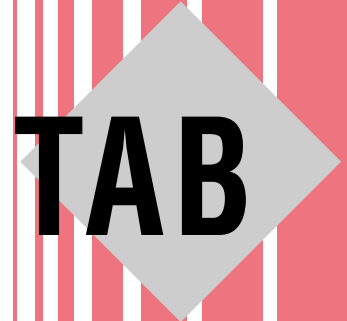


Herbert Paschen  
Christopher Coenen  
Torsten Fleischer  
Reinhard Grünwald  
Dagmar Oertel  
Christoph Revermann

Juli 2003



TA-Projekt  
Nanotechnologie

ÄÄÄÄ • æ { ^ } æ • v } \*



# Zusammenfassung

## Begriffe und Grundlagen

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala befassen. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter ( $10^{-9}$  m) und bezeichnet einen Grenzbereich, in dem mehr und mehr quantenphysikalische Effekte eine wichtige Rolle spielen.

Wegen ihres Potenzials zur grundlegenden Veränderung ganzer Technologiefelder wird die Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie angesehen, die in naher Zukunft nicht nur die technologische Entwicklung beeinflussen, sondern auch maßgebliche ökonomische, ökologische und soziale Implikationen mit sich bringen wird.

Eine allgemein anerkannte Definition der Nanotechnologie existiert bis heute nicht. Im vorliegenden Bericht wird folgende, pragmatisch zu verstehende Definition verwendet:

1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind.
2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.
3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.

Es gibt zwei grundlegende Strategien, um in die Nanodimension vorzustoßen. Auf der einen Seite gibt es den sog. „Top-down“ (=von oben nach unten)-Ansatz, der vor allem in der Physik und physikalischen Technik dominiert. Hier werden von der Mikrotechnik ausgehend Strukturen und Komponenten immer weiter miniaturisiert. Auf der anderen Seite steht der „Bottom-up“ (=von unten nach oben)-Ansatz, bei dem immer komplexere Strukturen gezielt aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen aufgebaut werden. Dieser Ansatz wird bislang eher durch die Chemie und Biologie repräsentiert, wo der Umgang mit Objekten in der Nanometerdimension seit langem vertraut ist.

Charakteristisch ist beim Übergang auf die Nanometerskala, neben der zunehmenden Dominanz quantenphysikalischer Effekte, dass Oberflächen- bzw. Grenzflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften des Materials

eine immer größere Rolle spielen. Außerdem treten vielfach Selbstorganisations-Phänomene auf.

Als Basisstrukturen der Nanotechnologie werden betrachtet: punktförmige Strukturen, die in allen drei Dimensionen kleiner als 100 nm sind (z.B. Nanokristalle, Cluster oder Moleküle), linienförmige Strukturen, die in zwei Dimensionen nanoskalig sind (z.B. Nanodrähte, Nanoröhren und Nanogräben), Schichtstrukturen, die in nur einer Dimension nanoskalig sind, „inverse“ Nanostrukturen, also Poren, sowie komplexe Strukturen wie z.B. supramolekulare Einheiten oder Dendrimere. Ohne Verfahren und Werkzeuge, mit denen die oben genannten Basisstrukturen hergestellt und analysiert werden können, wäre die Nanotechnologie nicht denkbar. Daher werden die damit assoziierten Technologien ebenfalls diskutiert.

Die Nanotechnologie erfordert einen hohen Grad an interdisziplinärer und transdisziplinärer Kooperation und Kommunikation. Dies liegt zum einen darin begründet, dass auf der Nanoebene Begriffswelten der Physik, Chemie und Biologie miteinander „verschmieren“, zum anderen darin, dass die Methoden einer einzelnen Disziplin durch Verfahren und Fachkenntnisse aus den anderen Fachrichtungen ergänzt werden können oder müssen.

## **Forschung und Entwicklung im internationalen Vergleich**

Der internationale Vergleich der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten anhand von bibliometrischen Daten und Patentindikatoren zeigt die starke Position Deutschlands im Bereich der Nanotechnologie.

Deutschland gehört zu den publikationsstärksten Akteuren in der Nanotechnologie und wird hier nur von den USA und Japan übertroffen. Auf Rang 4 folgt China. In Europa sind hinter Deutschland Frankreich und Großbritannien die Länder mit dem größten Publikationsaufkommen. Bezüglich des Anteils, den die Nanotechnologie am gesamten wissenschaftlichen Publikationsaufkommen hat, liegt Deutschland an fünfter Stelle, hinter China, Südkorea, Russland und Japan, aber deutlich über dem internationalen Durchschnitt. Die größten Wachstumsraten bei den Publikationen im Bereich der Nanotechnologie weisen Südkorea, China und Israel auf; der Wert für Deutschland entspricht dem internationalen Durchschnitt, der für die USA liegt deutlich darunter.

Bei den Patentanmeldungen liegt Deutschland auf Platz 2, hinter den USA, aber vor Japan. Es folgen Frankreich und Großbritannien. Anders als beim Publikationsaufkommen zählt China hier nicht zu den Top-10-Akteuren. Der

Anteil der nanotechnologierelevanten Patente am gesamten Patentaufkommen liegt in Deutschland leicht über dem internationalen Durchschnitt, die jährlichen Wachstumsraten der Patentanmeldungen sind allerdings leicht unterdurchschnittlich. In allen betrachteten Ländern liegt die Wachstumsrate der nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen deutlich über der Wachstumsrate der Patentanmeldungen insgesamt.

Für die deutsche Forschung gilt es, diese starke Position im Bereich der Nanotechnologie zu behaupten und möglichst weiter auszubauen. Hierzu werden erhebliche Anstrengungen unternommen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die seit Anfang der 1990er-Jahre bestehende Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, die von ca. 35 Mio. Euro im Jahre 2000 auf über 88 Mio. Euro in 2002 angewachsen ist und die 2003 auf 112 Mio. Euro steigen soll. Seit 1998 gibt es die Förderinitiative „Kompetenzzentren Nanotechnologie“ und seit 2002 einen Nachwuchswissenschaftler-Wettbewerb im Bereich Nanotechnologie. Auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit und die Deutsche Forschungsgemeinschaft sind an der Förderung der Nanotechnologie beteiligt. Die Max-Planck-Gesellschaft, die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und die Wissensgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz setzen beträchtliche Mittel für die Weiterentwicklung der Nanotechnologie ein. Insgesamt wurden im Jahre 2002 öffentliche Mittel in Höhe von ca. 200 Mio. Euro für die Nanotechnologie eingesetzt, gegenüber ca. 150 Mio. Euro in 2001.

Damit entfiel auf Deutschland mehr als die Hälfte der öffentlichen Mittel, die im EU-Raum für die Nanotechnologie bereitgestellt wurden.

## **Überblick über wichtige Anwendungsfelder**

Die Verkleinerung von Abmessungen in den Nanometerbereich hinein führt oft zu charakteristischen, für neue Anwendungen nutzbaren Eigenschaften von Stoffen und Werkstoffen, die bei makroskopischen Stücken des gleichen Materials nicht auftreten. Dazu gehören z.B. deutlich höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen, die Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände, hohe chemische Selektivität der Oberflächenstrukturen und eine deutlich vergrößerte Oberflächenenergie.

Durch den kontrollierten Aufbau makroskopischer Körper aus atomaren und molekularen Bausteinen lassen sich deren Eigenschaften gezielt einstellen. Das

Verständnis der molekularen Grundlagen neuer Materialien eröffnet Perspektiven für die Herstellung neuer „schaltbarer“ Werkstoffe, die mit konventionellen Methoden nicht herstellbar sind.

Insgesamt gesehen ist der Entwicklungsstand von Produkten, Produktideen und Konzepten der Nanotechnologie sehr unterschiedlich; ihr Realisierungszeitpunkt reicht von der Gegenwart bis weit in die Zukunft. Eine Reihe von Anwendungen befindet sich bereits in der Phase der Realisierung, wobei es sich eher um Top-down-Ansätze handelt. Neuere Anwendungen – eher die Bottom-up-Ansätze – sind erst mittel- bis langfristig zu erwarten.

### *Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung*

Unter marktrelevanten Aspekten befindet sich die Nanotechnologie im Bereich Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung bereits in einem relativ fortgeschrittenen Stadium. Teilweise bereits in der industriellen Anwendung befinden sich Nano-Multischichten und Nano-Verbundschichten, die sich durch verbesserte mechanische und tribologische Eigenschaften auszeichnen. Weitere Beispiele sind quasi „selbstreinigende“ Oberflächen, die gleichzeitig hydrophobe und oleophobe Eigenschaften aufweisen. Auch schon im Einsatz befinden sich optisch-funktionale Oberflächen für Fassaden, Kraftfahrzeuge, Solarzellen etc. (z.B. zur Entspiegelung, Sonnenschutzverglasung, Antireflexbeschichtung für Instrumententafeln).

Durch den Zusatz von Nanopartikeln in konventionelle Lacke ergeben sich neue und verbesserte, nanobasierte Farbeffekte. In der Anwendung befinden sich bereits Pigmentruße aus agglomerierten Nanopartikeln in hochwertigen schwarzen Lacken. Über schaltbare bzw. in der Farbe veränderbare Lacke und selbstheilende Lacke wird diskutiert.

### *Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese*

In der chemischen Industrie werden katalytische Nanopartikel bereits eingesetzt. Im Nanobereich werden auch völlig neue Materialien als Katalysatoren erschlossen (z.B. Gold-Nanopartikel). Nanoreaktoren (z.B. Dendrimere) ermöglichen eine völlig neue Art der räumlichen Prozesskontrolle im Nanometermaßstab. Durch sog. supramolekulare Wirt-Gast-Strukturen eröffnen sich neue Synthesewege in der organischen Chemie. Die Regio- und Stereo-Selektivität von Katalysatoren kann erhöht werden. Oberflächenaktive Membranen, nanoporöse (Bio)Filter und Adsorptionsmittel sind aus nanotechnologischer Sicht op-

timierbar, z.B. zur Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung.

Durch die nanotechnologische Verbesserung bereits verfügbarer Katalysatoren (z.B. Zeolithe) werden Trägerkatalysatoren mit neuen Eigenschaften zugänglich. Durch ein kontrolliertes Aufwachsen der Katalysatorpartikel auf nanoskalige Trägermaterialien wird eine präzise Kontrolle der Katalysatoreigenschaften möglich. In Zukunft wird es verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern. Durch molekulares Prägen (Molecular Imprinting) gelingt der Aufbau spezifischer Polymere (MIPs) mit hoher Selektivität. Dabei können biomimetische, enzymanaloge Katalysatoren gewonnen werden, die Vorteile gegenüber Enzymen u.a. in ihrer Einsetzbarkeit bei extremen Reaktionsbedingungen aufweisen.

### *Energieumwandlung und -nutzung*

Mit dem Einsatz der Nanotechnologie kann die Effizienz der Energieumwandlung erhöht werden. Dabei stehen materialseitige Verbesserungen im Vordergrund (z.B. Einsatz nanotechnologischer Werkstoffe in der Photovoltaik und in Brennstoffzellen). Ein weiterer Schwerpunkt ist die verlustarme Speicherung von Energie. Dabei stellt die effiziente Speicherung von Wasserstoff nach wie vor eine Herausforderung dar. Durch Methoden der Mikro- und Nanostrukturierung lässt sich etwa der Massenanteil des Wasserstoffs bei chemischer Speicherung erhöhen. An der Speicherung von Wasserstoff in Nanoröhren aus Kohlenstoff und anderen Fulleren-Derivaten wird – in Erwartung höherer Massenanteile – weiter geforscht.

Nanomaterialien können zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Batterien, von Mini-Akkus (z.B. durch Verwendung von Nanoröhren in Lithium-Ionen-Akkus) und bei elektrochemischen Kondensatoren (Superkondensatoren) genutzt werden. Zudem ist die Kombination von Superkondensatoren mit Batterien auch für Antriebszwecke vielversprechend (z.B. Speicherung der Bremsenergie im Elektromobil). Die hohen Verluste beim Stromtransport machen die Verwendung von supraleitenden Leitungen interessant. Dabei setzt man Hoffnung auf Nanoröhren, bei denen Supraleitfähigkeit bei Raumtemperatur für möglich gehalten wird.

### *Konstruktion*

Entscheidende Materialgrößen (Härte, Verschleißfestigkeit etc.) können durch die Einführung charakteristischer Strukturgrößen im Nanometerbereich gezielt verbessert werden. Viele Strukturanwendungen nanokristalliner Werkstoffe ergeben sich aus einer Verteilung von Nanopartikeln in einer keramischen, metallischen oder Polymer-Matrix.

Beispielsweise verbessert das Einbringen von nanoskaligen Teilchen in Metallen deren mechanische Eigenschaften, womit ein wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann. Mit Nanopartikeln versehene Polymere besitzen Merkmale, die zwischen denen von organischen Polymeren und anorganischen Keramiken liegen. Einsatzmöglichkeiten derart optimierter Materialien finden sich in besonders beanspruchten Bereichen des Leichtbaus oder in Hochtemperaturanwendungen, aber auch in Massenanwendungen wie Kunststoff-Gehäusen oder -Verkleidungen. Hervorzuheben ist z.B. das duktile Verhalten von nanostrukturierten Keramiken, die bisher als ausschließlich spröder Werkstoff bekannt waren. Für die Praxis ergibt sich daraus eine Vielzahl an Innovationen in der keramischen Technologie. Wesentliche Eigenschaftsverbesserungen sind auch bei Baustoffen durch Beimischen von Nano-Zusatzstoffen möglich (z.B. Hochleistungsbetone mit höhere Druckfestigkeiten bei verbessertem Verschleiß- und Erosionswiderstand).

### *Nanosensoren und Aktuatoren*

Für die Vermessung von Mikro- und Nanostrukturen werden zerstörungsfreie Messverfahren mit Nanometergenauigkeit benötigt. Eine Vielzahl von Sensoren wird durch die Nanotechnologie erst ermöglicht. Zur Detektion mechanischer Größen werden z.B. Magnetfeldsensoren verwendet (z.B. in Airbag-Systemen, Leseköpfen von Festplattenspeichern). Mit Infrarot-Sensoren lässt sich eine hohe thermische und räumliche Auflösung realisieren; den höchsten Entwicklungsstand haben zurzeit Infrarot-Detektormosaiken aus Quantentrog-Infrarot-Photodetektoren. Im Arznei- und Lebensmittelbereich werden kommerziell Markierungen („Thermolabels“) auf Nanotechnologiebasis angeboten, die durch Verfärbung Temperaturüber- oder -unterschreitung anzeigen. Mit dem Rasterwärmemikroskop kann die thermische Leitfähigkeit bzw. Temperaturverteilung z.B. von elektronischen Bausteinen hochauflösend vermessen werden. Viele Oxide kommen erst in nanokristalliner Form für eine Verwendung als Sensormaterial, etwa für Chemosensoren (z.B. Glukosesensor mit



Farbumschlag zur Bestimmung des Blutzuckergehaltes), in Frage. Ein Beispiel für Biosensoren sind sog. Lab-on-a-Chip-Systeme.

### *Informationsverarbeitung und -übermittlung*

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Nanoelektronik im Bereich der Informationsverarbeitung und -übermittlung sind elektronische, optische bzw. optoelektronische Bauelemente. Durch Nanotechnologie werden auch im Bereich der Fertigungstechnik kostengünstigere oder präzisere Verfahren erwartet.

Die technisch beherrschte Größenordnung von Logik- und Speicherbausteinen in der heute dominierenden CMOS-Technik verschiebt sich zunehmend in die Nanometerdimension (Quantenpunkte, Kohlenstoff-Nanoröhren). Photonische Kristalle weisen ein Einsatzpotenzial für rein optische Schaltkreise auf, etwa als Grundlage für eine zukünftige nur auf Licht basierende Informationsverarbeitung (Photonik). In der molekularen Elektronik lassen sich mit Hilfe der Nanotechnologie elektronische Bauelemente mit neuen Eigenschaften auf atomarer Ebene zusammensetzen mit Vorteilen u.a. in einer potenziell hohen Packungsdichte.

Neue Konzepte für Komponenten beruhen vor allem auf der Nutzung quantenmechanischer Effekte für die Realisierung kleinerer, schnellerer oder anderweitig besserer Bauelemente. Längerfristig werden durch die Nutzung der Nanotechnologie im IuK-Bereich aber auch neue Architekturen möglich. Ein Beispiel für ein neues biochemisches Rechnerkonzept ist das sog. DNA-Computing.

### *Lebenswissenschaften*

Durch den Einsatz der Nanotechnologie werden u.a. Verbesserungen bei medizinischer Diagnose und Therapie, „Leistungssteigerungen“ beim Menschen und Ertragssteigerungen bei Tieren und Pflanzen erwartet. Mögliche Anwendungen sind unter anderem in der Analytik und Diagnostik, der nanotechnologischen Herstellung von Wirkstoffen, dem ortsgenauen Wirkstofftransport sowie der Herstellung biokompatibler Materialien und Oberflächen zu finden.

Bei der Ernährung stehen derzeit nanotechnologisch hergestellte Verpackungen sowie Farb- und Zusatzstoffe im Vordergrund. Künftig dürfte Nanotechnologie auch im Bereich des „Functional Food“ eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht. In Kosmetika werden Nanopartikel bereits eingesetzt, z.B. für Sonnenschutzmittel mit verbesserten Eigenschaften.

### *Sicherheit und Rüstung*

Der Einsatz der Nanotechnologie in der Rüstung eröffnet Wege zu verbesserten Waffen, innovativen Materialien und neuen Anwendungsbereichen. Bei Land- und Luftfahrzeuge könnten herkömmliche Strukturwerkstoffe zum Teil durch festere und leichtere Materialien ersetzt werden. Zudem könnten Verbesserungen beim direkten (Panzerungen) und indirekten Schutz militärischer Fahrzeuge (Tarnen und Täuschen, z.B. durch Farbwechsel mit „intelligenten“ Oberflächenbeschichtungen) erreicht werden. Wichtige Auswirkungen der Nanotechnologie auf den Betrieb militärischer Trägersysteme sind bei der Wandlung und Speicherung von Energie zu erwarten (z.B. effizientere Solarzellen, geeignete Membranen und Katalysatoren zum Betrieb von Brennstoffzellen sowie leistungsgesteigerte Batterien). Nanoskalige elektronische, sensorische und elektromechanische Komponenten könnten die Steuerung und Regelung von Fahrzeugen leistungsfähiger und robuster machen. Der bereits bestehende Trend zu unbemannten/autonomen Systemen in den Bereichen Luft, See und Weltraum könnte sich hierdurch noch verstärken.

In der militärischen Aufklärung gibt es eine Vielzahl von möglichen Anwendungen, die auf der Nutzung von nanotechnologischen Komponenten für Sensoren, Sensorsysteme und Sensornetze basieren. Auch der Bereich der Waffen und Munition wird unmittelbar von den verbesserten sensorischen Fähigkeiten sowie von der Erhöhung der Rechenleistung und Speicherkapazität durch Nanotechnologie beeinflusst. Eine weitere Option ist hier die Entwicklung nanoskaliger Pulver für den Einsatz in Treibmitteln und Sprengstoffen, wodurch sich Energieausbeute und Explosionsgeschwindigkeit erhöhen lassen.

Nanotechnologische Entwicklungen werden vermutlich erhebliche Auswirkungen für das militärischen Personal haben, unter anderem auf der Ebene der persönlichen Ausstattung (Stichwort: „Soldier as a System“). Im Vordergrund steht das Bestreben, Soldaten mit zusätzlichen Funktionalitäten auszustatten, ohne das Gewicht der Ausrüstung wesentlich zu erhöhen.

### **Vertiefung: Anwendungen in ausgewählten Industriebranchen**

Potenziale für Anwendungen der Nanotechnologie bestehen in praktisch allen Industriezweigen, auch in solchen, die eher zu den Lowtech-Branchen gerechnet werden. Die hier analysierten sechs Branchen – Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie, Bauwesen, Textilindustrie, Energiewirtschaft und Chemi-

sche Industrie – repräsentieren einen bedeutsamen Ausschnitt aus dem zukünftigen industriellen Gesamtpotenzial der Nanotechnologie.

### *Automobilindustrie*

Im Automobilbau der Zukunft wird nanotechnologische Kompetenz zu den Kernfähigkeiten gehören, die erforderlich sind, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit dieser für die deutsche Volkswirtschaft so wichtigen Branche zu erhalten. Das Spektrum nanotechnologischer Innovationsbemühungen im Automobilbau reicht von bereits eingesetzten Komponenten über konkrete Entwicklungsaktivitäten bis hin zu Ideen mit allenfalls langfristiger Realisierbarkeit. Zum Teil handelt es sich dabei um grundlegend neue Entwicklungen mit weitreichenden Auswirkungen auf das Produkt. Es werden Spin-off-Effekte in viele andere Branchen hinein erwartet.

Nanotechnologische Entwicklungen können in allen Subsystemen bzw. Komponenten des Automobils eine Rolle spielen. Beispiele sind:

- Nanopartikel als Füllstoff in Autoreifen (realisiert, Weiterentwicklung),
- Antireflexbeschichtungen (realisiert),
- nanopartikelverstärkte Polymere und Metalle (Entwicklungsphase, zum Teil realisiert),
- nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler (in Entwicklung),
- katalytische Nanopartikel als Zusatz in Kraftstoffen (Forschungsstadium),
- nanoporöse Filter zur Minimierung der Emission von Partikeln im Nanometerbereich (Zukunft),
- hydrophile Oberflächenschichten als Antibeschlagschichten (Zukunft),
- „selbstaushheilende“ Lacke, z.B. durch Selbstorganisation (allenfalls langfristig).

### *Luft- und Raumfahrtindustrie*

Auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie bestehen für die Nanotechnologie mittel- bis langfristig erhebliche Anwendungsmöglichkeiten. Im Bereich der Raumfahrt sind diese Möglichkeiten besonders vielfältig, andererseits sind hier die Anforderungen an die technologische Leistungsfähigkeit der Komponenten oft extrem hoch. Ökonomische Anwendungsbarrieren ergeben sich aus dem erforderlichen finanziellen Aufwand für die Entwicklung von Nanotechnolo-

gieprodukten bei gleichzeitig niedrigen Stückzahlen, vor allem im Bereich der Raumfahrt.

Wichtige Anwendungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Strukturwerkstoffe (z.B. Gewichts- und Energieeinsparung durch Einsatz leichtgewichtiger, hochfester nanotechnologiebasierter Materialien), Informations- und Kommunikationstechnik (z.B. effizientere Gestaltung der Datenübertragung zwischen Raumfahrzeugen und terrestrischen Informationsnetzen mit Hilfe elektronischer und optoelektronischer Nanotechnologiekomponenten), Sensorik (z.B. Verbesserung der medizinischen Überwachung von Astronauten durch Sensoren auf der Basis nanostrukturierter Materialien) und Thermalschutz/Thermalkontrolle (z.B. Verbesserung thermischer Kontrollsysteme durch nanostrukturierte diamantartige Kohlenstoffschichten).

### *Bauwesen*

Auch im Bauwesen gibt es eine Fülle von Möglichkeiten für Anwendungen nanotechnologischer Entwicklungen. So können Siliziumdioxid-Nanopartikel in synthetischen Kieselsäuren (Nanosilica) als Zusatzmittel für Spritz- und Hochleistungsbeton eingesetzt werden und zur Verbesserung der Haftzug- und Haftscherfestigkeit zwischen Beton und Bewehrungsstahl beitragen. Durch nanometerdünne Multilagenschichtung aus leitenden Polymeren ist ein verbesserter Korrosionsschutz bei Verwendung von Karbonstahl oder Edelstahl als Baumaterial realisierbar. Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der Gebäude-Wärmedämmung (z.B. Einsatz von Fensterflächen zur transparenten Wärmedämmung durch Aufbringen einer wenige nanometerdicken, unsichtbaren Silberschicht), bei der Außenflächengestaltung (z.B. Einstellung von Funktionen wie Selbstreinigung, Anti-Graffiti-Schutz oder hohe Kratz- und Abriebfestigkeit bei Kunststoffen durch geeignete Beschichtungen) und im Innenbereich (z.B. Einsatz von Titandioxid-Nanopartikeln als Additive in Lacken zum Schutz vor Verfärbungen durch Kunst- und Tageslicht).

### *Textilindustrie*

In der Textilindustrie richten sich die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen besonders auf die Integration neuer funktionaler Eigenschaften in textile Materialien, um einen Zusatznutzen (und damit Wettbewerbsvorteile) zu erzeugen. Es gibt hier einerseits einige wenig realistische Visionen, wie etwa die Integration von Nanorobotern, die einem Kleidungsstück eine ausgeprägte

Selbstreparaturfähigkeit verleihen sollen. Durchaus erfolgversprechend dürften andererseits die Bemühungen um Verbesserungen bei Eigenschaften bzw. Funktionen wie Knitterfreiheit, Atmungsaktivität, Verschleißfestigkeit, Abstoßen von Flecken und Wasser, Antistatik, Wirkstoffdepot oder Feuerschutz sein.

### *Energiewirtschaft*

Von Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie werden erhebliche Einflüsse auf die zukünftige Energieproduktion und Energieverteilung erwartet. Zu nennen sind vor allem nanotechnologiebedingte Fortschritte bei Solarzellen, bei der Speicherung von Energie und bei Brennstoffzellen.

Hoffnungen, mit Hilfe nanotechnologischer, bei Raumtemperatur supraleitender Materialien die hohen Leitungsverluste unserer zentralisierten Energieversorgung zu reduzieren, sind umstritten.

### *Chemische Industrie*

Die Chemische Industrie ist eng mit der Entwicklung der Nanotechnologie verknüpft: Sie ist einerseits Lieferant wesentlicher Grundstoffe, andererseits zukünftiger Nutzer nanotechnologiebasierter verfahrenstechnischer Innovationen. Von der Nanotechnologie wird erwartet, dass die Chemische Industrie aus ihr neue Innovationsdynamik schöpfen kann.

Zahlreiche Produkte der Chemischen Industrie, die heute dem Bereich Nanotechnologie zugerechnet werden, gibt es schon seit Jahrzehnten. In vielen Bereichen zeichnen sich aber neue Nanoprodukte ab, die auf Grund ihres potenziellen Marktvolumens wirtschaftlich relevant sind.

Hauptanwendungsgebiete der Nanotechnologie in der Chemischen Industrie sind die Katalyse, die Erzeugung von Füllstoffen, Pigmenten, Beschichtungen und Schmierstoffen, die Mikro-/Nanoreaktionstechnik, Membranen und Filter sowie Pharma und Kosmetik.

### **Vertiefung: Anwendungen in der Informations- und Kommunikationstechnik**

Die Informations- und Kommunikationstechnik ist ein wichtiger und weiterhin stark wachsender Wirtschaftsbereich mit einem hohen Innovationstempo. Nach einer jahrzehntelangen Schwäche hat die deutsche Industrie in diesem Sektor in

den vergangenen Jahren enorm aufgeholt und besitzt heute gute Voraussetzungen, die Herausforderungen der kommenden Jahre zu meistern, vor allem den Übergang von der traditionellen zur nanotechnologischen Elektronik.

Diese Entwicklung wird getragen von der „Top-down-Entwicklung“ der Mikroelektronik hin zur Nanotechnologie, d.h. der zunehmenden Miniaturisierung bis an die Grenzen der Festkörperphysik, bei der ein Übergang zur „Bottom-up-Nanotechnologie“ zwingend wird. Letztere befindet sich heute aber noch weitgehend im Bereich der Grundlagenforschung. Nanotechnologische Konzepte und Verfahren werden die weitere Entwicklung der Elektronikindustrie und deren industrielle Kontinuität mittelfristig – beginnend im Zeitraum zwischen 2005 und 2010 – sichern. Dabei existieren zahlreiche Produkte, Produktideen und Konzepte, deren Realisierungszeitpunkt von der Gegenwart bis zu einer ungewissen Zukunft reichen.

Bei neuen Logik- und Speichertechnologien werden nanotechnologische Ansätze schnell eine wichtige Rolle spielen. So ist bereits in naher Zukunft mit der Einführung von magnetischen RAMs und Resonanz-Tunnel-Elementen in Logikschaltkreisen zu rechnen. Mittelfristig Erfolg versprechende Ansätze sind beispielsweise Einzelflussquanten-Logik (RSFQ) oder Einzel-Elektronen-Transistoren. Eine vollständig molekulare Elektronik – sei es auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhren oder organischen Makromolekülen – liegt hingegen noch in weiter Ferne. Insgesamt geht es hier darum, Impulse aus der Grundlagenforschung für die industrielle Technologieentwicklung nutzbar machen. Tendenziell gilt hier – wie in der Vergangenheit bei der CMOS-Technologie –, dass Lösungen im Speicherbereich solchen bei Logikschaltkreisen um einige Jahre vorausziehen. Die nichtklassische CMOS-Technologie ist eine Fortsetzung der bekannten und beherrschten Mikroelektronik bis weit in die Nanometerdimension hinein. Hier wird insbesondere mit neuen Produktionsverfahren und Werkstoffen kurz- bis mittelfristig versucht, identifizierte technisch-wirtschaftliche Lücken entlang der vertikalen Wertschöpfungsketten bedarfsgerecht auszugleichen. Unabhängig vom Erfolg der alternativen Ansätze wird die CMOS-Technologie auch in absehbarer Zukunft das Arbeitspferd der Halbleiterindustrie bleiben.

Der Marktdurchbruch zur Nanotechnologie in der Informations- und Kommunikationstechnik könnte sich also in zwei Schritten vollziehen: Zunächst wird im Zuge der „Top-down-Miniaturisierung“ die herkömmliche Mikrostrukturierung die Grenze zur Nanotechnologie überschreiten. Längerfristig könnten „Bottom-up-Nanoelektronik“ und „Nanosystemtechnik“ hinzutreten,

in denen „echte“ Nanotechnologien eingesetzt werden, etwa solche, die Selbstorganisationsprozesse für den Aufbau von Schaltkreisen und Systemen nutzen.

Neuartige, Nanotechnologie nutzende Systemarchitekturen sind die am weitesten in der Zukunft liegenden Entwicklungen. So befinden sich sowohl das DNA- als auch das Quanten-Computing noch im Stadium der Erforschung der Grundlagen. Erst seit relativ kurzer Zeit ist der experimentelle Nachweis der grundlegenden Funktionsprinzipien erbracht worden. Daher ist eine technische Nutzung kurz- bis mittelfristig nicht absehbar. Zumindest theoretisch besitzen beide Technologien durch die Möglichkeit zur massiven Parallelisierung der Datenverarbeitung erhebliches Potenzial für die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit. Darüber hinaus besitzen beide inhärente Vorteile. So hat das DNA-Computing überall dort Vorteile, wo – die in Zukunft immer wichtiger werdende – Schnittstelle zu biochemischen Prozessen von Bedeutung ist. Mit dem Quantencomputer wird hingegen die Lösung von Problemen möglich, für die es keine effizienten klassischen Algorithmen gibt.

Wegen der großen Unwägbarkeiten wird insbesondere die Entwicklung von Quantencomputern auf industrieller Seite von solchen Unternehmen betrieben, die traditionell grundlagennahe Forschung betreiben. Hierzu gehören insbesondere IBM, Hewlett-Packard und Lucent-Technologies (ehem. Bell Labs). Deutsche Akteure finden sich kaum. Da zudem die Quantenkryptografie vor allem für militärisch-nachrichtendienstliche Anwendungen entwickelt wird, besteht für Deutschland das Risiko, auf diesem potenziell wichtigen Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik frühzeitig den Anschluss zu verlieren.

Für beide Ansätze dürfte allerdings klar sein, dass sie den klassischen Computer für universelle Anwendungen im privaten und geschäftlichen Umfeld wegen des vergleichsweise hohen apparativen Aufwandes kaum ablösen dürften. Es wird sich also noch erweisen müssen, wie breit letztlich die Anwendungsbereiche sind, in denen DNA- bzw. Quantencomputer ihre inhärenten Vorteile ausspielen können. Die Frage, ob es sich um künftige Schlüsseltechnologien handelt, kann daher heute noch nicht beantwortet werden. Dies gilt umso mehr, als durch die Entwicklung nanoelektrischer Bauelemente auch herkömmliche Architekturen nochmals einen erheblichen Leistungsschub erfahren werden.

Eine wichtige Rolle für Innovationsanstrengungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechniken spielt das Paradigma der Systeme der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung (Ubiquitous Computing). Diese Anwendungsvision setzt wichtige Beiträge der Nanotechnologie für ihre technische Basis voraus. So wird beispielsweise die propagierte totale und nahtlose

Vernetzung von Mensch und Maschine erst durch die Entwicklung von höchst-integrierter (Opto-)Elektronik in Verbindung mit leistungsfähiger Funktechnik zu preiswerten Massenprodukten möglich. Von der Nanotechnologie sollen wichtige Impulse für die extreme Miniaturisierung, die Konstruktion neuartiger Sensoren und die Möglichkeit zur Produktion billiger und leistungsfähiger polytronischer Schaltungen ausgehen. Dieses Anwendungsgebiet weist aber auch eine Vielzahl von technikinduzierten Implikationen auf. So stellt die Möglichkeit zur Sammlung, Verbreitung und Verarbeitung einer Vielzahl von teilweise personenbezogenen Daten die Technik, den Staat und die Gesellschaft vor zahlreiche Probleme aus den Bereichen der Persönlichkeitsrechte – insbesondere des Datenschutzes, der informationellen Selbstbestimmung und der wachsenden Abhängigkeit wichtiger gesellschaftlicher Funktionen von technischen Infrastrukturen.

### **Vertiefung: Anwendungen in den Lebenswissenschaften**

Zu den Lebenswissenschaften im engeren Sinn zählen Biologie und Humanmedizin sowie Veterinärmedizin mit den entsprechenden anwendungsorientierten Disziplinen, z.B. Medizintechnik und Biotechnologie. Berührungspunkte ergeben sich zu den dortigen biotechnischen Entwicklungen; dazu zählen beispielsweise neue biomedizinische Therapien (Gentherapie, Zelltherapie, Xenotransplantation etc.), künstliche Implantate (Gewebe und Organe), die individualisierte Medizin (Pharmakogenomik etc.), aber auch die Telemedizin. Im weiteren Sinne können auch Pharmazie, Kosmetik, Ökotrophologie, Agrarwissenschaft, Forstwissenschaft und Umweltwissenschaften zu den Lebenswissenschaften gezählt werden. Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Kapitel auf den Anwendungen der Nanotechnologie in den biomedizinischen Bereichen.

Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergänzen sich gegenseitig in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Aktuell zeichnet sich ein breites Spektrum von technischen Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ab. Berührungspunkte zwischen Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergeben sich insbesondere dort, wo Nanotechnologie eingesetzt wird, um Ziele der Biowissenschaften zu erreichen, und/oder Nanotechnologie von Erkenntnissen und Verfahren aus den Biowissenschaften profitiert.

Unter der „Transferrichtung Nano2Bio“ ist die Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Materialien für die Untersuchung biologischer Fragestel-



lungen zu verstehen. Unter diesem Blickwinkel sind unter anderem Nanoanalytik, Nanomanipulationstechniken für biologische Strukturen und Objekte, nanotechnologisch hergestellte Wirkstoffe für lebende Organismen, Nanofähren für den Transport von Wirkstoffen, Nanomaschinen, Nanorobotik für Forschung, Diagnostik und Therapie, nanotechnologisch beschichtete Implantate sowie nanoelektronische, insbesondere neurologische Implantate als Anwendungsperspektiven zu nennen. Die „Transferrichtung Bio2Nano“ steht für bio(techno)logische Materialien und Baupläne zur Herstellung technischer Nanosysteme. Diese könnten in den Bereichen Information und Kommunikation, Energie und Umwelt u.a.m. für technische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Zu nennen sind hier z.B. nanotechnologische Anwendungen nach biologischen Vorbildern, der Einsatz biologischer Bausteine im Nanomaßstab für technische Systeme oder die Nanoelektronik und Nanoinformatik unter Verwendung biologischer Bausteine, Funktions- oder Organisationsprinzipien.

Im Überblick lässt sich konstatieren, dass sich für die nächsten Jahre marktfähige Anwendungen vor allem bei Implantaten und Transplantaten und im Bereich der Drug-Delivery-Systeme für Medizin, Ernährung und auch Kosmetik abzeichnen. Bei der Analyse von Nanostrukturen nimmt die Rastersondenmikroskopie eine führende Position ein. Einige nanotechnologische Produkte überzeugen durch ein neuartiges Leistungsspektrum bzw. hohe Wirksamkeit. Die Einführung solcher Produkte, die bereits bestehende Entwicklungen fortführen, erfolgt jedoch weitgehend, ohne dass der Bezug zur Nanotechnologie in der Öffentlichkeit besonders wahrgenommen wird.

Im Rahmen des Berichtes wurden primär die Anwendungsbereiche berücksichtigt; sekundär einbezogen sind auch die angewendeten Verfahren. Viele Vorhaben befinden sich zurzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung, der Anwendungsbezug ist daher zum Teil prospektiv zu verstehen. Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsschwerpunkte der Nanotechnologie insbesondere in den biomedizinischen Bereichen in kurzer Form zusammengefasst.

### *Diagnostik*

Diagnosechips für Krankheiten und genetische Dispositionen werden von verschiedenen Start-up-Unternehmen entwickelt. Die Nanotechnologie kann bei der Optimierung dieser Biochips helfen. Mit solchen Diagnosechips lassen sich Tausende von Genen gleichzeitig untersuchen. Dazu werden im Labor hergestellte Gen-Stücke mit bekannten Eigenschaften auf die Chip-Oberfläche geklebt. Eine Diagnose hängt z.B. davon ab, an welche Gen-Stücke sich die DNA

aus dem Blut eines Patienten anlagert. An DNA-Fragmente gekoppelte Nanopartikel z.B. erlauben die Identifikation definierter DNA-Sequenzen. Viren und Zelltypen können auf Grund von Oberflächeneigenschaften identifiziert werden, die sie an bestimmten Nanostrukturen haften lassen.

Eine Nachfrage nach solchen Diagnosechips ist beispielsweise für biomedizinische Analysen zu erwarten, die in jeder Arztpraxis oder auch vom Patienten zu Hause vorgenommen werden können, so etwa bei der regelmäßigen Überwachung der mütterlichen Blutwerte während einer Schwangerschaft. Synergien bestehen mit der Telemedizin: Chronischkranke oder Risikopatienten können mit Hilfe implantierter Sensoren im Nanomaßstab überwacht werden. Interesse an Verfahren, die mit sehr geringen Probenmengen auskommen, ist auch im Bereich der Kriminaltechnik vorhanden.

In der Forschung besteht Bedarf an Sensoren, die das Verhalten von Biomolekülen und Zellorganellen *in vivo* verfolgen können. Kleinste Sensoren, die in biologische Organismen eingepflanzt werden, könnten Auskunft über äußere Belastungen und den physiologischen Zustand des Organismus geben. Kleine Sensoren, die frühe Anzeichen einer Erkrankung, z.B. Krebs oder Herzinfarkt, erkennen, verfügen ebenfalls über ein hohes Marktpotenzial.

Im Bereich der Arbeits- und Umweltmedizin besteht Bedarf an kleinen Biosensoren, die Schadstoffbelastungen an verschiedensten Orten differenziert messen können bzw. herkömmliche Produkte an Empfindlichkeit und Vielfalt der detektierbaren Substanzen übertreffen. Nanobiosysteme erlauben es, solche Verbesserungen zu erzielen.

### *Wirkstoffe*

Es besteht ein erheblicher Bedarf an Vehikeln, die biologische Wirkstoffe – vor allem Medikamente – effizient zu ihrem Ziel transportieren und vielfach auch einen Schutzmantel bilden. Nanopartikel können auf Grund ihrer Größe biologische Barrieren, wie z.B. Zellmembranen, verhältnismäßig leicht durchdringen und stellen daher geeignete Transportsysteme für Wirkstoffmoleküle dar. Nanopartikel lassen sich nicht nur zum Transport und Schutz biologischer Wirkstoffe einsetzen, sondern sind auch geeignet, solche Wirkstoffe über Zeiträume bis zu mehreren Monaten dosiert freizusetzen. Insbesondere wird an Vehikeln gearbeitet, die in der Lage sind, auf körpereigene Signale zu reagieren. In der Medizin besteht großer Bedarf an Dosiersystemen, die bioaktive Wirkstoffe solchermaßen kontrolliert abgeben, für Patienten und Behandelnde gut zu handhaben sind und ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen.

Zurzeit werden solche biologische Dosiersysteme entwickelt. Schilddrüsenzellen oder Inselzellen der Bauchspeicheldrüse beispielsweise werden heute bereits in teildurchlässige Hüllen verkapselt implantiert. Im Körper der so behandelten Patienten produzieren sie die zuvor fehlenden Hormone.

Eine wesentliche Ergänzung bzw. Verbesserung dieser Therapieansätze könnten sog. nanobasierte Mikropumpen darstellen. Ende 2004 soll eine kleine und für Patienten komfortable Mikropumpe auf den Markt gelangen, die Insulin verabreicht. Die Verbindung dieser Pumpe mit einem Biochip, der kontinuierlich den Blutzuckerspiegel überwacht, wird geprüft. Intensiv wird zudem auch an implantierbaren Chemotherapiesystemen im Nanomaßstab geforscht.

### *Verfahren, Materialien und Instrumente*

An der Erforschung und Entwicklung von biomedizinischen Nanomaschinen wird international gearbeitet. Aktuell wird unter anderem an Motoren geforscht, die aus DNA-Molekülen sowie aus Aktin und Myosin bestehen. Bisher handelt es sich dabei überwiegend noch um reine Grundlagenforschung. Als in absehbarer Zeit realisierbare Nanomaschinen werden sehr kleine, bewegliche Endoskope eingestuft, die mit zusätzlichen Instrumenten, z.B. Greifarmen im Nanomaßstab, ausgestattet werden könnten. Für solche Geräte ist eine starke Nachfrage abzusehen.

Ein weiteres aktuelles Anwendungsfeld stellt auch die magnetfeldinduzierte Behandlung mit Wärme dar. In der Berliner Charité wird hierzu derzeit ein Projekt zur Zerstörung von Tumorzellen mit Hilfe magnetischer Nanopartikel durchgeführt. Bei einem weiteren Verfahren, an dem zurzeit geforscht wird, werden Nanostrukturen, die selektiv an Krebszellen binden, mit Radionukliden befrachtet. Tumorzellen sollen dadurch zerstört werden, ohne dass das umliegende Gewebe erheblichen Schaden erleidet.

Mit Hilfe der Nanotechnologie lassen sich Beschichtungen für medizinische Geräte herstellen, die antimikrobiell wirken, kaum verschmutzen oder leicht zu reinigen sind und Korrosion bei der Sterilisation oder Desinfektion verhindern. Mittelfristig können Nanomaterialien als Transplantate, z.B. als „künstliche Haut“, zum Einsatz kommen oder den Aufbau solcher Transplantate aus Zellkulturen unterstützen. Auch Synergien zwischen Stammzelltherapie und Nanotechnologie sind denkbar, indem Nanotechnikmaterialien ein Gerüst bilden, das den Aufbau neuen Gewebes mit Hilfe von Stammzellen ermöglicht. Durch Verfahren der Nanotechnologie könnte die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Zudem wird erwartet, dass Nanoimplantate länger

im Körper funktionsfähig bleiben als bisher übliche. Ein weiteres Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate dar, die Schäden an Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren bzw. die Leistungsfähigkeit dieser Organe erhöhen. International wird bereits intensiv an Mikroimplantaten gearbeitet, die insbesondere die Funktionsfähigkeit von Sehsinn und Gehör wieder herstellen sollen.

#### *Weitere Anwendungen der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften*

Mit Hilfe der Nanobiotechnologie könnten die Qualität von Lebensmitteln verbessert, die Bioverfügbarkeit von wichtigen Inhaltsstoffen erhöht sowie optische Eigenschaften, Geschmack und Konsistenz verändert werden. Es sind nanotechnologisch optimierte Herstellungsverfahren und Verpackungsmaterialien im Gespräch, die den Zustand der verpackten Lebensmittel überwachen und beispielsweise eine Warnung zeigen, wenn die Kühlkette unterbrochen wurde oder ein Nahrungsmittel verdorben ist. Nachfrage ist auch bei geeigneten nanoanalytischen Verfahren zu erwarten. So werden beispielsweise nanoanalytische Methoden unter Verwendung von DNA-Chips für die Untersuchung von Lebensmitteln auf gentechnisch veränderte Bestandteile entwickelt.

Mit Hilfe der Nanotechnologie werden im Bereich der Kosmetik vor allem bestehende Produkte weiter entwickelt. Eine wichtige Funktion in der Kosmetik übernehmen Vehikel, die Wirkstoffe (z.B. Vitamine oder UV-Filter) zu ihrem Wirkungsort, etwa in tiefere Hautschichten, transportieren. Wirkstoffe sollen mit Hilfe von Nanopartikeln besser auf und in der Haut verteilt und effektiver abgegeben werden. Titan- oder Zinkoxidpartikel im Nanomaßstab werden beispielsweise in Sonnenschutzmitteln eingesetzt. Sonnenschutzprodukte mit Nanopartikeln zeigen nach heutigem Kenntnisstand höhere Wirksamkeit und bessere Hautverträglichkeit als konventionelle Produkte. Es ist daher zu erwarten, dass Nanopartikel künftig zunehmend in Kosmetika eingesetzt werden.

#### **Visionen**

Nanotechnologie ist ein hochgradig visionäres Thema. Sowohl Langfrist-Visionen mit einem Zeithorizont von mehr als 15 Jahren als auch kurzfristige Visionen, die besonders im Umfeld der US-amerikanischen „National Nanotechnology Initiative (NNI)“ entwickelt werden, prägen im Guten wie im Schlechten das Bild der Technologie in der interessierten Öffentlichkeit.

Zu unterscheiden sind zumindest zwei visionäre Diskurse: zum einen der in Forschungspolitik, Wissenschaft und Wirtschaft stattfindende Diskurs über die Potenziale der Nanotechnologie, in dem es vor allem um relativ realistisch anmutende, kurzfristige Visionen geht, zum anderen der stark futuristische – und überwiegend sehr optimistische – Diskurs im Umfeld des von K. Eric Drexler gegründeten „Foresight Institute“. Dessen Grundannahmen zur zukünftigen Entwicklung werden auch von futuristischen Pessimisten wie Bill Joy geteilt.

Die Visionen Drexlers, Joys und anderer extremer Futuristen – aber auch einige der im Umfeld der „NNI“ entwickelten – beruhen zum großen Teil auf Annahmen zum zukünftigen Zusammenwirken mehrerer neuer Technologien. Gerade durch solche Visionen zur Konvergenz verschiedener Technologien werden Hoffnungen auf umfassende und tiefgreifende Veränderungen der Bedingungen menschlicher Existenz beflügelt.

Der technologische Futurismus malt eine Zukunft aus, in der alte Menschheitsträume (Überwindung von Armut, Mangel, Tod etc.) wahr werden. Pessimistische Futuristen warnen jedoch vor möglichen großen Gefahren. Eine besonders bedrohliche Vision ist dabei die Vorstellung einer Vernichtung allen Lebens auf der Erde durch selbstreplizierende Nano-Roboter („gray goo problem“). Diese bereits in den achtziger Jahren von Drexler popularisierte Zukunftstechnologie spielt auch in Visionen einer zukünftigen Welt allgemeinen Wohlstands eine zentrale Rolle. Viele Wissenschaftler betrachten solche Visionen zu selbstreplizierenden Nano-Robotern mit großer Skepsis. Die Skepsis gegenüber dem Futurismus von Autoren wie Drexler, Joy und Ray Kurzweil sollte aber nicht den Blick darauf verstellen, dass auch im Umfeld der „NNI“ eine Reihe sehr weit reichender optimistischer Visionen entwickelt wurde.

Die Begeisterung, die optimistische futuristische Visionen wecken können, wird in den USA bewusst als Mittel zur Förderung der Technologieentwicklung eingesetzt. Eine solche Strategie des „hope and hype“ ist aber immer eine Gratwanderung. Neben positiven Effekten dieser Strategie (wie z.B. Anreize für den wissenschaftlichen Nachwuchs oder das Wecken sowie Wachhalten von politischem und wirtschaftlichem Interesse) sind auch negative Konsequenzen denkbar: So besteht zum einen die Gefahr, dass die Erwartungen an Nanotechnologie zu hoch geschraubt und Enttäuschungen dadurch unvermeidlich werden. Zum anderen kann unbeabsichtigter Weise auch die Kehrseite des optimistischen Futurismus – ein mit Weltuntergangsängsten und Schreckensvisionen verbundener pessimistischer Futurismus – popularisiert werden.

Eine kritische Auseinandersetzung mit den Schreckensvisionen, selbst wenn sie deren Popularität zunächst noch vergrößerte, wäre ein wichtiger Beitrag zu

einer rationalen, problemadäquaten Diskussion über Chancen und Risiken der Nanotechnologie. Problematisch ist allerdings, dass eine solche Auseinandersetzung intellektuelle und materielle Ressourcen binden würde, die dann möglicherweise bei der Einschätzung dringlicher erscheinender Probleme der Technikfolgenabschätzung im Bereich Nanotechnologie (wie z.B. den Auswirkungen gesundheitlicher und ökologischer Auswirkungen von Nanopartikeln oder den ethischen Konsequenzen nanotechnologischer Anwendungen in der Medizin) fehlen.

## **Chancen und Risiken der Nanotechnologie**

### *Wirtschaftliche Aspekte*

Mit der Nanotechnologie verbindet sich die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in fast allen Branchen der Wirtschaft. Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch ziemlich in den Anfängen, jedoch hat eine Reihe von Produkten und Verfahren bereits den Weg in den Markt gefunden.

Der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse auf verkaufbare Produkte besteht schon seit Jahren in den Bereichen Elektronikherstellung, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. In den letzten Jahren sind nanotechnologische Erkenntnisse zunehmend auch in die Felder Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin eingeflossen, und dieser Trend wird voraussichtlich weiter anhalten. Bereits heute sind deutliche Einflüsse nanotechnologischer Erkenntnisse auf Milliardenmärkte bei der Pharmakaherstellung, medizinischen Diagnostik, Analytik oder bei chemischen und biologischen Katalysatoroberflächen zu erkennen.

Zu unterscheiden sind die direkten Umsätze mit Nanokomponenten und die Umsätze mit Produkten, in denen Nanotechnologien inkorporiert sind. Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist allerdings – nicht nur in Deutschland – noch sehr lückenhaft, eine allgemein anerkannte breite Datenbasis liegt bisher noch nicht vor.

Eine Studie des Bankhauses Sal. Oppenheim jr & Cie. stellt fest, dass letztlich die Hebelwirkung der neuen Technologie als entscheidend für das Marktvolumen anzusehen ist. Wesentlich seien nicht der direkte Umsatz und die Gewinne, die mit Nanotechnologieprodukten selbst erzielt würden, sondern die vielfältigen Auswirkungen der Technologie in verschiedensten Anwendungsbe-

reichen. Unternehmen, die sich auf Nanotechnologie konzentrieren, seien gezwungen, den schwierigen Übergang von der wissenschaftlichen Forschung zum Massengeschäft zu meistern. Als hilfreich werde sich dabei oft die Entwicklung strategischer Partnerschaften erweisen.

### *Positive Folgen für Gesundheit und Umwelt*

Für die Bereiche Gesundheit und Umwelt werden durch den Einsatz von Nanotechnologien deutliche Entlastungseffekte vermutet bzw. erhofft. Zu den positiven Folgen nanotechnologischer Entwicklungen für die Gesundheit zählen u.a. die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren, erhebliche Erkenntnisfortschritte in den Biowissenschaften und im Verständnis biologischer Prozesse, die Entwicklung neuer und die Optimierung bekannter Medikamente und Agrochemikalien.

Mit Hilfe nanotechnologiebasierter Diagnoseinstrumente können möglicherweise Krankheiten oder Dispositionen für Krankheiten früher als bisher erkannt werden. Durch die Entwicklung der Lab-on-a-Chip-Technologie wird die sich abzeichnende Tendenz hin zu einer individualisierten Medizin weiter gefördert. Bei der Therapie besteht Aussicht, mit Hilfe der Nanotechnologie gezielte und nebenwirkungsfreie Behandlungen zu entwickeln. Die breite Anwendung nanopartikulärer Dosiersysteme könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung führen. Durch Verfahren der Nanotechnologie kann die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Relativierend ist anzumerken, dass mit wenigen Ausnahmen die positiven Auswirkungen von Nanotechnologie auf die menschliche Gesundheit jedoch bisher überwiegend hypothetisch sind.

Entlastungseffekte für die Umwelt können sich durch die Einsparung von stofflichen Ressourcen, die Verringerung des Anfalls von umweltbelastenden Nebenprodukten, die Verbesserung der Effizienz bei der Energieumwandlung, die Verringerung des Energieverbrauchs und die Entfernung umweltbelastender Stoffe aus der Umwelt ergeben.

### *Mögliche negative Folgen für Gesundheit und Umwelt*

Einen Schwerpunkt dieser Diskussion bildet die Frage nach den Auswirkungen einer unkontrollierten Freisetzung von Nanopartikeln. Zum Stand der Forschung über die Gesundheits- und Umweltrelevanz der Nanotechnologien ist derzeit generell festzustellen, dass die vorliegenden Untersuchungsergebnisse

hinsichtlich ihrer Belastbarkeit begrenzt sind. Vermutungen über mögliche negative Folgen der Inhalation von Nanopartikeln basieren bisher im Wesentlichen auf Analogieschlüssen zu Ergebnissen vorliegender Untersuchungen über die Wirkungen ultrafeiner Partikel.

Ultrafeine Partikel können nachweislich chemische Reaktionen im Körper katalysieren. Die Aufnahme ultrafeiner Partikel in Zellen kann Reaktionen des Immunsystems auslösen. In vielen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie treten Nanotubes auf, die als lungengängige Fasern möglicherweise ähnliche gesundheitliche Folgen nach sich ziehen könnten wie Asbestfasern. Nanopartikel können Zellmembranen verhältnismäßig leicht durchdringen und damit neben dem erwünschten auch zu einem unerwünschten Transport von Wirkstoffen über biologische Barrieren führen. Die Pharmakokinetik von Wirkstoffen, die mit Nanopartikeln verabreicht werden, ist heute erst ansatzweise bekannt.

Über Lebensmittel und Kosmetika kommt der menschliche Körper bereits heute vielfach mit Nanopartikeln in Kontakt (z.B. Farbstoffe, UV-Filter), wobei die Grenzen zwischen Medikamenten und Kosmetika zunehmend unscharf werden. Darüber hinaus verändern Fortschritte in der Kosmetik die gesellschaftlichen Ansprüche an das Erscheinungsbild und die körperliche „Perfektion“ von Menschen weiter.

Künstliche Nanostrukturen können z.B. durch Emissionen der Nanoindustrie oder durch Entstehung von Nanopartikeln beim alltäglichen Gebrauch von Nanoprodukten in die Umwelt gelangen. Ihr Ausbreitungsverhalten und ihre Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere potenzielle Langzeitfolgen, sind bisher kaum bekannt. Hier ist insbesondere auf solche Stoffe zu verweisen, die in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes, die als neuartige Materialien einzustufen sind.

Zudem sind unterschiedliche Wirkungen auf die jeweiligen Umweltmedien zu erwarten. In der Luftreinhaltung stützt man sich derzeit auf Aussagen zu ultrafeinen Partikeln, die aus Emissionen des Verkehrs stammen. In Bezug auf Wasser wird von einer hohen Beweglichkeit der Nanopartikel ausgegangen. Abwässer aus Bergwerken beispielsweise enthalten eine vergleichsweise hohe Konzentration an Schwermetallen; Nanopartikel könnten diese Schwermetalle in Fließgewässer verschleppen.

### *Ethische und gesellschaftliche Aspekte*

Bisher wird Nanotechnologie in praktischer Philosophie und Ethik kaum thematisiert, mögliche gesellschaftliche Folgen ihres verstärkten Einsatzes werden



eher selten erforscht. In Forschungspolitik und Wissenschaft besteht jedoch Einigkeit darüber, dass hier mehr Forschungsprojekte, sonstige wissenschaftliche Aktivitäten und forschungspolitische Anstrengungen vonnöten sind. Schon jetzt lassen sich einige grundsätzliche Überlegungen zu ethischen Problemen sowie zu möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf ausgesuchte gesellschaftliche Bereiche anstellen.

In Visionen zur Nanotechnologie tauchen immer wieder Aspekte auf, die die Grenze zwischen dem verwaschen, was Menschen sind, und dem, was sie mit Hilfe technischer Errungenschaften und Anwendungen erschaffen. Solche Aspekte betreffen z.B. die Durchdringung und Veränderung des menschlichen Körpers durch Versuche, seine biologischen Bestandteile durch nanotechnische zu ergänzen bzw. zu ersetzen und ihn mit externen Maschinen oder anderen Körpern bzw. Körperteilen zu vernetzen. Derartige Vorstellungen, aber auch weitere Visionen zur Nanotechnologie, ähneln Visionen zu anderen neuen Technologienentwicklungen oder beziehen sich sogar direkt auf diese. Durch die sich abzeichnende Konvergenz verschiedener Technologien werden nicht nur Hoffnungen auf technische Fortschritte, sondern auch Bedenken in Bezug auf deren Folgen verstärkt. Die weitere Entwicklung der Nanotechnologie sollte daher flankiert werden von kontinuierlicher Forschung zu ethischen und politischen Fragen, die das sich wandelnde Verhältnis von Mensch und Maschine sowie von Natur und Technik betreffen.

Probleme der Verteilung und der gerechten Nutzung der Früchte technischen Fortschritts sind weitere wahrscheinliche gesellschaftliche Folgen des Einsatzes von Nanotechnologie. Sie sind hinsichtlich des politischen Handlungsbedarfs von besonderem Interesse. Fragen der Chancen-Verteilung könnten zumindest in zweierlei Hinsicht dringlich werden: zum einen innerhalb technisch weit entwickelter Gesellschaften, zum anderen mit Blick auf weniger entwickelte Gesellschaften. Befürchtungen in Bezug auf diese beiden Formen eines möglichen „Nano-divide“ basieren auf der Annahme, dass Nanotechnologie sowohl zu neuen und erweiterten Optionen individueller Selbstbestimmung (z.B. im gesundheitlichen Bereich) als auch zu erheblichen Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften beitragen kann. Politische Maßnahmen können Chancengleichheit und eine nachhaltige globale Entwicklung fördern. Weitere politische Aufgaben stellen sich in Bezug auf Schadensvermeidung, z.B. hinsichtlich denkbarer negativer Konsequenzen neuer medizinischer Diagnose- und Überwachungsmöglichkeiten für den Patientendatenschutz.

Ein weiteres Feld, in dem durch Nanotechnologie erhebliche Fortschritte erwartet werden, sind militärische Anwendungen. Zudem könnte ein „Nano-

divide“ zwischen weit und weniger weit entwickelten Staaten sicherheitspolitisch problematische Folgen nach sich ziehen. Die weitere Entwicklung der Nanotechnologie dürfte daher auch erhöhten sicherheitspolitischen Handlungsbedarf mit sich bringen. Zudem besteht (vor allem – aber nicht nur – in den USA) ein erhebliches Interesse an militärischen Nanotechnologie-Anwendungen. Obwohl einige der in der wissenschaftlichen Diskussion auftauchenden möglichen Sicherheitsprobleme (wie z.B. durch selbstreplizierende Nano-Roboter) wenig dringlich erscheinen, dürften – bei weiteren Fortschritten der nanotechnologischen militärischen Forschung und Entwicklung – Forderungen nach sicherheits- und rüstungskontrollpolitischen Maßnahmen in Zukunft häufiger gestellt werden.

### **Handlungsbedarf**

Die Voraussetzungen für die erfolgreiche Weiterentwicklung der Nanotechnologie und die breite wirtschaftliche und gesellschaftliche Nutzung ihrer Potenziale müssen geschaffen bzw. verbessert werden. Hieraus resultiert vielfältiger Klärungs- und Handlungsbedarf. Da sich die Nanotechnologie – insgesamt gesehen – noch in einem relativ frühen Stadium der Entwicklung befindet, kommt den Anforderungen an staatliches Handeln besondere Bedeutung zu.

Die Nanotechnologie muss in der öffentlichen Forschungsförderung ein prioritärer Bereich bleiben, damit die deutsche Forschung ihre derzeit starke internationale Position im Bereich der Nanotechnologie behaupten kann. Das Anwendungspotenzial und der ökonomische und gesellschaftliche Nutzen sollten als Beurteilungskriterien für öffentliche Förderung stärkeres Gewicht erhalten. Die Kompetenzzentren Nanotechnologie könnten eine aktivere und erweiterte Rolle bei der Umsetzung von Ergebnissen nanotechnologischer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten spielen.

Der Stand der Forschung über die potenziellen Umwelt- und Gesundheitswirkungen der Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Verfahren und Produkte ist unbefriedigend. Erhebliche verstärkte Forschungsanstrengungen sind hier dringend erforderlich, da sich aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen Hemmnisse für die Markteinführung von Nanotechnologien ergeben könnten.

Forschung zu gesellschaftlichen und ethischen Aspekten der Entwicklung und verbreiteten Anwendung der Nanotechnologie sollte bereits jetzt initiiert werden. Fragen des Datenschutzes (insbesondere im medizinischen Bereich)

und des Schutzes der Privatsphäre sollten regelmäßig hinsichtlich relevanter nanotechnologischer Neuentwicklungen wissenschaftlich untersucht und öffentlich diskutiert werden.

Die umfassende Information der Öffentlichkeit ist Voraussetzung einer rationalen gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie. Anzustreben wäre eine zentrale Informationsstelle für die breite Öffentlichkeit zum Thema Nanotechnologie. Dabei könnte auf die Informationsangebote der einzelnen Kompetenzzentren und auf andere nationale, europäische und außereuropäische Informationsportale zurückgegriffen werden.

Aus den Fortschritten in der Nanotechnologie – und aus der zunehmenden Konvergenz verschiedener Technologie- und Forschungsbereiche – entstehen neue Anforderungen an die Bildungspolitik. Interdisziplinäre Ansätze in Ausbildung und Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie und verwandten Technologiebereichen müssen kontinuierlich und verstärkt gefördert werden. Sozial- und geisteswissenschaftliche Technikforschung sollte dabei mehr als bisher einbezogen werden. Der nanotechnologische Qualifizierungsbedarf verschiedener Berufsgruppen ist vertieft zu untersuchen und gegebenenfalls durch geeignete Qualifizierungsangebote abzudecken.

Politische Entscheidungen über die Notwendigkeit nanotechnologiespezifischer Regulierungen werden in absehbarer Zeit getroffen werden müssen. Für solche Entscheidungen sind die sachlichen Grundlagen zu schaffen. Dazu gehört – neben einer wesentlich verbesserten Datenbasis zu den Auswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte auf Umwelt und menschliche Gesundheit – eine systematische und umfassende Analyse des derzeitigen für Anwendungen der Nanotechnologie relevanten Rechtsrahmens. Die Einrichtung eines den weiteren Anwendungsprozess der Nanotechnologie begleitenden entscheidungsunterstützenden Monitoring-Programms sollte erwogen werden.



Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des gesellschaftlich-technischen Wandels. Das TAB ist eine organisatorische Einheit des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Forschungszentrums Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft und arbeitet seit 1990 auf der Grundlage eines Vertrages zwischen dem Forschungszentrum und dem Deutschen Bundestag.



**TAB**

Büro für Technikfolgen-Abschätzung  
beim Deutschen Bundestag

---

Neue Schönhauser Str. 10 · 10178 Berlin  
Telefon: 0 30 / 28 49 10  
Telefax: 0 30 / 28 49 11 19  
e-mail: [buero@tab.fzk.de](mailto:buero@tab.fzk.de)  
Internet: [www.tab.fzk.de](http://www.tab.fzk.de)