werden, um diese Änderungen umgehend im „*TA-Net-BW*“ aktualisieren zu können. Dies betrifft ebenso Änderungen/Ergänzungen der WWW-Linksammlung, die ständig aktualisiert und ergänzt wird. Die Neuaufnahme von Institutionen und Projekten dagegen kann aus Kapazitätsgründen nach wie vor nur im Rahmen der im Zweijahres-Rhythmus stattfindenden vollständigen inhaltlichen Aktualisierung der Dokumentation und des Portals erfolgen, da die für die Auswahl bzw. Aufnahme notwendige inhaltliche Bewertung entsprechenden Aufwand erfordert. Unabhängig davon können sich neue Institutionen und Einrichtungen jederzeit mit ihrer Interessensbekundung melden und werden garantiert in die nächste Erhebung einbezogen. In diesem Sinne sind wir auch jederzeit für Anregungen, Vorschläge und konstruktive Kritik offen und dankbar.

Die Dokumentation kann gegen eine Schutzgebühr von € 5,00 bei der TA-Akademie unter der ISBN-Nr. 3-934629-79-2 bestellt werden (Fax: +49 (0) 711 / 90 63 - 299) und steht außerdem als PDF-Download zur Verfügung unter http://www.ta-akademie.de.

Kontakt

Dr.-Ing. Manfred Rohr
Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg
Industriestraße 5, 70565 Stuttgart
Tel.: +49 (0) 711 / 90 63 - 103
E-Mail: manfred.rohr@ta-akademie.de

« »

TA-KONZEPTE UND -METHODEN

Technikfolgenabschätzungen zur Nanotechnologie – Inhaltliche und konzeptionelle Überlegungen

von Torsten Fleischer, ITAS

Nanotechnologie erlebte in den letzten Jahren eine rege forschungspolitische und auch mediale Resonanz. Dabei wird die Diskussion in der Öffentlichkeit insbesondere von spektakulären, aber wissenschaftlich bislang wenig fundierten und kaum in absehbarer Zeit realisierbaren Anwendungen geprägt, während die bereits umgesetzten bzw. kurz- und mittelfristig zu erwartenden nanotechnologiebasierten Produkte und Verfahren und deren Chancen und Risiken weitgehend unbeachtet blieben. Im folgenden Artikel wird sich mit einigen methodischen Herausforderungen bei TA-Untersuchungen zur Nanotechnologie auseinandergesetzt und versucht, Schwerpunkte für zukünftige Forschungsaufgaben in diesem Themenfeld zu identifizieren.

1 Einführung

Nanotechnologie erfreut sich in den letzten Jahren eines regen forschungspolitischen – und zunehmend auch medialen – Interesses. Das möglich erscheinende Design von Materialien auf atomarer und molekularer Ebene und damit verbunden die Kontrolle von makroskopischen – ggf. neuen – Produkteigenschaften sowie die weitere Miniaturisierung von Komponenten, Produkten und Verfahren bis hin zum Bau von „Nanomaschinen“ sind sowohl für Hersteller und Anwender als auch für potenzielle Kunden faszinierend. Teilweise wird der Nanotechnologie sogar eine epochale Bedeutung zugesprochen, da sie für zahlreiche Hochtechnologie-Bereiche marktentscheidende Beiträge liefern kann und ihre Beherrschung als im weltweiten Wettbewerb erfolgsentscheidend gilt. Man erwartet von ihr einen bedeutenden Einfluss auf den Güter- und Arbeitsmarkt des 21. Jahrhunderts, einige Verfechter sehen sie als Grundlage einer „dritten industriellen Revolution.“

Auf der anderen Seite haben die technologischen Möglichkeiten und Visionen im Bereich der Nanotechnologie – beispielsweise solche von autonom agierenden oder sich gar selbst replizierenden Nanomaschinen oder zukünftige Anwendungen der Nanotechnologie am Menschen, etwa für medizinische Zwecke oder zur Verbesserung seiner sensorischen oder mentalen Fähigkeiten –, die zeitgleich mit einer wieder aufkommenden Debatte über Möglichkeiten und Grenzen von Gentechnik und Robotik öffentlich gemacht wurden, eine breitere Auseinanderset

zung mit Chancen und Risiken dieser Techniken und ihrer politischen Kontrolle und Steuerung – in den USA in zahlreichen Fachzirkeln, in Deutschland vornehmlich im Feuilleton (Stichwort „Bill-Joy-Debatte") – ausgelöst.

2 Was ist Nanotechnologie?

„Nanotechnologie" als Begriff ist so schillernd wie unscharf. Gemeinhin wird die Geschichte der Nanotechnologie zurückgeführt auf den amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman (1918-1988). Dieser erläuterte am 29. Dezember 1959 auf einem Abendvortrag anläßlich des jährlichen Treffens der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft am Caltech, dem California Institute of Technology, seine Visionen der Manipulation von Materie auf atomarer Ebene:

> „But I am not afraid to consider the final question as to whether, ultimately – in the great future – we can arrange the atoms the way we want; the very atoms, all the way down! What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them (...). What would the properties of materials be if we could really arrange the atoms the way we want them? (...) Atoms on a small scale behave like nothing on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. (...) At the atomic level, we have new kinds of forces and new kinds of possibilities, new kinds of effects. The problems of manufacture and reproduction of materials will be quite different. (...) The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom. It is not an attempt to violate any laws; it is something, in principle, that can be done; but in practice, it has not been done because we are too big."

Den Begriff „Nanotechnik" selbst kreierte dann 1974 der Japaner Norio Taniguchi. Er beschrieb Nanotechnologie als: „...production technology to get the extra high accuracy and ultra fine dimensions, i.e. the preciseness and fineness on the order of 1 nm (nanometer), 10^{-9} meter in length."

Die nächsten beiden wichtigen Meilensteine wurden in den achtziger Jahren erreicht: Forscher aus dem Schweizer IBM-Labor Rüschlikon stellten zwei der wichtigsten „Werkzeuge" der Nanotechnologie vor: 1982 das Rastertunnelmikroskop, für das seine Erfinder Gerd Binnig und Heinrich Rohrer vier Jahre später den Nobelpreis erhielten und mit dem eine ganze Familie von Rastersondenverfahren begründet wurde, darunter auch das 1986 vorgestellte Rasterkraftmikroskop, an dem Binnig ebenfalls maßgeblich beteiligt war. Mit ihrer Hilfe wurde es möglich, Atome zu „sehen", zu bewegen und zu positionieren sowie – mittels weiterer technologischer Hilfsmittel – auch zu „fühlen". Populär wurde diese Technik Ende der achtziger Jahre, als es Don Eigler von IBM gelang, den Namenszug seines Unternehmens mit einzelnen Xenon-Atomen zu „schreiben" – die Aufnahmen davon sind bis heute ein beliebtes Objekt der Wissenschaftspresse.

Mit der einsetzenden Dynamisierung und Popularisierung des Forschungsfeldes in dieser Zeit – weitere wichtige Punkte sind die Entdeckung von regelmäßigen Kohlenstoffstrukturen wie den (Buckminster-)Fullerenen 1985 oder den Nanoröhren (1991) – einher geht einerseits seine Verbreiterung (einige sprechen bereits von „Verwässerung") andererseits kommen „Richtungsstreite" auf.

Letztere werden ausgelöst durch zwei Bücher von Eric Drexler: „Engines of Creation" (1986) und „Unbounding the Future" (1991). Drexler führt darin das Konzept der „molekularen Nanotechnologie" ein. Dieser Ansatz soll – vereinfacht gesprochen – die Konstruktion großer, auf das Atom genauer Objekte mittels einer Sequenz präzise gesteuerter chemischer Reaktionen erlauben, bei der Objekte Molekül für Molekül aufgebaut werden. Hierzu solle man sich sogenannter „Assembler" bedienen, die eine beliebige molekulare Struktur anhand einer Befehlssequenz aufbauen und die Kontrolle über die dreidimensionale Positionierung und genaue Orientierung der molekularen Komponente ermöglichen. Damit das Verfahren in vertretbaren Zeiträumen abläuft und wirtschaftlich ist, müssen diese Assembler in der Lage sein, Kopien ihrer selbst herzustellen, das heißt sich selbst zu replizieren. Die Realisierbarkeit dieses Konzeptes ist in der Fachwelt bis heute heftig umstritten, es gilt als in vielerlei Hinsicht problembehaftet und fragwürdig. Drexler und Mitarbeiter werden einerseits vielerorts als wissenschaftliche Außenseiter betrachtet, andererseits hätten die von ihnen vertretenen Ideen – erwiesen sie sich als technisch und wirtschaftlich umsetzbar

– weit reichende Konsequenzen. Zudem haben gerade diese visionären Vorstellungen – und die darauf in der belletristischen wie in der populärwissenschaftlichen Literatur entstandenen Echos – die mediale Vermittlung von Nanotechnologie, ihre Popularisierung wie auch die politische und öffentliche Diskussion um ihre Chancen und Risiken wesentlich geprägt.

Selbst innerhalb der etablierten Wissenschaften ist bislang nicht eindeutig geklärt, welche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nun eigentlich der Nanotechnologie zuzuordnen sind – und welche nicht. Es gibt bis heute keine allgemein akzeptierte Definition und Abgrenzung des Gebietes „Nanotechnologie", vielmehr existieren mehrere Definitionen (v. a. von Wissenschaftlern, Wissenschaftsorganisationen und Politikberatern), die sich z. T. deutlich voneinander unterscheiden. Wichtige Differenzierungsmerkmale sind dabei u. a. ein unmittelbarer Bezug auf Größenskala, Verweise auf neue Funktionalitäten als definierendes Moment oder auch die Beschränkung auf bestimmte Materialgruppen. Einige Definitionen schließen explizit auch noch die Anwendung dieser Techniken mit ein. Ein Übriges getan hat die aktuelle forschungspolitische Konjunktur des Feldes, infolge derer etliche etablierte Forschungsthemen Begründungen für ihre „Nanotechnologie-Relevanz" – und damit den Anspruch auf Fördermittel – entdeckten.

Als richtungweisend für die deutsche forschungspolitische Diskussion um die Nanotechnologie kann eine Publikation des VDI-Technologiezentrums aus dem Jahre 1998 (Bachmann 1998) gelten, in der es heißt:

> „Gegenstand der Nanotechnologie ist die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen, molekularen Materialien, inneren Grenzflächen und Oberflächen mit kritischen Dimensionen oder Fertigungstoleranzen von einigen 10 nm bis zu atomaren Abmessungen. (...) Ziel ist die Präparation materialabhängiger Festkörpereigenschaften, -dimensionen und neuer Funktionen, basierend auf neuen physikalisch-chemisch-biologischen Wirkprinzipien, deren Ursachen im sub-mikroskopischen bzw. atomaren und molekularen Bereich begründet sind. (...) Nanotechnologie beschäftigt sich mit Systemen, deren neue Funktionen und Eigenschaften nur allein von den nanoskaligen Effekten ihrer Komponenten abhängig sind."

Etwa vergleichbar dazu heißt es in der Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage der F.D.P.-Fraktion im Deutschen Bundestag 2001 (Bundestag 2001):

> „Gegenstand der Nanotechnologie ist die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von funktionalen Strukturen mit Dimensionen im Bereich weniger millionstel Millimeter. Bei diesen Dimensionen treten neuartige Phänomene auf, die in makroskopischen Dimensionen nicht beobachtbar sind."

Die im Jahr 2000 beschlossene Nationale Nanotechnologie-Initiative der USA beschreibt das Themenfeld wie folgt (NSTC 2002):

> „The essence of nanotechnology is the ability to work at the molecular level, atom by atom, to create large structures with fundamentally new molecular organization. (...) Nanotechnology is concerned with materials and systems whose structures and components exhibit novel and significantly improved physical, chemical and biological properties – and that enable the exploitation of novel phenomena and processes – due to their nanoscale size. The goal is first to exploit these properties by gaining control of structures and devices at atomic, molecular and supramolecular levels; and then to learn to manufacture and use these devices efficiently."

Nanotechnologie als neues Forschungsthema entstammt der Konvergenz von traditionell getrennten wissenschaftlichen Disziplinen und Technikfeldern, deren zentrale Entwicklungsrichtungen beim Übergang in den Nanometerbereich zu überlappen und zu verschmelzen beginnen.

Auf der einen Seite gibt es einen andauernden Trend zur Miniaturisierung von Strukturen und Komponenten. Dessen wichtigster Motor war und ist die Elektronikindustrie, die immer mehr elektronische Komponenten auf einem Chip unterzubringen und die entsprechenden Strukturen zu verkleinern sucht. Die umfangreichen fertigungstechnischen Erfahrungen mit dem Elektronikmaterial Silizium hat man sich auch für die Herstellung von mikromechanischen Bauteilen auf Silizium-Basis zunutze gemacht und daraus zahlreiche Komponenten und Systeme, etwa Cantilever, Zahnräder, ... gefertigt. Im Rahmen dieses sogenannten „top down"-Zuganges (ausgehend von großen zu immer kleineren Strukturen), wie er tendenziell

eher von Physikern und Ingenieuren verfolgt wird, verschiebt sich die beherrschte Größenordnung zunehmend in die Nanometerdimension. Dadurch gewonnene Erkenntnisse lieferten vor allem wesentliche Beiträge zur Elektronik, Optoelektronik und Sensorik.

Der gegenläufige Ansatz („bottom up", von unten nach oben) wird bislang eher durch Chemiker und Biologen vertreten, die mit dem Umgang mit Objekten in der Nanometer-Dimension seit langem vertraut sind. Hier versucht man, das wachsende Verständnis von sich selbst organisierenden Strukturen und Funktionseinheiten und die gewonnenen Erkenntnisse für technische Fragestellungen, gegenwärtig vornehmlich im Bereich der lebenswissenschaftlichen Forschung und bei der Entwicklung neuer Materialien, zu nutzen. Ein Ziel, dem man sich zu nähern sucht, ist das kontrollierte Erzeugen von komplexen Molekülen. So „gefertigte" lange Moleküle können als elektrische Leiter dienen; metallische Inseln, aus einer überschaubaren Anzahl von Metallatomen zu sogenannten Clustern zusammengefügt, dienen als Transistoren, mit denen sich einzelne Elektronen schalten lassen.

Das bedeutendste Potenzial für Innovationen aus der Nanowelt wird in der Kombination dieser beiden Entwicklungswege, aus deren gegenseitiger Befruchtung und entstehenden Synergien gesehen. Dabei geht es nicht einfach darum, „Dinge kleiner zu machen". Vielmehr soll ein Größenbereich dem aktiven und kontrollierten Zugriff geöffnet und technisch nutzbar gemacht werden, in dem neue, bislang unzugängliche Effekte und Eigenschaften auftreten. Dies erfordert innovationsorientierte neue Ansätze, die dem interdisziplinären Charakter dieses Technologiefeldes Rechnung tragen.

Aus Sicht der Technikfolgenabschätzung ist festzustellen, dass Nanotechnologie ein diffuser Untersuchungsgegenstand ist, da es keine in der wissenschaftlichen Community allgemein anerkannte klare Definition gibt und sich die Abgrenzung zu verwandten oder benachbarten Gebieten wie z. B. der Mikroelektronik, der Chemie oder der Biotechnologie schwierig gestaltet. Zudem ist der Begriff „Nanotechnologie" irreführend, da es sich weder im engeren Sinne um e i n e Technologie oder eine Gruppe von Technologien handelt, noch damit in nennenswertem Umfang marktgängige Produkte und Verfahren beschrieben werden können. Vielmehr handelt es sich dabei um einen eher forschungspolitisch und forschungsorganisatorisch geprägten Terminus. Unter ihm werden Technologien für und mit (und manchmal auch noch Wissenschaft von) nanoskaligen Systemen (die in mindestens einer Dimensionen einen Größenbereich etwa zwischen 1 und 100 nm aufweisen) zusammengefaßt, bei denen aus dieser Miniaturisierung neue Effekte und Eigenschaften resultieren und nutzbar gemacht werden.

Inhalt und Breite der Definition bringen es mit sich, dass Nanotechnologie – in weit reichender Analogie zur „klassischen" Materialforschung – als Querschnittstechnologie mit vielfältigen Implikationen für andere Technologien und einen großen antizipierten wirtschaftlichen und forschungsbezogenen Innovationspotenzial zu betrachten ist. Dabei sind sowohl die zu berücksichtigenden Technologien selbst, die Zeithorizonte ihrer Realisierung wie auch die potenziellen Anwendungen und deren Kontexte heterogen und hochgradig differenziert. Eine generalisierte Diskussion von Chancen und Risiken der Nanotechnologie („d i e Technikfolgenabschätzung d e r Nanotechnologie") erscheint darum weder geeignet noch machbar.

3 Innovationen durch Nanotechnologie

Nanotechnologie als Querschnittstechnologie läßt weit reichende Implikationen für andere Technologien erwarten. Ihr immanent sind zum einen qualitative Verbesserungen bestehender Produkte und Applikationen. So erlaubt sie die Leistungssteigerungen technischer, ökonomischer oder ökologischer Parameter bei bekannten Produkten oder Systemen, die nicht selten einhergehen mit Innovationen bei Fertigungsverfahren. Sie kann auch zur innovativen Konstituierung gänzlich neuer Produkte und Anwendungen führen. Darüber hinaus wird ihr erheblicher Einfluß auf existierende Technologien und das Potenzial zur grundlegenden Veränderung ganzer Technologiefelder (Systeminnovation) zugesprochen. Deshalb ist ihr der Status einer Schlüsseltechnologie zu attribuieren.

Nanotechnologie ist eine „enabling technology", bei der in nur wenigen Fällen der Produktbezug unmittelbar erkennbar ist. Viele Fortschritte bei bekannten Produkten und

Technologien, aber auch neuartige Produkt- und Prozessinnovationen, beruhen auf nanotechnologiebezogenen Materialien oder Verfahren, ohne jedoch auf den ersten Blick damit in Verbindung gebracht zu werden. Zugleich sind es aber weniger die Nanomaterialien und -technologien selbst, die beträchtliche ökonomische und damit verbunden auch soziale, institutionelle und ökologische Konsequenzen haben werden. Von weitaus größerer Bedeutung dürfte deren Nutzung in neuen Produkten oder Technologien sein.

Auf der Anwendungsseite weist das „Nano"-Feld ein breites Zeitspektrum auf. Bestimmte, seit Jahren etablierte Produkte und Prozesse werden heute als nanotechnologisch bezeichnet. Einige neue Nanotechnologie-(Vor-)Produkte sind bereits auf dem Markt, der Großteil der Entwicklungen steht allerdings noch am Anfang. Das Gebiet ist in seiner Breite eher noch durch Grundlagenarbeiten gekennzeichnet, für die (bestenfalls) grob skizzierte Produkt- und Anwendungsideen existieren. Viele Forschungsergebnisse und -vorhaben sind noch auf der Suche nach vielversprechenden Anwendungen und von einer Kommerzialisierung weit entfernt. Durch diese Situation werden auf empirischen Daten aufbauenden TA-Vorhaben und Verfahren enge Grenzen gesetzt, da solche Daten – sofern sie überhaupt verfügbar sind – nur in begrenztem Maße repräsentativ sein können.

Auf der anderen Seite sind in der frühen Phase der Entwicklung, in der sich die Nanotechnologie noch befindet, auch die Gestaltungsmöglichkeiten (für die Wirtschaft wie auch für die Politik) größer. Es ist ja eine Hoffnung vieler TA-Konzepte, dass man mit entsprechenden Untersuchungen früh ansetzen solle, ehe es für gestaltende Eingriffe zu spät ist. Aufgabe von TA-Vorhaben sollte demzufolge sein, Lösungspotenziale der Nanotechnologie – etwa in Bezug auf sich abzeichnende wissenschaftlich-technisch oder ökonomisch bedingte Innovationshindernisse, aber auch auf erkennbare ökologische oder Nachhaltigkeits-Probleme – und diesbezügliche Gestaltungs-, Förder- oder Steuerungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Dies kann zum einen dazu dienen, die Entwicklung von nanotechnologiebasierten Produkten und Verfahren möglichst gut unter techno-ökonomischen wie auch unter den so genannten „weichen" Kriterien passfähig zu machen. Zum anderen könnten Förderstrategien für Nanotechnologie-Vorhaben zielgenauer auf deren Problemlösungsbeiträge ausgerichtet werden. Letztlich könnte ein solches Vorhaben den Beginn von TA als einen die Nanotechnologie begleitenden Prozess markieren.

In einer groben Systematik lassen sich für die Analyse von Innovationseffekten der Nanotechnologie drei Ansätze unterscheiden, die zusammen mit einigen für TA relevanten Charakteristika in nachstehender Tabelle zusammengefasst sind:

Einige nanotechnologiebasierte Produkte und Verfahren sind schon heute auf dem Markt beziehungsweise befinden sich kurz vor ihrer Einführung:

- Nanopartikel – Teilchen in der Größenordnung zwischen 10 und 100 Nanometern – besitzen eine breite Palette unterschiedlicher Erscheinungsformen. Sie verlieren die typischen Charakteristika kompakter Materie, es erfolgt ein Übergang zu molekularen oder atomaren Phänomenen, die „ungewöhnliche" Eigenschaften (elektrische, optische, mechanische ...) nutzbar machen. Nanopartikel ermöglichen innovative Anwendungen im gesamten Bereich der Materialwissenschaften, etwa als kratzfeste, schmutzabweisende, farbvariable, lichtleitende oder geruchbindende Beschichtung klassischer Werkstoffe. Sie finden Anwendung in der Kosmetik, beispielsweise als UV-Filterkomponente in Sonnenschutzcremes. Da sie unterhalb einer bestimmten Größe durch Zellwände migrieren und vom Körper aufgenommen werden – somit bioverfügbar sind – wird ihre Nutzung in der Pharmazie und Medizintechnik, u. a. für die Herstellung partikulärer Trägersysteme für die kontrollierte Freisetzung von pharmazeutischen Wirkstoffen oder die Mikronisierung von Carotinoiden, verfolgt.
- Nanopartikel aus Kohlenstoff, sog. carbon black, finden schon seit geraumer Zeit Anwendung in der Reifenherstellung. Die wichtigsten Produkteigenschaften von Fahrzeugreifen – Fahreigenschaften, Rollwiderstand und Lebensdauer – waren aber bislang kaum unabhängig voneinander verbesserbar. In jüngster Zeit kommen hierfür kontrolliert mit definierten technischen Eigenschaften industriell in großen Mengen produzierbare nanostrukturierte Russpartikel zum Einsatz. Dadurch gelang es, Reifen auch hinsichtlich zuvor nur bedingt und unter gegenseitiger Beeinträchtigung zu beeinflussender Parameter zu optimieren und somit beispielsweise verschleißfestere Reifen mit geringerem Rollwiderstand herzustellen.
- Leseköpfe von modernen Computer-Festplatten nutzen den sogenannten Giant-Magneto-Resistive-(GMR-)Effekt, der nur durch nanostrukturierte Komponenten – bestimmte Schichtaufbauten, die sogenannten „spin valves" – technisch zugänglich wird. Dadurch werden kleinere und empfindlichere Magnetsensoren möglich, wie sie für Speichersysteme mit steigendem Speicherbedarf bei gleichbleibender Baugröße und damit wachsenden Speicherdichten erforderlich sind. GMR-Köpfe sind seit Ende der

Tab. 1: Ansätze für die Analyse von Innovationseffekten durch Nanotechnologie

	Zeithorizont	*Informations-Verfügbarkeit*	*„Wirkungs„-Potenzial*	*analytische Vergleichsbasis*
I: Nanotechnologie als „unterstützende" Technologie bei Material- und Prozessinnovationen für existierende bzw. in der Entwicklung befindliche Produkte und technische Systeme	(kurz- und) mittelfristig	qualitativ: gut quantitativ: eingeschränkt	mittel	gut
II: Nanotechnologie als „enabling technology" für neue Produkte und Verfahren	mittel- bis langfristig	qualitativ: eingeschränkt quantitativ: kaum belastbar	mittel – hoch	kaum vorhanden
III: Nanotechnologie als Voraussetzung für Systeminnovationen	langfristig	qualitativ: hoch spekulativ quantitativ: keine	hoch	nicht möglich

neunziger Jahre Stand der Technik, auch an der Entwicklung von Sensoren, Magnetic Random Access Memories (MRAMs) und Spin-Transistoren mit GMR-Systemen wird intensiv gearbeitet.

- Katalysatoren für Energiewandlungstechniken und chemische Verfahrenstechniken, etwa zur direkten Erzeugung von Diesel- und Vergaserkraftstoff aus Kohle oder für wirtschaftlicher herzustellende Brennstoffzellen.
- Röhrenförmige Anordnungen aus anorganischen Materialien sind im Grunde schon lange bekannt, doch erst mit der Entdeckung der Kohlenstoff-Nanoröhren 1991 erlangten sie breite Aufmerksamkeit und erleben seitdem einen rasanten Aufstieg. Nanoröhren zeichnen sich durch besondere Funktionalitäten aus, auf die sich Hoffnungen für zukünftige Anwendungen gründen. Gegenwärtig wohl am besten untersucht sind Kohlenstoff-Nanoröhren (Nanotubes); röhrenförmige Kohlenstoffmoleküle, die im einfachsten Fall aus einer einzelnen, zu einem Zylinder zusammengerollten Lage aus Graphit (sogenannte single-walled Nanotubes, SWNT) bestehen. Daneben findet man auch Nanoröhren (sogenannte multi-walled Nanotubes, MWNT) aus ineinander geschachtelten einlagigen Röhren. Eine einwandige Nanoröhre hat typischerweise einen Durchmesser von 1 bis 2 Nanometern, MWNT haben Durchmesser zwischen 10 und 50 nm. Kohlenstoff-Nanoröhren sind extrem stabil und zugleich vergleichsweise leicht, weswegen man sie als „Verstärkungs"-Faser in Verbundwerkstoffen (Kompositen) in Betracht zieht. Zudem sind sie chemisch reaktionsträge und hervorragende Leiter für Wärme. Die elektrische Leitfähigkeit der Nanoröhren hängt von ihrer räumlichen Struktur ab, d. h. je nach räumlicher Struktur verhalten sie sich wie ein Metall oder wie ein Halbleiter. Das bedeutet: In einer einzigen Materialklasse sind sämtliche Eigenschaften vereint, die man für die Elektronik braucht, was Nanoröhren zu interessanten Kandidaten für nanoelektronische Bauteile macht. Sie können durch elektrische Spannungen zur Kontraktion oder Ausdehnung stimuliert werden, wodurch elektromechanische Stellglieder oder Mikromanipulatoren realisiert werden könnten.

In den nächsten Jahren werden Einflüsse der Nanotechnologie wohl vor allem in den Bereichen Materialien, Elektronik, Optik und Gesundheitsversorgung (Medizintechnik/Pharmazie) bemerkbar sein. Dies sind Branchen, die auf beträchtliche Vorarbeiten zurückgreifen können und in denen man über Erfahrungen mit dem Arbeiten auf der sub-Mikrometer-Skala und über viele dafür notwendige Werkzeuge verfügt. Zunächst wird Nanotechnologie dazu beitragen, dort bereits existierende Produkte und Verfahren weiter zu verbessern. Ihre Kommerzialisierung wird FuE-Arbeiten für eine großmaßstäbliche Fertigung anstoßen und eine Refinanzierung von Forschungsarbeiten in den traditionell umsatzstarken Branchen gestatten. Die genannten Felder sind sicher nicht die im Hinblick auf ihre mediale Präsentation aufregendsten, sie dürften in ihrer technischen und ökonomischen Reichweite den „populäreren" Anwendungen jedoch kaum nachstehen.

4 Nanotechnologie und Marktprognosen oder „Die Magie der großen Zahlen“

Um den Einfluss der Nanotechnologie auf das zukünftige Wirtschaftsgeschehen zu beschreiben, werden in zunehmenden Maße Marktpotenzialschätzungen erarbeitet und publiziert. Diese werden auch in der politischen und öffentlichen Darstellung des Themenfeldes gern zitiert, um dessen wirtschaftliche und forschungspolitische Bedeutung zu unterstreichen. Für den Nanotechnologie-Markt sind in unterschiedlichen räumlichen Abgrenzungen zahlreiche Studien veröffentlicht. Eine Übersicht über aktuellere Arbeiten gibt die nachstehende Tabelle.

Tab. 2: Übersicht über jüngere Marktpotenzialschätzungen für Nanotechnologie (Angaben in Mrd. US$)

Autor	*inhaltliche Abgrenzung*	*Region*	*heute*	*2005*	*2010*	*2015*
National Science Foundation (USA)	NT-Produkte und -Dienstleistungen	global				ca. 1.000
NanoBusiness Alliance	NT-Produkte und -Dienstleistungen	global	45,5			1.000 - 2.000
Evolution Capital	„products and processes supported by NT“	global	20 - 50	> 150	> 1.000	
In Realis	„direct NT influence on total industrial output“	global		50 - 100	200 - 800	450 - 2.000
DZ Bank	NT	global	54		220	
Hitachi Research Institute	NT	Japan		19	230	
Mitsubishi Research Institute	NT (ohne Halbleiter)	Japan		68	162	

Diese Zahlen sind untereinander nur schwer vergleichbar, da insbesondere die Abgrenzung des Untersuchungsfeldes (s. o.) nur selten nachvollziehbar offengelegt wird. Zudem können diese Angaben – vor allem für die entfernteren Zeitpunkte – kaum als seriöse Projektionen gelten. Dafür lassen sich – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – zahlreiche Gründe anführen:

- Die Ausgangs- und Grunddaten sind noch äußerst lückenhaft, da die offiziellen Wirtschaftsstatistiken nanotechnologiebasierte Produkte nicht als gesonderte Kategorien erfassen.
- Es ist unklar, wie groß der Anteil von „Nanotechnologie“ an einzelnen Produkten tatsächlich ist bzw. wie er bemessen wird und welcher Mehrwert durch den Einsatz von Nanotechnologie bei den jeweiligen Produkten tatsächlich generiert wird.
- Schon das Abgrenzungsproblem für die Nanotechnologie allein ist bis heute nicht befriedigend gelöst, die gewählte Definition bestimmt aber das Marktvolumen entscheidend mit. Was „nanotechnologiebasierte“ oder „nanotechnologieunterstützte“ Produkte oder Prozesse – noch gar nicht zu reden von entsprechenden Dienstleistungen – sind, eröffnet zusätzlichen Interpretationsspielraum.
- Da Nanotechnologie ein junges Technologiefeld ist, existieren für eine Vielzahl diskutierter – häufig noch in der Phase der Grundlagenforschung befindlicher – Nanomaterialien und „Nano-Effekte“ nur Ansät

ze für Produktideen und Anwendungsfelder. Wenn Nanotechnologie tatsächlich neue, bislang unbekannte oder unzugängliche Effekte nutzbar macht, sind daraus resultierende Produkte und Dienstleistungen wohl kaum belastbar zu beschreiben. Aussagen über Akzeptanz auf dem Markt und über die Marktvolumina sind folglich hochgradig spekulativ.

- Derartige Marktstudien haben eine immanente Tendenz zur Überschätzung: Politiker wie Investoren (und hier vor allem die Risikokapitalunternehmen) mögen große Ideen, deren wirtschaftliche Relevanz durch große Zahlen unterstrichen wird.

Einig sind sich die Autoren offensichtlich hinsichtlich der tief greifenden wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie, entsprechen die geschätzten 1.000-2.000 Mrd. $ in 2015 doch immerhin bis zu 10 % des Industrieanteils am weltweiten Bruttosozialprodukt für dieses Jahr. Angesichts der Eingangsthese, dass Nanotechnologie als Querschnittstechnologie alle wirtschaftlichen Bereiche beeinflussen wird, kann dies höchstens in Bezug auf den gewählten Zeitpunkt, nicht aber hinsichtlich des Umfangs überraschen.

5 Nanotechnologie und Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit, nachhaltige Entwicklung ist ein zentrales, weltweit Beachtung findendes politisches Thema der letzten Jahre. Ohne hier vertieft auf die konzeptionelle und methodische Diskussion über die Umsetzung des Leitbildes „Nachhaltigkeit“ eingehen zu können (vgl. hierzu Kopfmüller et al., 2001), sei festgehalten, dass jenseits aller Diskussionen im Detail weitgehend Einigkeit darüber herrscht, dass technische Innovationen einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen leisten werden (ausführlich hierzu Fleischer und Grunwald 2002). Entsprechendes wird auch von der Nanotechnologie erwartet, teilweise werden ihr bereits erhebliche Problemlösungspotenziale, vor allem bei Materialien und Werkstoffen, zugeschrieben.

Allgemein gilt, dass die Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung von neuen Werkstoffen/Materialien für innovative Anwendungen herausragende Bedeutung für viele Technologiefelder und Wirtschaftsbranchen hat. Neue Werkstoffe bilden die Grundlage für Weiterentwicklungen in praktisch allen wichtigen Technologiebereichen. Die künftige wirtschaftliche Entwicklung steht in engem Zusammenhang mit Innovationen im Werkstoffbereich. Die Herstellung von Werkstoffen und ihre Nutzung in Produkten sind von zentraler Bedeutung für zahlreiche menschliche Aktivitäten. Damit verbundene Fragen haben zahlreiche Anknüpfungspunkte zur Diskussion um nachhaltige Entwicklung:

- Die Herstellung von Massen-Werkstoffen (etwa Stähle, Aluminium oder Keramiken) – sowie die Gewinnung von Rohstoffen dafür – ist mit großen Stoffströmen und Energieverbräuchen und häufig mit beträchtlichen ökologischen Lasten verbunden. Folglich hat die Entwicklung neuer Werkstoffe und der zugehörigen Produktions- und Verarbeitungstechniken auch erhebliche ökologische Auswirkungen.
- Werkstoffe bestimmen wichtige Design-Parameter weit verbreiteter Techniken mit. Optimierungen von Materialeigenschaften und neue Werkstoffe in heute typischen Anwendungsbereichen können dazu beitragen, ökologische Folgen der Techniknutzung selbst zu mildern. Beispielsweise könnte durch Leichtbau bei Fahrzeugen oder durch bessere Dämmmaterialien im Gebäudebereich eine Reduktion des Energieverbrauchs ohne Komfortverzicht erreicht werden.
- Auch Fortschritte bei Technologien, die nicht auf den ersten Blick mit neuen Werkstoffen in Verbindung gebracht werden, beruhen in erheblichem Maße auf neuen Werkstoffentwicklungen. Dabei spielt die zentrale Rolle neuer Werkstoffe für die Entwicklung innovativer Technologien und neuer marktfähiger Produkte in der öffentlichen Wahrnehmung eine eher untergeordnete Rolle. Dies hat seine Ursache unter anderem darin, dass die Funktionalität eines neuen bzw. weiterentwickelten Systems oder Produkts für den Nutzer im Vordergrund steht und damit häufig die eigentlich entscheidenden Bausteine – die verwendeten Werkstoffe – hinter diese zurücktreten. So machen neue Funktionsmaterialien, z. B. für die Elektronik, neue Produkte oder Technologien überhaupt erst möglich, die ihrerseits beträchtliche ökonomische – und damit verbunden auch soziale,

institutionelle und ökologische Konsequenzen haben.

Dass die Nutzung von Materialien als Werkstoffe und die damit verbundenen Energie- und Stoffströme zu Veränderungen von Ökosystemen führen können, ist ein naturwissenschaftlich feststellbarer Sachverhalt. Ob solche Veränderungen jedoch positiv oder negativ sind, bedarf einer Bewertung, die letztlich nur auf der Basis gesellschaftlicher Zielvorstellungen getroffen werden kann. Beispielsweise ist bei einem Einsatz der Nanotechnologie zu erwarten, dass sich aus ökologischer Sicht aufgrund der Miniaturisierungstendenzen und Effizienzsteigerungen bei den erstellten Produkten (z. B. Nano-Elektronikbauteile) erhebliche Ressourceneinsparungen ergeben. Auf der anderen Seite kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine aufwändige Verfahrenstechnik zur Herstellung der Nano-Produkte mit der Entstehung von zusätzlichen Umweltbelastungen verbunden ist. Ebenso könnten die Miniaturisierung und die hohe Integrationsdichte der Produkte ein Recycling erschweren. Auch können mit dem Einsatz der Nanotechnologie in lebenden Organismen neuartige ökologische und gesundheitliche Risiken verbunden sein.

Eine Untersuchung der ökologischen Dimension von Nachhaltigkeit bedarf folglich auch der Betrachtung gesellschaftlicher Abwägungsprozesse. Des Weiteren sind die Zielvorstellungen über den sachlich, räumlich und zeitlich anzustrebenden Umweltzustand in der aktuellen Debatte umstritten. Diese Diskussion innerhalb eines technologieinduzierten Vorhabens (weiter)führen zu wollen, hieße jedoch, dieses zu überfordern.

Potenziale und Probleme von Nanomaterialien und -technologien in Bezug auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit können nur bei konkreten Produktinnovationen und deren Nutzung in spezifischen Anwendungsfeldern detaillierter betrachtet werden. Deshalb bietet sich zunächst eine Beschränkung auf ausgewählte Anwendungen an. Zudem scheint es angeraten, sich zunächst auf eine Analyse möglicher ökologischer Wirkungen und hierbei vornehmlich auf solche Wirkungskategorien zu konzentrieren, deren gesellschaftliche Relevanz weitgehend unstrittig und akzeptiert ist. Eine generalisierte Diskussion von Nachhaltigkeitseffekten der Nanotechnologie und entsprechende Zuschreibungen („Nanotechnologie ist (k)eine nachhaltige Technologie“) erscheinen uns daher unredlich und nicht problemadäquat.

6 Bisherige und laufende TA-Arbeiten zur Nanotechnologie in Deutschland

Seit einigen Jahren sind in Deutschland Aktivitäten zur Technikfolgenabschätzung auf dem Gebiet der Nanotechnologie zu verzeichnen, die in den letzten beiden Jahren noch an Dynamik zunahmen.

Als Vorreiter für TA-Aktivitäten kann das VDI-Technologiezentrum gelten. 1994 legte man dort die erste Technologieanalyse zur Nanotechnologie vor, hinzu kamen in den Folgejahren zahlreiche Technikanalysen zu Teilgebieten der Nanotechnologie, etwa zu Rastersondentechniken, Nanostrukturtechniken oder zu Nanoröhren. Eine profunde Übersicht über das Gesamtgebiet liefert der 1998 erschienene Band „Innovationschub aus dem Nanokosmos“ (Bachmann 1998), in dem auch einige wichtige TA-Aspekte des Feldes angesprochen werden. Eine Fortführung erlebten die diesbezüglichen Arbeiten mit der 2001 veröffentlichten „Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse Nanotechnologie“ (Malanowski 2001).

Letztgenannte Arbeit dürfte wesentliche inhaltliche Grundzüge für die im Frühjahr 2002 erfolgte Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für eine „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ geliefert haben. In ihrem Rahmen werden seit 01.09. diesen Jahres drei Studien zu den Chancen und Risiken der Nanotechnologie mit den Schwerpunkten „Das wirtschaftliche Potenzial der Nanotechnologie“ (Auftragnehmer: VDI Zukünftige Technologien Consulting Düsseldorf und Deutsche Bank Innovationsteam Mikrotechnologie Berlin, Fertigstellung März 2004), „Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte“ (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin und Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fertigstellung Januar 2004) sowie „Nanotechnologie und Gesundheit“ (Aachener Gesellschaft für Innovation und Technologietransfer AGIT mbH u. a., Fertigstellung August 2003) erarbeitet. Im Rahmen dieser Studien sollen an Hand transparenter, an wissenschaftlichen Maßstäben orientierter Un

tersuchungen Zahlenmaterial und Argumente zusammengestellt werden, die das BMBF bei der Bewertung der Bedeutung der Nanotechnologie unterstützen. Die Ergebnisse sollen eine Grundlage für die weitere Ausgestaltung der BMBF-Förderstrategie für diesen Bereich darstellen.

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hat – angeregt durch einen Vorschlag der F.D.P.-Fraktion – im September 2001 mit der Durchführung eines umfassenden TA-Projektes „Nanotechnologie" begonnen. Ziel des Vorhabens ist eine Sachstandsbeschreibung und eine prospektive Analyse der Möglichkeiten der Nanotechnologie mit dem Schwerpunkt Deutschland: Neben der Darstellung des Themengebietes in der Breite werden die Anwendungen der Nanotechnologie in den Gebieten Informations- und Kommunikationstechnik, Life Sciences und Neue Werkstoffe vertieft betrachtet werden. Die Studie soll in kompakter Form die verschiedenen Forschungs- und Anwendungsbereiche analysieren, mögliche Entwicklungstendenzen und ihre Folgen sowie politischen Handlungsbedarf aufzeigen. Ihre Fertigstellung ist für April 2003 vorgesehen.

In Vorbereitung befindet sich ein Projekt der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler, in dem unter dem Titel „Nanomaterialien, Nanodevices, Nanocomputing – Standortbestimmung und Perspektiven" ausgewählte Themen aus dem Feld der Nanotechnologie detaillierter untersucht werden sollen.

Auch das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Forschungszentrums Karlsruhe wird sich in Zukunft verstärkt TA-relevanten Themenstellungen mit Bezug zur Nanotechnologie zuwenden. Erste Arbeiten sind im Rahmen des Strategiefondsvorhabens der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland" durchgeführt worden und stehen kurz vor ihrem Abschluss.

7 Aufgaben für Technikfolgenabschätzung im Bereich der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie ist damit konfrontiert, dass ihr Bild in der Öffentlichkeit insbesondere von spektakulären, aber wissenschaftlich bislang wenig fundierten und – wenn überhaupt – kaum in absehbarer Zeit realisierbaren Anwendungen geprägt wird. Die bereits umgesetzten bzw. kurz- und mittelfristig zu erwartenden nanotechnologiebasierten Produkte und Verfahren und deren Chancen und Risiken bleiben in der öffentlichen Diskussion, letztgenanntes auch in der Fachdiskussion, weitgehend unbeachtet.

Dabei bieten sich gerade auch hier zahlreiche interessante Forschungsaufgaben, nicht nur im Hinblick auf TA-relevante Fragestellungen. In einer ersten Strukturierung können sie entlang von drei Leitthemen gruppiert werden, die auch orientierenden Charakter für in ITAS – zusammen mit weiteren Partnern – geplante Arbeiten haben.

Die stoffliche Dimension der Nanotechnologie. Ein wesentliches Anwendungsfeld von Nanotechnologie wird im Bereich der Materialien und Werkstoffe liegen. Dadurch werden Innovations- und Substitutionsprozesse angestoßen, die in ihrer Reichweite bislang kaum überschaubar, aber von z. T erheblicher technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Relevanz sind. Hieraus lassen sich beispielsweise folgende Fragestellungen ableiten: Welche „klassischen Materialien" werden substituiert? Welche Auswirkungen auf den Produktionsprozeß sind zu erwarten? Würden dadurch „strukturwandelnde Prozesse" (etwa eine Schwächung der Metallindustrien zugunsten der Chemieindustrie oder auch die Stärkung von Anwenderbranchen) angestoßen? Welche Arbeitsmarkteffekte (Arbeitsplätze, Qualifikationsstruktur) könnten damit verbunden sein? Wie sieht die „ökologische Bilanz" von nanotechnologiebasierten Materialen aus? Führen verbesserte Produkteigenschaften auch zu geringeren ökologischen Belastungen in der Nutzungsphase? Wie verhalten sich dazu die Aufwendungen (energetisch, stofflich) bei der Materialdarstellung und der Produktfertigung? Entstehen neue Anforderungen für den Umgang mit Produkten aus diesen Materialien nach Ende der Nutzungsphase (Rezyklierung, Verwertung, ...)? Falls ja, wie sehen diesbezügliche Konzepte aus? Sind neue Vorsorgekonzepte (etwa Arbeitsschutz bei Fertigung und Umgang mit nanoskaligen Partikeln sowie

Vorkehrungen zur Vermeidung von deren Freisetzung) notwendig und ggf. bereits in der Entwicklung? Wo besteht noch Forschungs- und ggf. auch schon Regelungsbedarf?

Entwicklungsbegleitende Technikfolgenabschätzung. Nanotechnologie befindet sich auf vielen Teilgebieten noch in einer frühen Phase ihrer Entwicklung. Grundlagenarbeiten dominieren, Produkt- und Anwendungsideen existieren – wenn überhaupt – erst in groben Umrissen. Dies bringt erhebliche methodische Herausforderungen für TA-Arbeiten mit sich, bietet zugleich aber auch neue Chancen. Ein Ziel vieler TA-Konzepte ist es bekanntlich, bereits in den frühen Phasen der Technikentwicklung mitzuwirken, den dann potenziell größeren Gestaltungsmöglichkeiten (für die Wirtschaft wie auch für die Politik) eine fundiertere Grundlage zu verschaffen und so zu den entwicklungsbegleitenden Entscheidungsprozessen beitragen zu können. Forscher, Entwickler und Anwender von nanotechnologischen Produkten und Verfahren stehen gegenwärtig und zukünftig immer wieder vor strategischen Entscheidungen über die Fortführung ihrer Anstrengungen. Etwas pauschal: Es sind aussichtsreiche von weniger erfolgversprechenden Forschungsthemen zu trennen, die Relevanz von Forschungsfeldern zu bewerten und entsprechend Fördermittel zuzuweisen, Auslegungen von technischen Systemen gegenüber anderen zu bevorzugen, Marktpotenziale für Produktlinien und deren Alternativen einzuschätzen und entsprechende Produktionsentscheidungen zu fällen. Aufgabe von TA-Vorhaben in diesem Kontext könnte u. a. sein, Potenziale der Nanotechnologie, etwa in Bezug auf Beiträge zur Lösung erkennbarer ökologischer oder Nachhaltigkeits-Probleme und diesbezügliche Gestaltungs-, Förder- oder Steuerungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Sich abzeichnende wissenschaftlich-technische oder ökonomisch bedingte Innovationshindernisse könnten identifiziert und Vorschläge zu ihrer Beseitigung ausgearbeitet werden. Dies kann zum einen dazu dienen, die Entwicklung von nanotechnologiebasierten Produkten und Verfahren unter den vielfältigen techno-ökonomischen Kriterien wie auch unter nicht-technischen Aspekten zielgenauer zu machen. Zum anderen könnten Förderstrategien für Nanotechnologie-Vorhaben zielgenauer auf deren Problemlösungsbeiträge ausgerichtet werden.

Nanotechnologie als „enabling technology". Viele Weiterentwicklungen bei bekannten Produkten und Technologien, vor allem aber auch neuartige Produkt- und Prozessinnovationen werden auf nanotechnologiebasierten Materialien, Komponenten oder Verfahren beruhen, ohne dass ihre Verbindung damit immer offensichtlich ist. Zugleich werden weniger die Nanomaterialien und -technologien selbst als vielmehr ihre Nutzung in neuen Produkten oder Technologien und deren Anwendung in bestehenden oder neuen Kontexten beträchtliche ökonomische, ökologische, soziale und institutionelle Konsequenzen haben. (Als historisches Analogon kann man hier die Halbleitertechnologie bemühen, deren Fortschritte eine permanent weiterentwickelte Elektronik, ihre nahezu ubiquitäre Anwendung und dadurch Veränderungen in beinahe jedem Lebensbereich angestoßen haben.) Vergleichbare Entwicklungen können bei einigen sich bereits abzeichnenden Innovationen erwartet werden, zu deren Realisierung Nanowissenschaften oder Nanotechnologie wichtige Beiträge leisten sollen:

- Entwicklungen im Bereich der biologisch-chemischen Analytik, die auf kostengünstige und weitgehend automatisierte Analyse- und Diagnosesysteme abzielen, bieten zahlreiche vielversprechende Anwendungen etwa in der Medizintechnik, der Landwirtschaft oder der Lebensmitteltechnologie. Sie bergen aber auch nicht zu unterschätzende Problempotenziale, sei es durch das Möglichmachen einer weitgehend unkontrollierbaren Erhebung von medizinischen oder genetischen Informationen oder durch Veränderungen im Arzt-Patienten-Verhältnis.
- Die Verknüpfung technischer Systeme mit Organen oder Zellen des menschlichen Körpers, für deren Realisierung nanotechnologischen Verfahren eine wichtige Rolle zukommen wird, ist Voraussetzung für Neuroprothesen, die Heilung oder Linderung von bislang nicht zu therapierenden Krankheiten oder die (Wieder-)Erlangung von sensorischen Fähigkeiten gestatten sollen. Zugleich eröffnen sie aber auch Möglichkeiten für Anwendungen, die aus ethischer Sicht zumindest fragwürdig und diskussionsbedürftig erscheinen.
- Zahlreiche neue Technologien für den Bereich der Energieumwandlung und Nutzung

haben für ihre techno-ökonomische Realisierbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit Innovationen bei ausgewählten Schlüsselkomponenten zur Voraussetzung. So würde die Verfügbarkeit von geeigneten Speichertechniken neue Systeme im Bereich der Elektrizitätsversorgung oder bei Fahrzeugantrieben einer Umsetzung wesentlich näher bringen. Katalysatoren in Brennstoffzellen sind ein wichtiger Faktor in Bezug auf Leistungsfähigkeit und Kosten dieser Technik. Hochtemperaturfeste Beschichtungen könnten Wirkungsgrade von konventioneller Anlagentechnik verbessern helfen. All diese Anwendungen sind Ziel von Forschungsarbeiten, die durchaus dem Feld der Nanotechnologie zugerechnet werden.

Aufgabe von TA-Vorhaben in diesem Kontext soll es also sein, Trends in Forschung und Entwicklung und damit verbundene Produkt- und Anwendungsvisionen zu identifizieren; darzustellen, welche davon technisch und ökonomisch vielversprechend sind bzw. hohe Problemlösungspotenziale besitzen, und offenzulegen, wo Risikopotenziale und diesbezüglicher Untersuchungsbedarf vermutet werden bzw. gesellschaftlicher Diskussionsbedarf herrschen könnte. Zudem soll der Versuch unternommen werden, ausgehend von anwendungsspezifischen Problemlagen und Handlungserfordernissen Ziele von wissenschaftlich-technischer Entwicklungstätigkeit zu bestimmen und daraus Hinweise dafür zu gewinnen, inwieweit absehbare Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie hierzu Lösungen oder Lösungsbeiträge liefern könnten.

Dies alles wird weder in einer Studie noch gar ein für allemal abschließend beantwortet werden können. Es eröffnet vielmehr ein Arbeitsprogramm, das sich mit unterschiedlichen Gewichtungen auf zahlreiche zu vertiefende Einzelfragestellungen konzentrieren und regelmäßiger Aktualisierungen und Überarbeitungen bedürfen wird. Es ist sicher weniger spektakulär als die Diskussion der Folgen der Freisetzung selbst replizierender Nanoboter, aber bestimmt kaum weniger spannend – und vor allem wesentlich realitätsnaher.

Literatur

Bachmann, G., 1998: Innovationschub aus dem Nanokosmos. VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien. Düsseldorf

Bundestag, 2001: Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage ... der Fraktion der F.D.P. Stand und Entwicklung der Nanotechnologie in Deutschland. Bundestags-Drucksache 14/5443. Berlin

Drexler, K.E., 1987: Engines of Creation. New York: Anchor Books

Drexler, K.E. Peterson, C.; Pergamit, G., 1991: Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution. New York: William Morrow and Company, Inc.

Fleischer, T.; Grunwald, A., 2002: Technikgestaltung für mehr Nachhaltigkeit – Anforderungen an die Technikfolgenabschätzung. In: A. Grunwald (Hrsg.): Technikgestaltung für eine nachhaltige Entwicklung. Von konzeptionellen Überlegungen zur konkreten Umsetzung. Berlin: Edition Sigma (in Vorbereitung)

Kopfmüller, J., Brandl, V., Jörissen, J., Paetau, M., Banse, G., Coenen, R., Grunwald, A., 2001: Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln, Indiktoren. Berlin: Edition Sigma

Malanowski, N., 2001: Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse Nanotechnologie. VDI-Technologiezentrum, Abteilung Zukünftige Technologien. Düsseldorf

National Science and Technology Council (NSTC), Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, 2002: National Nanotechnology Initiative. The Initiative and Its Implementation Plan. Detailed Technical Report Associated with the Supplemental Report to the President's FY 2003 Budget. June 2002. Washington, D.C.

Kontakt

Dipl.-Phys. Torsten Fleischer
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Postfach 36 40, 76021 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 72 47 / 82 - 45 71
Fax: +49 (0) 72 47 / 82 - 48 06
E-Mail: fleischer@itas.fzk.de
Internet: http://www.itas.fzk.de

« »