



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Standortbestimmung**

# Nanotechnologie in Deutschland



**BMBF PUBLIK**



### **Impressum**

#### **Herausgeber**

Bundesministerium  
für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat Öffentlichkeitsarbeit  
53170 Bonn

#### **Bestellungen**

Schriftlich an den Herausgeber  
Postfach 30 02 35  
53182 Bonn

oder telefonisch unter der  
Rufnummer 01805-BMBF02  
bzw. 01805-262302  
Fax: 01805-BMBF03  
bzw. 01805-262303  
0,12 Euro/Min.

E-Mail: [books@bmbf.bund.de](mailto:books@bmbf.bund.de)  
Internet: <http://www.bmbf.de>

#### **Stand**

Mai 2002

Gedruckt auf Recyclingpapier

### **Bildnachweis**

linker Rand oben („Nano“):  
Universität Kiel (Prof. Dr. R. Berndt)  
linker Rand unten (farbige Gefäße):  
Universität Hamburg (Prof. Dr. H. Weller)  
großes Feld, Hintergrund:  
Universität Hamburg (Prof. Dr. R. Wiesendanger)  
großes Feld, oben: TVR Engineering Ltd.  
großes Feld, Mitte: Siemens AG  
großes Feld, unten: BMBF

# Inhalt

<b>Vorwort: Nanotechnologie – ein Innovationsraum.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Forschungspolitischer Rahmen .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Nanotechnologie – Zukunftsperspektiven für Deutschland .....</b>	<b>4</b>
2.1 Was ist Nanotechnologie? .....	4
2.2 Wissenschaftlich-technische Bedeutung der Nanotechnologie.....	6
2.3 Wirtschaftliche Bedeutung, Beitrag zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands .....	8
2.4 Ökologische Bedeutung, Nachhaltigkeit .....	11
2.5 Gesellschaftliche Dimension der Nanotechnologie: Visionen .....	13
<b>3 Nanotechnologieförderung in Deutschland und international .....</b>	<b>15</b>
3.1 Die Förderung der Nanotechnologie in Deutschland .....	15
3.2 Fördermittel in der Europäischen Union.....	19
3.3 Gegenüberstellung mit Fördermitteln in USA und Japan .....	20
<b>4 Nanotechnologie – Vielfalt der Innovationswege.....</b>	<b>22</b>
4.1 Nanoelektronik .....	23
4.2 Nanooptik.....	26
4.3 Nanofabrikation.....	29
4.4 Nanochemie.....	32
4.5 Nanomaterialien.....	33
4.6 Nanobiotechnologie .....	34
4.7 Nanoanalytik .....	36
4.8 Innovations- und Technikanalyse.....	39
<b>5 Kompetenzzentren Nanotechnologie - Innovation durch Vernetzung .....</b>	<b>42</b>
<b>6 Literatur.....</b>	<b>47</b>

## **Vorwort: Nanotechnologie – ein Innovationsraum**

Die Nanowissenschaften sind heute eine der ergiebigsten Quellen neuer und bahnbrechender Entdeckungen. Forscherinnen und Forscher aus Physik, Chemie, Biologie und den Ingenieurwissenschaften finden hier eines der attraktivsten Arbeitsfelder der Zukunft, eine multidisziplinäre, motivierende Herausforderung. Nachwuchswissenschaftler setzen in Doktorarbeiten und Habilitationen zunehmend auf die Nanowissenschaften, und auch aus den Verbundprojekten des BMBF entstehen neue disziplinübergreifende Kooperationsformen ebenso wie vielfältige Karrierechancen.

Die Nanotechnologie wird in immer stärkerem Maße die Technikfelder und Märkte der heutigen Mikrotechnologie besetzen. Doch sie ist mehr als nur die nächste Stufe der Miniaturisierung. Auf der Nanoskala verbinden sich physikalische, chemische und biologische Funktionen. Daraus ergeben sich auch Lösungen für Anwendungen, die die heutige Mikrotechnologie nicht erreicht. Das langfristige Marktpotenzial der Nanotechnologie wird daher als mindestens so hoch wie dasjenige der Mikrotechnologie heute eingeschätzt.

# 1 Forschungspolitischer Rahmen

Ein zentrales Ziel des BMBF ist es, Forschung zu initiieren und zu fördern, die dem Menschen nützt und nachhaltiges Wachstum ermöglicht.

Voraussetzungen zum Erreichen dieses Ziels sind:

- Erkennen und Fördern zukunftsweisender Technologien, die es der Gesellschaft ermöglichen, an der Dynamik der Globalisierung und des mit ihr verbundenen Strukturwandels nachhaltig teilzuhaben. Das sind vor allem Technologien, die neue Arbeitsplätze in neuen Branchen schaffen
- Erkennen und Fördern zukunftsweisender Technologien, die Standort- und Wettbewerbsvorteile für Deutschland erwarten lassen – innovative und „intelligenz- und wissensintensive“ Technologien, die auf den Stärken Deutschlands in der Bildung aufbauen
- Erkennen und Fördern zukunftsweisender Technologien, die zum Erhalt der Gesundheit der Bürgerinnen und Bürger in Vorsorge, Diagnose und Therapie beitragen
- Erkennen und Fördern zukunftsweisender Technologien, die einen Beitrag zu Schutz und Erhaltung der Umwelt liefern
- Erkennen und Fördern zukunftsweisender Technologien, die durch minimierten Ressourcenverbrauch nachhaltiges Wirtschaften und die Bewahrung der Zukunftschancen künftiger Generationen fördern
- fundiertes und frühzeitiges Bewerten der Chancen, die aus neuem Wissen und neuen Technologien entstehen, unter wissenschaftlichen, ethischen, sozialen, rechtlichen, ökonomischen und politischen Aspekten
- Erkennen und Beherrschen etwaiger Risiken

Mittel zum Erreichen dieses Ziels sind:

- effektive Projektförderung insbesondere mittels strategisch angelegter Forschungsk Kooperationen mit Standortbedeutung, sog. „Leuchtturmprojekte“
- Ausbau einer leistungsfähigen Forschungsinfrastruktur durch institutionelle Förderung im Rahmen der DFG, MPG, HGF, FhG und WGL
- Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft, um Forschungsergebnisse rasch in marktfähige Produkte umzusetzen
- frühzeitige Beteiligung kleiner und mittlerer Unternehmen an den Forschungsprogrammen
- Flexibilisierung des deutschen Wissenschafts- und Forschungssystems durch Weiterentwicklung seiner Strukturen, um die Wirkung der eingesetzten Forschungsmittel zu maximieren.

Technologien, die diesen Anforderungen umfassend gerecht werden, nennt man Schlüsseltechnologien. Sie versprechen weitreichende Zukunftsvisionen und unmittelbaren Einfluss auf unser Leben, einerseits Chancen für die nächste Generation, andererseits evidente kurz-, mittel- und langfristige Marktchancen. Schlüsseltechnologien in diesem Sinne sind die Informationstechnologie und die Biotechnologie. Daneben beginnt sich die **Nanotechnologie** als eine weitere Schlüsseltechnologie zu etablieren.

## 2 Nanotechnologie – Zukunftsperspektiven für Deutschland

### 2.1 Was ist Nanotechnologie?

Gegenstand der Nanotechnologie ist die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von funktionalen Strukturen, deren Abmessungen im Bereich unter einhundert Nanometer liegen. Ein Nanometer bezeichnet den millionstel Teil eines Millimeters. Der Durchmesser des menschlichen Haars ist im Vergleich dazu fünfzigtausend mal größer.

Begibt man sich auf die Ebene von Atomen und Molekülen, so entspricht ein Nanometer beispielsweise der Länge einer Kette aus 5 bis 10 Atomen oder dem Durchmesser eines einfachen organischen Moleküls. Einem Atom oder einem Molekül kommen jedoch uns vertraute physikalische Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit, Magnetismus, Farbe, mechanische Härte oder ein bestimmter Schmelzpunkt noch nicht zu. Ein Stecknadelkopf hingegen besitzt bereits alle genannten physikalischen Eigenschaften und unterscheidet sich in dieser Hinsicht nicht von einem tonnenschweren Objekt aus Stahl. Nanotechnologie spielt sich also in einem Übergangsbereich zwischen individuellen Atomen oder Molekülen einerseits und größeren Ensembles von Atomen und Molekülen andererseits ab. In diesem Bereich treten Phänomene auf, die man an makroskopischen Gegenständen nicht beobachtet.

Diese neuen Eigenschaften werden zum einen bedingt durch die enorm großen Oberflächen, die nanoskalige Objekte im Vergleich zu ihrem Volumen besitzen. Oberflächenmoleküle sind besonders reaktiv und reagieren mit ihrer Umgebung heftig, teilweise spontan (z.B. Mehlstaubexplosion).

Beispiel:

Baut man aus einfachen Molekülen einen Würfel mit einer Kantenlänge von 10 Molekülen, so hat dieser Würfel eine Kantenlänge von ca. 10 Nanometer und besteht aus insgesamt 1000 Molekülen. 488 davon (49%) befinden sich an der Oberfläche und können mit ihrer Umgebung reagieren. Baut man aus den gleichen Molekülen einen Würfel mit einer Kantenlänge von 1 Mikrometer (1 tausendstel Millimeter), d.h. immer noch 50 mal kleiner als der Durchmesser des menschlichen Haars, besteht der Würfel aus 1 Milliarde Molekülen. Davon befinden sich knapp 6 Millionen (0,6%) an der Oberfläche, der Rest der Moleküle (99,4%) im Inneren des Würfels. Es treten im Gegensatz zu 49% beim Nanowürfel nur 0,6% der Gesamtzahl der Moleküle in direkten Kontakt mit der Umgebung.

Im Bereich der Nanodimensionen werden zudem Effekte der Quantenmechanik sichtbar, die ebenfalls bei größeren Objekten nicht zu beobachten sind. Elektronen, die sich in Festkörpern nahezu ungehindert im gesamten Volumen bewegen können, werden durch die engen Di-

mensionen von Nanoobjekten in ihrer Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt. Nähert sich diese einem kritischen Wert, der DeBroglie-Wellenlänge, werden die Elektronen in diskrete Zustände gezwungen. Nanopartikel ändern dann ihre Farbe in Abhängigkeit von ihrer Größe. Oder: Mit Hilfe von sogenannten Quantenpunkten können Laser konstruiert werden, deren Wellenlänge („Farbe“) durch die Größe der Quantenpunkte in gewünschter Weise eingestellt werden kann. Nanosysteme können in einer oder mehreren Dimensionen nanoskalig strukturiert sein:

- Eindimensional nanostrukturierte Systeme, z.B. ultradünne Schichten
- Zweidimensional nanostrukturierte Systeme, z.B. Nanoleitungen, Quantendrähte
- Dreidimensional nanostrukturierte Systeme, z.B. Quantenpunkte, Nanopulver, funktionale supramolekulare Systeme.

Der entscheidende Durchbruch zur Nanotechnologie geschah in den 80er Jahren mit der Entdeckung des Rastertunnelmikroskops, für die der deutsche Wissenschaftler Binnig und der Schweizer Wissenschaftler Rohrer 1986 den Nobelpreis erhielten. Mit diesem Mikroskop gelang es erstmals an bestimmten Materialien, atomare Strukturen sichtbar zu machen. Mit der nachfolgenden Entwicklung des Rasterkraftmikroskops wurde dessen Einsatzbereich wesentlich erweitert.

Die Nanotechnologie will jedoch nicht nur die Prinzipien, die zur Ausbildung neuartiger Eigenschaften führen, verstehen, sondern vor allem dieses Wissen in technischen Systemen umsetzen. Inzwischen sind weitere Varianten des Rastertunnelmikroskops entwickelt worden, mit denen man einzelne Atome sogar „anfassen“ und sie zu künstlichen Strukturen zusammenbauen kann. Das besondere Potenzial der Nanotechnologie liegt in der Kombination eines **Top-Down-Ansatzes** (durch fortschreitende Miniaturisierung) mit einem **Bottom-Up-Ansatz**. Die kontrollierbare Manipulation von Atomen und Molekülen auf der Nanoskala ist dabei das entscheidend Neue, das die Nanotechnologie kennzeichnet. Sie wird es in zunehmendem Maße erlauben, funktionale Nanostrukturen Atom für Atom aufzubauen und daraus Materialien und Bauteile mit bislang unbekanntem Eigenschaften zu erzeugen.

Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie, die in nahezu alle Bereiche der Naturwissenschaft und Technik eindringen wird. Auf der Nanometerskala verschwimmen die klassischen Grenzen zwischen wissenschaftlichen Disziplinen. Forschung an den Schnittstellen läßt besonders reichhaltigen Erkenntnisfortschritt erwarten. Daraus ergibt sich als Herausforderung für Biologen, Physiker und Chemiker, mit Materialforschern, Ingenieuren, Elektronikern und Medizinforschern interdisziplinär zu planen und zusammenzuarbeiten.

## **2.2 Wissenschaftlich-technische Bedeutung der Nanotechnologie**

Das Vordringen in den Nanokosmos eröffnet Chancen, die elementaren Bauprinzipien der Natur, wie aus Atomen und Molekülen physikalische, chemische und biologische Strukturen und Objekte entstehen, von Grund auf zu verstehen und zu nutzen. Auf der Nanometerskala laufen viele Prozesse ab, welche die in der makroskopischen Welt sichtbaren Abläufe verursachen. Obwohl wir mit den makroskopischen Auswirkungen dieser Prozesse recht gut vertraut sind, werfen die nanoskopischen Grundlagen immer noch eine Unzahl von Fragen auf.

Das Verhalten von Atomen und Molekülen wird bestimmt durch quantenmechanische Gesetzmäßigkeiten. Noch heute, 100 Jahre nach der Formulierung der ersten quantenmechanischen Theorien, wird daran wissenschaftlich gearbeitet, wie diese eigentümlich anmutenden Gesetzmäßigkeiten zu interpretieren sind. Gerade der Übergang vom quantenmechanischen Verhalten zu den uns vertrauten Phänomenen der Makrowelt stellt nach wie vor eine der interessantesten Fragestellungen in der Physik dar.

Neue makroskopische Eigenschaften können einem Material bekannter Zusammensetzung insbesondere dann entlockt werden, wenn man das Arrangement der Grundelemente auf der Nanoskala verändert. Neue Materialien auf Basis kompakterer Nanopartikel, nanoskopischer Schichtsysteme oder nanoporöser Netzwerke dokumentieren diesen Ansatz eindrucksvoll. Nach wie vor stützt sich dieser Zugang zu neuen Materialien weitgehend auf empirische Studien. Dabei ist für die technische Anwendung insbesondere das Design eines neuen Materials nach Vorgabe der gewünschten makroskopischen Eigenschaften von größtem Interesse. Diese Vorgehensweise ist heute nur sehr eingeschränkt möglich und stellt eines der ambitionierten Ziele der Nanotechnologie dar.

Die Natur und die Evolution zeigen uns, dass aus den einfachsten Materialien wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefel, Eisen und einigen anderen chemischen Elementen, die alle im Überfluss auf der Erde vorhanden sind, sowohl einfache als auch äußerst komplexe Lebewesen entstehen können; Systeme, die sich selbst vermehren, selbst erhalten und selbst reparieren können. Von einem Verständnis dieser Vorgänge sind wir jedoch noch weit entfernt.

Ein Ziel der Nanowissenschaften ist, die Prinzipien der Selbstorganisation, wie sie von der Natur demonstriert werden, zu erforschen. Selbstorganisation findet nicht nur im Bereich der belebten Natur statt, sondern ebenso im Bereich der unbelebten Natur. Beispielsweise ordnen sich Kohlenstoffatome je nach äußeren Bedingungen zu unterschiedlichen Strukturen an wie

Graphit, Diamant oder zu Nanoröhren. Quantenpunkte sind kleine, pyramidenförmige Gebilde, die in ihrem 100 Quadratnanometer großen und fünf Nanometer hohen Volumen nur einige tausend Atome beherbergen. Etwa 100 Milliarden solcher Pyramiden lassen sich auf einer Fläche von einem Quadratzentimeter unterbringen. Ihre Herstellung und regelmäßige Anordnung übernimmt – unter geeigneten Randbedingungen – in Sekundenschnelle die Natur. Quantenpunkte sind z.B. die Grundlage neuartiger Lasersysteme.

Selbstorganisation eröffnet einen Weg, auf künstlichem Wege konstruierte molekulare Bausteine zur Massenproduktion anzuregen, so dass nahezu jedes gewünschte Material – vom Polymer bis zum elektronischen Schaltkreis – „von selbst wächst“.

Das umfassende Verständnis nanoskaliger Systeme befriedigt also nicht nur die wissenschaftliche Neugier, sondern es erlaubt auch, die Prinzipien der Natur auf technische Systeme zu übertragen und zur Grundlage neuer Anwendungen zu machen. Die Nanotechnologie bringt die Abkehr von dem bisherigen Prinzip, natürliche Rohmaterialien - seien sie biologischen oder geologischen Ursprungs - solange umzuarbeiten, bis das gewünschte Endprodukt vorliegt. Die Möglichkeit, ein Objekt mit spezifischen Eigenschaften herzustellen, soll im Idealfalle vielmehr nur noch davon abhängen, ob die physikalischen Gesetze den angestrebten Endzustand erlauben oder nicht.

Die Nanowissenschaften sind heute noch weit von diesem Ziel entfernt. Noch sind die notwendigen Kenntnisse und Theorien erst in Ansätzen vorhanden. Ebenso ist wenig über die Energiebilanzen solcher elementaren Materiewandlungen bekannt. Hier könnte es sich erweisen, dass theoretisch vielversprechende Wege später in der Praxis nicht gangbar sind. Gerade vor diesem Hintergrund ist die Untersuchung biologischer Systeme besonders wichtig, denn schließlich untermauern komplexe Systeme wie der Mensch eindrucksvoll, dass es grundsätzlich möglich ist, durch die geschickte Anordnung nano- und mikroskopischer Grundelemente erstaunliche Eigenschaften und Funktionalitäten auf der Makroskala zu erzeugen.

### **2.3 *Wirtschaftliche Bedeutung, Beitrag zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands***

“Kleiner, schneller, leistungsfähiger“ sind für viele Industriebereiche zunehmend wichtiger werdende Markenkennzeichen und für die internationale Wettbewerbsfähigkeit von strategischer Bedeutung. Als Perspektive werden Arbeitsplätze zukünftig maßgeblich in solchen High-Tech-Branchen erwartet, in denen eine langfristig angelegte Verknüpfung von Forschungspotenzialen mit den Möglichkeiten der produzierenden Wirtschaft vorliegt. Konkurrenzfähigkeit gegenüber Niedriglohnländern ist somit in zunehmendem Maße durch die Faktoren Technologie und Innovation bestimmt. Man erwartet durch die Nanotechnologie einen deutlichen Einfluss auf den Arbeitsmarkt des 21. Jahrhunderts.

Erkenntnisse aus der Nanotechnologie werden eine vielfältige Produktpalette hinsichtlich dieser geforderten Kriterien in etablierten Anwendungsfeldern hervorbringen, jedoch sicherlich auch für heute noch nicht berücksichtigte technologische Überraschungen gut sein. Deutschland ist auf dem Gebiet der Nanowissenschaften gegenüber der internationalen Konkurrenz gut positioniert. In einem offenen Rennen um noch nicht verteilte Märkte ergeben sich daher in der Nanotechnologie Wettbewerbsperspektiven bei neu einzurichtenden Produktionsstätten am Standort Deutschland. Jedoch auch in etablierten Technikfeldern (z.B. im Bereich der Synthesechemie) oder derzeit im Wachsen befindlichen Bereichen (z.B. Biotechnologie) bieten Beiträge der Nanotechnologie Chancen der Standortsicherung. In diesem Entstehungsprozess werden Industriefirmen z.T. auch interdisziplinäre bzw. multinationale Kooperationen eingehen müssen. Die Nanotechnologie ist nicht nur als Ergänzung und zunehmende Substitution der Mikrotechnologien für die High-tech-Branchen wichtig. Sie wird gerade auch die exportstarken Bereiche Deutschlands in den mittleren Technologien (Fahrzeug- und Anlagenbau, Elektrotechnik und Chemie) stärken. Nanotechnologische Anwendungen fließen sogar teilweise auch in Low-Tech-Produkte ein: Farben und Kosmetik sind Beispiele dafür.

#### ***Produkte der Zukunft***

Die Randbedingungen für eine erfolgreiche Produktentwicklung werden in vielen Fällen durch die Nachfrage nach extremen Einsparungen bei Gewicht, Volumen, Rohstoff- und Energieverbrauch und nach Schnelligkeit sowohl bei der Produktherstellung als auch bei der Prozessdurchführung bestimmt. Diese Kriterien sind Triebfedern für fortgesetzte technologische Entwicklungen mit Durchbruchschancen für nachfolgenden wirtschaftlichen Erfolg. Das Besondere an der Nanotechnologie ist, dass sie im Gegensatz zu anderen Hochtechnologien häufig viele Kriterien gleichzeitig erfüllt, und dies in überragender Weise. Sich daraus erge-

bende langfristig markträchtige Produktperspektiven und Anwendungsoptionen sind beispielsweise:

- langzeitstabile Minidatenspeicher mit der Kapazität der Deutschen Bibliothek
- PC's mit der Leistungsfähigkeit eines heutigen Rechenzentrums
- CD's, auf denen alle klassischen Musikwerke abrufbar sind
- Mini-Chips, auf denen Spielfilme mit 1000 Stunden Videozeit gespeichert sind
- nm-Vielschichtstapel für Leucht- und Laserdioden in Multimediasystemen (CD, DVD) oder als energiesparende Beleuchtung (Ampeln, Rückfahrscheinwerfer)
- neuartige preiswerte Solarzellen, die sich das Prinzip der natürlichen Photosynthese zunutze machen
- effiziente Wasserstoffspeicher für die regenerative Energiewirtschaft
- perfekt selektierende Sensoren für Umweltgifte, Lebensmittelüberwachung, Kontrolle von Körperfunktionen
- Diagnostikchips zur einfach handhabbaren medizinischen Früherkennung zuhause.
- langzeitdosierbare Pharmaka und Wirkstoffe für die orale Einnahme
- Hautersatzmaterialien und Folien für inneren Wundverschluss
- Lokale thermische Krebstherapie mit Hilfe magnetischer Nanoteilchen
- rostfreie Leichtbaumaterialien mit hoher mechanischer Festigkeit und unübertroffener Temperaturresistenz
- wärmeisolierende und schmutzabweisende Fensterflächen
- leichte Kunststoff-Autoscheiben mit kratzfester und hitzereflektierender Eigenschaft
- Glasherstellung mit nichttoxischer dekorativer Beschichtung
- photokatalytische Beschichtungen auf Sanitärkeramik für antibakterielle Badezimmer und Toiletten
- selektive Katalysatoren mit hochporöser Oberfläche und optimierter Reaktionsführung

### ***Marktpotenzial von durch Nanotechnologie beeinflussten Produkten***

Obwohl die Nanotechnologie weit in die Zukunft weist, wird ihr bereits heute ein Einfluss auf existierende Produktumsätze in Milliardenhöhe pro Jahr zugesprochen. Eine vom BMBF Ende der 90er Jahre in Auftrag gegebene Untersuchung über die Marktchancen der Nanotechnologie [1] schätzte das Marktvolumen von auf nanotechnologischen Erkenntnissen beruhenden Produkten bereits für das Jahr 2001 auf mindestens 100 Mrd. DM. Berücksichtigt wurden dabei solche Produkte, welche nach Expertenmeinung eine hohe industrielle Bedeutung besitzen und durch nanotechnologische Herstellverfahren oder Kontrollmöglichkeiten einen dominanten wettbewerbsbestimmenden Einfluss erhalten.

Generell konnte bei der Recherche festgestellt werden, dass in den wenigsten Bereichen ein exklusiver Nanotechnologie-Markt besteht. Vielmehr bewirkt der Einfluss nanotechnologischer Systembausteine eine Verbesserung bestehender Produkte. Oftmals sind es jedoch spezielle einzelne Komponenten in einem System, die den Markterfolg garantieren. Die kleinste am Markt verkaufbare Einheit ist das Gesamtsystem und meistens ist nur für dieses der Marktwert zu beziffern. Beispielsweise sind die Leseköpfe auf Basis des im Forschungszentrum Jülich entdeckten Giant Magnetoresistance-Effekt (GMR) bereits heute die Schlüsselkomponenten im auf 34 Mrd. Dollar Jahresumsatz geschätzten Weltmarkt für Computerfestplatten.

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 zukünftige Milliardenmärkte bei der Pharmakaherstellung, der medizinischen Diagnostik, Analytik oder bei chemischen und biologischen Katalysatoroberflächen zu erkennen. Speziell in den Bereichen Pharmaka-Screening, Biochips und bei der analytischen Unterstützung industrieller Entwicklungen besteht bereits ein deutlich wachsendes Industrieinteresse.

Neben dem Entstehen von Produktinnovationen werden durch nanotechnologische Erkenntnisse auch Einsparpotenziale, wie die Verminderung von Durchlaufzeiten, oder die Reduktion von Ressourcen- oder Energieverbrauch aktiviert.

Im Bereich bestehender Produkte, wo durch Nanotechnologie ein Verdrängungswettbewerb erzeugt wird, können Marktzahlen recht verlässlich abgeleitet werden. Wesentlich schwieriger gestaltet sich der Versuch, diejenigen Technologien bezüglich ihres Marktes abzuschätzen die in Folge eines „bottom up“-Ansatzes völlig neu entstehen. Obwohl es bereits erste Beispiele für solche Technologien gibt, sind gesicherte Schätzungen zu Marktzahlen in diesem Bereich derzeit kaum möglich. Einige aktuelle Studien aus der Finanzwelt zeigen aber, dass auf Seiten privater Investoren die Nanotechnologie auch als eine Schlüsseltechnologie eingeschätzt wird [6, 8, 9, 10].

## **2.4 Ökologische Bedeutung, Nachhaltigkeit**

Ein wesentliches Merkmal der Nanotechnologie ist der Grundgedanke, bestimmte, von der technischen Anwendung geforderte Funktionalitäten mit einem Minimum an Material zu realisieren. Aus diesem Grund ist die Nanotechnologie von ihrem Konzept her zunächst als prinzipbedingt ressourcenschonend und auch energiesparend einzustufen.

Beispielweise ließen sich mit extrem feinen und gleichmäßig großen nanokristallinen Pulvern Bauteile herstellen, welche stärkeren mechanischen und thermischen Belastungen trotz kleinerer Materialmengen standhalten, hart und trotzdem flexibel sind und teilweise selten vorkommende Rohstoffe ersetzen können. Auch neue Fertigungsprozesse bei wesentlich niedrigeren Temperaturen sind möglich, so dass zusätzlich der Energieaufwand bei der Bauteilherstellung deutlich minimiert werden kann. Mit Nanopulvern ergeben sich auch Perspektiven für die Herstellung neuartiger photovoltaischer Zellen mit einfacherem Aufbau als bei der Siliziumtechnologie.

Nachhaltiges und ökologisches Potenzial bietet auch die Optimierung von Katalysatoroberflächen, wodurch energie- und ressourcenschonende Herstellverfahren in der Chemie ermöglicht werden bei deutlichen ökonomischen Vorteilen.

Ökologische Aspekte eröffnen sich weiterhin durch den Einsatz von Wärmestrahlungsreflektoren für klimatisierte Räume, z.B. auf Fensterscheiben oder dem Dach von Autos. Diese bestehen aus kleinsten Teilchen, welche in Abhängigkeit ihrer Größe bestimmte Lichtwellenlängen reflektieren oder durchlassen. Faszinierende Eigenschaften und Anwendungen bieten auch Aerogele, hochporöse nanostrukturierte Materialien. Sie finden Anwendung als transparente Dämmstoffe in der Solararchitektur oder als FCKW-freie thermische Superisolationen.

Korrosion durch lokalen Lochfraß oder Spaltkorrosion ist ein immenses Problem bei der Langzeitstabilität von Stahlbetonbauten, Maschinen in aggressiver Umgebung, Rohrleitungen für reaktive Produkte oder auch Autoteilen. Dort, wo Material durch noch unverstandene Vorgänge beschädigt oder zerstört wird, kann die Beobachtung im atomaren oder molekularen Maßstab Aufschluss über die Schadensentstehung geben. Nur mit diesen elementaren Kenntnissen erhält man die Möglichkeit, entsprechende Passivierungsüberzüge maßzuschneidern oder Materialien mit hoher Beständigkeit zu entwickeln. Durch Korrosions- und Tribologieforschung auf der Nanoskala und einer darauf aufbauenden Produktverbesserung ließen sich volkswirtschaftliche Schäden in beträchtlichem Umfang vermeiden.

Da ökologische Mechanismen im ökonomischen Zusammenhang aber kaum zuverlässig vorhergesagt werden können, ist eine abschließende Bewertung hinsichtlich der Nachhaltigkeit der Nanotechnologie nur sehr eingeschränkt möglich. Gleiche Schwierigkeiten gelten jedoch für fast alle neuen Technologien. Nachhaltigkeit kann daher nicht per se als Eigenschaft einer Technologie angesehen, sondern sie muß im Kontext mit der Anwendung von Technologien betrachtet werden. Tendenziell lässt sich jedoch erkennen, dass die Nanotechnologie eine Anzahl neuer, sehr wirkungsvoller Instrumente zur Unterstützung des nachhaltigen Umgangs mit unserer Umwelt verfügbar machen wird.

In analoger Weise sind die rein ökologischen Aspekte der Nanotechnologie zu beurteilen. Gegenstand nanotechnologischer Untersuchungen und Anwendungen können sowohl umweltverträgliche wie auch belastende oder gar toxische Substanzen sein. Daher kann der Nanotechnologie ebenso wie anderen Technologien eine intrinsisch ökologische Eigenschaft nicht zugesprochen werden. Gleichwohl stellt sie, wie viele moderne Technologien, neue Anwendungen zur Verfügung, deren Nutzung einen wichtigen Beitrag zum schonenden Umgang mit unserer Umwelt liefern kann.

## **2.5 Gesellschaftliche Dimension der Nanotechnologie: Visionen**

Die gesellschaftliche Dimension der Nanotechnologie ergibt sich aus der Vielzahl der auf ihr basierenden neuen und verbesserten Anwendungen. Diese eröffnen der Gesellschaft neue Perspektiven der Lebensführung, verbesserte Kommunikation, Mobilität, und medizinische Versorgung. Die Nanotechnologie markiert einen weiteren Schritt beim Übergang vom Zeitalter der großen Maschinen hin zu den virtuosen, hocheffizienten Systemen, wie sie uns als Ergebnis der Evolution in Form der so vielfältigen Tier- und Pflanzenwelt schon lange in eindrucksvoller Weise demonstriert werden.

Auch wird der Wunsch nach Individualität bei technischen Fragestellungen zukünftig stärker in den Vordergrund treten. Dies äußert sich u.a. darin, dass unsere individuelle Umgebung in diesem Jahrhundert intelligent sein wird. Die intelligente, auf persönliche Bedürfnisse abgestimmte Informationsbereitstellung beginnt in unserer häuslichen Umgebung in der virtuellen Bibliothek, in der wir den Weltliteraturbestand durchstöbern können. Mit Hilfe tragbarer, ultraschneller Rechnersysteme werden wir in virtuellen Welten durch Einkaufspassagen schlendern, Feriendomizile vorerleben, Immobilienobjekte testen oder Abenteuerreisen durchführen. Unser intelligentes Badezimmer wird allmorgendlich via sensorischer drahtloser Erfassung unserer Körperfunktionen einen Gesundheits-Check durchführen und die notwendigen Präventivmaßnahmen gegen sich ankündigende Erkrankungen einleiten. Unsere Lebensmittelversorgung wird gekoppelt sein mit der elektronischen Kontrolle des Haushaltsvorrats und der sensorischen Erfassung der Lebensmittelfrische. Innovationen bei der Hausfassade sorgen für ein besseres Wohnklima und ermöglichen zudem eine dezentrale, umweltschonende Energieversorgung. Die Verkehrssysteme der Zukunft werden ebenfalls auf unsere persönlichen Bedürfnisse abgestimmt sein - vom Autodesign über eine persönliche Routenplanung und -information bis zur unfallfreien Kontrolle unseres Fahrverhaltens. Wir werden an jedem Ort der Erde Informationen abrufen und senden können, erdumspannende Kommunikation wird möglich sein, und interkontinentale Diskussionsteilnahmen ohne streßbehaftetes Reisen wird durch tragbare Sende- und Empfangssysteme realisierbar. Zukünftige Erkenntnisse aus den Nanotechnologieforschung werden uns dieser Welt näherbringen.

Im Bereich der Lebenswissenschaften ist bereits heute der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse in den Bereichen Sensorik, biokompatible und biofunktionalisierte Oberflächen, Wirkstoffträgersysteme, biologische Membranen für die Nanofiltration, sowie DNA- und Protein-Strukturbestimmung festzustellen. Speziell den DNA-, Protein- und Lab-on-a-chip-Systemen wird für die Zukunft ein Multimilliardenmarkt zugesprochen. Nanotechniken begin-

nen, durch neue Nachweisverfahren, welche selektiver, empfindlicher und voraussichtlich auch preiswerter als herkömmliche Methoden sind, in diesen Markt einzudringen. Lassen sich solche Systeme präventivmedizinisch sinnvoll zur Krankheitsfrüherkennung einsetzen, so existiert zum hohen Marktpotenzial auch ein immenses Einsparpotenzial im Gesundheitswesen durch Vermeidung kostenträchtiger Eingriffe.

Eine drastisch verbesserte Frühdiagnose für verschiedene Krankheiten wie etwa Krebs wäre denkbar. Neue nanobiotechnologische Verfahren könnten Krebszellen bereits in einem sehr frühen Stadium registrieren. Zunehmende Bedeutung wird biomedizinischen Therapieformen z.B. unter Einsatz von sogenannten Wirkstofftransportern eingeräumt, mit denen Pharmaka gezielt zum Krankheitsherd im Körper geführt und auch nur von den betroffenen Bereichen aufgenommen werden. Solche Transportsysteme können aus selbstorganisierenden Hohlkörpern (Liposome, Fullerene und andere Käfigmoleküle, Dendrimere) oder durch Ankopplung an Nanopartikel oder virale Partikel hergestellt werden. Ein weiteres Ziel der Nanomedizin ist die Möglichkeit der oralen oder dermalen Aufnahme von Wirkstoffen wie Insulin, Seren, oder vergleichbarer, momentan nur injizierbarer Pharmazeutika, sowie der Aufbau von Langzeitdepots im Körper.

Diese Beispiele sollen nur ansatzweise illustrieren, auf welche vielfältige Weise die Nanotechnologie unser tägliches Leben erleichtern und sicherer machen kann. Dass in der Gesellschaft hierfür entsprechende Bedürfnisse bestehen, kann dabei kaum in Zweifel gezogen werden.

### 3 Nanotechnologieförderung in Deutschland und international

#### 3.1 Die Förderung der Nanotechnologie in Deutschland

##### Projektförderung

Das BMBF hat bereits seit Beginn der 90er Jahre im Rahmen der Programme „Materialforschung“ und „Physikalische Technologien“ Forschungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie gefördert. Schwerpunkte waren zunächst die Herstellung von Nanopulvern, Erzeugung lateraler Strukturen auf Silizium sowie Methodenentwicklung zur Nanoanalytik. Später wurden auch in anderen Programmen, so z.B. im Programm „Lasersforschung“ oder im Programm „Optoelektronik“ Forschungsarbeiten mit Nanobezug gefördert. Heutzutage werden zahlreiche Projekte mit Nanotechnologiebezug durch eine Reihe von Fachprogrammen unterstützt. Einen deutlichen Schub erhielt die Förderung der Nanotechnologie vor allem durch die BMBF-Initiative zur Gründung von Kompetenzzentren der Nanotechnologie (Kapitel 5) im Jahre 1998, die seither eine Bündelung der Kräfte und eine Vernetzung von Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft, Risikokapital u.a. im Bereich der Nanotechnologie erreicht hat. Sie spiegelt sich auch in einer deutlichen Steigerung der Ausgaben des BMBF zur Projektförderung der Nanotechnologie wider:

Nanotechnologieförderung des BMBF(ab 2002 Sollzahlen)	1998	1999	2000	2001	<b>2002</b>	2003
Verbundprojekte	27,0	31,1	32,7	52,0	<b>86,7</b>	110,6
Vernetzung durch Kompetenzzentren	0,6	1,6	2,1	2,1	<b>1,8</b>	1,5
<b>Summe (in Mio Euro)</b>	<b>27,6</b>	<b>32,7</b>	<b>34,8</b>	<b>54,1</b>	<b>88,5</b>	<b>112,1</b>

**Tabelle 1: Die derzeitige BMBF-Förderung der Nanotechnologie ist seit 1998 um 221% angestiegen. Die Steigerung vom Jahr 2000 auf 2002 beträgt 154% und vom Jahr 2001 auf 2002 64%. Geplant ist eine weitere 27%ige Erhöhung der Förderausgaben auf 112,1 Mio Euro in 2003. (Quelle: Datenbanken der Projektträger des BMBF)**

Eine Auflistung der BMBF-Aufwendungen für die Nanotechnologie-Forschung auf die verschiedenen Schwerpunktthemen der BMBF-Förderung ist in Tab. 2 für die Haushaltsjahre 2001 bis 2003 gezeigt.

Nanotechnologieförderung des BMBF	2001	2002	2003
Nanomaterialien	23,5	23,9	29,1
Optische Technologien	12,6	17,0	17,6
Biotechnologie	1,3	8,5	9,6
Nanoelektronik	8,6	27,5	42,0
Kommunikationstechnologien	2,9	4,0	4,0
Produktionstechnologien	0,2	0,6	1,3
Mikrosystemtechnik	5,0	7,0	8,5
<b>Summe (in Mio Euro)</b>	<b>54,1</b>	<b>88,5</b>	<b>112,1</b>

**Tabelle 2: Aufwendungen in der BMBF-Förderung für die Nanotechnologie im Rahmen verschiedener BMBF-Schwerpunktthemen**

Zusätzlich zur Förderung des BMBF werden vom BMWi projektbezogene Investitionen in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM sowie Projekte mit Nanotechnologiebezug im Programm Innovationskompetenz PRO INNO für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) finanziert. Dafür wurden zusammen 6 Mio Euro in 2001 bereitgestellt (Angaben des BMWi).

Die Mittel des BMBF und des BMWi für die Projektförderung in 2001 sind in Tabelle 3 dargestellt. Die BMBF-Projektförderung wird im Rahmen von Verbänden aus Universitäten, öffentlichen Forschungsinstituten und Unternehmen gewährt. Dabei liegt die mittlere Förderquote der BMBF-Projekte in der Nanotechnologie bei ca. 56%. Das bedeutet, dass die beteiligte Industrie weitere etwa 42 Mio Euro in 2001 im Rahmen der Verbundprojektförderung aufwendet, zzgl. der Industriebeiträge in BMWi-Projekten. Wieviel Mittel von der Industrie für Nanotechnologieforschung *außerhalb* der öffentlichen Förderung aufgewendet werden, ist dem BMBF nicht bekannt.

Projektförderung 2001	Gesamtsumme Mio Euro	davon öffentliche Mittel	davon Industrieanteil
BMBF	96,6	<b>54,1</b>	42,5
BMWi	8,0	<b>6,0</b>	2,0
<b>Summe (in Mio Euro)</b>	<b>104,6</b>	<b>60,1</b>	<b>44,5</b>

**Tabelle 3: Projektförderung durch das BMBF und das BMWi in 2001. (Quelle: Datenbanken der Projektträger des BMBF; Angaben des BMWi)**

### Institutionelle Förderung

Im Rahmen der institutionellen Förderung des BMBF gemeinsam mit den Ländern werden weitere Mittel für Forschung mit Nanotechnologiebezug aufgewendet (Bezugsjahr 2001; siehe Tab. 4).

Institutionelle Förderung (in 2001)	Gesamtsumme Mio Euro	davon öffentliche Mittel	davon Industrieanteil
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft	27,0	<b>25,2</b>	1,5
MPG Max-Planck-Gesellschaft	14,3	<b>13,6</b>	0,7
FhG Fraunhofer-Gesellschaft	8,5	<b>4,4</b>	4,1
WGL Wissenschaftsgemeinschaft G.W. Leibniz	25,4	<b>17,8</b>	7,6
HGF Helmholtz-Gemeinschaft	31,8	<b>26</b>	5,8
andere (caesar, PTB)	5,7	<b>5,7</b>	0,0
<b>Summe (in Mio Euro)</b>	<b>112,7</b>	<b>93</b>	<b>19,7</b>

**Tabelle 4: Mittel für Nanotechnologieförderung im Rahmen der DFG-Förderung und der institutionellen Förderung.**

**(Quelle: Umfrage unter den Instituten vom April 2001 und Stichproben in 2002)**

Damit ergibt sich als Summe für die Nanotechnologieförderung im Jahr 2001 in Deutschland:

Nanotechnologieförderung in Deutschland (Jahr 2001)	Gesamtsumme In Mio Euro	<b>Öffentliche Mittel</b>	Industrieanteil
BMBF Projektförderung	96,6	<b>54,1</b>	42,5
BMWi Projektförderung	8,0	<b>6,0</b>	2,0
Institutionelle Förderung	112,7	<b>93</b>	19,7
<b>Summe (in Mio Euro)</b>	<b>217,3</b>	<b>153,1</b>	<b>64,2</b>

**Tabelle 5: Aufwendungen der öffentlichen Hand und der Wirtschaft für öffentlich geförderte Vorhaben der Nanotechnologie in Deutschland.**

Die Gesamtaufwendungen für Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Nanotechnologie betragen 217,3 Mio Euro. Davon sind 153,1 Mio Euro öffentliche Mittel. Die Aufwendungen der Länder für die Universitäten im Rahmen der Grundfinanzierung sind hier nicht berücksichtigt.

Stichprobenartige Rückfragen zur Förderung der Nanotechnologie in 2002 bei einigen FhG-Instituten, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und dem Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) ergaben eine ca. 10%ige Erhöhung der Ausgaben verglichen mit 2001. Daraus lässt sich eine Erhöhung der institutionellen Nanotechnologieförderung in 2002 auf 103 Mio Euro abschätzen. Unter oben dargestellten Annahmen erhält man für die Aufwendungen Deutschlands in der öffentlichen Förderung der Nanotechnologie, ohne den zusätzlichen Anteil der Industrie zur Projektförderung, eine **Gesamtsumme für 2002 von 197,5 Mio Euro** (vgl. auch Tab. 7).

### 3.2 Fördermittel in der Europäischen Union

Nach einer Erhebung der Europäischen Kommission wurde im fünften Rahmenprogramm Nanotechnologie in verschiedenen Programmen wie z. B. IST, GROWTH oder QoL gefördert, wobei im Jahr 2001 ca. 50 Mio Euro für Nanotechnologie aufgewendet wurden. Im Rahmen der nationalen Programme wenden die Staaten der Europäischen Union – ohne Deutschland – pro Jahr derzeit ca. 94 Mio Euro auf (Angaben teilweise von 2000, teilweise von 2001). In 2001 hat Deutschland somit die höchsten Aufwendungen für die Förderung der Nanotechnologie in Europa getätigt.

Nanotechnologieförderung in Europa	Öffentliche Mittel in 2001
EU-Kommission	50
Staaten der EU ohne Deutschland	94
Deutschland	153
<b>Summe (in Mio Euro)</b>	<b>297</b>

**Tabelle 6: Mittel für Nanotechnologieförderung 2001 in Europa.**

**(Quellen für EU-Angaben: Technology Roadmap for Nanoelectronics, European Commission; zusätzlich Angaben von Vertretern der DG RTD und DG INFSO)**

Im sechsten Rahmenprogramm wird Nanotechnologie in der Hauptsache im Rahmen der thematischen Priorität 3 gefördert (nanotechnologies and nanosciences, knowledge-based multi-functional materials, new production processes and devices). Unter Annahme einer Gleichverteilung der Fördermittel in Höhe von 1300 Mio Euro auf diese 3 Themen und auf 4 Förderjahre ergibt sich für die Nanotechnologie eine jährliche Fördersumme von ca. 110 Mio Euro. Nanotechnologie wird aber teilweise auch in Priorität 1 (genomics and biotechnology for health: Gesamtsumme 2000 Mio Euro) und Priorität 2 (information society technologies: Gesamtsumme 3600 Mio Euro) und zusätzlich im Rahmen der Unterstützung von Networks und des Frontier Research Programms gefördert. Daher erscheint eine jährliche Fördersumme von 150 Mio Euro als realistische und konservative Schätzung. Setzt man den Anteil der europäischen Nationen als mindestens konstant voraus und den Anteil Deutschlands mit 195 Mio Euro ein, so ergibt sich für die **Nanotechnologieförderung in Europa eine Gesamtsumme von 441 Mio Euro für das Jahr 2002** (vgl. auch Tab.7).

### 3.3 Gegenüberstellung mit Fördermitteln in USA und Japan

Beim Vergleich von Angaben der Förderaufwendungen in unterschiedlichen Ländern ergeben sich verschiedene Schwierigkeiten, die die Vergleichbarkeit der Angaben in Frage stellen:

- Je nach der Definition des Technologiefeldes werden teilweise Projekte hinzugezählt, welche den Kriterien anderer Länder nicht standhalten würden.
- Den Angaben ist nicht direkt zu entnehmen, ob Vollkosten oder Nettokosten angesetzt werden. Weiterhin unterscheiden sich im Falle von Vollkosten die Overheadanteile beträchtlich. Teilweise werden Kosten zur Errichtung von Gebäuden oder vollständige Gebäudeausstattungen hinzugezählt.
- Die Kaufkraftunterschiede in den einzelnen Ländern bewirken unterschiedliche Ausgestaltungsmöglichkeiten der Programme. In Niedriglohnländern (bspw. in China) kann z.B. trotz deutlich niedrigerer Förderausgaben ein Vielfaches an Personenjahren investiert werden.

Daher erfolgt nachfolgend nur eine Darstellung der öffentlichen Ausgaben in USA und Japan, ohne detailliertere Darstellung der Förderdetails (z.T. sind diese auch nicht zu erfahren).

In den USA wurden im Haushaltsjahr 2001 für Nanotechnologie 420 Mio US\$ (entsprechen 467 Mio Euro) aufgewendet und für das Jahr 2002 sind 579 Mio US\$ (entsprechen 643 Mio Euro) bewilligt (Angaben der Koordinationsstelle der US-National Nanotechnology Initiative).

Die Angaben zur Nanotechnologieförderung in Japan sind nicht eindeutig. Im Rahmen des Global Nanotechnology Policy Workshops in Tokyo (Februar 2002) wurden für 2001 von Regierungsvertretern 454 Mio US\$ (500 Euro) als Gesamtsumme der öffentlichen Förderung angegeben und für 2002 sogar 1 Mrd. US\$ (1,1 Mrd Euro). Diese Summe erscheint zu hoch angesetzt zu sein, die Koordinationsstelle der US-Initiative beziffert die japanischen Ausgaben in [11] nur mit der Hälfte der angeführten Summe.

	2001 (in Mio Euro)	2002 (in Mio Euro)
Deutschland	153	198
Europa (inkl. D)	298	439
USA	467	643
Japan	500	1100*

**Tabelle 7: Aufwendungen zur Förderung der Nanotechnologie in Deutschland, Europa , USA und Japan in Mio Euro. (\* s. Anmerkung zu dieser Zahl im Text)**

**(Quelle: Global Nanotech Policy Workshop, Tokyo, Feb. 2002)**

Generell lässt sich anführen, dass mindestens in den HighTech Regionen Nanotechnologie als eines der wichtigen Zukunftsfelder erkannt wurde und gebührend gefördert wird. Nicht nur in USA, Japan und in Europa werden daher nationale oder forschungsraumspezifische Programme aufgelegt, sondern auch in China, Korea, Taiwan, Australien, und weiteren Nationen. Neben den hohen Investitionen in dieses Zukunftsfeld sind weitere Spezifika der derzeitigen Förderung in fast allen diesen Ländern:

- der interdisziplinäre Ansatz zur Beförderung des Feldes
- die gleichzeitige Förderung von Grundlagen- und angewandter Forschung
- die Initiierung von Netzwerkaktivitäten
- die Diskussion internationaler Kooperationen
- die Kombination mit Fragen der zukünftigen Aus- und Weiterbildung
- der Diskurs mit gesellschaftsrelevanten Fragestellungen
- der Drang nach schneller Erkenntnisumsetzung zur Standortstärkung

In fast allen Ländern wird ein Mangel an geeignet ausgebildetem Personal beklagt.

## 4 Nanotechnologie – Vielfalt der Innovationswege

Die Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie. Sie fließt nicht in ein einzelnes Anwendungsgebiet ein, sondern definiert sich anhand einer charakteristischen Längenskala, die für eine große Zahl von Wissenschafts- und Technologiezweigen von Relevanz ist. Sie wird im Rahmen mehrerer Programme des BMBF gefördert. Dennoch kristallisieren sich aus heutiger Sicht klare Schwerpunkte der Nanotechnologie heraus, für die sich ein **vordringlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf** abzeichnet:

- Die **Nanoelektronik** untersucht die verschiedenen Konzepte für die Nutzung der elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen für die vielfältigen Anwendungen einer zukünftigen Informationstechnologie.
- Die **Nanooptik** schafft die Voraussetzungen für die optische Hochgeschwindigkeits-Kommunikationstechnik, neuartige Laserlichtquellen und optische Systeme für vielfältige Anwendungen.
- Die **Nanofabrikation** erforscht und entwickelt Methoden zur Herstellung von Strukturen, Schichten, Oberflächen auf der Nanoskala, da entsprechende Verfahren für die Herstellung zukünftiger nanobasierter Produkte eine zwingende Voraussetzung sind.
- Die **Nanochemie** befaßt sich mit der Erzeugung und Veränderung von chemischen Systemen, die ihre Funktionalität aus der Nanoskaligkeit beziehen. Supramolekulare funktionale Systeme bilden die stoffliche Grundlage für neue Materialien.
- Das Gebiet der **Nanomaterialien** befasst sich mit der Erforschung und Entwicklung neuartiger Materialsysteme, deren wesentliche Eigenschaften auf der Nanoskaligkeit ihrer Bestandteile beruhen.
- Die **Nanobiotechnologie** verfolgt einerseits die Nutzung biologischer Nano-Objekte in technischen Systemen, von der Sensorik bis zur Photovoltaik. Sie wendet andererseits nanotechnologische Verfahren zur Untersuchung und Beeinflussung biologischer Systeme an. Hiervon werden insbesondere die Medizintechnik und die molekulare Diagnostik maßgeblich profitieren.
- Die **Nanoanalytik** schließlich liefert als Querschnittswissenschaft die analytischen Methoden und Werkzeuge zur Erfassung der Basisphänomene und zur Produktcharakterisierung und sorgt für eine analytische Qualitätssicherung durch Beiträge zu nationalen und internationalen Normungen.

## **4.1 Nanoelektronik**

Die heutige CMOS-Elektronik kann als einer der wichtigsten Faktoren, wenn nicht sogar als der zentrale Bestandteil unserer heutigen Technologie angesehen werden. Es fällt schwer, auch nur ein einziges Beispiel moderner Technologie zu benennen, das völlig ohne Elektronik auskommt [7].

Die Entwicklung der CMOS-Elektronik lässt sich seit mehreren Jahren mittels des sogenannten Moore'schen Gesetzes beschreiben, wonach sich alle drei Jahre die Schaltgeschwindigkeiten der Mikroprozessoren verdoppeln, wobei die Anzahl der Transistoren pro Chip sogar noch schneller wächst. Die weitere Entwicklung wird von der internationalen ITRS-Roadmap für die kommenden fünfzehn Jahre prognostiziert. Dieser Roadmap ist zu entnehmen, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt auch alternative Technologien zum CMOS-Prozess in die Nanoelektronik Einzug halten werden. Da reine CMOS-Bauelemente mit zunehmender Miniaturisierung an ihre physikalischen Grenzen stoßen, ist es erforderlich, rechtzeitig ergänzende bzw. funktionserweiternde Technologiekonzepte bereitzustellen.

Es muss an dieser Stelle betont werden, dass ein entsprechender Handlungsbedarf bereits heute vorliegt. Die neuen Elektronikkonzepte werden mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit schwerer zu beherrschen sein als ihre Vorgänger. Demzufolge wird bereits jetzt im Wettbewerb der forschenden Nationen entschieden, wer zu gegebener Zeit am besten auf die zukünftige Elektronik vorbereitet sein wird.

Die Nanotechnologie ist dabei schon heute im Bereich der CMOS-Elektronik von erheblicher Bedeutung. Heute befinden sich Transistoren mit Gatelängen von 40nm und einer Bauteilgröße von 90nm kurz vor der Produkteinführung. Damit ist der CMOS-Transistor ein genuin nanotechnologisches Bauelement. Im Zuge der weiteren Miniaturisierung der CMOS-Technologie, sind auch in den nächsten Jahren eine Vielzahl forschungsintensiver nanotechnologischer Problemstellungen zu überwinden. Der Silizium-Transistor von heute hat außer seiner grundlegenden Funktionsweise nur noch wenig mit seinen Vorläufern gemein, sondern unterliegt einem permanenten Wandel, der sich weiter fortsetzen wird. Der mit dieser Schlüsseltechnologie verbundene Forschungsbedarf wird daher auf absehbare Zeit die Forschungsanstrengungen für die langfristig wichtigen alternativen Konzepte noch deutlich überwiegen.

Einen wesentlichen Aspekt dieser Forschungen stellen die Herstellungsverfahren dar, welche insbesondere die Fähigkeit zur wettbewerbsfähigen Großserienherstellung von Halbleiter-

Chips sicherstellen müssen. Entsprechende **Lithographietechniken** – Deep-Ultraviolett-Lithographie bei 157 nm Wellenlänge (DUVL) und die Extrem-Ultraviolett-Lithographie bei 13 nm Wellenlänge (EUVL) - befinden sich in der Entwicklung (siehe auch 4.3 Nanofabrikation). Dabei stellen sowohl die Lithographieoptiken als auch die Lithographiemasken Präzisionsanforderungen auf atomarer Skala.

Weitere Technologien, die nicht vordringlich auf die Verkleinerung der Strukturen elektronischer Bauelemente zielen, sondern eine Erweiterung der Funktionalität zum Ziel haben, sind ebenfalls bereits heute von Bedeutung und werden in Zukunft noch wichtiger werden. Im Bereich der Sensoren und der nichtflüchtigen Speicher ist hier die **Magnetoelektronik** zu nennen. Die Magnetoelektronik liefert neue Speicherkonzepte wie den MRAM und neue Konzepte für Logikschaltungen, aber auch Sensoren, z.B. auf Basis des GMR-Effekts. Für diese Beispiele haben nanotechnologische Aspekte eine erhebliche Bedeutung.

Für die Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung stellt die **Nanooptoelektronik** eine Vielzahl von Problemlösungen zur Verfügung. Kleinste Halbleiterlichtquellen – Leucht- und Laserdioden für alle Spektralfarben - aber auch völlig neuartige optische Bauelemente wie beispielsweise photonische Kristalle, die der Kommunikationstechnik neue Funktionalitäten erschließen können bzw. die deutliche Miniaturisierung vorhandener optischer Bauelemente erlauben (siehe auch 4.2 Nanooptik).

Die Relevanz der Nanotechnologie für die Elektronik wird jedoch mit der Suche nach einer Erweiterung und vielleicht langfristig nach einem Nachfolger der heutigen CMOS-Elektronik noch einmal beträchtlich ansteigen. Nahezu alle derzeit diskutierten Alternativen beinhalten genuin nanotechnologische Funktionselemente. Beispiele für solche Technologien sind:

### **Molekularelektronik**

Hier werden Ströme innerhalb eines Moleküls oder zwischen einzelnen Molekülen geschaltet. Erforscht werden muss hierbei insbesondere die Reversibilität solcher Schaltvorgänge, die Schaltgeschwindigkeit, die Skalierung hin zu großen molekularen Schaltkreisen sowie die Herstellung entsprechender Prozessoren (und die Kontaktierung zur Außenwelt). Erste Anwendungen beruhen allerdings nicht auf der Nutzung individueller Moleküle für logische oder für Speicheroperationen, sondern es werden Schichten aus den funktionalen Molekülen gebildet, die als Ensemble implementiert bereits jedes für sich die genutzte Schaltfunktion besitzen. Ebenso ist geplant, Kohlenstoff-Nanoröhren als extrem kleine Drähte (Vias) zu nutzen und in einen Silizium-Chip zu integrieren. Langfristig verspricht man sich von der Molekular-

elektronik eine ultimative Miniaturisierung mit Bauelementgrößen auf der Skala weniger Nanometer bei gleichzeitig sehr hoher Leistung.

### **Spintronik**

Die Spintronik nutzt nicht nur die Ladung, sondern auch das magnetische Moment des Elektrons zur Informationsverarbeitung. Es gibt bereits Abschätzungen, die vorhersagen, dass Bauelemente, die nur den Spin des Elektrons schalten, deutlich schneller sein können als solche, die auf Basis der elektrischen Ladung funktionieren. Zusätzlich würde der Vorgang weniger Energie benötigen als ein vergleichbarer Ladungstransport. Ein wesentlicher Vorteil der Spintronik wäre, dass für sie ein Großteil des heutigen Halbleiter-Know-Hows genutzt werden könnte. Es müssten keine grundlegend neuen Herstellungsmethoden gefunden werden, sondern diese könnten auf den bestehenden aufbauen.

### **Quanteninformationsverarbeitung**

In konventionellen Bauteilen tauchen auf der Nanoskala Quanteneffekte als störende Einflüsse auf, welche die Funktionsweise des Bauelements beeinträchtigen. Die Quanteninformationsverarbeitung dagegen beruht auf der gezielten Nutzung von kohärenten Quantenzuständen für eine völlig neue Form der massiv parallelen Informationsverarbeitung. Zu lösende Probleme sind hierbei insbesondere die zeitliche Stabilität der Quantenzustände und die Skalierung einzelner Bauelemente zu größeren Arrays.

### **Tunnel-Bauelemente**

Diese Dioden nutzen für ihre Funktionsweise den ausserordentlich schnellen quantenmechanischen Tunneleffekt. Dies verspricht gegenüber konventionellen Bauelementen eine deutliche Geschwindigkeitssteigerung. Nachteil ist bislang, dass es kaum Transistorkonzepte gibt. Ebenso hängt das Verhalten der Tunnelelemente sehr stark von der Geometrie des Bauteils ab. Daher sind sehr hohe Anforderungen an einen entsprechenden Herstellungsprozess zu stellen. Das derzeit erfolgversprechendste Tunnelbauelement ist die Resonante Tunneldiode.

### **Bioelektronik**

Ziel ist es, biochemische Grundvorgänge, wie beispielsweise eine Schlüssel-Schloß-Reaktion von DNA-Strängen, elektronisch zu sensieren. Solche bioelektronischen Bauelemente haben einen biotechnischen und einen elektronischen Bestandteil. Die Aufgabe besteht darin, Nanoliterproben durch den Nachweis von elektrischen Strömen im Nanoamperebereich zu erkennen. Diese Bauelemente finden sich in integrierten Chips, welche hochparallel biochemische Vorgänge detektieren und verarbeiten. So soll z.B. eine zeitintensive teure Laboruntersuchung

einer Blutprobe durch eine einzige kostengünstige Chip-Analyse ersetzt werden („lab on a chip“).

Die aufgeführten Beispiele sind **exemplarisch** für die verschiedenen Konzepte der Nanoelektronik und nicht erschöpfend. Ein wesentlicher Faktor bei der Beurteilung der Praxisrelevanz der jeweiligen Ansätze ist die Frage der Wirtschaftlichkeit einer Technologie. Gerade in dieser Hinsicht erweist sich der CMOS-Prozess als nach wie vor wichtigster Technologieträger der Nanoelektronik. Ob und in welcher Weise alternative Konzepte sich in den CMOS-Prozess integrieren lassen oder diesen gar eines Tages ersetzen, hängt insbesondere auch von den Kosten ab, die damit verbunden sein werden und kann auf Basis heutigen Wissens nur schwer eingeschätzt werden. Es ist hierzu erforderlich, ausgehend von der nach wie vor dominierenden CMOS-Technologie, durch umfassende und konsequente Forschung die Zukunft vorzubereiten, um frühzeitig belastbare wissenschaftliche, technische und ökonomische Aussagen treffen und alle erforderlichen Maßnahmen zur Einführung der nächsten Elektronikgeneration einleiten zu können.

## **4.2 Nanooptik**

Einige der interessantesten Innovationen innerhalb des weiten Feldes der Nanotechnologie finden sich im Teilgebiet der Nanooptik. Hier sind nanotechnologische Aspekte an verschiedenen Stellen von zentraler Bedeutung.

### ***Optoelektronik***

Von erheblicher kommerzieller Bedeutung ist die Optoelektronik. Diese adressiert vor allem über Anwendungen in der Telekommunikation einen globalen Multimilliardenmarkt. Bahnbrechende Entwicklungen wie das Internet beruhen zentral auf der Verfügbarkeit einer hinreichend leistungsfähigen Telekommunikationstechnologie.

Im Bereich der Optoelektronik kann auch in den kommenden Jahren mit enormen Wachstumsraten von mehreren zehn Prozent pro Jahr gerechnet werden (der Markt für Laserdioden hat sich von 1999 nach 2000 sogar mehr als verdoppelt).

Eine erhebliche Anzahl optoelektronischer Bauelemente, wie zum Beispiel Laserdioden beruhen dabei auf nanoskaligen Funktionselementen. In sogenannten Quantenfilmlasern findet die eigentliche Laseraktivität in einer nur wenige Nanometer dicken Halbleiterschicht statt. Es gelingt bei den Laserdioden derzeit jedoch nicht, alle technisch wichtigen Wellenlängenbereiche abzudecken. Mit dem Übergang zu neuen Materialsystemen, wie etwa dem sogenannten

wide-bandgap-Halbleiter Galliumnitrid konnten zwar schon blauviolett emittierende Laserdioden realisiert werden, der blau-grüne Spektralbereich wurde jedoch bislang nur für Leuchtdioden erschlossen. Hier erhofft man sich Fortschritte einerseits durch Verwendung alternativer Materialien wie Zinkoxid, aber auch durch neue Bauelementkonzepte, wie z.B. den Quantenpunktlaser. Bei diesem besteht der laseraktive Bereich aus einer unregelmäßigen Anordnung von Quantenpunkten mit Abmessungen von wenigen Nanometern. Diese Strukturen werden nicht lithographisch erzeugt, sondern können auf einfache Weise mittels eines Selbstorganisationsverfahrens erzeugt werden. Man hat damit eines der ersten Beispiele überhaupt für die erfolgreiche Nutzung der so oft zitierten Selbstorganisationsverfahren vorliegen, mit denen es möglich ist, kleinste Strukturen bei minimalem Aufwand und geringen Kosten zu realisieren. Obwohl die genaue Funktionsweise der Quantenpunktlaser noch nicht vollständig verstanden ist, konnte dieses Konzept bereits erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden.

Die Telekommunikation bedarf jedoch nicht nur innovativer Strahlquellen, sondern sie benötigt auch Bauteile, wie Multiplexer, Verstärker oder Repeater. Auch für diese kommen neuartige Bauteile zur Anwendung, die in vielen Fällen auf nanoskaligen Phänomenen beruhen.

### ***Photonische Kristalle***

Vor allem (aber nicht nur) für passive Bauelemente erhofft man sich entscheidende Fortschritte bei der Nutzung photonischer Kristalle. Diese ermöglichen in Bezug auf Licht die gleichen Funktionalitäten, wie sie Halbleiter für elektrische Ströme zur Verfügung stellen. Man bezeichnet photonische Kristalle daher auch als photonische Bandlückenmaterialien. Sie bestehen aus strukturierten Halbleitern, Gläsern oder Polymeren und zwingen das Licht mittels ihrer spezifischen Indexkontraststruktur dazu, sich in der für die Bauteilfunktion notwendigen Art und Weise im Medium auszubreiten. Ein wesentliches Merkmal dieser Technik ist die Möglichkeit, Licht auf vergleichsweise engen Abmessungen zu führen. Damit rückt ein entscheidender Durchbruch auf dem Gebiet der optischen Miniaturisierung, die mit konventionellen optischen Techniken eine prinzipbedingte Grenze nicht unterschreiten kann, in greifbare Nähe.

Die erfolgreiche Nutzung photonischer Bandlückenmaterialien eröffnet die Möglichkeit einer weiteren Steigerung der Datenübertragungen bei gleichzeitiger Verkleinerung der Geräte und Reduzierung der Kosten. Generell wird die Zielrichtung verfolgt, eine vollständig optische Kommunikationstechnologie zu verwirklichen, da sich gegenwärtig die Elektronik als hauptsächlichster Engpass hinsichtlich der Geschwindigkeit und Übertragungskapazität der Nachrichtenübertragung darstellt.

Die Anwendung photonischer und optoelektronischer Strukturen erschöpft sich jedoch nicht in der Telekommunikation. Sie sind auch bedeutsam für Sensoren, Beleuchtung und möglicherweise in Zukunft sogar die Informationsverarbeitung. Marktstudien gehen davon aus, dass die Leuchtdiode mittelfristig die Glüh- und Gasentladungs-Lichtquellen aus vielen Bereichen des täglichen Lebens inklusive der Raumbelichtung verdrängen wird. Im Bereich der Informationsverarbeitung existieren bereits Konzepte für rein optische Schaltelemente, die eines Tages als optische Hochgeschwindigkeits-Transistoren genutzt werden könnten.

Bis dahin wird jedoch die Kopplung der konventionellen elektronischen Informationsverarbeitung an die optische Informationsübertragung von eminenter Bedeutung sein. Auch hier gibt es neuartige Ansätze, die fundamental auf nanoskaligen physikalischen Effekten beruhen. Beispielsweise versprechen sogenannte *spintronische Bauelemente* eine direktere Kopplung optischer und elektronischer Informationsträger, da auf diese Weise beispielsweise die Polarisation von Licht unmittelbar auf die der Elektronen übertragen werden könnte.

### ***Neue Lichtzustände - Quantenoptik***

In den aktuellsten Forschungsgebieten der Physik begegnet man den ungewöhnlichsten Eigenschaften des Lichts und deren Anwendungen. Im Bereich der Quantenoptik werden Lichtzustände erzeugt, mit Hilfe derer sich neuartige metrologische Verfahren höchster Empfindlichkeit realisieren lassen oder die in Wechselwirkung mit einzelnen Atomen oder Molekülen exotische Materiezustände verursachen, die in zukünftigen sogenannten Quantenrechnern zu bislang kaum vorstellbaren Datenverarbeitungsgeschwindigkeiten führen können.

In diesem Zusammenhang ebenfalls zu nennen ist die Femtosekundentechnologie, die sich mit Lichtpulsen beschäftigt, die so kurz sind, dass sie trotz der ungeheuer großen Lichtgeschwindigkeit von 300.000 km/s nur eine Länge von einigen hundert Nanometern aufweisen und damit von der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts sind. In Wechselwirkung mit Materie auf der Nanoskala, d.h. Atomen oder Molekülen, verspricht man sich von der Femtosekundentechnologie die Präparation neuer atomarer Zustände oder chemischer Verbindungen, die mit Hilfe der etablierten Verfahren schlichtweg nicht machbar sind.

### ***Ultrapräzise Optikkomponenten***

Ebenfalls wichtiger Bestandteil der Nanooptik ist die Herstellung ultrapräziser klassischer optischer Komponenten wie Spiegel, Linsen u.a. Mit Hilfe der ultrapräzisen Oberflächenbearbeitungsmethoden (vgl. auch 4.3 Nanofabrikation) gelingt mittlerweile die Realisierung geradezu sensationell geringer Formabweichungen im Bereich von nur wenigen Nanometern.

Anwendungsfelder solcher präziser Oberflächen sind beispielsweise die Lithographie, optische Sensoren, Präzisionsinstrumente, Schreib- und Leseköpfe in optischen Datenspeichern, Röntgenoptiken etc.

### 4.3 Nanofabrikation

Alle gegenwärtigen und zukünftigen nanotechnologischen Erzeugnisse müssen mit vertretbarem Aufwand produziert werden können, um ihren Weg in die Anwendung zu finden. Die überzeugendste Demonstration einer raffinierten Funktion eines nanotechnologischen Erzeugnisses erweist sich als letztlich nutzlos, wenn seine Herstellung nur durch das schrittweise Aneinanderfügen individueller Atome möglich ist. Daher befasst sich ein großer Bereich der nanotechnologischen Forschung mit neuartigen Herstellungs- und Bearbeitungsmethoden auf der Nanoskala.

#### ***Laterale Strukturen***

Ein wichtiger Aspekt der Nanofabrikation ist die Erzeugung lateraler Strukturen. Diese spielen als Höchstdurchsatzverfahren vor allem für die Herstellung von elektronischen Logik- und Speicherarchitekturen eine tragende Rolle. Kostengünstige Verfahren für kleine und mittlere Serien finden vor allem in der Optoelektronik, aber auch in der Nanooptik und der Mikrofluidik Anwendung. Ein ganz anderer neuartiger Ansatz zur Herstellung regelmäßiger Strukturen auf der Nanoskala ist die Selbstorganisation.

Beispiele für solche Strukturierungsmethoden sind:

- Optische Lithographietechniken wie beispielsweise das deep-UV (bei einer Wellenlänge von 157 nm) oder mit noch stärkerem Nanobezug die extreme-UV-Lithographie (bei einer Wellenlänge von 13 nm), mit denen Strukturbreiten deutlich unter 100 Nanometer erzeugt werden sollen.
- Elektronenstrahlithographie: Diese Methode bewährt sich seit langem durch ihr überragendes Auflösungsvermögen im vielfältigen Laboreinsatz. Da es sich jedoch um ein serielles Verfahren handelt, ist die Elektronenstrahlithographie für die Produktion zu langsam und zu teuer. Verbesserungen zielen in Richtung auf eine Parallelisierung dieser Technik.
- Nanoprägetechnik: Hier wird ein Stempel mechanisch in ein zu strukturierendes Substrat gepresst, um somit sein Relief direkt zu übertragen. Mit dieser Technik ist es bereits gelungen, sehr kleine Nanostrukturen zu erzeugen. Verbessert werden muss vor allem die Anzahl der Prägezyklen eines Stempels.
- Nanokontakt-Druck: Dieses Verfahren bedient sich ebenfalls eines Stempels, es wird jedoch keine dreidimensionale Struktur übertragen, sondern mit Hilfe des Stempels eine Chemikalie auf ein Substrat aufgedruckt. Diese Chemikalie dient dann beispielsweise für einen nachfolgenden Ätz- oder Belichtungsschritt als Resist.

- **Interferenz-Lithographie:** Dieses Verfahren ist eine Abwandlung der konventionellen optischen Lithographie und nutzt die Interferenz zweier Lichtfelder für eine Verkleinerung der Strukturgröße um den Faktor zwei aus. Diese Methode läßt sich allerdings nur zur Herstellung symmetrischer Strukturen nutzen.
- **Selbstorganisation**  
Die Selbstorganisation und Selbstordnung ermöglicht die massiv parallele Realisierung einer großen Zahl von Halbleiterstrukturen, insbesondere von sog. Quantenpunkten. In wenigen Sekunden können Quantenpunktdichten von  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  hergestellt werden. Im Gegensatz zu Lithographieverfahren werden in diesem „bottom-up approach“ Atome oder Moleküle zu typisch 10 bis 50 nm großen Inseln durch Selbstorganisationsprozesse zusammengefügt. Solche Nanocluster erfüllen unterschiedlichste Funktionen und können für verschiedenste Bauelemente und Anwendungen genutzt werden.

### ***Ultrapräzise Oberflächen***

Technologische Zielsetzung ist die Herstellung technischer Funktionsflächen mit höchster Präzision und ihre meßtechnische Charakterisierung. Die ultrapräzise Oberflächenbearbeitung hat heute das ultimative Limit atomarer Präzision erreicht – mit Hilfe von Rastersondenverfahren lassen sich einzelne Atome gezielt positionieren. Im Hinblick auf industrielle Einsetzbarkeit ist man von diesem Limit jedoch noch weit entfernt. Auf der Ebene nanoskaliger Präzision bedarf es eines Paradigmenwechsels: Wurden bisher Werkstoff und Werkzeug als kontinuierliche Medien aufgefaßt, so tritt nun in zunehmendem Maße die jeweilige atomare oder molekulare Struktur in den Vordergrund. Auf dieser Ebene sind neue Funktionalitäten zu erwarten. In einer automatisierten Fertigungsumgebung müssen Bearbeitungsvorgänge direkt von hochpräzisen Meßvorgängen gesteuert werden. Profundes Prozeßverständnis, automatisches Messen, Beurteilen und Regeln sind Voraussetzung für eine reproduzierbare Fertigung. Nur ein im Detail verstandener Bearbeitungsprozeß (z.B. über Computersimulation von Schneidvorgängen) und ein hinreichend genau charakterisierter Werkstoff machen eine fehlerfreie Produktion vom ersten Teil an möglich.

Ein sehr wichtiges Gebiet ist die **ultrapräzise Bearbeitung optischer Oberflächen**. Dieses Technologiefeld stellt eines der wenigen Beispiele dafür dar, dass nicht nur die Vermessung eines Produkts mit Nanometer-Genauigkeit stattfindet, sondern auch die Produktion bereits mit einer Präzision erfolgt, die eine Genauigkeit von nur wenigen Nanometern Abweichung bzw. in manchen Fällen sogar heute schon unter einem Nanometer aufweist.

Man erreicht durch diese ultrapräzisen Fertigungsmethoden eine Oberflächenglätte optischer Komponenten, die die Grenze des Vorstellbaren erreicht. So ist es bereits heute möglich, Oberflächen mit einem Durchmesser von einigen Zentimetern auf eine Rauigkeit von unter einem Nanometer glatt zu polieren. Die Anwendungsfelder solcher präziser Oberflächen sind vielfältig. Man benötigt sie für die Lithographie, mit deren Hilfe nahezu alle heute im Umlauf befindlichen elektronischen Mikrochips hergestellt werden.

Weitere Anwendungen sind optische Sensoren, Präzisionsinstrumente, Schreib- und Leseköpfe in optischen Datenspeichern, Röntgenoptiken etc.

### ***Ultradünne funktionale Schichten***

Ultradünne funktionale Schichten sind ein Schlüsselement in der Nanotechnologie. Sie finden ihren Einsatz in nahezu allen Zukunftstechnologien von der Mikroelektronik und Optik über die Medizin und Sensorik bis hin zu Verschleißschutzschichten.

In der Mikroelektronik hält der Trend zur weiteren Verkleinerung der Strukturbreiten ungebrochen an. Dies bedeutet für die aktiven Transistorgebiete weiterhin notwendige neue innovative Werkstoff- und Prozessentwicklungen. Auch die Entwicklung ultradünner Barrierschichten (< 10 nm) ist hier eine vordringliche Aufgabe.

Für neue Bauelemente der Informationstechnologie wie z.B. nichtflüchtige magnetische Speicher, ist eine Schichtfolge extrem dünner Metall- und Isolatorschichten (Einzelschichtdicke: ca. 1 nm) kontrolliert abzuscheiden und die Beschaffenheit der Grenzflächen gezielt einzustellen. Auch für weiterentwickelte Oberflächenakustikwellen-Bauelemente (SAW-Bauelemente), die ihre Hauptbedeutung in der Telekommunikation haben, sind ultradünne funktionale Schichten von entscheidender Bedeutung. Kommunikationssysteme der nächsten Generation arbeiten mit 10 bis 15 GHz und erfordern laterale Strukturabmessungen von 50 bis 100 nm mit Schichtdicken von 10 bis 30 nm.

Für die moderne Optik und Optoelektronik (Photonik) sind ultradünne Schichten und Schichten mit nanostrukturierten Komponenten vielfach entscheidende Schlüsselkomponenten. Insbesondere für aktive optoelektronische Bauelemente ist die Abscheidung und Funktionalisierung von ultradünnen Schichten, z.T. auch mit optisch aktiven Einzelmolekülen, Gegenstand intensiver Forschung.

Ein verhältnismäßig junges Forschungsgebiet sind organische Leuchtdioden (OLEDs). Hier sind für Aufbau und Verbesserung von Dünnschichtsystemen noch weitreichende Materialentwicklungen erforderlich.

Die Realisierung ultradünner biomolekularer Schichten für Medizin und Technik stellt eine neue interdisziplinäre Forschungsherausforderung dar, die biologische Materialien einer technischen Anwendung zugänglich macht.

Ultradünne Schichten mit verbesserten mechanischen Eigenschaften haben eine große Anwendungsrelevanz als Viellagenschichten für schlag-, verschleiß- und oxidationsresistente Werkzeugbeschichtungen, als adhäsions-, haftungs- oder benetzungsfördernde Zwischenschicht in der Klebe-, Beschichtungs- oder Drucktechnik, als adhäsions-, haftungs- oder benetzungsmindernde Zwischenschicht in der Kunststoffverarbeitungs-, der Verbundwerkstoff- oder Lebensmitteltechnik bzw. für Architekturgläser oder als Gleitschicht unter Mischreibungs- oder Trockenlaufbedingungen.

#### **4.4 Nanochemie**

Nanochemie - international nicht immer einheitlich definiert – meint chemische Veränderungen der Systeme, die auf der Nanoskala ablaufen und ihre Funktionalität aus dieser Dimension beziehen. Nanochemie umfasst insbesondere funktionale supramolekulare Systeme, z.B. zum gezielten Wirkstofftransport, schalt- bzw. steuerbare Systeme und Systeme mit einstellbaren Eigenschaften, sowie Bildungsprozesse von Nanopartikeln.

Die technische Beherrschung von Nanometerdimensionen verspricht für eine ganze Reihe industrieller Branchen einen Innovationsschub, wie er durch die Entwicklung der Mikroelektronik in den letzten Jahrzehnten realisiert worden ist. Die Chemie ist per se eine Schlüsselbranche für die industrielle Erschließung derartiger Nanostrukturen, insbesondere, wenn es um kostengünstige Herstellungsverfahren geht. Schon heute basieren viele Produkte – von Katalysatoren bis hin zu Pigmenten und Dispersionen – auf der Herstellung von Teilchen, die kleiner als 10 nm sind. Voraussetzung für die Entwicklung neuer Produkte und Verfahren ist die Fähigkeit, molekulare Architekturen sowie Metall- und Halbleiterpartikel auf der Nanoskala kontrolliert manipulieren zu können. Nanopartikel zeigen aufgrund ihrer Größe (die Teilchen sind kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes), ihrer Elektronenstruktur im Festkörper und ihrer großen Oberfläche andere Eigenschaften als größere Teilchen.

Mittelfristig, d. h. in einem Zeitraum bis etwa 2005, werden u. a. folgende Forschungsschwerpunkte gesehen:

- Durch die Miniaturisierung bestehender Herstellverfahren und den Einsatz von Nanoteilchen können verbesserte Produkteigenschaften erzielt werden.
- Für biomedizinische Anwendungen, z. B. mit Blick auf Wirkstofftransport und Sensorik, eröffnet der Einsatz maßgeschneiderter Nanomaterialien völlig neue Möglichkeiten.
- Durch die Kombination von Kunststoffen und anorganischen Nanopartikeln entstehen nanoskalige Hybridmaterialien.

Eher längerfristig, d. h. bis etwa 2010, sind folgende Schwerpunkte von Interesse:

- Neue chemische Syntheserouten für organische Moleküle als elektronische Bauelemente, für Kohlenstoff-Nanotubes und –Nanowires mit elektronischen Funktionen sowie für Nanocomposites als Energiespeicher und Katalysatoren
- Molekulares Engineering und nanoskalige Verarbeitungsverfahren.

#### **4.5 Nanomaterialien**

Die Nanotechnologie lässt ein beträchtliches Potenzial für die Werkstoffwissenschaften erwarten, denn mit ihrer Hilfe lassen sich Materialien mit völlig neuen mechanischen, elektrischen oder magnetischen Eigenschaften herstellen.

Innerhalb der Nanotechnologie sind die Nanostruktur-Materialien ein besonders innovativer Ansatz mit Potenzial für Anwendungen in Schlüsseltechnologiefeldern.

Beispielsweise konnte durch die Herstellung ultradünner Polymerschichten (Langmuir-Blodgett-Filme) die Grundlage für neue optische, elektronische sowie biologisch wirksame Systeme gelegt werden. Auch das gezielte Beschichten von feinstteiligen metallischen und keramischen Pulvern oder Fasern eröffnet Verbundwerkstoffen neue Anwendungsfelder.

##### ***Materialtechnische Aspekte von Oberflächen***

Wesentliche Reaktionen zwischen gasförmigen oder flüssigen Medien und festen Medien spielen sich häufig in Nanometer-Dimensionen an der Kontaktfläche ab. Die Wechselwirkung mit diesen Medien stellt daher an die Oberfläche von Partikeln, Fasern, Halbfertig- und Fertigprodukten besondere physikalische, chemische und biologisch-medizinische Anforderungen. Es gilt deshalb, Techniken zu entwickeln, die die Herstellung von maßgeschneiderten Materialien für innovative Nutz- und Schutzfunktionen von Oberflächen erlaubt.

Bei den Nutzfunktionen stehen Sensorik und Aktorik im Vordergrund. Bei den Schutzfunktionen ist dies u.a. die Beständigkeit gegen Oxidation, Korrosion, mechanischen Verschleiß und hohe Temperaturen.

### ***Materialtechnische Aspekte innerer Grenzflächen***

Komplexe Anforderungsprofile an Bauteile und Systeme lassen sich in der Regel nur durch mehrphasige, mehrkomponentige Materialien realisieren. Das Eigenschaftsprofil dieser Materialien wird durch die Volumenanteile seiner Komponenten sowie deren Grenzflächen, Korngrenzen und Zwischenschichten bestimmt. Die Grenzflächen gewinnen bei Nanostrukturmaterialien zunehmend an Bedeutung, da ihr relativer Anteil am Gesamtsystem mit Verringerung der Korngrößendurchmesser ansteigt.

Das Forschungsfeld der inneren Grenzflächen nimmt eine materialwissenschaftliche Schlüsselstellung ein, wenn Nanomaterialien mit gezielt eingestellten elektrischen, magnetischen und optischen Eigenschaften neben optimierten bruchmechanischen Eigenschaften realisiert werden sollen.

### ***Neues Design für Nanostruktur-Materialien***

An Bauteile aus modernen Materialien wird die Forderung nach Gewichts- und Volumenreduktion bei Verbesserung der charakteristischen Eigenschaften gestellt. Darüber hinaus wird - auch von diesen Bauteilen - eine Multifunktionalität gefordert. Der Schlüssel zum Erfolg sind Nanostruktur-Materialien: es gilt mit maßgeschneiderten Materialtechniken sowohl das Volumen der notwendigerweise mehrkomponentigen Materialien zu optimieren, als auch deren innere Grenzflächen und äußeren Bauteiloberflächen in Nanometer-Dimensionen zu strukturieren. Dazu ist ein neues Materialdesign zu verfolgen, das sowohl technischen als auch ökonomischen und ökologischen Anforderungen auf intelligente Art und Weise entspricht.

Dem Umgang mit Nanostruktur-Materialien und deren Wirkung auf Mensch und Umwelt soll besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

## **4.6 Nanobiotechnologie**

Die künftige industrielle und wirtschaftliche Entwicklung wird geprägt durch drei Technologiefelder von überragender Bedeutung, die als Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gelten: die Informationstechnologie, die Biotechnologie und die Nanotechnologie, die partiell miteinander verschmelzen. Gerade von der Schnittmenge der Nano- mit der Biotechnologie

erwartet man auf vielen Gebieten geradezu revolutionierende Erkenntnisse und umfassende neue Anwendungen.

Die Nanobiotechnologie macht sich gleich mehrere fundamentale Trends der technischen Entwicklung zunutze. Das ist zum einen der technische Trend der rasanten Miniaturisierung von Bauteilen der Informationstechnologie (top down) und gleichzeitig die gewachsenen Möglichkeiten, künftig mit Molekülen hantieren zu können (Nanotechnologie, bottom up) sowie die verstärkte Nutzung biologischer Prozesse für die technische, in diesem Fall die physikalisch-chemische Entwicklung. Demzufolge gilt parallel

– **Biology meets Nanotechnology**

mit den Zielen: Übertragung der Prinzipien der Biologie auf nanotechnologische Verfahren und der Nutzung biologischer Nanoobjekte für die Technik. Das sind u.a. molekulare Motoren und molekulare Bioelektronik

und

– **Nanotechnology meets Biology**

mit den Zielen: Nutzung nanotechnologischer Verfahren für die Biologie und zur Steuerung und Behandlung biologischer Systeme. Das sind u.a. Nanopartikel für biokompatible und biofunktionale neue Werkstoffe, Früherkennung und Therapie von Krankheiten.

Der BMBF fördert daher intensiv dieses zukunftsweisende Gebiet. Im Rahmen der Fördermaßnahme – die am 10. April 2000 bekannt gegeben wurde – sind in den bisherigen zwei Auswahlrunden ca. 28 Mio Euro festgelegt worden. Weitere Auswahlrunden sind geplant.

Folgende Themenschwerpunkte werden u.a. derzeit bearbeitet:

1. Die Entwicklung und der therapeutische und diagnostische Einsatz von Nanopartikeln
  - als Transportsystem für Wirkstoffe über biologische Barrieren
  - zur gezielten Anreicherung in Tumoren als Mittel zur lokalen Behandlung
2. die gezielte Herstellung und Nutzung biologisch-nanostrukturierter Oberflächen für technische Systeme
  - zur Organisation und Manipulation von technisch relevanten Biomolekülen
  - als alternative Datenspeicher
  - zur Herstellung kleinster elektronischer Bauteile.
3. die Entwicklung von neuen nanotechnologischen Verfahren
  - zur Beobachtung und Manipulation biologischer Moleküle

- zum Einsatz in Biochips für ultraschnelle Diagnostik
- für extrem miniaturisierte und hochpräzise Sensoren im lebenden Organismus.

Weitere Themen, die in diesem Rahmen bearbeitet werden sollen, sind z.B.:

- Nanotechnologie für die Zell-, Proteom- und Wirkstoffforschung
- molekulare Maschinen als Positionierwerkzeuge und Antriebe
- Einsatz biobasierter Systeme zur Herstellung von mikroelektronischen Bauteilen
- intelligente nanoskalige Biosensoren z.B. zum Nachweis von Immunparametern bzw. als Frühwarn- und Therapiesysteme für Krebs-, Herz-Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen
- neuartige Materialien für medizinische Implantate
- Biokatalysatoren für chemische Prozesse
- Herstellung und Nutzung von zellulären Maschinen
- Bioanaloge Membranen z.B. für hocheffiziente Filter
- lichtempfindliche biologische Materialien als Grundlage optischer Bauelemente
- neuartige Ansätze für die Bioelektronik und erste Bauteile für die molekulare Elektronik

#### **4.7 Nanoanalytik**

Die Nanotechnologie beruht auf physikalischen Phänomenen, die auf Längenskalen kleiner als 100 Nanometer (nm) bedeutsam werden. Zur Nutzung dieser Phänomene ist einerseits die Kontrolle von Materialien und Bauelementen auf molekularer und atomarer Skala notwendig, auf der anderen Seite ist die Bereitstellung und Nutzung teilweise völlig neuer Analyseverfahren erforderlich, um derartige Effekte effizient messen und optimieren zu können. Beispiele hierfür sind Quanteneffekte wie Elektroneninterferenzen sowie Einzelelektroneneffekte, die beim Übergang von der Mikrometer- zur Nanometerskala wichtig werden.

Nanotechnologie bedeutet qualitativ mehr als lediglich eine weitere Verkleinerung existierender mikroelektronischer und mikromechanischer Strukturen. Der gezielte Aufbau nanoskaliger Strukturen ist ohne geeignete Analytik nicht denkbar. Die Methoden und Geräte der Nanoanalytik sind das „Auge“, um Strukturen zu sehen, und die „Finger“, um Strukturen anzufassen und zu verändern.

Nanotechnologische Fragestellungen benötigen ein breites Spektrum verschiedener lateral und vertikal hochauflösender Sonden, die sowohl topografische als auch physikalische und chemische Analysen auf der Skala von wenigen Nanometern zuverlässig durchzuführen er-

lauben. In der Nanoanalytik werden deshalb je nach Problemstellung unterschiedliche hochentwickelte Verfahren und Geräte eingesetzt, die mit Elektronen-, Ionen-, Neutronen-, Neutralteilchen- und Photonenstrahlen, mit Feldemissions- und Tunneleffekten sowie nach akustischen, elektrischen, thermischen, magnetischen und optischen Prinzipien arbeiten.

Die Entdeckung des Rastertunnelmikroskops durch Binnig und Rohrer im Jahr 1982 und das davon abgeleitete Rasterkraftmikroskop haben die Entwicklung einer ganzen Serie von Rastersondensystemen befruchtet, mit denen eine Vielzahl lokaler Eigenschaften mit Nanometer-Auflösung gemessen werden kann:

- Elektronische Strukturen von Halbleitern mit dem Rastertunnelmikroskop,
- Dielektrizitätskonstanten/Dotierungsprofile mit dem Rasterkapazitätsmikroskop,
- Magnetische Strukturen mit dem spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop,
- Temperaturen mit dem Rasterthermomikroskop,
- Spannungen im GHz-Bereich mit dem Elektrostatik-Kraftmikroskop,
- Ströme mit dem Magnetkraftmikroskop,
- Optische Eigenschaften mit dem optischen Nahfeldmikroskop,
- Biologische Strukturen mit dem Kryo-Rasterkraftmikroskop.

Die Nanoanalytik dient nicht nur dem Vermessen und Verstehen von Materialeigenschaften, sondern wird auch mehr und mehr zur Qualitätssicherung in der industriellen Produktion eingesetzt. Die mit der fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Bauelemente verbundenen Anforderungen führen zu höchsten Ansprüchen hinsichtlich der Fehleranalyse von ICs. Die Rastersondenmikroskopie liefert neben einer exzellenten lateralen Auflösung auch eine schnelle Analyse-Prozedur, die keine zeitintensive Probenvorbereitung erfordert, ein Messen in Umgebungsbedingungen erlaubt und einfach zu interpretieren ist.

Für die nähere Zukunft sind folgende wissenschaftlich-technischen Ziele anzustreben:

- Zeitaufgelöste Nanoanalytik: Kombination ultimativer Ortsauflösung mit Zeitauflösung (bis in den Femtosekundenbereich) zur Untersuchung physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften individueller nanoskaliger Objekte
- Neu- bzw. Weiterentwicklung von Rastersondentechniken für den „Life Science Bereich“
- Nanoanalytik verborgener Grenzflächen, sowohl im physikalisch-technischen wie im Bio-bereich
- Quantifizierung nanoanalytischer Meßgrößen
- Verbindung nanoanalytischer Methoden mit Methoden der Nanomanipulation

- Standardisierung/Normung im Bereich physikalischer, chemischer und biologischer Größen (nicht nur geometrische Meßgrößen)

#### 4.8 Innovations- und Technikanalyse

Die Nanotechnologie als weit in die Zukunft greifende und gleichzeitig viele Sphären der Gesellschaft – Technik, Gesundheit, Kommunikation – umfassende Basistechnologie bedarf der Innovations- und Technikfolgenabschätzung. Die teilweise noch im Bereich des Visionären liegenden Erwartungen, die sich aus den Gestaltungsmöglichkeiten auf atomarer und molekularer Ebene für gänzlich neue Materialien und Produkte in den unterschiedlichsten Technik- und Wirtschaftsbereichen ergeben, lassen es geraten erscheinen, auch frühzeitig der Fragestellung nachzugehen, welche Wirkungen diese neuen Technologien auf den Standort Deutschland und den Lebensbereich der Menschen haben könnten.

Das BMBF hatte deswegen zunächst eine Vorstudie [4] vergeben, in der neben Fragen zur technischen und wirtschaftlichen Dimension auch ökologische, gesundheitliche, individuelle, soziale und politische Aspekte auf ihre Notwendigkeit zu vertieften Analysen untersucht wurden. Damit ist zum einen das Ziel verbunden, das vielfältige Innovationspotenzial in Verbindung mit diesen Aspekten zu ermitteln. Zum anderen geht es darum, Technikfolgen zu erkennen, um auf mögliche Risiken rechtzeitig angemessen reagieren zu können und sie zu minimieren. Auch in den USA liegt jetzt eine vergleichbare Studie vor [5].

Als Ergebnis einer sich daran anschließenden Diskussion mit Fachexperten der Nanotechnologie aus Wissenschaft und Industrie, der Technikfolgenforschung und Wirtschaftsforschern sowie den Kompetenzzentren der Nanotechnologie wurden folgende prioritäre, begleitende Maßnahmen zur Förderung der Nanotechnologie empfohlen:

- Studie zur „**Wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie**“

Für die politische Argumentation im Zusammenhang mit der Förderung der Nanotechnologie und für die Darstellung der Bedeutung der Nanotechnologie vor der Öffentlichkeit ist es essenziell, belastbare **quantifizierte Angaben** zum wirtschaftlichen *Potenzial* der Nanotechnologie machen zu können. Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist weltweit noch lückenhaft. Die derzeitigen offiziellen Wirtschaftsstatistiken erfassen Nanotechnologie noch nicht. Erste Erhebungen des Projektträgers VDI-Technologiezentrum [1] werden zur Zeit weltweit als Überblicksdaten zitiert. Erst kürzlich sind weitere, noch rudimentäre Untersuchungen hinzugekommen [6, 8, 9, 10]. Zahlenmaterial zum wirtschaftlichen *Potenzial* der Nanotechnologie ist vor allem aber auch eine Voraussetzung für verstärkte Investitionen seitens der Wirtschaft. Die in den Diskurs im Rahmen der Kompetenzzentren Nano-

technologie eingebundenen Venture Capital-Unternehmen können bereits einige erfolgreiche Investments vorweisen. Sowohl für ein weiteres breites Investment in Nanotechnologie-Unternehmen als auch für Schwerpunktbildung in der Förderung sind branchenbezogenen Marktabschätzungen sehr wichtig. Diese ergeben sich nicht allein durch Fortschreibung bereits bestehender Märkte, weil die Nanotechnologie gerade wegen ihres disziplinen- und branchenübergreifenden Charakters hohes Basis-Innovationspotenzial hat.

- Studie zu „**Nanotechnologie und Nachhaltigkeit**“

Nanotechnologie wird von vielen Befürwortern oberflächlich als nachhaltig „per se“ herausgestellt. Tiefergehende Analysen zu dem Thema, z.B. zur Auswirkung der mit der Nanotechnologie verbundenen „Dematerialisierung“ und damit zur Auswirkung auf Stoffströme, gibt es bisher nicht. Dies soll anhand einiger beispielhafter Anwendungen und auf der Basis genauer Daten konkret untersucht werden. Dabei muß darauf hingewiesen werden, dass bisher noch unklar ist, was der Begriff Nachhaltigkeit in Verbindung mit der Nanotechnologie bedeutet.

- Studie zu „**Nanotechnologie im Gesundheitssektor**“

Einige der gesellschaftlich und wirtschaftlich bedeutendsten Anwendungen der Nanotechnologie könnten im Gesundheitssektor liegen. Beispielsweise könnten Nanopartikel in der Therapie von Krankheiten eingesetzt werden. Aus funktionalen supramolekularen Systemen könnten neue Medikationsformen, aus der Nanobiotechnologie könnten funktionale Systeme auf der Basis von Biomaterialien entstehen. Noch sehr ferne Visionen sehen Möglichkeiten zur Ultrafrüherkennung von Krebs durch Produkte der Nanobiotechnologie. Der Anwendung im Gesundheitsbereich könnte eine Schrittmacherfunktion für die Nanotechnologie insgesamt zukommen. Deshalb sollten am Fallbeispiel des Gesundheitssektors Chancen und Risiken der Nanotechnologie evaluiert werden. Dabei sollten nicht nur heutige und zukünftige Anwendungsbeispiele der Nanotechnologie im Gesundheitsbereich erfasst werden, sondern die Auswirkungen der Nanotechnologie auf das Gesundheitswesen insgesamt. In diesem Zusammenhang stellen sich auch möglicherweise ethische Fragen des Einsatzes der Nanotechnologie.

- **Ultrafeine Partikel in der Umwelt**

Im Zusammenhang mit der Errichtung einer Fabrik zur Produktion von Nanopartikeln sind Befürchtungen über Toxizität dieser Partikel im Falle von Emissionen geäußert worden. In der Tat gibt es Experimente, nach denen bestimmte ultrafeine Partikel bei Ratten Tumore auslösen können.

Experten warnen jedoch mit Recht vor einer undifferenzierten Diskussion über mögliche Toxizität von Nanopartikeln. Es handelt sich vielmehr um ein generelles Problem ultrafeiner Partikel. Ultrafeine Partikel mit Abmessungen im Nanometerbereich nehmen in unserer Umwelt zwar zu, dies ist aber keine Folge der Nanotechnologie. Es gibt vielfältige Quellen für solche Partikel, z.B. lassen Dieselrußfilter gerade diese Partikel entweichen. Auch aus Autoabgas-Katalysatoren werden ultrafeine Metallpartikel emittiert.

Die Nanotechnologie bietet gerade für solche möglichen Risiken ein großes Potenzial der Erfassung und Kontrolle. Andererseits haben die Experten betont, dass eingehende Untersuchungen zur Toxizität von Nanopartikeln noch ausstehen. Die Fragestellung kann also nicht ignoriert werden. Es ist daher geplant, zunächst den konkreten Handlungsbedarf für die Forschung im Rahmen von Fachgesprächen zu ermitteln.

Im Jahr 2000 hat die sogenannte "Bill-Joy-Debatte" ein gewisses mediales Aufsehen erregt. Der bekannte amerikanische Computerwissenschaftler Bill Joy hat Visionen der Zukunftsforscher Kurzweil und Drechsler zu einem Horrorszenario umgedeutet, in dem die Kombination von Genetik, Robotik und Nanotechnologie in einigen Jahrzehnten zu derart intelligenten Maschinen führen könnte, dass der Mensch "überflüssig" wird und von Maschinen letztlich "abgeschafft" wird. Die überwiegende Zahl der Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft, die sich an dieser Debatte beteiligen, sehen dies allerdings als Science Fiction an. Die gegenwärtige Forschung der Nanotechnologie deutet in keiner Weise einen derartigen Trend an.

## **5 Kompetenzzentren Nanotechnologie - Innovation durch Vernetzung**

Die Nanotechnologie beschreibt ein junges innovatives Gebiet von hoher Komplexität, das sich aus einer Vielzahl spezialisierter Fachdisziplinen zusammensetzt. In den kommenden Jahren wird sich das erhebliche Innovationspotenzial dieser Technologie über bereits bestehende Anwendungen hinaus entfalten. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, Voraussetzungen zu schaffen, dieses Innovationspotenzial für Anwendungen in der Wirtschaft nutzbar zu machen.

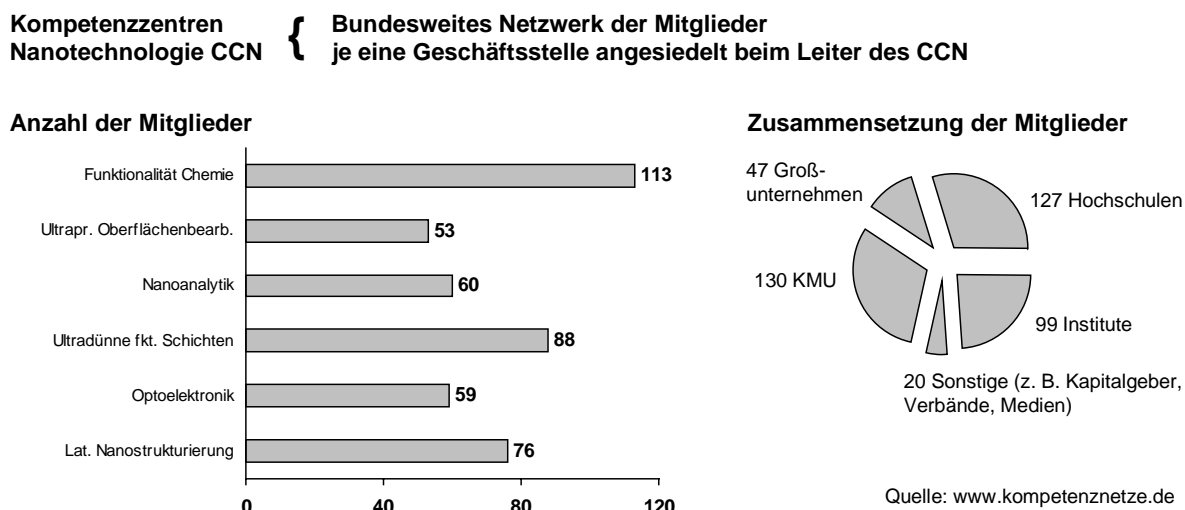
Die BMBF-Förderinstrumente für die Nanotechnologie in Deutschland setzen moderne Erkenntnisse der Innovationsforschung um. Um tatsächlich Innovationen zu generieren, reicht wettbewerbsfähige Forschung allein nicht aus. Hinzukommen muß die möglichst frühzeitige Vernetzung aller Akteure, die die Innovation hervorbringen. Dazu gehören nicht nur Forscher, Entwickler und Anwender, sondern auch Investoren, Vertreter von Normung, Marketing, Lehre und Öffentlichkeitsarbeit. Speziell in der Nanotechnologie besteht darüber hinaus die Anforderung bzw. die Chance, das hohe Maß an Interdisziplinarität bedarfsgerecht zu fördern. Auch hier gilt, dass die Vernetzung der Akteure über die Disziplinen Physik, Biologie, Chemie und Ingenieurwissenschaft hinweg ein innovationskritischer Faktor ist.

Diesem Ansatz folgend wird die Nanotechnologie auf zwei Arten gefördert: Zur bewährten Verbundprojektförderung tritt zusätzlich das neue Instrument der Vernetzungsförderung. Dabei wurden und werden die im Rahmen der Verbundprojekte geförderten Akteure zusätzlich und projektübergreifend in sieben jeweils bundesweiten Netzwerken („Kompetenzzentren“) zusammengeführt, und zwar in den Teilgebieten

- Laterale Nanostrukturierung
- Nanotechnologie in der Optoelektronik
- Funktionalität durch Chemie
- Ultradünne funktionale Schichten
- Nanoanalytik
- Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung
- Materialien der Nanotechnologie

zusammen (Es existieren auch weitere Teilgebiete, zu denen jedoch keine speziellen Kompetenzzentren gefördert werden). Die Kompetenzzentren werden durch eine beim Leiter des Zentrums angesiedelte Geschäftsstelle gefördert, welche für die Mitglieder des jeweiligen Zentrums innovationskatalysierende Plattformen organisieren. Mitgliederzahl und Mitgliederzusammensetzung sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die Förderung in den direkt vom BMBF unterstützten Kompetenzzentren ist als Anschubfinanzierung jeweils einer Geschäftsstelle pro Kompetenzzentrum angelegt, welche die Vernetzung disziplinenübergreifend und entlang der Wertschöpfungskette beschleunigt. Es handelt sich nicht um eine institutionelle Förderung. Die Förderung der Geschäftsstellen ist im Unterschied zur Verbundprojektförderung auf fünf Jahre und insgesamt 9,7 Mio Euro limitiert.



**Abbildung 2: Anzahl und Zusammensetzung der Mitglieder von sechs Kompetenzzentren Nanotechnologie (CCN). Neben Forschung und Entwicklung wird die innovationskatalysierende Vernetzung der Akteure gefördert.**

Die Netzwerkförderung, wie sie in Deutschland für die Nanotechnologie durchgeführt wird, wird zunehmend auch in anderen Forschungsregionen aufgegriffen. So plant zum Beispiel die EU im 6. Rahmenprogramm mit den „Networks of Excellence“ ein ähnliches Modell.

Die Arbeitsgebiete der Kompetenzzentren lassen sich folgendermaßen beschreiben:

- **Laterale Strukturierung (Nanoclub Lateral),**

(Geschäftsstelle: AMO GmbH Aachen)

Das zentrale Thema der F&E-Aktivitäten dieses Kompetenzzentrums ist die Erzeugung und Anwendung von lateralen Nanostrukturen unter 100 nm als Basis von neuen Technologien und Produkten in der Informationstechnologie, Sensorik, Medizintechnik und Nanobiotechnologie. Die wissenschaftlich-technischen Aktivitäten der Mitglieder des Zentrums wurden dazu in acht Themenclustern gebündelt: Ultraelektronik, Magnetoelektronik, Extended CMOS, Lithographie Selbstorganisation, Simulation, Analytik und Nanowerkzeuge.

Ziel der Forschungsprojekte ist es, möglichst viele Stufen der Wertschöpfungskette abzudecken, um eine effektive Umsetzung des vorhandenen und zu erarbeitenden technologischen Wissens zu erreichen.

- **Funktionalität durch Chemie (NanoChem)**

(Geschäftsstelle: Universität Kaiserslautern)

Chemische Nanotechnologien eröffnen eine neue Materialwelt und damit branchenübergreifend wettbewerbswirksame Innovationschancen. Die Basis sind Materialstrukturen und Partikel im Nanometer-Maßstab, die im Verbund neuartige, für industrielle Anwendungen maßgeschneiderte Materialeigenschaften ermöglichen. Das Kompetenzzentrum NanoChem ist in der Lage, die gesamte Prozeßtechnik von den wissenschaftlichen Grundlagen über die Verarbeitungs- und Formgebungstechnik bis hin zur Anwendungstechnik zu erarbeiten.

- **Nanotechnologie in der Optoelektronik (NanOp)**

(Geschäftsstelle: TU Berlin)

Das Kompetenzzentrum NanOp arbeitet an der Erforschung und Entwicklung von lateralen Nanostrukturen für die Optoelektronik. Selbstorganisiertes Wachstum von Quantenpunkten ist dabei einer der wichtigsten Ansätze für die Herstellung neuartiger Lichtemitter und Photodetektoren. Durch den Einsatz von Quantenpunkten lassen sich preiswerte, neuartige Halbleiterlaser entwickeln, die in Wellenlängenbereichen arbeiten können, welche mit konventionellen Halbleiterlasern bisher nicht erschlossen werden konnten. Der Einsatz von Nanotechnologien schafft neue Einsatzgebiete der Optoelektronik und erschließt damit neue Märkte.

- **Ultradünne funktionale Schichten (UFS)**

(Geschäftsstelle: FhG-IWS Dresden)

Diese Zentrum verfügt durch seine Mitglieder über besondere Kompetenz auf dem Gebiet der Herstellung, Charakterisierung und Anwendung von ultradünnen Schichten. Die Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu ultradünnen Schichten liegen auf den Gebieten „Advanced CMOS“, neuartige Bauelemente, biomolekulare Schichten für Medizin und Technik, mechanische und Schutzschichtenanwendungen, ultradünne Schichten für die Optik und Photonik, Nanosensorik, Nanoaktorik und Nanoreaktorik.

- **Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung (UpOB)**

(Geschäftsstelle: PTB Braunschweig)

Das Ziel dieses Zentrums besteht darin, Möglichkeiten weiterzuentwickeln, um technische Funktionsflächen mit höchster Genauigkeit herzustellen und meßtechnisch zu charakterisieren. Kernbereiche sind: Mechanisch/chemische Bearbeitungsverfahren; Ionenstrahl- und Plasmaverarbeitungsverfahren; Optische Bearbeitungsverfahren und verwandte Gebiete; Charakterisierung von Oberflächen.

- **Nanoanalytik**

(Derzeitige Geschäftsstelle: Universität Hamburg)

Das Kompetenzzentrum Nanoanalytik nimmt innerhalb der Nanotechnologie eine Querschnittsfunktion wahr. Es entwickelt und vermittelt nanoanalytische Meßverfahren sowohl im Rahmen der Kompetenzzentren als auch in Kooperationen, die über den Rahmen der Zentren hinausgehen. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt stellt die Standardisierung na-

noanalytischer Meßverfahren und damit die Vorbereitung ihres Einsatzes in Produktion und Qualitätssicherung dar. Die experimentellen Methoden umfassen neben Rastersondenverfahren wie Rastertunnelmikroskopie (STM), Rasterkraftmikroskopie (AFM) und optischer Nahfeldmikroskopie (SNOM) alle Meßverfahren, die eine laterale Auflösung von 100 nm und eine vertikale Auflösung von 10 nm zulassen, d.h. Elektronenmikroskopie, Elektronenspektroskopie, Sekundärionen-Massenspektrometrie und eine Vielzahl anderer, zum Teil kombinierter Verfahren.

- **Materialien der Nanotechnologie (Nanomat)**

(Geschäftsstelle: FZ Karlsruhe)

Angeregt durch die Initiative des BMBF zur Bildung von Kompetenzzentren, aber unabhängig von der Förderung der Geschäftsstellen der sechs zuerst genannten Zentren, hat das Forschungszentrum Karlsruhe gemeinsam mit den Universitäten Karlsruhe und Straßburg einen neuartigen Forschungsverbund "Nanomat" eingerichtet, in dem bisher ungeklärte Fragestellungen von wirtschaftlicher Bedeutung in großer fachlicher Breite überwiegend im Bereich der Vorlauforschung bearbeitet werden. Im Rahmen einer strategischen Allianz mit Partnern der deutschen Industrie, der Fraunhofer- und Max-Planck-Gesellschaft sowie verschiedener Universitäten werden die Ergebnisse der Vorlauforschung genutzt, um wirtschaftlich verwertbare innovative Produkte und Verfahren zu entwickeln. Der Forschungsverbund "Nanomat" konzentriert dabei die spezifischen Kompetenzen der beteiligten Einrichtungen, die sich mittelfristig mit der Entwicklung molekularelektronischer Bauelemente und der Synthese nanostrukturierter Materialien auf theoretischer und experimenteller Basis befassen werden. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, nanostrukturierte Systeme mit maßgeschneiderten Eigenschaften für wirtschaftlich interessante Anwendungen gezielt synthetisieren zu können. Dazu werden Forschungsvorhaben mit an die Komplexität der Aufgabe angepasster Laufzeit eingerichtet.

Die Aufgaben und die Rolle der Kompetenzzentren beschränken sich nicht allein auf Diskussionen zu Strategieprozessen. Ihr Aufgabenspektrum beinhaltet darüberhinaus

- Öffentlichkeitsarbeit
- Aus- und Weiterbildung
- Fragen der Standards und der Normung
- Schaffung eines wirtschaftlich attraktiven Umfeldes (z.B. Kapital für Start-ups)
- Beratung von Unternehmen

Eine vorläufige Evaluierung der Kompetenzzentren nach drei Jahren ihrer Tätigkeit zeigt bereits erste Erfolge:

- Es ist gelungen, verschiedene Fachszenen zusammenzubringen, die vorher keinen Kontakt hatten. So konnten z.B. Hersteller von Nanopartikeln mit den Herstellern von Dentalmaterialien Kontakt aufnehmen und auf diese Weise ein neues Anwendungsgebiet der Nanopartikel in der Dentalmedizin angehen.
- Die Kompetenzzentren entwickeln sich zu einem Forum, auf dem Informationen zwischen Industrie und Wissenschaft ausgetauscht werden können. Die Industrie ist verständlicherweise zurückhaltend in der Diskussion von Problemen und Lösungsansätzen. Ein neutrales Kompetenzzentrum kann hier über einen längeren Zeitraum Vertrauen schaffen, das die Kommunikation zwischen Wissenschaft und Industrie fördert.

- Die Gründung der Kompetenzzentren hat entscheidend dazu beigetragen, dass sich eine „Nanotechnologie-Fachszene“ formiert. Die Kompetenzzentren haben die Kommunikation der verschiedenen, z.T. wissenschaftlich weit auseinanderliegenden Teilgebiete der Nanotechnologie vorangetrieben. Es werden Synergien zwischen den verschiedenen Feldern der Nanotechnologie genutzt. So werden beispielsweise Anfragen von Unternehmen zwischen den Kompetenzzentren ausgetauscht, so dass Lösungsansätze aus ganz anderen Technologiegebieten geprüft werden können.
- Es sind Netzwerke von der Wissenschaft über den Technologieanbieter (z.B. Gerätehersteller) bis zum potenziellen Anwender entstanden. Die Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette konnte also verbessert werden. Die Technologieanbieter sind mit neuen Anwendungsgebieten und Anwendern, aber auch mit Risikokapitalgebern in Kontakt gekommen.
- Unter den Mitgliedern der sechs Kompetenzzentren sind insgesamt etwa 130 KMU. Diese profitieren laut Auswertung einer begleitenden Evaluierung überdurchschnittlich von der Einbindung in die Netzwerke der Nanotechnologie-Akteure.

## 6 Literatur

- [1] VDI-Technologiezentrum (Hrsg.) *Innovationschub aus dem Nanokosmos*, Düsseldorf Oktober 1998
- [2] NSTC/IWGN (Ed.) *National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution (NNI)*, Washington February 2000
- [3] Department of Trade and Industry, *The International Technology Service Missions on Nanotechnology to Germany and the USA*, March 2001, London
- [4] VDI-Technologiezentrum (Hrsg.), *Vorstudie Innovations- und Technikanalyse Nanotechnologie*, Februar 2001
- [5] National Science Foundation (Ed.), *Social Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Washington March 2001
- [6] Sal. Oppenheim (Hrsg.), *Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie – Schlüsseltechnologie für Deutschland*, Köln April 2001
- [7] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), *BMBF-Programm IT-Forschung 2006*, Bonn, März 2002
- [8] Evolution Capital Ltd., *Nanotechnolog.: Commercial opportunity*, London, Dezember 2001
- [9] DG-Bank, GZ-Bank (Hrsg.), *Im Fokus, Nanotechnologie in der Chemie*, Frankfurt/Main, September 2001
- [10] WGZ-Bank (Hrsg.), *Mikro- und Nanotechnologie, Branchenreport aus Sicht des Kapitalmarktes*, Düsseldorf, April 2002
- [11] Roco, *International Strategy for Nanotechnology Research and Development*, Journal of Nanoparticle Research 3: 353-360, 2001



Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.