangaben besteht das Produkt aus einem nanoskaligem Polymeradditiv und wird zum Bau hoch wasserdurchlässiger und wasseraufnahmefähiger Tragschichten und Oberflächenbefestigungen verwendet. Das Material erhöht die Versickerung von Niederschlagswasser auf versiegelten Flächen. Zudem können herkömmliche Entwässerungsmaßnahmen von Flächen (Drainage) geringer dimensioniert werden. Solche Materialien sind vorwiegend zum Bau von Parkplätzen, Außenanlagen, Geh- und Radwegen, untergeordneter Verkehrsflächen mit geringem Verkehrsaufkommen (z. B. Forst- und Wirtschaftswege) sowie von Flächen im Garten- und Landschaftsbau geeignet [BACHMANN ET AL., 2007].

### 3.4 BEREICH ENERGIE/KLIMA

Die Deckung des Energiebedarfs der Menschheit ist insbesondere vor dem Hintergrund der begrenzten Vorkommen fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) sowie des Klimawandels eine der zentralen Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft für Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Durch die Zunahme der Weltbevölkerung, die weitere wirtschaftliche Entwicklung in den Entwicklungsländern und den hohen Energieverbrauch in den Industrienationen wird der globale Energiebedarf voraussichtlich steigen. Eine Entkoppelung des wirtschaftlichen Wachstums vom Energieverbrauch, wie sie ansatzweise in einzelnen Industrieländern beobachtet werden kann, ist global gesehen noch nicht eingetreten.

Daher ist eine Reduzierung des Energieverbrauchs und die Optimierung bestehender sowie die Entwicklung neuer Technologien zur Energieerzeugung anzustreben. Ein

Schwerpunkt sollte dabei die Steigerung der Energieeffizienz bilden, sowohl bei der Erzeugung und Verteilung als auch beim Verbrauch. Energie, die nicht verbraucht wird, muss auch nicht erzeugt werden. Insbesondere die erneuerbaren Energien als umweltfreundliche Technik zur Energieerzeugung bieten ein hohes Potenzial für nanotechnologische Entwicklungen. Allerdings werden Nanomaterialien bei energietechnischen Verfahren und Anwendungen in der Praxis bislang noch nicht in der Breite eingesetzt.

**Windkraftanlagen** weisen zunehmend größere Aggregate (Generatoren) und Dimensionen (z. B. Rotorblätter) auf. Verstärkte Bedeutung erhält auch die Installation von Windkraftanlagen in den Offshore-Windparks. Die Windkraftanlagen im ersten deutschen Hochsee-Windpark Alpha Ventus in der Nordsee besitzen z. B. jeweils 5 MW installierte Leistung, ihre Rotoren haben einen Durchmesser von bis zu 126 m. Dies führt zu zunehmenden Anforderungen an die verwendeten Materialien und Bauteile hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit, korrosionsbeständigen Verschleißfestigkeit und Wartungsarmut, insbesondere im marinen Umfeld (Salzwasser, Wetterverhältnisse). Durch die Verwendung von Polymerkompositen z. B. aus CNT können leichtere und widerstandsfähigere Rotorblätter hergestellt werden. Nanokomposite mit oxidischer Matrix verbessern die Korrosionsbeständigkeit und erhöhen die Verschleißfestigkeit von Schutzschichten [ELSNER ET AL., 2009]. In nanoskaligen Strukturen biomimetisch nachgeahmte Effekte können zukünftig dazu beitragen, die Entstehung von Luftwirbeln an Rotorblättern zu verringern und damit den Geräuschpegel von Windkraftanlagen zu reduzieren [BMBF, 2009].

Eine Steigerung der Effizienz von **Leuchtmitteln** trägt wesentlich zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs bei. Herkömmliche Glühlampen wandeln lediglich 5 - 10 % des eingesetzten Stromes in Licht um, der Rest wird als Wärme an die Umgebung abgegeben. Energiesparlampen (Kompaktleuchtstofflampen) hingegen weisen einen erheblich höheren Wirkungsgrad auf. Ökologisch problematisch ist allerdings ihr technisch notwendiger Gehalt an Quecksilber, der die vom herkömmlichen häuslichen Abfall getrennte Sammlung und Entsorgung als Sonderabfall notwendig macht.

**Leuchtdioden** (Light Emitting Diode, LED) sind elektronische Halbleiter-Systeme, welche bei Stromdurchfluss Licht in einer von Halbleitermaterial und Dotierung abhängigen Wellenlänge ausstrahlen. LED zeigen gegenüber herkömmlichen Leuchtmitteln (Glühlampen, Energiesparlampen) einen sehr hohen Wirkungsgrad, sind äußerst zuverlässig und langlebig, unempfindlich gegenüber Erschütterungen und in verschiedenen Farben erhältlich (Abbildung 11). LED sind nur mit Nanomaterialien realisierbar. Beispielsweise wird nanoskaliges Galliumarsenidphosphid (GaP), Aluminiumindiumgalliumphosphid (AlInGaP) oder Indiumgalliumnitrid (InGaN) als Halbleitermaterial in LED eingesetzt. Weiterentwicklungen der LED in den Bereichen Farbe, Helligkeit, Effizienz und Produktionskosten erschließen weitere Einsatzbereiche und können zur Substitution herkömmlicher weniger effizienter Leuchtmittel beitragen [BACHMAN ET AL., 2007].

**Organische Leuchtdioden** (Organic Light Emitting Diode, OLED) sind im Aufbau den LED sehr ähnlich, verwenden jedoch ein organisches Halbleitermaterial. Sie werden für großflächige Beleuchtung und Bildschirme entwickelt. OLED können als dünne flexible Filme auf ein Trägerma-

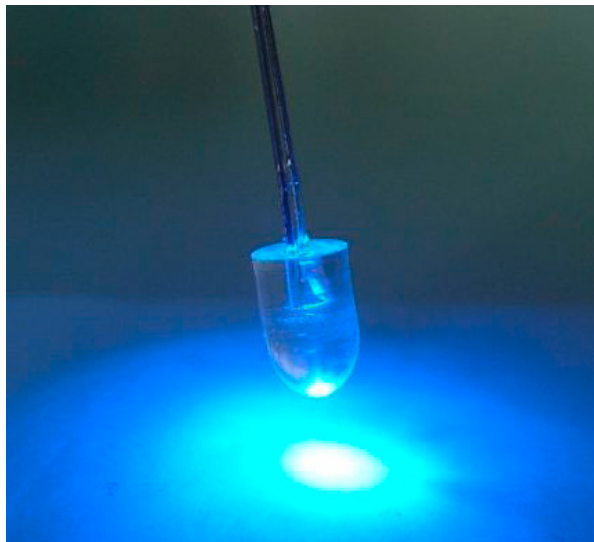


Abbildung 11: LED (Quelle: Hochschule Harz)

terial gedruckt werden (elektronisches Papier). Nanotechnologische Verfahren können dazu beitragen, die Filmdicke von OLED auf unter 100 nm zu reduzieren [BACHMAN ET AL., 2007]. Als transparente und dünne Beschichtungen auf Wände oder Fenster aufgebracht, sind mit OLED großflächige Beleuchtungen denkbar. Zudem bieten sie die

Möglichkeit, Bildschirme an jeglicher Stelle zu platzieren oder als aufrollbare Displays zu konzipieren. Im Vergleich zu herkömmlichen LCD-Bildschirmen (Liquid Crystal Display, Flüssigkristallbildschirm) benötigen sie wesentlich weniger Energie. Von Nachteil ist zurzeit noch ihre relativ geringe Lebensdauer, die bislang eine breitere Einführung in die Praxis verhindert [ELSNER ET AL., 2009].

**Katalysatoren** können allgemein chemische Reaktionen ermöglichen, beschleunigen bzw. die zur Reaktion notwendige Energie oder die erforderliche Reaktionstemperatur verringern. Nanoskalige Katalysatoren eröffnen aufgrund ihrer erhöhten Reaktivität neue Einsatzmöglichkeiten. Hierdurch lassen sich viele Herstellungsprozesse in der chemischen Industrie energieeffizienter gestalten.

In **Verbrennungsmotoren** sind Effizienzverluste durch Reibung beweglicher Bauteile (Kolben, Lager, Ventilsteuerung, Nebenaggregate) für einen verringerten Wirkungsgrad des Motors und damit für einen höheren Kraftstoffverbrauch verantwortlich. Hierbei entfallen ca. 30 % der Reibungsverluste auf das System Kolben/Zylinderlaufbahn [JÜLICH, 2010]. Eine Verminderung der Reibung in diesem Bereich geht folglich mit einem höheren Wirkungsgrad des Motors einher. Ziel eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts ist es, die bisher verwendeten Grauguss-Zylinderlaufbuchsen durch eine nanokristalline Beschichtung zu ersetzen, die wesentlich verbesserte Reibungseigenschaften aufweist. Hierfür werden keramische nanokristalline Materialien wie z. B. Carbide oder Boride, als erfolgversprechend angesehen, die zudem auch eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit aufweisen [ELSNER ET AL., 2009]. Eine Reduzierung des Kraft- und Schmierstoffverbrauchs wäre die Folge. Mit einer serienmäßigen Nutzung dieser Beschichtungstechnologie wird ab Mitte 2010 gerechnet [Jülich, 2010]. Nanokatalysatoren können zukünftig als Bestandteil von Kraftstoffen (z. B. Aluminium-Nanopartikel, Ceroxide) zu einer Optimierung von Verbrennungsprozessen in Motoren und damit ebenfalls zu einer Kraftstoffersparnis und zu einer Reduzierung von Schadstoffemissionen beitragen. Die Nanokatalysatoren verbrauchen sich allerdings während des Verbrennungsprozesses nicht und gelangen mit dem Abgas in die Umwelt. Zu den Wirkungen in der Umwelt ist bislang wenig bekannt.



**Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS)** ist ein Versuch, die CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen (Erdöl, Kohle, Erdgas) zu reduzieren, indem das bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> aus dem Abgas entfernt und in unterirdischen Lagerstätten (z. B. Schichten mit hoher Porosität) dauerhaft gespeichert wird. Neben dem Transport und der Verfügbarkeit entsprechender Speicherformationen im Untergrund (Volumen, Gewährleistung der Dichtheit über lange Zeiträume) verursacht die Filtertechnik selbst zurzeit noch Probleme. Abgasreinigungssysteme reduzieren die Effizienz von Kraftwerken und können daher zu einem höheren Verbrauch fossiler Kraftstoffe führen. Schätzungen gehen davon aus, dass durch den Einsatz bislang verfügbarer CCS-Abgasreinigungssysteme die Wirkungsgradsteigerung in der Kraftwerkstechnik der letzten 50 Jahre aufgehoben wird [RADKIN ET AL., 2006]. Leistungsfähigere nanostrukturierte Filtermembranen sollen zukünftig die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus dem Abgas ermöglichen, ohne eine gravierende Reduzierung der Effizienz zu verursachen. Katalysatoren auf den Filtermembranen lassen das CO<sub>2</sub> in Gegenwart von Wasser zu Hydrogencarbonat reagieren, welches anschließend leicht zu entfernen ist [LUTHER (I), 2008].

Die thermische Isolierung von Gebäuden ist eine effiziente Maßnahme, den Energieverbrauch von Gebäuden und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu senken. Insbesondere Altbauten weisen hier ein hohes Nachrüstpotenzial auf. Es wird geschätzt, dass bei ca. 80 % der Altbauwerke in Deutschland der Heizwärmebedarf etwa doppelt so hoch ist, wie er für Neubauten zulässig wäre [ELSNER ET AL., 2009]. Da häufig verwendete Baumaterialien wie Beton oder Stahl relativ gute Wärmeleiter sind, werden sie mit Dämmstoffen zur Reduzierung der Wärmeleitung versehen. Als Dämmstoffe eignen sich vorwiegend hochporöse Materialien. Die in den Poren enthaltene, unbewegte Luft bewirkt eine verringerte Wärmeleitfähigkeit des Materials. Polystyrol oder Mineralwolle (Steinwolle, Glaswolle) sind neben pflanzlichen Produkten wie Hanf oder Flachs Beispiele für konventionelle Dämmstoffe. Neuere Entwicklungen von Dämmstoffen zielen darauf ab, durch verbesserte Isolationseigenschaften geringere Materialstärken verwenden zu können. Dies bietet aufgrund des verminderten Materialeinsatzes Vorteile sowohl bei Neubauten als auch bei der nachträglichen Isolierung von Altbauten, bei denen häufig

eine Isolierung mit herkömmlichen Dämmstoffen in der energetisch erforderlichen Schichtdicke technisch nicht realisierbar ist. So genannte nanoporöse Aerogele weisen eine extrem hohe Porosität im nanoskaligen Bereich auf. Sie werden aus Siliziumdioxid-Polymeren im Sol-Gel-Verfahren hergestellt. Im Gel sind die Poren des Polymergerüsts flüssigkeitsgefüllt. Durch überkritische Trocknung wird die Flüssigkeit aus dem Polymergerüst ausgetrieben. Das Material besteht nach dem Trocknungsprozess zu 99 % aus Porenvolumen, ist sehr leicht und weist eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit auf als herkömmliche Dämmstoffe (Abbildung 12). Wegen vergleichsweise hoher Herstellungskosten haben sich Aerogele bislang nicht flächendeckend durchsetzen können, dennoch wurden erste Projekte in der Gebäudeisolierung mit Aerogelen durchgeführt, z. B. durch Injektion von Aerogel-Granulat in Hohlräume von Fassaden [LUTHER (I), 2008; LUTHER (II), 2008].

**Solare Photovoltaik** ist die direkte Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrischen Strom. Die hierfür verwendeten Aggregate sind Solarzellen. Wichtige Kriterien für eine Steigerung des Anteils der Photovoltaik an der Energieerzeugung sind die Kostenreduktion bei der Herstellung der Solarzellen und die Verbesserung ihrer Wirkungsgrade. Entscheidende Fortschritte bei der Weiterentwicklung der verschiedenen Solarzellentypen werden durch den Einsatz nanotechnologischer Verfahren erwartet, insbesondere bei der Herstellung von Farbstoff- und organischen Polymersolarzellen. Diese befinden sich allerdings bislang noch in einem allenfalls anwendungsnahen Forschungsstadium.

Für Halbleiter-Solarzellen wird hochreines kristallines Silizium verwendet, dessen Verarbeitung sehr kosten- und energieintensiv ist. Monokristalline Silizium-Solarzellen, bei de-

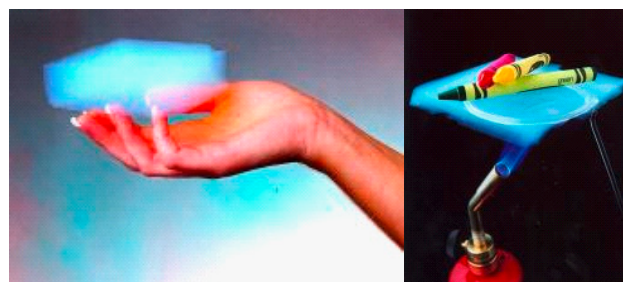


Abbildung 12: Aerogelblock (links) und als Wärmeisolator (rechts): Die Wachsmalstifte schmelzen trotz Gasflamme nicht. [NASA, 2010]

nen ein Einkristall aus einer Siliziumschmelze gezogen und in hauchdünne Scheiben geschnitten wird, haben zwar einen relativ hohen Wirkungsgrad von ca. 25 %, sind aber in der Herstellung sehr teuer. Polykristalline Siliziumsolarmodule können kostengünstiger hergestellt werden, weisen jedoch aufgrund von Kristallisationsdefekten beim Erstarren der Siliziumschmelze einen geringeren Wirkungsgrad auf (ca. 14 %) [BACHMANN ET AL., 2007]. Nanotechnologische Ansätze zur Verbesserung von Silizium basierten Solarzellen beschäftigen sich z. B. mit dem Einsatz von Quantenpunkten. Die Bandlücke und in der Folge die Absorptionswellenlänge hängen von der Nanokristallgröße ab. Wird deren Größe variiert, erschließt sich ein breiteres Wellenspektrum zur photovoltaischen Nutzung. Außerdem können beim so genannten „Hot Carrier“-Effekt mehrere Elektronen-Loch-Paare pro Photon und somit zusätzliche Ladungsträger erzeugt werden, was den Wirkungsgrad der Solarzelle erhöht. Der Einsatz von Silizium-Quantenpunkten befindet sich allerdings noch im Stadium der Grundlagenforschung [ELSNER ET AL., 2009].

Die **Brennstoffzelle** ist eine Möglichkeit, Wasserstoff zur Energieerzeugung zu nutzen. Konventionelle Wärmekraftmaschinen erzeugen Strom, indem ein Brennstoff verbrannt wird und die freiwerdende Energie zur Erzeugung heißen Gases verwendet wird, welches wiederum einen Stromgenerator antreibt. Brennstoffzellen hingegen erzeugen Energie durch die direkte Umwandlung von in einem Brennstoff gespeicherter Energie in elektrischen Strom. Eine

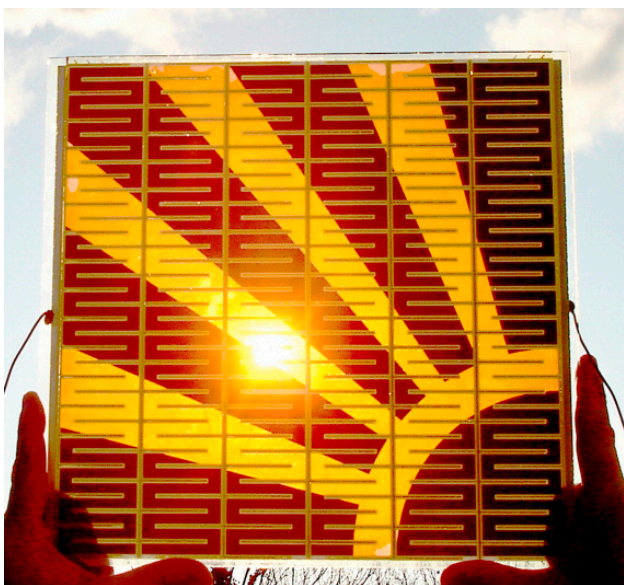


Abbildung 13: Farbstoff-Solarzelle (Quelle: Fraunhofer Institut für solare Energieforschung)

Brennstoffzelle besteht vereinfacht aus Elektroden, die durch eine Membran und einen Elektrolyten getrennt sind und von den Reaktionsstoffen umspült werden. Der Wasserstoff wird in der Brennstoffzelle katalytisch mit Sauerstoff zu Wasser oxidiert, wobei ein elektrischer Strom fließt. Eine Brennstoffzelle ist folglich kein Energiespeicher sondern ein Energiewandler. Der Vorteil von Brennstoffzellen liegt in ihrem relativ hohen Wirkungsgrad sowie bei Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff in der schadstoffemissionsfreien Energieerzeugung. Neben Wasserstoff können Brennstoffzellen aber auch mit anderen Energieträgern wie Methan, Erdgas, Biogas oder Methanol betrieben werden, aus denen der Wasserstoff durch eine vorgeschaltete Reformation (bei Methanol direkt in der Brennstoffzelle) gewonnen wird [BACHMANN ET AL., 2007].

Zur Fortentwicklung von Brennstoffzellen können Nanomaterialien an verschiedenen Punkten beitragen. Die Produktions- und Materialkosten der wesentlichen Elemente (Elektroden, Elektrolyt, Membran, Katalysator) einer Brennstoffzelle sind zurzeit noch sehr hoch - so wird z. B. das teure Edelmetall Platin als Katalysator eingesetzt. Nanomaterialien wie CNT an Elektroden können zu einem vergrößerten Oberflächen-Volumen-Verhältnis führen, sodass sich die katalytische Wirkung des Platins erhöhen lässt, was in einem reduzierten Platinbedarf resultiert [LUTHER (II), 2008]. Daneben können nanoskalige hydrophile anorganische Materialien die Ionenleitfähigkeit der Membran verbessern. Polymer-Nanokomposite sollen zu einer verbesserten Trennung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser in der Protonen-Austauscher-Membran führen. Weitere Entwicklungen beschäftigen sich mit verbesserten Verfahren der Wasserstoffherstellung z. B. bei der Reformierung von Methanol in Brennstoffzellen durch mit Nanopartikeln dotierte Polymermembranen. Auch die photokatalytische Zersetzung von Wasser durch Nanokatalysatoren (Mischung aus Rhodium- und Chromoxiden) wird weiterentwickelt.

Die Brennstoffzelle an sich besitzt einen hohen technischen Entwicklungsstand. Ihre Einführung in die Praxis wird aber erschwert durch Probleme bei der Wasserstoffspeicherung sowie die bislang nicht gelöste Frage nach einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Art der Erzeugung des Wasserstoffs. Wasserstoff besitzt zwar einen

## Wasserstoff

Molekularer Wasserstoff ( $H_2$ ) besitzt einen hohen Energieinhalt und verbrennt mit Sauerstoff zu Wasser (Oxidation). Als Wasser ist er in quasi unbegrenztem Umfang verfügbar. Er bietet sich daher als klimafreundlicher Energiespeicher an. Da Wasserstoff in der Natur nur in gebundener Form vorliegt, muss er für den Einsatz in der Brennstoffzelle in einem energieintensiven Prozess erzeugt werden, der zudem wie jeder Energieumwandlungsprozess mit Verlusten behaftet ist. Die Klimabilanz einer Brennstoffzelle hängt folglich entscheidend davon ab, wie der Wasserstoff erzeugt wird. Die Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern (Kohle, Erdgas, Schweröl) führt zu keiner  $CO_2$ -Einsparung gegenüber ihrer direkten Verbrennung. Wasserstoff wird industriell zurzeit überwiegend durch Reformation von Erdgas produziert. Die Produktion von Wasserstoff durch Vergasung von Biomasse oder direkt durch Algen befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Die naheliegende, jedoch energieintensive Elektrolyse von Wasser zur Wasserstoffherzeugung wirkt sich nur dann  $CO_2$ -mindernd aus, wenn der zur Elektrolyse benötigte Strom umweltfreundlich - im Idealfall regenerativ - erzeugt wurde. Die Effizienz von Edelmetallkatalysatoren auf der Elektrodenoberfläche bei der Wasserstoff-Elektrolyse kann durch Nanostrukturierung ebenfalls gesteigert werden [LUTHER (II), 2008].

hohen Energieinhalt bezogen auf sein Gewicht (Energiedichte), die Energiedichte je Volumen ist jedoch vergleichsweise gering. Da molekularer Wasserstoff unter Normalbedingungen gasförmig vorliegt, muss er entweder gasförmig unter hohem Druck oder flüssig bei niedrigen Temperaturen gelagert werden, um ein praktikables Speichervolumen zu erzielen. Beides erfordert aufwändige technische Lösungen (Hochdruckfestigkeit der Tanks, Abdichtung der Tanks gegenüber dem Austritt des hochflüchtigen flüssigen Wasserstoffs), die insbesondere im mobilen Bereich bislang nicht befriedigend umgesetzt werden konnten. Zur Wasserstoffspeicherung speziell für den mobilen Einsatz werden Metallhydride als Feststoffspeicher erforscht, die zwar eine hohe volumenbezogene Speicherdichte aufweisen [ELSNER ET AL., 2009], jedoch relativ teuer und schwer sind [BACHMANN ET AL., 2007]. Bei Einsatz von z. B. nanokristallinen Metallhydrid-Legierungen reduziert sich die erforderliche Zeit zur Be- bzw. Entladung des Speichers mit Wasserstoff von mehreren Stunden auf wenige Minuten [ELSNER ET AL., 2009].

Die Stromspeicherung in effizienten Systemen mit hoher Energie- und Leistungsdichte ist bei der Elektromobilität von besonderer Bedeutung. Auch hier ist grundsätzlich entscheidend, ob der Strom - analog zum Wasserstoff bei der Brennstoffzelle - ökonomisch und ökologisch vertretbar zu produzieren ist. Zudem müssen die Speichermedien eine schnelle Leistungsaufnahme und Leistungsabgabe aufweisen sowie eine hohe Reichweite des Fahrzeugs ermöglichen. Als Speicher für elektrischen Strom kommen wieder

aufladbare Batterien (Akkumulatoren) und Superkondensatoren (elektrochemische Doppelschicht-Kondensatoren) in Frage. Lithium-Ionen-Batterien besitzen aufgrund ihrer hohen Zellspannung und hohen Leistungsdichte großes Potenzial als Energiespeicher in der Elektromobilität. Superkondensatoren kommen dort zum Einsatz, wo kurzzeitig große Energiemengen aufgenommen oder abgegeben werden müssen [ELSNER ET AL., 2009]. CNT oder nanokristalline Komposit-Materialien werden als Ersatz für Graphit- oder Graphit-Lithium-Elektroden erforscht. Sie können die aktive Oberfläche der Elektroden von Batterien und Superkondensatoren erhöhen und zu erheblich höheren Lade- und Entladekapazitäten führen. Zudem weisen sie eine höhere Lebensdauer und Robustheit auf und können häufiger ge- bzw. entladen werden. Es wird geschätzt, dass durch die Verwendung von CNT als Elektrodenmaterial die Speicherkapazität um 30 % gesteigert werden kann [BACHMANN ET AL., 2007]. Der Ersatz des zumeist flüssigen Elektrolyten durch feste Polymer-Nanoschichten oder durch Elektrolyte aus Metall-Keramik-Nanokomposit-Schichten kann zukünftig die Auslaufsicherheit und damit die Sicherheit und Lebensdauer des Speichermediums erhöhen [ELSNER ET AL., 2009].

### 3.5 BEREICH RESSOURCEN- UND MATERIALEFFIZIENZ

Bedingt durch die zukünftig weiterhin zunehmende Weltbevölkerung wird die Nachfrage nach Verbrauchs- und Konsumgütern und in der Folge der bereits gegenwärtig

hohe Bedarf an Rohstoffen und Energie steigen. Zumindest für einige Rohstoffe ist mit einer Verknappung zu rechnen. Dies kann zu erheblich schwankenden und tendenziell steigenden Rohstoffpreisen führen. Ein geringerer Ressourcenverbrauch ist nicht nur aus ökologischen, sondern auch aus ökonomischen Gründen anzustreben. Ein Ansatz hierzu ist die Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz entlang der gesamten Lebenszykluskette eines Produktes: die Produktentwicklung, die Produktion, die Nutzung und schließlich die möglichst weitgehende Rückführung der Rohstoffe in den Produktionskreislauf (Recycling) bzw. die Entsorgung. Bereits bei der Produktentwicklung sollte beispielsweise untersucht werden, ob die Funktion des Produktes durch ein neues Design oder neue Werkstoffe mit weniger Ressourceneinsatz erfüllt werden kann, sowie die spätere Recyclingfähigkeit des Produktes berücksichtigt werden. Produkte mit einer hohen Nutzungsdauer können wesentlich zu einer Schonung der Ressourcen beitragen [ROHN ET AL., 2010].

Nanotechnologien und -materialien eröffnen vielfältige Innovationspotenziale zur ressourcen- und materialeffizienteren Gestaltung von Produkten und Produktionsprozessen, z. B. bei **Oberflächenbeschichtungen**.

Der Korrosionsschutz ist entscheidend für die Sicherheit und Lebensdauer metallener Werkstücke und Produkte. Für eine Wert erhaltende Metalllackierung muss das Werkstück durch die Beschichtung mit einer Konversionsschicht vorbehandelt werden, die eine dauerhafte Verbindung zwischen der Metalloberfläche und dem Lack ermöglicht. Herkömmliche Prozesse zur Ausbildung der Konversionsschicht wie Eisen- und Zinkphosphatierung sind aufgrund der hohen Schwermetallgehalte ökologisch bedenklich und energieintensiv. Nanokeramische Beschichtungen aus titan- und zirkonhaltigen Metalloxiden ohne toxische Schwermetalle stellen neue Verfahren zum Korrosionsschutz und zur Vorbehandlung der Werkstücke für eine Lackierung dar, die bei geringeren Schichtdicken hohe Einsparpotenziale beim Material- und Energieverbrauch aufweisen [PASTEWSKI ET AL., 2009].

Pulverlackierungen sind in vielen Bereichen eine Alternative zu herkömmlichen, lösemittelhaltigen Lacken und in industriellen Produktionsprozessen seit langem etabliert.

Als einziges Beschichtungssystem kommen sie ohne den Einsatz von Lösemitteln aus. Zur Anhaftung der elektrostatisk geladenen Pulverlackpartikel an die Oberfläche muss das Werkstück elektrisch leitend sein. Elektrisch leitende Nanomaterialien zur Oberflächenbeschichtung nicht leitender Werkstücke können zukünftig die Einsatzmöglichkeiten einer Pulverlackierung erweitern und so den Lösemittelverbrauch reduzieren [ETAG, 2006; PASTEWSKI ET AL., 2009].

Kratzfeste Beschichtungen tragen zu einer ästhetischen Werterhaltung und damit längeren Nutzungsdauer eines Produktes bei. Erste Anwendungen von organisch modifizierten Nano-Keramiken in Lacken finden sich bereits in der Automobilindustrie [BACHMANN ET AL., 2007]. Insbesondere bei Kunststoffteilen kommen nanotechnologische Kratzfestbeschichtungen, z. B. anorganisch-organische Hybridpolymere oder pyrogene Kieselsäure, vermehrt zum Einsatz. Durch die erhöhte Kratzfestigkeit eröffnen sich Kunststoffen gerade im Automobilbau neue Einsatzmöglichkeiten (z. B. Windschutzscheiben aus Polycarbonat), die zu einer Gewichtsreduktion und damit Energieeinsparung führen können [HEUBACH ET AL., 2008].

**Schaltbare Klebstoffe** mit magnetischen Nano-Eisenoxid-Kernen (Nano-Ferrite) können zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs bei industriellen Klebprozessen beitragen. Als Verbindung zwischen Werkstücken werden häufig Industrieklebstoffe verwendet, welche durch Erhitzung der Werkstücke aushärten. Die Nano-Ferrite in Klebstoffen werden durch ein Magnetfeld in Schwingung gesetzt und erzeugen die zur Aushärtung benötigte Wärme direkt im Klebstoff. Dadurch kann eine energieintensive Erwärmung des gesamten (temperatursensiblen) Werkstücks vermieden werden. Zudem lässt sich die Klebeverbindung durch das erneute Anlegen eines Magnetfelds wieder lösen, sodass sich die Recyclingfähigkeit des Produkts nach Nutzungsende deutlich erhöht (schaltbares Kleben) [PASTEWSKI ET AL., 2009; BACHMANN ET AL., 2007].

Zur Verlängerung der Standzeiten von Werkzeugen werden **verschleißresistente Hartschichten** (tribologische Schutzschichten) aufgebracht. Hierzu werden bereits Nano-Multischichten und Nano-Verbundschichten aus Nitriden, Carbi-

den und Carbonitriden von Titan, Wolfram, Siliziumdioxid sowie Aluminiumdioxid bei Werkzeugen in der Produktionstechnik (Umform-, Schneid- und Stanzwerkzeuge) oder z. B. für hochbelastete Fräsen im Straßenbau eingesetzt. Zum Beispiel erhält ein Schneidwerkzeug durch eine Beschichtung mit nanokristallinem Diamant eine extrem scharfe und gleichzeitig sehr harte Schneidkante [BMBF, 2009]. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung von verschleißbeständigeren Transportoberflächen in Druckmaschinen im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Nanodruck“. Die Transportoberflächen werden mit einer antiadhäsiven Nano-Mikrostruktur auf Basis von Sol-Gel-Nanopulvern versehen, die die mechanische und chemische Beständigkeit und damit die Standzeiten bei gleichbleibender Qualität des Druckerzeugnisses erhöht, sowie die Entfernung von Farbpartikeln wesentlich erleichtert [BMBF, 2009].

Insbesondere im **Luftfahrzeug- und Automobilbau** ist zukünftig mit einer Substitution herkömmlicher Werkstoffe durch nanooptimierte Materialien zu rechnen. So können Metalle und Legierungen durch die Integration nanoskaliger Phasen höhere Festigkeitswerte bei gleichem Gewicht erreichen. In der Folge können geringer dimensionierte Metallteile verbaut werden, was zu einer Reduzierung des Gesamtgewichts führen kann. An zahlreichen Stellen finden sich im Fahrzeugbau zudem Kunststoffe, die durch nanoskalige Füllstoffe, wie z. B. nanostrukturierte Schichtsilikate, polyedrische Oligosilsesquioxane (POSS) oder CNT, in ihrer Struktur optimiert werden und neben der mechanischen Verstärkung ein niedrigeres Gewicht bieten. Einer breiteren Einführung nanooptimierter Werkstoffe im Fahrzeugbau stehen zurzeit noch die hohen Herstellungskosten und die hohen Anforderungen an eine gleichbleibend hohe Qualität der Werkstoffe entgegen [ELSNER ET AL., 2009].

## 4 Fazit / Ausblick

Die Nanotechnologie bzw. Nanomaterialien gelten als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft mit hohem technischem und wirtschaftlichem Potenzial. Die Verringerung der Teilchengröße in den nanoskaligen Bereich führt zu veränderten physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften. Bekannte und gut erforschte Stoffe verhalten sich als nanoskalige Partikel vollkommen anders als es ihre chemische Natur erwarten ließe. Veränderte chemische Eigenschaften wie eine erhöhte Reaktivität, Stabilität oder elektrische Leitfähigkeit eröffnen neue Anwendungsfelder auch im Bereich Umweltschutz. Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie und trägt in vielen Bereichen zur Verbesserung von Produkten und Verfahren bei. Es wird erwartet, dass sich ganze Technologiefelder durch nanotechnologische Innovationen verändern.

Im Bereich des Umweltschutzes finden sich erste Anwendungen von Nanomaterialien, allerdings sind sie bislang nicht in der breiten Praxis anzutreffen. Konkrete Anwendungen lassen sich vor allem im Bereich der Wasser- und Abwasseraufbereitung finden, wo nanoskalige Filtersysteme bereits seit längerer Zeit bekannt sind und erfolgreich eingesetzt werden. Weiterentwicklungen insbesondere bei dezentralen Aufbereitungssystemen gewinnen vor dem Hintergrund einer problematischen Trinkwasserversorgung der Menschen in Entwicklungsländern an Bedeutung. Hier können Nanotechnologien zu einer entscheidenden Kostenreduzierung und Steigerung der Effizienz bei gleichzeitiger Vereinfachung der Aufbereitungsverfahren führen. Es ist zu erwarten, dass zukünftig auch die bislang energetisch und damit finanziell aufwändige Meerwasserentsalzung durch verbesserte Nanofiltrationssysteme für die Trinkwassergewinnung in großem Maßstab interessant werden könnte. Die Integration von Selbstreinigungseffekten durch eine nanoskalige Funktionalisierung von Oberflächen kann zu einer Reduzierung des Verbrauchs von Wasser und Reinigungsmitteln beitragen.

Im Bereich der effizienteren Gestaltung der Energieerzeugung, -speicherung und -nutzung unter besonderer Berücksichtigung der Fortentwicklung der Erzeugung regene-

rativer Energien finden nanotechnologische Ansätze vielfach Eingang, auch wenn sie sich zum überwiegenden Teil noch im Forschungsstadium befinden. Besonders die photovoltaische Energieerzeugung lässt ein hohes nanotechnologisches Potenzial zur Effizienzsteigerung hinsichtlich der Haltbarkeit, der Energieerzeugung und der Produktionskosten von Photovoltaikanlagen erwarten. Nanotechnologien können die Entwicklung von mobilen Systemen zur Energieerzeugung (Brennstoffzelle) bzw. Speicherung (Batterien) voranbringen, die entscheidend zu einer Umstellung des Individualverkehrs hin zu einer emissionsfreien Elektromobilität führen. Große Entwicklungsmöglichkeiten werden auch in der Verbesserung katalytischer Prozesse durch Nanokatalysatoren gesehen, die zu einer erheblichen Einsparung von Stoffen und Energie beitragen können.

Ob die Nanotechnologie in naher Zukunft entscheidend zur Lösung unserer Umweltprobleme beitragen kann, ist jedoch nicht unumstritten. Umweltverbände [BUND, 2010] sehen weder auf dem Energiesektor noch beim Klima- oder Ressourcenschutz bzw. der Minderung von Schadstoffen bedeutende Lösungsbeiträge; bisherigen Entwicklungen fehle die Marktreife. Im Vergleich zu herkömmlichen Produkten könnten Nanomaterialien, insbesondere unter Berücksichtigung von Energieaufwand und Materialeinsatz bei deren Herstellung, nicht bestehen. Es wird sogar angedeutet, dass Nanoprodukte unsere Umweltprobleme vergrößern könnten.

Wirtschaft und Politik sind gegenteiliger Meinung und sehen in der Nanotechnologie einen Innovationsmotor für den Standort Deutschland [HANS BÖCKLER STIFTUNG, 2010]. Es wird erwartet, dass neue und verbesserte Produkte bei geringerem Materialeinsatz die Wettbewerbsfähigkeit entscheidend erhöhen. Das Marktsegment der Nanomaterialien weist derzeit am Gesamtmarkt die höchste jährliche Wachstumsrate auf.

Nach Meinung der Verfasser können nanotechnologische Entwicklungen im Bereich des Umweltschutzes zu einem weiteren Ausbau der deutschen Marktführerschaft bei Umwelttechnologie-Anwendungen beitragen. Die ökologische

Wertschöpfung einer nanotechnologischen Innovation im Umweltbereich muss jedoch grundsätzlich im Vergleich zu bereits existierenden konventionellen Verfahren bewertet werden. Der konkrete Umweltentlastungseffekt eines Nanomaterials oder einer Nanotechnologie ist aber oftmals nicht genau zu quantifizieren, da die eingesetzten Materialien und Technologien häufig nur eine Komponente von vielen eines Systems darstellen, das in seiner Gesamtheit zu einer Entlastung der Umwelt beitragen kann. Zudem ist häufig die Intention neuer nanotechnologischer Anwendungen mit Umweltentlastungseffekten nicht der Umweltschutz an sich, sondern die Optimierung eines Produkts in funktioneller Hinsicht, die Erschließung neuer Märkte oder die Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen mit entsprechenden finanziellen Vorteilen für das Unternehmen. Erst in zweiter Linie bewirkt der Einsatz von Nanomaterialien hier Umweltentlastungseffekte z. B. durch Material- oder Energieeinsparungen. Die Produktion vieler Nanomaterialien ist darüber hinaus zumindest gegenwärtig oftmals noch sehr energie- und ressourcenintensiv und ihrerseits u. U. mit Umweltbelastungen verbunden. Im Sinne eines möglichst umfassenden Life-Cycle-Assessments sollte daher anwendungsspezifisch der konkrete Nutzen einer nanotechnologischen Innovation im Hinblick auf ihren Umweltentlastungseffekt untersucht werden.

Zudem ist bei vielen zukünftigen Anwendungen von Nanomaterialien im Umweltbereich wie auch in anderen Bereichen nanotechnologischer Anwendungen die Freisetzung von Nanopartikeln in die Umwelt nicht auszuschließen. Über das Umweltverhalten von Nanopartikeln liegen bislang jedoch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Die Wahrnehmung und Akzeptanz des Einsatzes von Nanomaterialien zum Schutz der Umwelt sowie ihr potenzieller Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung hängen aber wesentlich davon ab, ob bei einer Freisetzung neue, bislang nicht bekannte Umweltbelastungen entstehen und wie sich diese auf Ökosysteme und den Menschen auswirken. Hier ist die Politik, die Wirtschaft und die Forschung aufgefordert, die gegenwärtig bestehenden Wissenslücken zum Freisetzungs- und Umweltverhalten von Nanomaterialien zu schließen und zu einer wissenschaftlich fundierten und transparenten Risikobewertung von Nanomaterialien beizutragen. Eine objektive Beurteilung der Risiken von Nanomaterialien muss dabei auch die Option zur Formulierung regulativer Maßnahmen seitens des Gesetzgebers zum Einsatz von Nanomaterialien einschließen. Eine möglichst frühzeitige und intensive Einbeziehung der Öffentlichkeit im Rahmen einer sachlich geführten Risikodiskussion ist daher anzustreben.

# Glossar

**Aerogel:** hochporöser Festkörper mit einem Porenanteil von bis zu über 99 %

**Agglomeration:** Zusammenballung

**biomimetisch:** technische Nachahmung von biologischen Formen, Strukturen oder Effekten

**Biozid:** Stoff, der aufgrund seiner Giftigkeit oder sonstigen chemischen oder biologischen Wirkungen Organismen schädigt oder tötet.

**Bodendegradation:** Herabsetzung der Leistungsfähigkeit eines Bodens hinsichtlich seiner natürlichen und wirtschaftlichen Funktionen

**end of pipe:** engl.: am Ende des Rohres (des Schornsteins)

**endokrine Substanzen:** Hormone oder hormonähnliche Substanzen

**Fouling:** Bewuchs von Oberflächen mit Organismen

**Fulleren:** Der Name „Fulleren“ leitet sich von dem Namen des Architekten Richard Buckminster Fuller ab. Die von ihm entworfenen Kuppeln hatten eine ähnliche Form wie die Nano-Fullerene und werden daher häufig „Bucky-Balls“ genannt.

**hydrophil:** wasseranziehend

**hydrophob:** wasserabweisend

**in situ/ex situ:** an Ort und Stelle/außerhalb des Ursprungsortes

**Katalyse:** Einleitung, Beschleunigung oder Lenkung chemischer Reaktionen. Der Katalysator verbraucht sich bei der Reaktion in der Regel nicht.

**Kontamination:** Verunreinigung, Belastung mit Schadstoffen

**Matrix:** hier: Material in Verbundwerkstoffen, in das andere Bestandteile eingebettet sind.

**Osmose:** gerichteter Fluss gelöster Stoffe durch eine selektiv permeable Membran

**permeabel:** durchlässig

**persistente Substanzen:** Stoffe, die in Kläranlagen oder im Ökosystem nicht oder nur schwer abbaubar sind und sich daher in Gewässern, in Sedimenten sowie in Pflanzen und Tieren anreichern können. Über die Nahrungskette können diese Stoffe auch in den menschlichen Organismus gelangen.

**Photokatalyse:** Katalytische Prozesse unter Einwirkung von Licht

**pump and treat:** Verunreinigtes Grundwasser wird an die Oberfläche gepumpt, gereinigt und wieder in den Untergrund oder in die Kanalisation/den Vorfluter abgeleitet.

**Ressource:** natürliches Rohstoffvorkommen

**Scaling:** Anlagerung von Partikeln

**Sorption:** Anreicherung eines Stoffes innerhalb einer Phase (Absorption) oder auf einer Grenzfläche zwischen zwei Phasen (Adsorption).

**Toxizität:** Giftigkeit einer Substanz

**Tribologie:** Reibungslehre

**Troposphäre:** untere Schicht der Erdatmosphäre bis ca. 15 km Höhe

**Umkehrosmose:** Verfahren zur Aufkonzentrierung von gelösten Stoffen, bei dem mit Druck der natürliche Osmose-Prozess umgekehrt wird.



# Abkürzungsverzeichnis

|                 |   |      |                              |
|-----------------|---|------|------------------------------|
| $\mu\text{m}$   | Mikrometer                                      | LCD  | Liquid Crystal Display       |
| bar             | Maßeinheit für den Druck                        | LED  | Light Emitting Diode         |
| BMBF            | Bundesministerium für Bildung und Forschung     | m    | Meter                        |
| CCS             | Carbon Dioxide Capture and Storage              | mm   | Millimeter                   |
| CKW             | Chlorierte Kohlenwasserstoffe                   | MW   | Megawatt                     |
| CNT             | Carbon Nano Tubes                               | MWNT | Multi Walled Nano Tubes      |
| DLR             | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. | nm   | Nanometer                    |
| h               | Stunde  | OLED | Organic Light Emitting Diode |
| Kat             | Katalysator                                     | PET  | Polyethylenterephthalat      |
| km              | Kilometer                                       | PTFE | Polytetrafluorethylen        |
| km <sup>3</sup> | Kubikkilometer                                  | SWNT | Single Walled Nano Tubes     |
| kt              | Kilotonne (1000 t)                              | UV   | ultraviolett                 |

# Abbildungsverzeichnis

**Abbildung 1:** Entwicklungsstand und Anwendungsfelder der Nanotechnologie (nach [RIEKE, BACHMANN, 2004])

**Abbildung 2:** Nanotechnologische Begriffe [LUBW, 2009]

**Abbildung 3:** C<sub>60</sub>-Fulleren [WIKIPEDIA (II), 2010]

**Abbildung 4:** Verschiedene Typen von CNT [WIKIPEDIA (III), 2010]

**Abbildung 5:** Verteilung der Süßwasserressourcen der Erde (verändert nach [BMU/UBA, 2008])

**Abbildung 6:** Trennbereiche von Membranen - Teilchengrößen und Molekulargewicht für die Mikro-, Ultra- und Nanofiltration und Umkehrosmose (verändert nach [MARTENS ET AL, 2010])

**Abbildung 7:** SOWARLA-Pilotanlage (Quelle: DLR)

**Abbildung 8:** Selbstreinigende Fassade unter Nutzung des Lotus-Effektes [NEES-INSTITUT, 2010]

**Abbildung 9:** Gesamtemissionen ausgewählter Luftschadstoffe [in Kilotonnen, kt] in Deutschland (eigene Abbildung mit Daten aus [UBA, 2010])

**Abbildung 10:** Aufgeschnittener Katalysator; deutlich zu erkennen ist die Wabenstruktur [WIKIPEDIA (I), 2010]

**Abbildung 11:** LED (Quelle: Hochschule Harz)

**Abbildung 12:** Aerogelblock (links) und als Wärmeisolator (rechts): Die Wachsmalstifte schmelzen trotz Gasflamme nicht [NASA, 2010]

**Abbildung 13:** Farbstoff-Solarzelle (Quelle: Fraunhofer Institut für solare Energieforschung)

# Tabellenverzeichnis

**Tabelle 1:** Geänderte Sichtweise beim Übergang zur Nanoskala nach [PASCHEN ET AL, 2004]

**Tabelle 2:** Anwendungsbeispiele zum Einsatz von Nanopartikeln in Produkten (verändert nach [LUBW, 2007])

# Quellenangaben

- BACHMANN, G.; GRIMM, V.; HOFFKNECHT, A.; LUTHER, W.; PLOETZ, C.; REUSCHER, G.; TEICHERT, O.; ZWECK, A.: Nanotechnologie für den Umweltschutz. Hrsg.: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (2007)
- BMBF: „nano.DE-Report 2009“. Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung. Bonn (2009)
- BMBF: „Nano-Initiative - Aktionsplan 2010“. Bundesministerium für Bildung und Forschung. [http://www.bmbf.de/pub/nano\\_initiative\\_aktionsplan\\_2010.pdf](http://www.bmbf.de/pub/nano_initiative_aktionsplan_2010.pdf) (2006)
- BMU/UBA: Grundwasser in Deutschland. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008)
- BUND: BUND und Friends of the Earth: Nano-Technologie liefert keine Patentlösungen für Umweltprobleme; Pressemitteilung (2010)
- ELSNER, N.; HASSE, G.; HOFFKNECHT, A.; KLINK, M.; KRAUSS, O.; PIEPER, S.; POHLE, D.; REINERS, G.; ZWECK, A.: „Meta-Roadmap Nanomaterialien“. Hrsg.: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH. Düsseldorf (2009)
- ETAG (European Technology Assessment Group): The role of Nanotechnology in Chemical Substitution, Scientific Technology Options Assessment (STOA), European Parliament (2006)
- FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT zur Förderung der angewandten Forschung: Online-Pressemitteilung „Saubere Luft durch Pflastersteine“ (August 2010). <http://www.fraunhofer.de/presse/presseinformationen/2010-2011/08/saubere-luft-durch-pflastersteine.jsp>
- HANS BÖCKLER STIFTUNG: Nanotechnologie – Innovationsmotor für den Standort Deutschland (2010)
- HEUBACH, D.; ANGERER, G.: „INANU Innovation durch Nanotechnologie in der Umwelttechnik als Schlüssel zur Nachhaltigkeit“. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS (2007)
- HEUBACH, D.; ANGERER, G.; KÜHNE, C.; SCHRÖDER, A.: Innovation durch Nanotechnologie in der Umwelttechnik - Funktionelle Oberflächen und Farbstoffsolarzellen. Hrsg.: Umweltministerium Baden-Württemberg (2008)
- HUND-RINKE, K.; MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F.; KEMPER, M.: „Beurteilung der Gesamtumweltexposition von Silberionen aus Biozid-Produkten.“ Forschungsbericht 360 04 020. Hrsg.: Umweltbundesamt (2008)
- JÜLICH: Werkstoff-Letter 05/2010. Hrsg.: Projektträger Jülich, Geschäftsbereich Neue Materialien und Chemie (NMT), Jülich. 2010. abgerufen unter [http://www.ptj.de/lw\\_resource/datapool/items/item\\_1604/werkstoffletter-mai-2010.pdf](http://www.ptj.de/lw_resource/datapool/items/item_1604/werkstoffletter-mai-2010.pdf).
- JUNG, CHRISTIAN (2009) Das Projekt SOWARLA - Ziele, Umsetzung, Ergebnisse. Vortrag zur Einweihung der Demonstrationsanlage SOWARLA zur solaren Wasseraufbereitung, 05.11.2009, Lampoldshausen; abgerufen unter [http://elib.dlr.de/60947/1/2009\\_11\\_05\\_Einweihung\\_SOWARLA.pdf](http://elib.dlr.de/60947/1/2009_11_05_Einweihung_SOWARLA.pdf)
- KÖBER, R.; KOPINKE, F.-D.: „Sanieren mit Nanoeisen“. TerraTech 6/2007, S. 17-20
- LANXESS Deutschland GmbH: <http://verantwortung.lanxess.de/de/wasser/lanxess-produkte/produkte-zur-wasseraufbereitung/> und [http://www.bayferrox.de/ipg/de/applications/other/water/arsenic\\_adsorbent/](http://www.bayferrox.de/ipg/de/applications/other/water/arsenic_adsorbent/)
- LIFESAVER: <http://www.lifesaversystems.com> (Stand: 22.11.2010)
- LUBW: „Anwendung von Nanopartikeln“. Hrsg.: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2007)

- LUBW: „Nanomaterialien: Arbeitsschutzaspekte“. Hrsg.: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2009)
- LUBW: „Nanomaterialien: Toxikologie/Ökotoxikologie“. Hrsg.: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2010)
- LUTHER, W. (I): Einsatz von Nanotechnologien im Energiesektor. Band 9 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Hrsg.: HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden (2008)
- LUTHER, W. (II): Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen. Band 7 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Hrsg.: HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden (2008)
- LUTHER, W.; BACHMANN, G.; GRIMM, V.; MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F.; SCHUG, H.; ZWECK, A.: „Nanotechnologien für den Umweltschutz“. Hrsg.: Umweltbundesamt (2007)
- LUTHER, W.; BACHMANN, G.; GRIMM, V.; MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F.; SCHUG, H.; Zweck, A.: „Zukunftsmarkt nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie“. Hrsg.: Umweltbundesamt (2007)
- MARTENS, S.; EGGERS, B.; EVERTZ, T.: „Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz“. Hrsg.: Umweltbundesamt (2010)
- MÜLLER, M.; LÖBEL, E.; RISSING, P.: „Sanierung mit Nano-Eisen - Stand der Technik“, Altlasten-Spektrum 2/2006 S. 75-83.
- NANOPRODUCTS.de; <http://www.nanoproducts.de> (Stand: 24.08.2010)
- NANOWERK: Nanomaterial database; [http://www.nanowerk.com/phpscripts/n\\_dbsearch.php](http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php) (Stand 24.08.2010)
- NASA.: <http://stardust.jpl.nasa.gov/photo/aerogel.html>, (Stand: 19.08.2010)
- NEES-INSTITUT FÜR BIODIVERSITÄT DER PFLANZEN DER UNIVERSITÄT BONN: <http://www.lotus-effekt.de> (Stand 17.08.2010)
- OTTEN, K.; STEINGROBE, B.: Werkstoffinnovationen aus Hessen - Potenziale für Unternehmen. Band 10 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Hrsg.: HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden (2008)
- PASCHEN, H.; COENEN, C.; FLEISCHER, T.; GRÜNWALD, R.; OERTEL, D.; REVERMANN, D.: „Nanotechnologie“. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB); Springer-Verlag Berlin, Heidelberg (2004)
- PASTEWSKI, N.; LANG-KOETZ, C.; HEUBACH, D.: Materialeffizienz durch den Einsatz von Nanotechnologien und neuen Materialien. Band 14 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; Hrsg.: HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden (2009)
- RADKEN, P.; CREMER C.; WARKENTIN, S.; GERLING, P.; MAY, F.; KNOPF, S.: Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung. Forschungsbericht 203 41 110 UBA FB 000938; Hrsg.: Umweltbundesamt. 2006; Abruf unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3077.pdf>
- RIEKE, V.; BACHMANN, G.: „Nanotechnologie erobert Märkte“; Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2004)
- ROHN, H.; LANG-KOETZ, C.; PASTEWSKI, N.; LETTENMEIER, M.: Ressourceneffizienzpotentiale durch Technologien, Produkte und Strategien - Erste Ergebnisse. Papier zu Arbeitspaket 1 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) im Auftrag des BMU/UBA. Hrsg.: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH; Abruf unter <http://www.netzwerk-ressourceneffizienz.de> am 04.10.2010
- STELLENBOSCH UNIVERSITY: Stellenbosch University Water Institute; <http://thehopeproject.co.za/hope/projects/academic/water/Pages/default.aspx> (Stand: 22.11.2010)

THE PROJECT ON EMERGING NANOTECHNOLOGIES: <http://www.nanotechproject.org> (Stand 24.08.2010)

UMWELTBUNDESAMT: „Boden“ unter <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden>, (Stand 19.08.2010)

UMWELTBUNDESAMT: Daten zur Umwelt. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/open.do> (Stand 18.08.2010)

VESTERGAARD-FRANSEN: <http://www.vestergaard-frandsen.com> (Stand: 22.11.2010)

WATERMANN, B. T.; DAEHNE, D.; FÜRLE, C.: „Einsatz von Nanomaterialien als Alternative zu biozidhaltigen Antifouling-Anstrichen und deren Umweltauswirkungen“; Hrsg.: Umweltbundesamt (2010)

WIKIPEDIA (I): <http://de.wikipedia.org/wiki/Fahrzeugkatalysator> (Stand: 17.08.2010)

WIKIPEDIA (II): <http://de.wikipedia.org/wiki/Fullerene> (Stand: 17.08.2010)

WIKIPEDIA (III): <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffnanoröhren> (Stand: 17.08.2010)

WIKIPEDIA (IV): <http://de.wikipedia.org/wiki/Lotuseffekt> (Stand: 24.08.2010)

WIKIPEDIA (V): <http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenpunkt> (Stand: 17.08.2010)

# Internet-Adressen zum Thema Nanotechnologie

AMBIO (Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling):

<http://www.ambio.bham.ac.uk/index.shtml>

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA) - Nanotechnologie:

[http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/Nanotechnologie.html?\\_nnn=true](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/Nanotechnologie.html?_nnn=true)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) - NanoCare: <http://www.bmbf.de/de/5915.php>

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) - NanoMap - Kompetenzatlas Nanotechnologie in Deutschland: <http://www.nano-map.de/index.php>

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): <http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: [http://www.bmu.de/gesundheits\\_und\\_umwelt/nanotechnologie/aktuell/37643.php](http://www.bmu.de/gesundheits_und_umwelt/nanotechnologie/aktuell/37643.php)

Dialog Nanopartikel: <http://www.dialog-nanopartikel.de/>

European Commission - Nanotechnology: [http://ec.europa.eu/nanotechnology/policies\\_en.html](http://ec.europa.eu/nanotechnology/policies_en.html)

Hessen-Nanotech: <http://www.hessen-nanotech.de/>

Informationsplattform Nano-Sicherheit (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung): <http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dssid=336>

Innovationsallianz Carbon Nanotubes: <http://www.inno-cnt.de/de/>

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/55700/>

Nano-BW Zuliefererinitiative Baden-Württemberg: <http://www.webmapcenter.de/clusterpilot/nano/>

Nanoforum - European Nanotechnology Gateway: <http://www.nanoforum.org/>

NanoMat: <http://www.nanomat.de/welcome.htm>

Nanoproducts.de (NanoProducts & Technologies), Nanoproduktdatenbank: <http://www.nanoproducts.de>

NanoRoad des Steinbeis-Europa-Zentrums der Steinbeis Stiftung für Wirtschaftsförderung: <http://www.nanoroad.net/>

Nanosicherheit - Hessen: <http://nano-sicherheit.de/>

NanoTruck: <http://www.nanotruck.de/>

nanoValley.eu (Initiative zur Etablierung einer europäischen Technologieregion): <http://www.nanovalley.eu>

Nanowerk - Nanomaterial Database Search: [http://www.nanowerk.com/phpscripts/n\\_dbsearch.php](http://www.nanowerk.com/phpscripts/n_dbsearch.php)

PEN - Project on Emerging Nanotechnologies: <http://www.nanotechproject.org>

TechPortal Nanotechnologie: <http://www.techportal.de/de/b/2/start,public,start/>

Umweltbundesamt: <http://www.umweltbundesamt.de/technik-verfahren-sicherheit/>

VDI Technologiezentrum - Nano Map: <http://www.nano-map.de/>

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg: <http://www.wm.baden-wuerttemberg.de/mikrosystemtechnik-und-nanotechnologie/170155.html>



