

Innovationen in neuen Technikfeldern – Die Nanotechnologie

Torsten Fleischer
Armin Grunwald

Moderne Gesellschaften sind auf beständige Innovation angewiesen, die immer wieder aus Wissenschaft und Forschung gespeist werden muss. Seit einigen Jahren ist die Nanotechnologie ein wesentlicher Hoffnungsträger. Nationale und europäische Forschungspolitik messen ihr eine zentrale Bedeutung für Wettbewerbsfähigkeit und zukünftige wirtschaftliche Entwicklung bei, was sich nicht zuletzt in wachsenden spezifischen FuE-Ausgaben manifestiert. Von den europäischen öffentlichen Forschungsmitteln – die sich in gleicher Größenordnung wie die der USA und Japans bewegen – entfällt ein weit überproportionaler Anteil auf Deutschland. Europa – und hier insbesondere Deutschland – verfügt in der Nanotechnologie über eine exzellente Wissenschaftsbasis, allerdings werden ihm vielfach Schwächen bei der wirtschaftlichen Umsetzung von Ergebnissen der Spitzenforschung attestiert. Wir geben in diesem Beitrag einen Überblick, welche Hoffnungen dies sind und welche Innovationspotenziale gesehen werden. Zudem fragen wir, inwieweit und mit welchen Ansätzen bereits heute, da sich die Nanotechnologie noch in einem sehr frühen Stadium ihrer Entwicklung befindet, Folgewirkungen – Innovationspotenziale und mögliche Risiken – überhaupt vorausgesehen werden können und welche Gestaltungsmöglichkeiten sich daraus ergeben.

1 Technologie im Nanokosmos

Der Begriff der Nanotechnologie hat sich seit ca. zehn Jahren als Oberbegriff für eine Reihe avancierter Wissenschafts- und Technikrichtungen etabliert, deren Gemeinsamkeit darin besteht, gezielte Analyse und Manipulation in einer Größenordnung zu erlauben, die bislang menschlichem Zugriff verschlossen war: in der Nanometer-Dimension (der Größenordnung z. B. komplexer Moleküle). Nanotechnologie entstammt der Konvergenz von traditionell getrennten wissenschaftlichen Disziplinen und Technikfeldern, deren zentrale Entwicklungsrichtungen beim Übergang in den Nanometerbereich zu überlappen und zu verschmelzen beginnen: Physik, Chemie, Ingenieurwissenschaften und Biologie. Ermöglicht wurde diese „Eroberung“ des Nanokosmos unter anderem durch neuartige physikalische Analyse- und Manipulationstechniken wie die Rastersonden- und Rasterkraftmikroskopie.

Vielfach wurde versucht, Nanotechnologie genauer zu definieren oder wenigstens in ihren Inhalten zu umreißen. Diese Versuche sind auf den ersten Blick relativ ähnlich, zeigen aber bei detaillierter Analyse deutliche Unterschiede (Schmid et al. 2003). Zudem ist offen, ob und in welchem Umfang Nanotechnologie verwandte oder benachbarte Gebiete wie z. B. Mikroelek-

tronik oder Biotechnologie einschließt, und wo sie sich von ihnen abgrenzt. Es hat sich bislang keine Definition als allgemein anerkannt durchgesetzt (Decker et al. 2004).

Quelle weiterer Diskussionen ist die Frage, ob Nanotechnologie wirklich „Technologie“ ist: Bei der Nanotechnologie handelt es sich weder im engeren Sinne um *eine* Technologie oder eine Gruppe von Technologien, noch können damit zurzeit in nennenswertem Umfang marktgängige Produkte und Verfahren beschrieben werden. Vielmehr stellt der Begriff der Nanotechnologie einen eher forschungspolitisch und forschungsorganisatorisch geprägten Terminus dar. Unter ihm werden Techniken für und mit (und häufig auch noch die Wissenschaft von) nanoskaligen Systemen (die also in mindestens einer Dimension einen Größenbereich etwa zwischen 1 und 100 nm aufweisen) zusammengefasst, bei denen aus dieser Miniaturisierung neue Effekte und Eigenschaften resultieren und nutzbar gemacht werden.

Nanotechnologie ist auf der einen Seite das konsequente Ergebnis des andauernden Trends 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 mi-

kroelektromechanischen Bauteilen auf Silizium-Basis zunutze gemacht. Im Rahmen dieses so genannten „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.

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 ver-

Torsten Fleischer, Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Forschungszentrum Karlsruhe. Leiter der Projektgruppe „Technikfolgenabschätzungen zur Nanotechnologie“. Arbeitsschwerpunkte: Technikfolgenabschätzungen in den Bereichen Energie und Verkehr sowie zu neuen Materialien und deren Anwendungen.
e-mail: Torsten.Fleischer@itas.fzk.de

Armin Grunwald, Prof. Dr., Leiter des ITAS und Professor an der Universität Freiburg. Seit 2002 Leiter des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Arbeitsschwerpunkte: konzeptionelle und methodische Fragen der Technikfolgenabschätzung, Ethik in der Technikgestaltung, Nachhaltigkeit und Technik.
e-mail: grunwald@itas.fzk.de

traut sind. Hier versucht man, das wachsende Verständnis von sich selbst organisierenden Strukturen und Funktionseinheiten für technische Fragestellungen, gegenwärtig vornehmlich im Bereich der lebenswissenschaftlichen Forschung und bei der Entwicklung neuer Materialien, zu nutzen. Ein Ziel ist die technisch kontrollierte Erzeugung von komplexen Molekülen.

Das bedeutendste Potenzial für Innovationen aus dem Nanokosmos liegt in der synergetischen Kombination dieser beiden komplementären Entwicklungswege. Dabei soll der Nano-Größenbereich, in dem neue, bislang unzugängliche Effekte und Eigenschaften auftreten, dem aktiven und kontrollierten Zugriff geöffnet und technisch nutzbar gemacht werden. Dies erfordert neue Ansätze, die dem interdisziplinären Charakter dieses Technologiefeldes Rechnung tragen.

2

Innovationspotenziale der Nanotechnologie

Nanotechnologie ist – in weit reichender Analogie zur ‚klassischen‘ Materialforschung – eine Querschnittstechnologie mit vielfältigen Implikationen für andere Technikfelder und einem großen antizipierten wirtschaftlichen und forschungsbezogenen Innovationspotenzial. In Bezug auf diese Technikfelder dürfte Nanotechnologie die Rolle einer „enabling technology“ spielen (Fleischer 2003). Dies bedeutet, dass hier nicht die Nanotechnik selbst einen unmittelbaren Produktbezug hat. Vielmehr bilden Nanotechniken die materielle und verfahrenstechnische Voraussetzung für zahlreiche Innovationen bei anderen Technikfeldern – von vergleichsweise einfachen Alltagstechniken über Energietechnik oder Informations- und Kommunikationstechniken bis hin zur Biotechnologie –, ohne dass ihre Verbindung damit zunächst immer offensichtlich ist, und die darüber hinaus als Schlüsseltechnologien oft selbst Bestandteil komplexerer technischer Anwendungssysteme sind. Dabei sind sowohl die Nanotechniken selbst, die Zeithorizonte ihrer Realisierung wie auch die potenziellen Anwendungen und deren Kontexte heterogen und hochgradig differenziert.

Einerseits haben nanotechnologische Erkenntnisse schon seit Jahren Einfluss auf verkaufbare Produkte in den Bereichen

Elektronikerherstellung, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. Seit kurzem trifft dies zunehmend auch auf die Felder Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin zu. Nanopartikel, kleinste Materiebausteine aus nur wenigen bis wenigen hundert Atomen oder Molekülen und mit einer Größe von weniger als 100 nm, finden schon heute in Kosmetika, Drucker- und Kopierertonern, Farben, Autoreifen oder als Nahrungsmitteladditive Anwendung und werden in naher Zukunft in weiteren Gebieten Einzug halten. Andererseits befindet sich ein großer Teil der Nanotechnologie noch in frühen Entwicklungsstadien. Erwartungen, wie die einer dritten industriellen Revolution durch Nanotechnologie, sind daher noch Zukunftsmusik, genauso wie sich viele Potenziale und Folgen bislang nur unter großen Unsicherheiten einschätzen lassen.

2.1 TECHNOLOGIE- UND ANWENDUNGSFELDER

Nach gängiger Einschätzung sind die Bereiche mit den weitestreichenden Innovationspotenzialen der Nanotechnologie: Neue Materialien, Information/Kommunikation sowie Lebenswissenschaften/Medizin (folgend der Darstellung in Paschen et al. 2004).

NEUE MATERIALIEN

Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung neuer Materialien für innovative Anwendungen bilden die Grundlage für Innovationsansätze in praktisch allen wichtigen Technikfeldern und stehen in engem Zusammenhang mit der künftigen wirtschaftlichen Entwicklung. Die Verkleinerung von Materialstrukturen in den Nanometerbereich hinein führt häufig zu neuen, überraschenden Eigenschaften von Werkstoffen, die makroskopisch beim gleichen Material nicht auftreten. Deutlich höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen, die Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände oder die Fähigkeit von Oberflächenstrukturen, aus einer Anzahl von angebotenen Möglichkeiten zur chemischen Reaktion eine mit hoher Trennschärfe bevorzugt auszuwählen, lassen sich technisch nutzen und sind ein wesentliches Motiv für Anstrengungen von Forschung und Entwicklung (FuE) in diesem Bereich.

Durch den kontrollierten Aufbau von Materialstrukturen aus atomaren und molekularen Bausteinen lassen sich funktionale Eigenschaften gezielt einstellen. Besondere Relevanz hat dies für die Oberflächenbehandlung, da relativ dünne Schichten über wichtige Oberflächeneigenschaften entscheiden. Durch den Zusatz von Nanopartikeln in konventionelle Lacke ergeben sich neue und verbesserte Farbeffekte. Weitere Beispiele sind quasi „selbstreinigende“ Oberflächen, die gleichzeitig wasser- und ölabweisende Eigenschaften zeigen. Auch schon im Einsatz befinden sich optisch-funktionale Oberflächen für Fassaden, Kraftfahrzeuge, Solarzellen etc. (z. B. zur Entspiegelung, Sonnenschutzverglasung, Antireflexbeschichtung für Instrumententafeln). Überschaltbare bzw. in der Farbe veränderbare Lacke und selbstheilende Lacke wird diskutiert.

Entscheidende Materialgrößen (Härte, Verschleißfestigkeit etc.) können durch die Einführung charakteristischer Strukturgrößen im Nanometerbereich gezielt verbessert werden. Beispielsweise verbessert das Einbringen von nanoskaligen Teilchen in Metalle deren mechanische Eigenschaften, womit ein wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann. Einsatzmöglichkeiten von mit Nanopartikeln versehenen Polymeren finden sich in besonders beanspruchten Bereichen des Leichtbaus oder in Hochtemperaturanwendungen, aber auch in Massen Anwendungen wie Kunststoff-Gehäusen oder -Verkleidungen. Hervorzuheben sind Keramiken, bisher als spröder Werkstoff bekannt, die durch Nanostrukturierung verformbar werden. Für die Praxis ergibt sich daraus eine Vielzahl an Innovationen in der keramischen Technologie. Bei Land- und Luftfahrzeugen könnten herkömmliche Strukturwerkstoffe zum Teil durch festere und leichtere Materialien ersetzt werden. Wesentliche Eigenschaftsverbesserungen sind auch bei Baustoffen (z. B. Hochleistungsbetone) durch Beimischen von Nano-Zusatzstoffen möglich.

In der chemischen Industrie werden durch nanotechnologische Verfahren neue Materialien als Katalysatoren erschlossen (z. B. Gold-Nanopartikel) und eröffnen sich neue Synthesewege in der organischen Chemie. Oberflächenaktive Membranen, nanoporöse (Bio)Filter und Adsorptionsmittel (an deren Oberfläche sich bestimmte Substanzen anreichern) sind aus nano-

technologischer Sicht optimierbar, z. B. zur Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung. Durch die nanotechnologische Verbesserung bereits verfügbarer Katalysatoren werden Trägerkatalysatoren mit neuen Eigenschaften zugänglich. In Zukunft wird es verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern.

INFORMATIONSVERRARBEITUNG UND -ÜBERMITTLUNG

Informationsspeicherung und -verarbeitung sind seit Jahrzehnten die treibende Kraft der Miniaturisierung. Traditionelle Technologien stoßen hierbei zunehmend an Grenzen. Auf die Nanotechnologie werden Hoffnungen gesetzt, einen weiteren Entwicklungsschub zu ermöglichen. Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Nanoelektronik im Bereich der Informationsverarbeitung und -übermittlung sind elektronische, optische bzw. optoelektronische Bauelemente. Die technisch beherrschte Größenordnung von Logik- und Speicherbausteinen in der ‚konventionellen‘ Halbleitertechnik verschiebt sich zunehmend in die Nanometerdimension. Photonische Kristalle weisen ein Einsatzpotenzial für rein optische Schaltkreise auf, etwa als Grundlage für eine zukünftige nur auf Licht basierende Informationsverarbeitung. In der molekularen Elektronik lassen sich mit Hilfe der Nanotechnologie elektronische Bauelemente mit neuen Eigenschaften auf atomarer Ebene zusammensetzen mit Vorteilen u.a. in einer potenziell hohen Packungsdichte.

Neue Konzepte für Komponenten beruhen vor allem auf der Nutzung quantenmechanischer Effekte für die Realisierung kleinerer oder schnellerer Bauelemente (Quanten-Computing). Längerfristig werden durch die Nutzung der Nanotechnologie im IuK-Bereich aber auch neue Architekturen möglich. Angesichts der Bedeutung der Informations- und Kommunikationstechnologien für die globale Wirtschaft, für die Wissensgesellschaft und im privaten Bereich zeichnen sich hier erhebliche ökonomische Potenziale ab.

LEBENSWISSENSCHAFTEN

Grundlegende Lebensprozesse spielen sich im Nanomaßstab ab, da wesentliche Bausteine gerade diese Größenordnung haben

(wie z. B. Proteine). Durch Nanobiotechnologie, bei der zusätzlich zu den üblichen Definitionskriterien der Nanotechnologie Biokomponenten Bestandteil der Anwendung sind (VDI 2002), werden biologische Prozesse nanotechnisch kontrollierbar. Es wird unterschieden zwischen „Nano2Bio“, wo es um die Nutzung der Nanotechnologie für die Analyse und Herstellung biologischer Nanosysteme geht und „Bio2Nano“, das für die Nutzung biotischer Materialien und Baupläne zur Herstellung technischer Nanosysteme steht. Das hierdurch ermöglichte bessere Verständnis biologischer Prozesse soll vor allem medizinischen und biotechnologischen Anwendungen zugute kommen.

Molekulare „Fabriken“ (Mitochondrien) und „Transportsysteme“, wie sie im Zellstoffwechsel eine wesentliche Rolle spielen, können Vorbilder für kontrollierbare Bio-Nanomaschinen sein. In der Nanobiotechnologie wird die Sprache des „engineering“, wie sie in der Biotechnologie auf biotische Systeme angewendet wurde, auf die Nanoebene ausgeweitet. Von Nanomaschinen in zellulären und subzellulären Prozessen ist die Rede: Dabei arbeiten funktionelle Biomoleküle als Bestandteile von Lichtsammel- und Umwandlungsanlagen, Signalwandler, Katalysatoren, Pumpen oder Motoren. Eine Vernetzung natürlicher biologischer Prozesse mit technischen Prozessen erscheint denkbar, genauso wie ein „nanobionischer“ Nachbau natürlicher Lebensvorgänge. Vielfältige medizinische und biotechnologische Anwendungen zeichnen sich ab.

2.2 GESELLSCHAFTLICHE FOLGENPOTENZIALE

Nanotechnologische Verfahren und Bausteine haben Querschnittscharakter und können daher in vielen ganz anderen Technikbereichen und in vielen Anwendungsfeldern Fortschritte, neuartige Funktionen und neue Produkte ermöglichen. Diese „enabling“-Eigenschaft führt dazu, dass neben der Vielzahl von möglichen Anwendungen auch weitere gesellschaftliche Folgen erwartet werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Bereiche genannt, wobei in der Regel eher Fragen gestellt und tentative Stichworte gegeben als bereits abgesicherte Antworten formuliert werden können.

WIRTSCHAFT UND SOZIALES

Mit der Nanotechnologie verbindet sich die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in fast allen Branchen der Wirtschaft (VDI 2004). Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch in den Anfängen, eine Reihe von Produkten und Verfahren hat jedoch bereits den Weg in den Markt gefunden. Methodisch schwierig ist deren Quantifizierung. Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist – nicht nur in Deutschland – noch sehr lückenhaft. Auch die Berechnungspraxis ist unterschiedlich, etwa bei Bezug auf die direkten Umsätze mit Nanokomponenten oder die Umsätze mit Produkten, die unter Einsatz von Nanotechnologie hergestellt wurden.

Unter Innovationsgesichtspunkten entscheidend sind die Hebelwirkung der neuen Technologien und ihre vielfältigen Auswirkungen in verschiedensten Anwendungsbereichen. Deren vorausschauende Erfassung ist allerdings noch erheblich schwieriger als die Einschätzung der direkten Marktpotenziale. Bereits kursierende Zahlenwerte zum Umsatz mit Nanotechnologieprodukten in den nächsten Jahren und zu darauf aufbauenden Arbeitsplatzzahlen sind daher mit äußerster Vorsicht zu genießen (Schmid et al. 2003), zumal in derartigen Einschätzungen zwar zumeist erwartete neue Arbeitsplätze thematisiert werden, nicht jedoch gegen die Felder, in denen auch Arbeitsplätze wegfallen würden, bilanziert wird.

Besondere Aufmerksamkeit verdient die Frage, ob durch Nanotechnologie Auswirkungen auf den industriellen Produktionsprozess oder andere Entwicklungen mit dem Potenzial eines Strukturwandels zu erwarten sind. Das Aufkommen einer nano-basierten Industrie – möglicherweise stark auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zentriert – könnte zu einer Schwächung traditioneller Industriebereiche (wie z. B. der Metallindustrie), einer weitergehenden Spezialisierung und Differenzierung von Werkstoffbranchen oder auch zu einer Stärkung von Anwenderbranchen führen. Damit verbunden sind Auswirkungen auf die Qualifikationsstruktur der Beschäftigten und den Arbeitsmarkt zu erwarten. Höhere Qualifikationen, erhöhte Bereitschaft zu interdisziplinärer Kooperation und entsprechende Kompetenz werden notwendige Folgen ei-

ner weiteren Diffusion der Nanotechnologie in die Arbeitswelt sein. Dies hat einerseits Folgen für den Ausbildungsbereich (sowohl an Universitäten und Fachhochschulen wie auch für Facharbeiter), andererseits aber auch Folgen für die Weiterbildung während des Berufslebens.

Technischer Fortschritt vertieft aber auch nicht selten bereits vorhandene soziale Ungleichverteilungen. Fragen der Verteilungsgerechtigkeit und des „Zugangs“ könnten zum Beispiel bei neuen nanotechnologie-induzierten medizinischen Möglichkeiten dringlich werden. Innerhalb industrialisierter Gesellschaften könnten bestehende Ungleichheiten im Zugang zu medizinischer Versorgung - vor allem unter sich verschärfenden wirtschaftlichen Bedingungen – durch eine weiter hochtechnisierte Medizin unter Verwendung von Nanotechnologie verstärkt werden. Zum anderen könnten sich ebenfalls bereits bestehende und teils dramatische Ungleichheiten zwischen technisierten und Entwicklungsländern weiter verschärfen. Befürchtungen in Bezug auf diese beiden Formen eines möglichen „Nano-divide“ (in Anlehnung an die Diskussion um die ungleiche Chancenverteilung bei IuK-Nutzungsmöglichkeiten, den „digital divide“) basieren auf der Annahme, dass Nanotechnologie sowohl zu neuen und erweiterten Optionen individueller Selbstbestimmung (z. B. im gesundheitlichen Bereich) als auch zu erheblichen Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften beitragen kann.

UMWELTASPEKTE

Entlastungseffekte für die Umwelt können sich durch die Einsparung von stofflichen Ressourcen, die Verringerung des Anfalls von umweltbelastenden Nebenprodukten, die Verbesserung der Energieumwandlungseffizienz, die Verringerung des Energieverbrauchs und die Entfernung umweltbelastender Stoffe aus der Umwelt ergeben. Aus diesen Gründen gilt die Nanotechnologie auch als Hoffnungsträger in Bezug auf nachhaltige Entwicklung (Fleischer 2003). Allerdings ist dabei immer daran zu denken, dass es sich hierbei zunächst nur um Potenziale handelt, die nur unter bestimmten Voraussetzungen einmal zur Realität werden.

Beispielsweise kann durch den Einsatz nanotechnologischer Werkstoffe in Brennstoffzellen oder der Photovoltaik, aber auch

in der konventionellen Kraftwerkstechnik, die Effizienz der Energieumwandlung erhöht werden. Auch die verlustarme Speicherung von Energie, vor allem die effiziente Speicherung von Wasserstoff, stellt eine Herausforderung für die Nanotechnologie dar. Nanomaterialien können zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Batterien, von Mini-Akkus (z. B. durch Verwendung von Nanoröhren in Lithium-Ionen-Akkus) und bei elektrochemischen Kondensatoren (Superkondensatoren) genutzt werden. Zudem ist die Kombination von Superkondensatoren mit Batterien auch für Antriebszwecke viel versprechend (z. B. Speicherung der Bremsenergie im Elektromobil).

GESUNDHEIT

Große Hoffnungen werden in die Potenziale der Nanotechnologie zur besseren medizinischen Versorgung gesetzt. Mit Hilfe nanotechnologiebasierter Diagnoseverfahren können möglicherweise Krankheiten früher erkannt werden. Bei der Therapie besteht Aussicht, mit Hilfe der Nanotechnologie gezielte und nebenwirkungsfreie Behandlungen zu entwickeln. Vor allem die breite Anwendung nanopartikulärer Dosiertechnik (drug delivery) könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung und zur Vermeidung unerwünschter Nebenwirkungen führen. Durch Verfahren der Nanotechnologie kann die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Bei der Ernährung dürfte Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel mit gesundheitlichem Zusatznutzen („Functional Food“) eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht.

Diese positiven Auswirkungen von Nanotechnologie auf die menschliche Gesundheit sind jedoch bisher überwiegend hypothetisch, wengleich die Wissenschaftler hier optimistisch sind. Daneben werden auch eher „visionäre“ Hoffnungen thematisiert. Ein spezielles und praktisch wie auch ethisch besonders interessantes Teilgebiet liegt in der Herstellung direkter Kontakte zwischen Technik und dem menschlichen Nervensystem. Es wird intensiv an einer Verbindung der molekularbiologischen Welt mit der technischen Welt gearbeitet. Ein interessantes Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate (Neurobionik) dar, die Schäden an

Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren bzw. die Leistungsfähigkeit dieser Organe erhöhen und das menschliche Wahrnehmungsspektrum verbreitern. Mikroimplantate könnten die Funktionsfähigkeit von Gehör und Sehsinn wieder herstellen. Über derartige visionäre Aspekte hinaus werden auch teils utopische Hoffnungen gehegt, z. B. Alterungsprozesse deutlich zu verlangsamen.

3

Früherkennung von Potenzialen und Risiken

Der Beratungs- und Entscheidungsbedarf in Politik und Wirtschaft erfordert die frühzeitige Erkennung und vergleichende Einschätzung von Potenzialen und Risiken der Nanotechnologie. Technikfolgenabschätzung (Grunwald 2002), Innovationsforschung und andere Felder problemorientierter Forschung, die sich mit prospektiven Analysen dieser Art befassen, sind mit der Heterogenität der Nanotechnologie sowie mit einem großenteils vorliegenden frühen Entwicklungsstadium konfrontiert – was allerdings auch Chancen bietet. Im Folgenden werden, abgestuft nach Entwicklungsstand und Stand der Anwendungen, drei verschiedene Ansätze zur Früherkennung von Chancen und Risiken erläutert.

3.1 ZWISCHEN FRÜHERKENNUNG UND VORSORGEPRINZIP: MATERIALSUBSTITUTION

Durch Nanotechnologie werden im Materialbereich 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 Fragen ableiten: Welche „klassischen Materialien“ werden substituiert? Wie sieht die ökologische Bilanz von nanotechnologiebasierten Materialien 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?

Diese klassischen Fragen für die Systemanalyse werden typischerweise mit methodischen Ansätzen des Life Cycle Assessment (LCA) in Verbindung gebracht. Bei der Auswertung der Ergebnisse solcher Analysen stützt man sich dabei häufig auf relative Bewertungen und unterstellt eine funktionsäquivalente Ersetzung vorhandener Technik durch innovative Technik. Ein solches Vorgehen ist nicht nur für die klassische Technikfolgenabschätzung (TA) interessant, es erlaubt darüber hinaus – wenigstens teilweise – eine direkte Übersetzung von Nachhaltigkeitsforderungen in technische Leistungsmerkmale und ansatzweise auch eine Art komparative „Nachhaltigkeitsbewertung“. Er geht einher mit einem FuE-Ansatz, der auf die Entwicklung von Techniken abzielt, die in unveränderten oder nur geringfügig modifizierten Nutzungskontexten bestehende Techniken ersetzen und dadurch deren erkannte (hauptsächlich ökologische) Rucksäcke verringern. Dieser steht ganz in der Tradition klassischer Effizienzstrategien.

Generell werden durch den Entwicklungsstand der Nanotechnologie auf quantitativen Informationen und empirischen Daten aufbauenden TA-Vorhaben und Verfahren aber enge Grenzen gesetzt, da solche Daten kaum verfügbar und nur in begrenztem Maße repräsentativ sind. Vor allem in Bezug auf neue Produkte und Verfahren stößt LCA mithin schnell an die Grenzen ihrer Anwendbarkeit. Dennoch wäre zu überlegen, ob der zugrunde liegende methodische Ansatz für eine Weiterentwicklung unter den Bedingungen unsicheren Wissens in frühen Phasen der Entwicklung geeignet sein könnte.

Über die Ebene der relevanten Wirkungskategorien damit verbunden ist die Frage nach Risiken von neuen, z. T. noch unbekanntem Materialeigenschaften im Nanometerbereich und ihrer Bewertung. Wie bereits ausgeführt, ändern sich beim Übergang in die Nanometerdimension – bei gleicher chemischer Zusammensetzung – viele Eigenschaften von Materialien. Darin liegt eine große Herausforderung, denn der Größenübergang kann auch zu einem modifizierten Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt oder in lebenden Organismen führen.

Die toxikologische Forschung dazu hat bereits eingesetzt und wird mit Nachdruck

vorangetrieben, die bisherigen Kenntnisse sind aber noch spärlich und wenig abgesichert (Krug et al. 2004, HSE 2004). Neben der Beantwortung toxikologischer Fragen ist hier auch die Brücke zu Anwendungskontexten zu schlagen. Geht mit Produkten auf Basis von Nanopartikeln überhaupt eine nachweisbare Ausdünstung für den Menschen bei Herstellung, Gebrauch oder Entsorgung einher? Auf welchen Wegen erfolgt diese Exposition? Ist mit dieser ein Risiko verbunden und wie ist dieses für das jeweilige Produkt (bei kurativen Anwendungen möglicherweise anders als bei kosmetischen) zu bewerten? 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? Wo ist die richtige Balance zwischen Vorsorgeprinzip (Haum et al. 2004) und Innovationsförderung?

3.2 NANOTECHNOLOGIE ALS „ENABLING TECHNOLOGY“

Eine weitere methodische Herausforderung für TA zur Nanotechnologie ergibt sich aus der oben ausgeführten Tatsache, dass es sich bei den Nanotechniken im Wesentlichen um „enabling technologies“ handelt. Die Potenziale von neuen Techniken – wie auch ihre Folgen – können fundiert erst dann analysiert werden, wenn konkrete Produkte und Dienstleistungen sowie deren Anwendungskontexte bekannt sind. Ein solcher Zusammenhang ist deshalb zunächst in strukturierter und belastbarer Form herzustellen. Es müssen Voruntersuchungen bezüglich möglicher Anwendungen und den daraus resultierenden Produkten durchgeführt werden. Teile von Nanotechnologie sind darüber hinaus den so genannten emergenten Techniken zuzurechnen, also Techniken, deren grundsätzliche Nutzbarkeit gezeigt ist, für die aber noch technische, ökonomische und andere kompetitive Hindernisse für eine Umsetzung zu überwinden sind. Hier sind Wege zu finden, TA-Ansätze bereits in der Frühphase der Technikentwicklung, vor der konkreten Ausgestaltung vermarktbarer Produkte und Verfahren, umsetzen zu können. Um diese „methodische Lücke“ zu schließen, wird zurzeit die Möglichkeit untersucht, Roadmapping-Verfahren für die genannten Zwecke zu adaptieren (Fiedeler et al. 2004).

Eine strukturierte Verknüpfung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Nanotechnologie mit möglichen Anwendungsfeldern und Produktideen soll dazu beitragen, die Analyse der Anwendungsfelder nanotechnologischer Forschung in Bezug auf ihre ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Folgen auf eine argumentativ solide Basis zu stellen und so einen qualifizierten Beitrag zur öffentlichen Diskussion von Chancen und Risiken von Nanotechnologie zu leisten. Die damit notwendigerweise einhergehende Konkretisierung der Technikfelder würde auch einigen momentan zu beobachtenden Tendenzen zur übermäßigen Komplexitätsreduktion und ungerechtfertigten Generalisierung bei der Folgenanalyse zu Nanotechnologie und einer damit verbundenen Banalisierung ihrer Ergebnisse entgegenwirken.

Ziel dieser Aktivitäten kann es ferner sein, den Realisierungsgrad (und ggf. auch die -chancen) in der Diskussion befindlicher Konzepte zu überprüfen und zu beurteilen sowie Herausforderungen und Transferprobleme für die technische Umsetzung und das Engineering, vor allem beim Übergang vom Labor- zum Fertigungsmaßstab, oder auch bisher noch unbedachte Anwendungsmöglichkeiten zu erkennen. Ein systematisches Auswahl- und Prüfungsverfahren (Screening) der derzeit dringendsten technologischen Herausforderungen kann helfen, Forschungsfragen im Bereich der Nanotechnologie zu identifizieren bzw. zu spezifizieren und auf bestehende Problemlagen zu fokussieren. Mit diesem Prozess der systematischen Untersuchung möglicher Anwendungsfelder könnte auch die Reflexion von institutionenbezogenen Forschungsstrategien unterstützt werden.

3.3 TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG ALS „VISION ASSESSMENT“

Nachdem sich die Nanotechnologie über längere Zeit hinweg fast unbemerkt von medialer und öffentlicher Aufmerksamkeit entwickelte, hat vor etwa vier Jahren auch in diesem Bereich eine Risikodiskussion eingesetzt. Dabei verschränken sich drei Risikodiskurse: Risiken durch neue Materialeigenschaften auf der Nanoebene (s.o.), Risiken durch neue, „nanoermöglichte“ Techniken und Risiken durch visionäre Entwicklungen. Für viele überraschend war letztgenannte – hoch spekulative – Dis-

kussion über mögliche dramatische Gefahren in weiter Zukunft im Zeitverlauf die erste. Gestartet wurde sie in Zusammenarbeit einflussreicher Medien mit (selbst-)kritischen Wissenschaftlern, so in Deutschland vor allem durch die Feuilleton-Serie der FAZ im Anschluss an den Beitrag von *Bill Joy* „Warum die Zukunft uns nicht braucht“. Ausgangspunkt waren Sorgen, dass sich selbst vervielfältigende (replizierende) Nanoroboter eines Tages außer Kontrolle geraten und den Menschen überflüssig machen (Joy 2000) oder Menschen zur Beute ihrer technischen Leistungen werden könnten.

Bei genauerer Analyse wird diese Reaktion aber verständlich. Nanotechnologie wird von Anfang an von positiven langfristigen Visionen begleitet (Coenen 2004). Sie reichen von einem immensen ökonomischen Wertschöpfungspotenzial über medizinische Erwartungen, das Hinausschieben des Alterns und Sterbens, die Bewältigung der Entwicklungsprobleme der Dritten Welt, die technische Verbesserung physischer oder psychischer Fähigkeiten des Menschen, bis hin zu einer drastischen Reduktion des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen. Von vielen Wissenschaftsmanagern, Politikern und Wissenschaftlern werden diese techniko-optimistischen

Visionen wenigstens zum Teil und in weniger radikalen Versionen ebenfalls verwendet (z. B. Roco/Bainbridge 2002). Sie spielen eine (zunehmend) wichtige Rolle in der Forschungspolitik („hope and hype“), können dabei durchaus orientierend und handlungsleitend sein und die bereits frühzeitige gesellschaftliche Auseinandersetzung mit technischem Wandel ermöglichen.

Zugleich ist genau diese Kommunikationsform jedoch ambivalent. Das Revolutionäre und das „wirklich“ Neue sind nicht nur faszinierend, sondern erwecken auch Angst, Sorgen und Ablehnung. Das Neue passt nicht zu den etablierten Wahrnehmungsmustern, sondern ist zunächst fremd in der vertrauten Welt. Es entzieht sich den üblichen selbstverständlichen Beurteilungskriterien und stellt sie vielleicht gar in Frage. Revolutionen werden keineswegs einfach nur euphorisch begrüßt, sondern erzeugen auch Angst. Denn Revolutionen haben Gewinner und Verlierer zur Folge, die Lebensumstände werden sich radikal ändern, Werte geraten in Gefahr und traditionelle Strukturen werden zerbrechen. Die Metaphern des radikal und revolutionär Neuen in der Form wissenschaftlich-technischer Visionen zu verwenden, kann in sein Gegenteil umschlagen: Der

Versuch, durch positive Utopien zu faszinieren und zu motivieren, kann gerade zu Ablehnung und Widerspruch führen. Visionäre der Nanotechnologie scheinen von diesem dann tatsächlich erfolgten Umschlag überrascht worden zu sein.

Aus diesen Gründen könnten Visionen zu einem – wieder entdeckten – Analysegegenstand innerhalb von TA werden. Denn bei aller Unklarheit über die Realisierungswahrscheinlichkeit von Nanotechnologie-Visionen erweisen sich manche von ihnen als technisch-ökonomisch realisierbar, werden sie weitreichende Diskussionen um ihre gesellschaftlichen Implikationen zur Folge haben. Ein „Vision Assessment“ (Grunwald 2004) würde gerade Visionen als Kommunikationsmedium in ihren kognitiven und evaluativen Gehalten und Folgen untersuchen, um eine transparente und rationale Diskussion zu ermöglichen. Es wäre zudem Baustein eines offenen, kognitiv informierten und normativ orientierten Dialoges, z. B. zwischen Experten und Öffentlichkeit oder zwischen Naturwissenschaften und Regulierung. Er ist erforderlich, um die Innovationspotenziale der Nanotechnologie ausschöpfen zu können, ohne in eine fundamentalistisch verhärtete Risikodiskussion zu münden.

LITERATUR

- Coenen, C.** (2004): Nanofuturismus: Anmerkungen zu seiner Relevanz. Analyse und Bewertung. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 13(2), S. 67–76
- Decker, M./Fiedeler, U./Fleischer, T.** (2004): Ich sehe was, was Du nicht siehst... zur Definition der Nanotechnologie. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 13(2), S. 10–16
- Fleischer, T.** (2003): Technikgestaltung für mehr Nachhaltigkeit: Nanotechnologie; in: Coenen, R., Grunwald, A. (Hrsg.): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland. Analyse und Lösungsstrategien, Berlin, S. 356–373
- Fiedeler, U./Fleischer, T./Decker, M.** (2004): Roadmapping als ein Instrument der Technikfolgenabschätzung. Das Beispiel Nanotechniken, FZK-Nachrichten 4, S. 230–234
- Grunwald, A.** (2002): Technikfolgenabschätzung – eine Einführung, Berlin
- Grunwald, A.** (2004): Vision Assessment as a new element of the Technology Futures Analysis Toolbox; in: Scapolo, F., Cahill, E. (Hrsg.): New horizons and Challenges for Future-oriented Technology Analysis, JRC-IPTS Seville
- Haum, R./Petschow, U./Steinfeldt, M./von Gleich, A.** (2004): Nanotechnology and Regulation within the Framework of the Precautionary Principle, Schriftenreihe des IÖW 173, Berlin
- HSE, U. K. Health and Safety Executive** (2004): Nanoparticles: An occupational hygiene review. Prepared by the Institute of Occupational Medicine for the Health and Safety Executive Research Report 274, Sudbury
- Joy, B.** (2000): Why the Future Doesn't Need Us, Wired 8.04
- Krug, H./Kern, K./Diabaté, S.** (2004): Toxikologische Aspekte der Nanotechnologie. Versuch einer Abwägung. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 13(2), S. 58–64

Paschen, H./Coenen, C./Fleischer, T./Grünwald, R./Oertel, D./Revermann, C. (2004): Nanotechnologie in Forschung, Entwicklung, Anwendung, Stand und Perspektiven, Berlin
Roco, M. C./Bainbridge, W. S. (Hrsg.) (2002): Converging Technologies for Improving Human Performance, National Science Foundation, Arlington
Schmidt, G./Decker, M./Ernst, H./Fuchs, H./Grünwald, W./Grunwald, A./Hofmann, H./Mayor, M./Rathgeber, W./Simon, U./Wyrwa, D. (2003): Small Dimensions and Material Properties. A Definition of Nanotechnology, Graue Reihe 35, Europäische Akademie Bad Neuenahr-Ahrweiler

VDI, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg) (2002): Nanobiotechnologie I. Grundlagen und Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme, Zukünftige Technologien 38, Düsseldorf
VDI, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg) (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt. Innovations- und Technikanalyse, Zukünftige Technologien 53, Düsseldorf

Aus dem WSI

Heide Pfarr/Karen Ullmann/Marcus Bradtke/Julia Schneider/Martin Kimmich/Silke Bothfeld

Der Kündigungsschutz zwischen Wahrnehmung und Wirklichkeit: Betriebliche Erfahrungen mit der Beendigung von Arbeitsverhältnissen

Rainer Hampp Verlag München und Mering 2005, 138 Seiten, 19,80 €, ISBN 3-87988-922-8

Das Projekt REGAM (Regulierung des Arbeitsmarktes) des WSI widmet sich seit 2002 der rechtspolitischen Debatte um den Einfluss des Kündigungsschutzes auf den Arbeitsmarkt. Anhand von empirischen Daten werden die gängigen Argumente – der Kündigungsschutz sei für die Betriebe nicht handhabbar, Beendigungen regelmäßig von gerichtlichen Konflikten und Abfindungen begleitet – aufgegriffen und größtenteils widerlegt.