Globethics Repository



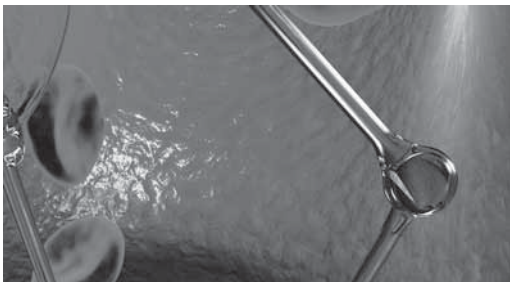
Nanobiotechnologie

This page was generated automatically upon download from the Globethics Repository. More information on Globethics see https://www.globethics.net. Data and content policy of Globethics Repository see https://repository.globethics.net/pages/policy.

Item Type	Book
Authors	Bachmann, Andreas
Publisher	Verlag : Bundesamt für Bauten und Logistik BBL
Rights	With permission of the license/copyright holder
Download date	2026-11-04 07:14:26
Link to Item	http://hdl.handle.net/20.500.12424/208960

Andreas Bachmann

Nanobiotechnologie
Eine ethische Auslegeordnung



Herausgeber: Eidgenössische Ethikkommission für die Biotechnologie im Ausserhumanbereich EKAH und Ariane Willemsen, Bern
© EKAH
Gestaltung: Atelier Bundi, Boll
Verlag: Bundesamt für Bauten und Logistik BBL, Bern, 2006
Titelfoto: © Getty Images
Druck und Bindung: Merkur Druck AG, Langenthal
ISBN: 3-905782-00-6
ISBN: 978-3-905782-00-4

Inhalt

Einführung 5

I. Teil: Nanotechnologie und Nanobiotechnologie: ein Überblick

1. Geschichte der Nanotechnologie: einige Stationen 10
2. Zum gegenwärtigen Stand der Nanotechnologie 17
3. Nanotechnologie – Elemente einer Definition 23
4. Einige (mögliche) Anwendungen 33
5. Nanobiotechnologie 36
   5.1 Die zwei Bereiche der Nanobiotechnologie: Nano2Bio und Bio2Nano 37
   5.2 Nanomedizin 42
   5.3 Nanobiotechnologie in der Landwirtschaft und in der Ernährung 53

II. Teil: Nanobiotechnologie – eine «ethische Landkarte»

6. Zum Stand der ethischen Diskussion 65
7. Die risikoethische Dimension 67
   7.1 Risiken von Nanopartikeln für den Menschen 72
   7.2 Risiken von Nanopartikeln für die Umwelt 78
   7.3 Für und wider ein Moratorium 84
8. Die Gerechtigkeitsdimension: Nachhaltigkeit und Nano-Divide 92
9. Die militärische Dimension 101
10. Privatheit und Datenschutz 103
11. Ethische Probleme der Nanomedizin 106
12. Enhancement 109
13. Schluss 112
14. Literatur 116

Einführung

Die Nanotechnologie wird heute gemeinhin als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts betrachtet. Ihr wird nicht nur in wissenschaftlicher, sondern auch in ökonomischer Hinsicht ein enormes Potenzial zugeschrieben. Gleichwohl ist sie in der Öffentlichkeit noch weitgehend unbekannt. Das liegt nicht zuletzt daran, dass sie sich in den letzten Jahren zwar kontinuierlich, aber auf relativ unspektakuläre Weise entwickelt hat. Weder ist es zu einem revolutionären öffentlichkeitswirksamen Durchbruch gekommen noch haben sich gravierende Zwischenfälle oder Rückschläge ereignet.

Ein Problem dieser Entwicklung ist, dass mehr und mehr Nanoprodukte auf den Markt kommen, ohne dass sich die Konsumentinnen und Konsumenten dessen bewusst sind, ja, ohne dass überhaupt irgend jemand einen Überblick über diese Produkte hätte, da sie weder zulassungs- noch kennzeichnungspflichtig sind.

Problematisch ist diese Situation insbesondere deswegen, weil erste toxikologische Untersuchungen Hinweise darauf ergeben haben, dass Nanopartikel Mensch und Umwelt schädigen können. Aus diesem Grund ist es dringend erforderlich, eine ethische Evaluation der Nanotechnologie vorzunehmen. Diese Evaluation muss in zwei Schritten erfolgen. Zunächst sind die für die Nanotechnologie spezifischen ethischen Probleme zu identifizieren. Sodann geht es darum, möglichst fundierte Vorschläge für eine Lösung dieser Probleme zu erarbeiten.

Die vorliegende Studie bewegt sich durchgehend auf der ersten Ebene.[1] Dabei konzentriert sie sich auf dasjenige Teilgebiet der Nanotechnologie, das als Nanobiotechnologie bezeichnet wird. Dieser besonders zukunftsträchtige Zweig der Nanotechnologie verbindet die Forschung an biologischen und nicht-biologischen

[1] Für konstruktive Kritik und weiterführende Hinweise möchte sich der Autor bei den Mitgliedern der EKAH sowie bei Louis Tiefenauer ganz herzlich bedanken.

Systemen auf der Nanoskala und hat deren Nutzung in verschiedenen Bereichen zum Ziel. Die Nanobiotechnologie strebt zum einen danach, nanotechnologische Verfahren und Materialien im Bereich der Lebenswissenschaften zum Einsatz zu bringen. Zum anderen sucht sie biologische Materialien und Konzepte zur Herstellung technischer Nanosysteme nutzbar zu machen.

Um diese neuartige Technologie aus ethischer Sicht beurteilen zu können, muss man sich zunächst einen Überblick über ihre wissenschaftlichen und technischen Grundlagen und die daraus erwachsenden Anwendungsmöglichkeiten verschaffen. Das wiederum setzt eine Kenntnis der wichtigsten in der Nanotechnologie im Allgemeinen verwendeten Verfahren und Materialien voraus. Denn viele der Verfahren zur Herstellung von nanotechnologischen Materialien und deren Eigenschaften sind auch für die Nanobiotechnologie von zentraler Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf das Ziel der Studie – die Entwicklung einer «ethischen Landkarte» für den Bereich der Nanobiotechnologie – ist folgendes Vorgehen angezeigt: In einem ersten Teil soll ein Überblick über die Nanotechnologie im Allgemeinen sowie die Nanobiotechnologie im Besonderen gegeben werden. Auf dieser Grundlage soll dann in einem zweiten Teil eine Auslegeordnung skizziert werden, die die wichtigsten ethischen Aspekte der Nanobiotechnologie sowie den Stand der Diskussion zu jedem dieser Aspekte umfasst.

Der erste Teil besteht aus fünf Kapiteln. Kapitel 1 enthält einen kurzen Abriss der Geschichte der Nanotechnologie. Kapitel 2 gibt einige Hinweise zum gegenwärtigen Stand dieser Technologie. In Kapitel 3 wird eine Definition der Nanotechnologie vorgeschlagen und deren wichtigsten Elemente erläutert. Das Potenzial der Nanotechnologie soll in Kapitel 4 anhand einiger möglicher Anwendungen illustriert werden. Kapitel 5 befasst sich sodann ausführlich mit der Nanobiotechnologie. Mit Hilfe von ausgewählten Beispielen aus den Bereichen Nanomedizin, Landwirtschaft und Ernährung («Nanofood») sollen die zukunftsweisenden Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie verdeutlicht werden.

Der zweite, den ethischen Aspekten der Nanobiotechnologie gewidmete Teil gliedert sich in sieben Kapitel. Kapitel 6 beschreibt den gegenwärtigen Stand der ethischen Diskussion zur Nanobiotechnologie. Es wird betont, dass diese Diskussion noch ganz am

Anfang steht. Dabei ist man sich einig, dass sie nötig ist und nicht mehr aufgeschoben werden darf; vielmehr muss sie, soll die Ethik ihre orientierende Funktion wahrnehmen können, jetzt geführt werden. Nicht einig ist man sich dagegen, ob es hierfür einer eigenständigen Nano-Ethik im Sinne einer neuen Bindestrich-Ethik bedarf.

Kapitel 7 bis 12 enthalten eine Darstellung der relevanten ethischen Dimensionen der Nanobiotechnologie. Im Sinne einer möglichst neutralen Auslegeordnung geht es darum, diese Dimensionen zu identifizieren, ohne zu den damit verbundenen ethischen Problemen Stellung zu beziehen. Kapitel 7 befasst sich mit der risikoethischen Dimension der Nanobiotechnologie. Für die Beurteilung dieser Technologie aus ethischer Sicht handelt es sich hierbei zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt ohne Zweifel um die zentrale Dimension. Aus diesem Grund wird die Risikodebatte ausführlich dargestellt. Zum einen soll dargelegt werden, mit welchen Risiken für Mensch und Umwelt der Einsatz von ungebundenen Nanopartikeln und Nanoröhren gemäss der neuesten Toxizitätsforschung verbunden ist. Zum anderen sollen die unterschiedlichen Bewertungen der Resultate dieser Forschung erläutert werden: Fordern die einen im Sinne des starken Vorsorgeprinzips ein Moratorium, verlangen die anderen lediglich, dass angemessene Sicherheitsmassnahmen ergriffen werden, ohne deswegen aber die Entwicklung der Nanobiotechnologie einschränken zu wollen.

Eine weitere wichtige ethische Dimension ist die Dimension der Gerechtigkeit. Ihr ist Kapitel 8 gewidmet. Im Zentrum der Auseinandersetzung steht die Frage, ob durch die Einführung der Nanobiotechnologie die Kluft zwischen dem reichen Norden und dem armen Süden auf ethisch problematische Weise weiter vertieft wird. Auch hier sind die Meinungen geteilt: Sind die einen der Ansicht, die Kluft werde sich unweigerlich vertiefen, weil ärmere Länder aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen, des erforderlichen Know-hows sowie der zu erwartenden Verteilung der Schlüsselpatente keine Chance haben, bei der Entwicklung der Nanobiotechnologie mitzuhalten, sehen andere insofern einen Hoffnungsschimmer, als zumindest Schwellenländer wie China, Indien oder Brasilien in der Lage sein sollten, aus eigener Kraft gewisse nanobiotechnologische Produkte zu entwickeln, insbeson-

dere solche, die ihnen helfen, die Grundbedürfnisse ihrer Bevölkerungen besser zu befriedigen.

Kapitel 9 schildert die Debatte um die möglichen militärischen Auswirkungen der Nanobiotechnologie. Schon heute fliesst ein grosser Teil der staatlichen Forschungsgelder für Nano(bio)technologie in die Entwicklung militärischer Anwendungen. Neue nanobasierte Materialien zur Tarnung und Sensoren zur direkten Bestimmung von schädigenden Substanzen werden die Kriegsführung wesentlich beeinflussen. Fachleute befürchten zudem, dass es zu einer nur schwer kontrollierbaren Proliferation von neuen biologischen und chemischen Waffen kommen könnte, die man mit Hilfe der Nanobiotechnologie eines vielleicht gar nicht so fernen Tages herstellen können wird.

Kapitel 10 bis 12 befassen sich mit ethischen Aspekten der Nanobiotechnologie, die wohl erst in einer längerfristigen Perspektive praktisch relevant werden dürften. Dazu gehört der aus ethischer Sicht besonders heikle Aspekt der Privatheit und des Datenschutzes. Mit diesem Aspekt beschäftigt sich Kapitel 10. Im Mittelpunkt stehen dabei besondere Formen der missbräuchlichen Verwendung der Nano(bio)technologie. Insbesondere Anwendungen von miniaturisierten elektronischen Bauelementen und Biosensoren könnten eines Tages ungeahnte Formen der Überwachung ermöglichen und damit Datenschutzprobleme einer neuen Qualität aufwerfen.

Besonders grosse Hoffnungen setzt man in die Nanomedizin. Unbestrittenermassen besitzt die Nanobiotechnologie in diesem Bereich ein enormes Potenzial, das ethisch gesehen so weit wie möglich ausgeschöpft werden sollte. Allerdings sind damit aus ethischer Sicht auch mehrere ernsthafte Probleme verbunden. Diese Probleme werden in Kapitel 11 angesprochen. Ein zentraler Punkt ist, dass neue diagnostische Instrumente, die auf Nanobiotechnologie beruhen, eine sehr frühe Erkennung von Krankheiten ermöglichen werden. Viele Fachleute nehmen deshalb an, dass sich die Schere zwischen diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten weiter öffnen wird – was für Patientinnen und Patienten zu schweren Belastungen führen könnte.

In Kapitel 12 schliesslich wird ein ethischer Aspekt angeschnitten, der zwar mit Nanobiotechnologie zu tun hat, gleichzeitig aber darüber hinausweist. Hierbei handelt es sich um das so genannte «Enhancement», d.h. die «Verbesserung» des Menschen. Diesbezüglich wird die Nanobiotechnologie vor allem bei der Wiederherstellung und Steigerung des Leistungsvermögens etwa des Seh- oder Hörsinns eine Rolle spielen. Sie könnte zudem einen Beitrag zur Entwicklung von Implantaten leisten, die nicht nur bestehende sensorische Funktionen verbessern, sondern ganz neue Funktionen (wie z.B. eine Infrarotsicht) ermöglichen. Solche Optionen sind gegenwärtig allerdings reine Zukunftsmusik. Dennoch sind sich alle Expertinnen und Experten einig, dass sie bereits jetzt thematisiert und diskutiert werden sollten.

Abschliessend noch zwei formale Hinweise:

1. Um den Text leserlich zu halten, sind im ersten Teil die Literaturnachweise weitgehend weggelassen worden. Die in diesem Teil zusammengefassten Informationen sind den unterschiedlichsten Quellen entnommen worden. Alle diese Quellen sind im Literaturverzeichnis aufgeführt. Im Unterschied zum ersten Teil werden im zweiten Teil alle benutzten Quellen im Text angegeben.
2. Vor allem im zweiten Teil wird häufig von Nano(bio)technologie die Rede sein. Hierbei handelt es sich um eine abkürzende Schreibweise, die das umständliche «Nanotechnologie und Nanobiotechnologie» vermeiden soll. Sie wird dann verwendet, wenn es um mögliche Anwendungen geht, an denen nicht nur die Nanobiotechnologie beteiligt ist, sondern auch andere Bereiche der Nanotechnologie wie etwa die Nanoelektronik (was recht häufig der Fall ist).

I. Teil: Nanotechnologie und Nanobiotechnologie: ein Überblick

1. Geschichte der Nanotechnologie: einige Stationen

Als Vater der Nanotechnologie gilt der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman.[2] In seinem 1959 gehaltenen Vortrag «Ganz unten ist eine Menge Platz» («There's plenty of room at the bottom») hat er erstmals die Möglichkeit einer Manipulation individueller Atome und Moleküle zur Erzeugung von Stoffen mit ganz neuen Eigenschaften in Erwägung gezogen. Die zentrale Stelle von Feynmans Vortrag lautet wie folgt:

«(…) ich schrecke nicht davor zurück, in Betracht zu ziehen, dass wir schliesslich – in einer fernen Zukunft – Atome nach Belieben werden manipulieren können; die eigentlichen Atome, ganz da unten! Was würde geschehen, wenn wir Atome eins ums andere arrangieren könnten, wie wir wollen? (…) Was wären die Eigenschaften von Materialien, wenn wir die Atome wirklich arrangieren könnten wie wir wollen? (…) Atome verhalten sich anders als Dinge im grossen Massstab, weil sie den Gesetzen der Quantenmechanik gehorchen. (…) Auf atomarer Ebene treffen wir auf neue Arten von Kräften und neue Möglichkeiten, neue Effekte. Die Probleme der Herstellung und Reproduktion von Materialien werden völlig anders sein. (…) Die Prinzipien der Physik sprechen nicht gegen die Möglichkeit, Dinge Atom für Atom zu manipulieren. Das ist kein Versuch, irgendwelche Gesetze zu verletzen; es ist im Grunde genommen etwas, das getan werden kann, aber in der Praxis nicht getan worden ist, weil wir schlicht zu gross dafür sind.» (Feynman 1959)

Feynman hat richtig erkannt, dass eine Manipulation einzelner Atome physikalisch gesehen möglich ist. Allerdings verfügte er weder über die Möglichkeit, Atome zu beobachten, noch über die Werkzeuge, sie zu manipulieren.

Auch stammt der Begriff Nanotechnologie nicht von Feynman, sondern vom japanischen Ingenieur Norio Taniguchi. Er veröffentlichte 1974 einen Artikel, in dem dieser Begriff zum ersten Mal verwendet wurde. Taniguchi definiert Nanotechnologie als «the processing of separation, consolidation, and deformation of materials by one atom or one molecule». Er betrachtet die Nanotechnologie als Weiterentwicklung der Feinmechanik: sie besteht im Kern in der Fähigkeit, auf einer nanoskaligen Ebene Gegenstände präzis herzustellen.

Unabhängig von Taniguchi machte 1986 der Amerikaner K. Eric Drexler den Begriff Nanotechnologie bei einem breiteren Publikum bekannt. Er greift in seinem Buch Engines of Creation (1986) Feynmans Idee einer kontrollierten Manipulation einzelner Atome auf und entwirft die Idee einer zukünftigen Nanotechnologie, die in der Lage ist, komplexe Maschinen und Materialien aus einzelnen Atomen zu konstruieren (sog. Molecular Manufacturing). Im Zentrum von Drexlers futuristischer Vision stehen die sogenannten Assembler, auch Nanoassembler oder Nanobots genannt, programmierbare nanoskalige Konstruktionsmaschinen, die einzelne Atome und Moleküle manipulieren, d.h. neu zusammenfü-

[2] Nanoeffekte werden allerdings bereits seit langer Zeit genutzt – ohne dass man sich dessen bewusst gewesen wäre. Ein Beispiel ist Goldrubinglas. In dieses Glas sind Goldnanopartikel eingeschlossen, die dem Glas die charakteristische rote Färbung verleihen. (Nanoskalige Goldpartikel sind nicht golden, sondern rot). Goldrubinglas gibt es bereits seit dem 10. Jahrhundert. Auch in einem anderen Sinn sind Nanowissenschaft und Nanotechnologien nicht neu: «Many chemicals and chemical processes have nanoscale features – for example, chemists have been making polymers, large molecules made up of tiny nanoscalar subunits, for many decades. Nanotechnologies have been used to create the tiny features on computer chips for the past 20 years» (RSRAE 2004:5). Zudem finden sich auch in der natürlichen Welt viele Beispiele von nanoskaligen Strukturen: «(…) from milk (a nanoscale colloid) to sophisticated nanosized and nanostructured proteins that control a range of biological activities, such as flexing muscles, releasing energy and repairing cells. Nanoparticles occur naturally, and have been created for thousands of years as the products of combustion and food cooking» (RSRAE 2004:5f.). Hingegen ist die systematische Erforschung und Manipulierung der Materie im Nanobereich neueren Datums. Sie verdankt sich primär der Entwicklung von neuen Werkzeugen, insbesondere des Rastertunnelmikroskops (1981) (s.u. S.14f.).

gen und wieder umgruppieren können. Damit könnten für nahezu beliebige Zwecke molekulare Strukturen erstellt werden, die nicht in der Natur vorkommen. Eine solche Struktur wären etwa die Nanoroboter, «die sich zielstrebig durch Blutbahnen bewegen, um Zellen zu reparieren oder zu vernichten und so in der Lage wären, Krankheiten wie Krebs zu heilen» (TA Swiss 2003:21). Drexlers Idee ist, dass sich beliebige Makro-Objekte – Häuser, Computer, Stühle, Nahrungsmittel etc., aber auch Waffen – auf diese Weise herstellen lassen würden.

Man kann sich leicht vorstellen, dass es gewaltige Mengen von Assemblern bräuchte, um die gewünschten makroskopischen Gegenstände zu erzeugen. Nur, wie stellt man solche Mengen her? Um dieses Problem zu lösen, entwickelt Drexler die Vision selbstreplizierender Assembler. Diese könnten, mit den korrekten Bauplänen ausgestattet und bei entsprechender Rohstoff- und Energiezufuhr, komplette Kopien ihrer selbst herstellen. Diese Selbstreproduktion könnte allerdings ausser Kontrolle geraten – was in der Konsequenz dazu führen würde, dass Assembler die komplette Biosphäre zerstören, um Rohstoffe für ihre eigene Selbstreplikation zu gewinnen. Genauer: sie verwandeln die gesamte Biosphäre des Planeten Erde in Kopien ihrer selbst, in einen «grauen Schleim» aus Myriaden Nanoreplikatoren.

Alle seriösen Wissenschaftler sind sich einig, dass eine solche Horrorvision – das sogenannte «grey goo»-Szenario – schon deshalb unsinnig ist, weil sich auch einzelne selbstreplizierende Assembler kaum verwirklichen lassen.[3] Drexler selbst hat seine Assembler-Vision in einem 2004 in der Zeitschrift «Nanotechnology» veröffentlichten Artikel weitgehend widerrufen. Er hält selbstreplizierende Nanoboter zwar weiterhin nicht für völlig

[3] Es gibt eine Debatte zwischen Drexler und Rick Smalley, dem Entdecker der Fullerene, der hierfür 1996 den Nobel-Preis für Chemie erhalten hat (vgl. Smalley 2001, Drexler et al. 2001). Smalley hat die zwei hinsichtlich der Realisierbarkeit von selbstreplizierenden Assemblern grundlegenden, d.h. praktisch kaum zu überwindenden Schwierigkeiten formuliert. 1) den «thick fingers»-Einwand. Dieser Einwand besagt, dass der Manipulator – der Assembler, der ein Replikat seiner selbst produzieren soll – selbst aus Atomen besteht, weshalb seine «Finger» für die geplanten Aufgaben schlicht zu dick sind; 2) den «sticky fingers»-Einwand. Dieser Einwand besagt, dass die Atome des Manipulators an den Atomen, die bewegt werden sollen, haften bleiben: «(…) die ▸

unmöglich, aber doch für nicht wünschenswert und zudem für ineffizient.

Obwohl Drexlers Visionen – die auch positive Aspekte enthalten, etwa die Überwindung von Alter und Tod durch Nanotechnologie – überzogen und kaum realisierbar erscheinen, bestimmen sie bis heute die öffentliche Wahrnehmung der Nanotechnologie stark.[4] Ebenso öffentlichkeitswirksam war die vom Mitbegründer des Computerkonzerns Sun Microsystems Bill Joy vorgebrachte fundamentale Kritik an der Nanotechnologie. In seinem im Jahr 2000 veröffentlichten Manifest «Warum uns die Zukunft nicht braucht» (Why the Future doesn't need us) vertritt Joy die These, die Kombination von Genetik, Robotik und Nanotechnologie könnte in einigen Jahrzehnten zu derart intelligenten Maschinen führen, dass der Mensch «überflüssig» und letztlich von Maschinen «abgeschafft» wird. Deshalb plädiert er dafür, die Forschung in diesen Bereichen zu beschränken oder teilweise ganz auszusetzen. Dieser Forschungsstopp soll uns die Zeit verschaffen, die wir brauchen, um einen Überblick über das Ausmass der Risiken zu bekommen und uns darüber zu verständigen, in welcher Welt wir leben wollen.

Drexlers und Joys Visionen, seien sie nun eher optimistisch oder eher pessimistisch eingefärbt, sind in zweierlei Hinsicht problematisch: Erstens führen sie insbesondere in ihrer negativen Ausprägung, da, wo sie Schreckensszenarien[5] und Weltuntergangsvisionen ausmalen, zu öffentlichen Diskussionen (aber auch zu Diskussionen in Fachkreisen!), die mit der realen Entwicklung der Nano-

gegriffenen Atome würden sich, sortenabhängig, nicht beliebig greifen und wieder abstreifen lassen, sie würden eben Bindungen eingehen – ein aus dem Alltag bekanntes Phänomen: Es ist nicht so einfach, ein klebriges Kügelchen wieder vom Finger zu bekommen» (BMBF 2004:42).

[4] Wenn auch mit abnehmender Wirkung. Zumindest in der informierten Öffentlichkeit spielt das Grey-Goo-Problem bestenfalls noch eine marginale Rolle. Das hat wohl damit zu tun, dass sich die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass es sich hierbei um reine Science Fiction handelt.

[5] Ein solches Szenario findet sich auch in Michael Crichtons bekanntem Roman «Beute» (erschienen 2002): Schwärme von smarten Nano-Partikeln schliessen sich zu halbintelligenten Wesen zusammen, die Menschen jagen, um sich in ihnen einzunisten und nach und nach alle Zellen zu ersetzen.

technologie und den damit verbundenen ethischen, politischen und sozialen Problemen nichts oder nur wenig zu tun haben. Sie dominieren die öffentliche Wahrnehmung und erschweren eine rationale Auseinandersetzung mit den Chancen und Risiken der Nanotechnologie. Zweitens könnten sie dazu führen, dass das positive Potential der Nanotechnologie nicht umgesetzt werden kann, weil sich die hochgeschraubten Erwartungen nicht erfüllen lassen und in der Folge Ernüchterung und Enttäuschung überhand nimmt.[6]

Für die reale Entwicklung der Nanotechnologie entscheidend war die Erfindung des Rastertunnelmikroskops (Scanning Tunneling Microscope). Das erste Mikroskop dieser Art wurde 1981 von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer am IBM-Labor in Rüschlikon gebaut – wofür sie 1986 den Nobelpreis erhielten. Es erlaubte zum ersten Mal, Atome «sichtbar» zu machen, und verschaffte damit den Forschenden einen Zugang zum Nano-Kosmos. Das Rastertunnelmikroskop ist freilich kein Mikroskop im herkömmlichen Sinn:

«Es gleicht vielmehr dem Taststock eines Blinden, denn bezüglich der Strukturen im Nanokosmos sind wir Blinde. Es gibt keine Möglichkeit, diese mit Licht zu bescheinen und die Reflexionen zu sehen. Das, was wir hier als «sehen» bezeichnen, sind die Bilder, die ein Oszillograph oder ein Computer für uns aus den elektronischen Informationen übersetzt hat» (Boeing 2004:48).

[6] Etwas realistischer, wenn auch immer noch sehr optimistisch, sind die Visionen, die im Umfeld der von Ex-Präsident Bill Clinton initiierten US-amerikanischen «National Nanotechnology Initiative (NNI)» entwickelt wurden. Die NNI lässt sich von zwei Ideen leiten: 1) Wir erleben derzeit die Anfangsphase der nächsten industriellen Revolution. 2) Die Konvergenz mehrerer neuer Technologien wird eine umfassende und tiefgreifende Veränderung der sozioökonomischen und wissenschaftlich-technischen Basis moderner Gesellschaften mit sich bringen. Entscheidend hierbei ist die so genannte NBIC-Konvergenz: Auf der Basis des nanotechnologischen Fortschritts wird es zu einer Integration von Nanotechnologie, Biotechnologie, Informationstechnologie und «Cognitive Science» kommen. Die kanadische ETC Group, die sich als erste NGO intensiv mit den Problemen der Nanobiotechnologie beschäftigt hat, spricht statt von NBIC von BANG: Bits (Information Technology), Atoms (Nanotechnology), Neurons (Cognitive Neurosciences), Genes (Biotechnology).

Wenig später baute Binnig mit den Physikern Quate und Gerber auch das erste Rasterkraftmikroskop (Atomic Force Microscope).[7] Dieses wird «nicht nur zur Analyse, sondern auch zur Herstellung und Manipulation von Strukturen im Nanomassstab bis hinunter auf die atomare Ebene eingesetzt» (Paschen et al. 2004:44). In diesem Zusammenhang spricht man auch von Rastersonden-Techniken. Darunter versteht man sowohl Techniken zur Abtastung von nanoskaligen Objekten wie auch Techniken, die zur Manipulation solche Objekte dienen, etwa zum Schneiden von DNA oder zum Verschieben von Biomolekülen.[8]

1985 entdeckten Kroto, Smalley und Curl die Buckminsterfullerene, eine besonders aussichtsreiche Klasse von Nanopartikeln.[9] Buckminsterfullerene – benannt nach dem amerikanischen Architekten Buckminster Fuller, der durch seine geodätischen Kuppeln[10] bekannt geworden ist – sind neben Graphit und Diamant die dritte Form von reinem Kohlenstoff. Es handelt sich bei ihnen um eine Gruppe von Kohlenstoff-Käfigmolekülen, von denen das einer geodätischen Kuppel ähnelnde C60-Molekül das wichtigste ist.[11] Dieses Molekül, dessen Durchmesser etwa 1 nm beträgt, wird auch «Buckyball» genannt. Solche Buckyballs könnten beispielsweise als Drug Delivery-Vehikel (s.u. S.49ff.) oder in elektronischen Schaltkreisen eingesetzt werden.[12]

[7] Eine auch für Laien verständliche Erklärung der Funktionsweise des Rastertunnel- und des Rasterkraftmikroskops findet sich in Boeing 2004:46ff.

[8] Daneben gibt es noch so genannte Optische Pinzetten. Diese nutzen Laserstrahlen, um mikro- und nanoskalige Teilchen einzufangen und zu bewegen.

[9] «Elf Jahre später bekamen Kroto, Smalley und Curl den Chemie-Nobelpreis. Smalley betonte allerdings in seiner Festrede, der könne nicht der Beschreibung eines solchen Moleküls gelten – die hatten ja bereits der Japaner E.G. Osawa und andere geliefert –, sondern nur der Entdeckung, dass die Natur es von selbst zusammenbaut» (Boeing 2004:70).

[10] Geodätische Kuppeln sind sphärische Kuppeln mit einer Substruktur aus Fünfecken.

[11] Die Struktur dieses Moleküls entspricht derjenigen eines Fussballs: Sie besteht aus 60 Kohlenstoff-Atomen, die in 12 Fünfecken und 20 Sechsecken angeordnet sind – genau wie die 12 fünfeckigen und 20 sechseckigen Lederflicken eines Fussballs.

[12] Zumindest in kommerziellen Produkten haben Buckyballs bis heute noch kaum Verwendung gefunden. Die hohen Produktionskosten spielen dabei eine ausschlaggebende Rolle. Allerdings beginnen die Preise langsam zu fallen.

1989 gelang Don Eigler und Erhard Schweizer mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops die erste gezielte Manipulation einzelner Atome: sie bauten ein IBM-Logo, das aus 35 Xenonatomen bestand.

1991 entdeckte Sumio Iijima die Nanoröhren («Nanotubes»), die eine Variante der Fullerene darstellen. Es handelt sich bei ihnen um röhrenförmige Anordnungen von Kohlenstoffatomen mit einem Durchmesser von einigen Nanometern. Nanoröhren gelten als der Werkstoff der Zukunft. Das liegt an ihren aussergewöhnlichen Eigenschaften: sie sind 100 mal fester als Stahl und fünf bis sechs mal leichter; gleichzeitig doch flexibel und verformbar und leiten Wärme und Elektrizität extrem gut. Sie könnten z.B. bei der Herstellung von Transistoren für Computerchips (Nanoelektronik), der Display-Herstellung oder der Herstellung von Sensoren, aber auch als Transportvehikel für Wirkstoffe aller Art oder als Wasserstoff-Speicher zum Einsatz kommen. Zudem könnten sie bald auch in vielen Baumaterialien Verwendung finden, im Flugzeug- und Autobau oder in Knochenimplantaten und künstlichen Gelenken. Heute werden sie bereits etwa in Tennisbällen und besonders leichten und stabilen Tennis-Rackets verwendet.

2. Zum gegenwärtigen Stand der Nanotechnologie

Die Mehrheit der Expertinnen und Experten wie auch der im Bereich Nanotechnologie aktiven Unternehmen ist der Ansicht, Nanotechnologie sei eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Dabei sind sich alle einig: Die Entwicklung steht noch am Anfang. Wie schnell und in welchem Ausmass sich die Nanotechnologie durchsetzen wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abschätzbar.[13] Aber vieles deutet darauf hin, dass sie sich durchsetzen und in diesem Prozess in verschiedensten Bereichen (mehr oder weniger) tiefgreifende Änderungen herbeiführen wird.[14] Dagegen vertritt eine Minderheit die Meinung, bei der Nanotechnologie handle es sich um einen weiteren «Hype» – eine künstliche Stimulierung einer neuen Technologie –, der der Ernüchterung Platz machen wird, wenn sich herausstellt, dass die überzogenen Erwartungen nicht erfüllt werden können, weil das Potential der Nanotechnologie überschätzt wird.[15]

---

[13] «Wann sich der grosse Nanoboom (…) ökonomisch handfest niederschlagen wird, darüber schweigen sich die meisten Fachleute aus. Bislang findet die Nanorevolution fast ausschliesslich im Labor statt. In industriellen Produktionsmassstäben dienen Nanomaterialien bislang allenfalls zur Aufwertung so banaler Produkte wie Sonnenmilch, Kloschüsseln oder Skiwachs. Die Umsätze der Unternehmen erreichen allenfalls einstellige Millionenhöhe, keines macht bislang nennenswerten Gewinn» (Kröher 2004).

[14] Ein vermutlich entscheidender Punkt, der für den Erfolg der Nano(bio)technologie spricht: sie wird in vielen Bereichen einsetzbar sein: Elektronikherstellung, Datenspeicherung, funktionelle Materialien, Präzisionsoptiken, Umweltschutz, regenerative Energien, Medizin, Arzneimittelherstellung, Lebensmittel, Landwirtschaft – um nur einige der wichtigen Bereiche zu nennen.

[15] «Selbst ein Insider wie Geoffrey Varga, Direktor beim Degussa-Start-up Advanced Materials, fragt sich nach jedem Nanokongress, was von dem dort Präsentierten einmal Wirklichkeit werden könnte – und was als schierer PR-Rummel abgehakt werden muss. «Was ist Pipeline – und was ist nur Hypeline?», heisst das im Jargon des Amerikaners. ▸

Niels Boeing, ein deutscher Wissenschaftsjournalist mit ausgezeichneter Kenntnis der Nanotechnologie, beschreibt die gegenwärtige Situation folgendermassen:

«Zwar gibt es weltweit schon mehr als 700 Unternehmen, die an nanotechnischen Verfahren und Produkten arbeiten. Einige davon sind grosse Konzerne aus der Computer- und aus der chemischen Industrie, viele sind junge Ausgründungen aus Universitäten und Forschungsinstituten. Aber wir können noch keine Produkte kaufen, die es ohne Nanotechnik nicht gäbe. Die Situation ähnelt vielleicht der der Informationstechnik Ende der sechziger Jahre. Den Computer als Alltagsgerät gab es noch nicht, und das Internet verband nur ein paar Universitäten. Um von solch einem frühen Stadium weiterzukommen, genügen Visionen nicht. Die Entwicklung hängt von einigen wichtigen Faktoren ab: Kapital, technischen Durchbrüchen, der Verbreitung nanotechnischen Know-hows und der Zustimmung der Öffentlichkeit zu der neuen Technik» (Boeing 2004:180).[16]

Dabei ist die öffentliche Aufmerksamkeit mit Blick auf Nanotechnologie noch sehr bescheiden; der öffentliche Diskurs kommt nur zögernd in Gang, und kann etwa mit der Debatte zur Gentechnologie (noch) nicht verglichen werden. Die Presse berichtet zwar über Nanotechnologie, aber auch sie bei weitem nicht in dem Masse, wie das bei der Gentechnologie der Fall ist.

Bezeichnenderweise befindet sich der Informationsstand der Bevölkerung noch auf einem sehr tiefen Niveau. In Umfragen, die in den USA, Kanada und verschiedenen europäischen Staaten durchgeführt worden sind, hat sich diesbezüglich ein einheitliches Bild ergeben: Rund Dreiviertel der Befragten haben bisher wenig oder gar nichts von Nanotechnologie gehört. Von denen, die das Wort kennen, ist die Mehrheit der Nanotechnologie gegenüber positiv eingestellt, d.h. glaubt, dass der Nutzen grösser ist als die Risiken. Allerdings ist die Risikotoleranz allgemein relativ gering (auch in den USA) – ebenso wie das Vertrauen in Regierung und Industrie, angemessen mit diesen Risiken umgehen zu können. Es besteht zudem ein breites Bedürfnis, mehr über Nanotechnologie zu erfahren.

Weltweit werden gegenwärtig etwa 5 Milliarden Euro in die Nanotechnologie investiert,[17] rund 1 Milliarde Euro in Europa – vor allem in Deutschland, England und Frankreich – und Japan sowie rund 3 Milliarden Euro in den USA. 2 Milliarden Euro kommen von privater Seite, die restlichen 3 Milliarden Euro von der öffentlichen Hand. In der Schweiz fliessen gemäss Schätzungen jedes Jahr ungefähr 50 Millionen Dollar staatliche Fördergelder in die Nano-Forschung und in verwandte Bereiche (vgl. TA Swiss 2006:2). Pro Kopf der Bevölkerung gerechnet ist dieses Engagement der Schweiz laut Seco weltweit das höchste.

Was die staatlichen Förderprogramme in der Schweiz betrifft, ist insbesondere der Nationale Forschungsschwerpunkt (NFS) «Nanowissenschaften» zu erwähnen.[18] Hierbei handelt es sich um ein langfristig angelegtes, interdisziplinäres Forschungsprogramm, das sich mit Strukturen im Nanometerbereich beschäftigt und Impulse für Lebenswissenschaften, Nachhaltigkeit, Informations- und Kommunikationstechnologien geben möchte. Innerhalb des NFS fungiert die Universität Basel als Kompetenzzentrum. Von hier aus wird ein Netzwerk aus Hochschulinstituten, Bundesforschungsanstalten und Industriepartnern gesteuert, in dem Wissenschaftler verschiedenster Disziplinen eng zusammen arbeiten. Zudem hat die EMPA ein Forschungsprogramm «Nanotechnologie» im Bereich der Materialforschung. Sie forscht auch zur Toxizität von Nanopartikeln und zur Risikoabschätzung. An den Schweizer

Die Frage ist umso berechtigter, als sich noch keine «Killerapplikation» abzeichnet. Die wäre jedoch nötig, um der Nanotechnologie eine ähnlich zentrale Bedeutung für die Zukunft der Wirtschaft zu geben, wie sie die Transistoren für die Halbleitertechnik haben. Diese seinerzeit neuartigen Elektronikbauteile – und später die integrierten Schaltkreise – bildeten die Basis für alle digitalen Technologien. Sie waren der Schlüssel zum Informations- und Kommunikationszeitalter» (Kröher 2004).

[16] Vgl. hierzu auch RSRAE 2004:32.

[17] Meili 2006 redet von 9 Milliarden Dollar. Die Swiss Re (2004:6) spricht von folgenden Zahlen für das Jahr 2003: Öffentliche Forschungsgelder weltweit mehr als 3 Milliarden Dollar mit steigender Tendenz im Hinblick auf die kommenden Jahre. Investitionen der Wirtschaft auch über 3 Milliarden US-Dollar. Für die Zahlen der staatlichen Fördergelder in Ländern wie China, Brasilien, Taiwan, Indien oder Südafrika vgl. Barker et al. 2005:3f.

[18] Vgl. auch den Überblick bei TA Swiss 2003:2.

Universitäten sowie an der ETH sind Nanowissenschaft und Nanotechnologien wichtige Forschungsschwerpunkte.

Ein guter Indikator für die Bedeutung einer Technologie sind die Patente. 2001 wurden bereits rund 2000 Patente auf nanotechnologische Erfindungen erteilt, am meisten in den USA. Seit 1996 hat sich die Anzahl der Patente verdreifacht. Vor allem in den USA lässt sich eine aggressive Patentierungswelle beobachten. Die jährlichen Patentanmeldungen in der Nanotechnologie haben sich in den letzten sechs Jahren etwa alle zwei Jahre verdoppelt.

Den Löwenanteil am Nanomarkt stellt gegenwärtig das Segment «Werkstoffe» (Materialien) bzw. Komposite – Mischung aus Nanopartikeln und ‹klassischen› Materialien – und nanostrukturierte Oberflächen (Beschichtungen). Sie sind am weitesten verbreitet und haben teilweise bereits Einzug in unseren Alltag gehalten. So finden sich Nanopartikel bzw. Nanomaterialien in so unterschiedlichen Produkten wie Sonnencremes (mit hohem UV-Schutz), Skiwachs, Tennisrackets, Tennisbällen, Easy-to-Clean Beschichtungen von Duschkabinen, fleckenresistenten Hosen, kratzfesten Autolackierungen, nanoveredelten Bügeleisen[19] oder schmutzabweisender Sanitärkeramik.[20] Ebenfalls zunehmend wichtig ist die Nanoelektronik (im Bereich der IT). Alles andere – Nanomedizin, Nanofood etc. – ist noch weitgehend Grundlagenforschung und, als anwendbare Technologie, Zukunftsmusik, auch wenn bereits einige Produkte auf dem Markt sind.

Wirtschaftlich betrachtet besteht das Kernproblem der Nanotechnologie(n) in der schwierigen Transformation von wissenschaftlichen Erkenntnissen und Forschungsergebnissen hin zu erfolgreichen Produkten im Markt.[21] So ist es auch nicht verwunderlich, dass innerhalb der globalen «Nano-Community» Fragen

[19] «Nanoveredelte Gleitflächen mindern Reibungsverluste und lassen Bügeleisen leichter über die Wäsche gleiten. Das verhindert Knitterfalten» (Kröher 2004).

[20] «Indem man die mikroskopisch feinen Vertiefungen an den Oberflächen von Glas, Keramik, Metall oder Lackierungen mit einer festen Schicht von Nanopartikeln (z.B. Titandioxid) füllt, wird eine äusserst glatte Oberfläche erzielt, die Wasser abperlen lässt und Schmutzteilchen keinen Halt mehr bietet» (TA Swiss 2006:6).

[21] Momentan werden etwa 500 Produkte kommerziell vertrieben, die nanoskalige Partikel enthalten; unzählige weitere sind in der Pipeline.

der Kommerzialisierung, der Sicherung von geistigem Eigentum (Patente) und der Finanzierung intensiv diskutiert werden.

Genaue Zahlen zur tatsächlichen gegenwärtigen wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie scheinen zu fehlen. Das deutsche Bundesforschungsministerium schätzt das heutige Weltmarktvolumen von Produkten, bei deren Herstellung Nanotechnologie eine Rolle spielt, auf 100 Milliarden Euro.[22] Die Swiss Re (2004:6) spricht in diesem Zusammenhang, etwas konservativer, von einem zweistelligen Milliardenbetrag. Zugleich prognostiziert sie, dass sich das Weltmarktvolumen bis 2010 auf dreistellige und bis 2015 auf vierstellige Milliardenbeträge erhöhen wird. Auch Jean-Daniel Gerber, Staatssekretär Seco, rechnet damit, dass der mit Nanoprodukten erzielte Umsatz im Jahr 2015 mehr als 1'000 Milliarden Dollar betragen wird. Meili (2006) redet gar von 1,5 Billiarden Dollar. Noch weiter geht das US-Marktforschungsinstitut LuxResearch. Seiner Meinung nach wird der weltweite Umsatz im Jahr 2014 2,6 Billiarden Dollar betragen, ein Anteil von 15% an der globalen Warenproduktion. Dies gilt für Produkte, die Nanotechnik enthalten. Es gilt nicht für die basalen Nanomaterialien wie Nanoröhren oder Quantenpunkte. Sie werden gemäss dieser Prognose im Jahr 2014 lediglich einen Umsatz von 13 Milliarden Dollar erzielen. Diese gewaltige Differenz erklärt sich daraus, dass die Nanotechnologie als solche keine Industrie oder Industriesektor ist, sondern ein Set von Werkzeugen und Produktionsprozessen, die man auf praktisch alle hergestellten Güter anwenden kann (vgl. luxresearch 2004).

Rechtlich gesehen hat bisher noch kein Land den Umgang mit der Nanotechnologie, insbesondere mit den – künstlich hergestellten – Nanopartikeln, spezifisch geregelt. Intensive Diskussionen sind aber inzwischen national und international in Gang gekommen. Regelungen werden eher früher als später erwartet. Denn die jetzige Situation wird von den relevanten Akteuren – Industrie, Versicherungen, Behörden – als unbefriedigend eingestuft, da sie mit Unsicherheit und Unwägbarkeiten verbunden ist.

In der Schweiz fallen die Nanopartikel unter den Geltungsbereich des Chemikaliengesetzes (ChemG), des Umweltschutz-

[22] Das betrifft nicht den direkten Umsatz mit Nanokomponenten, der noch relativ klein ist, sondern den Umsatz mit Produkten, die Nano-Bestandteile enthalten.

gesetzes (USG), des Lebensmittelgesetzes (LMG) und des Arbeitsgesetzes. Momentan wird von den zuständigen Behörden (BAFU, BAG) ein Aktionsplan ausgearbeitet. Darin geht es unter anderem um Massnahmen zum Arbeitnehmerschutz in Industrie und Forschung und, falls erforderlich, um eine Anpassung der Gesetzgebung.

Besonders in den Vereinigten Staaten findet gegenwärtig eine breite Debatte darüber statt, ob und wie die Nanotechnologie und das heisst vor allem die Risiken der Nanotechnologie rechtlich geregelt werden sollten. Die dabei vertretenen Positionen sind auch für die Debatten in anderen Ländern typisch. Einige plädieren für ein eigenes Nano-Gesetz – Hauptgrund: «NT materials behave differently from conventional materials» (Davies 2006:8) –, andere lehnen dies ab, weil sie befürchten, ein solches Nano-Gesetz könnte hauptsächlich kleine Firmen benachteiligen und sich allgemein auf das Innovationstempo hemmend auswirken. Diese Gruppe teilt sich ihrerseits in zwei Fraktionen. Die eine Fraktion hält die geltende Gesetzgebung für ausreichend und sieht darüber hinaus keinen weiteren Handlungsbedarf; die andere meint, es wäre klug, wenn sich die Industrie selbst freiwillig Sicherheitsstandards auferlegen würde.[23]

Der Umstand, dass es bislang keine spezifischen Regelungen für nanotechnologisch hergestellte Produkte gibt, erklärt auch, warum solche Produkte ohne besondere Kennzeichnung durch den Gesetzgeber ihren Weg in die Läden gefunden haben; häufig ohne vom Konsumenten als solche erkannt zu werden.

[23] Was teilweise durchaus geschieht. So hat zum Beispiel BASF einen eigenen Verhaltenskodex Nanotechnologie entwickelt (vgl. BASF 2004 und 2004a). Zudem hat die US-amerikanische Umweltbehörde EPA ein freiwilliges «stewardship program» eingeführt, um die Industrie mit Selbstkontrollen stärker in die Verantwortung einzubinden.

3. Nanotechnologie – Elemente einer Definition

Eine allgemein akzeptierte Definition der Nanotechnologie gibt es bis heute nicht. Die Schwierigkeit, sich auf eine solche Definition zu einigen, hat drei Gründe (vgl. zum Folgenden Paschen et al. 2004:28):

1. Nanotechnologie ist keine im konventionellen Sinn spezifische Technologie, sondern ein heterogenes Technologiefeld.
2. Die Abgrenzung zu verwandten oder benachbarten Gebieten wie Mikrotechnologie oder Biotechnologie gestaltet sich schwierig. «So beschäftigt sich z.B. die Biotechnologie seit langem mit nanometergrossen Strukturen, ohne deshalb per se zur Nanotechnologie zu gehören» (Paschen et al. 2004:28).
3. Beim Übergang in den Nanometerbereich beginnen zentrale Entwicklungsrichtungen von herkömmlich getrennten Disziplinen wie Physik, Chemie und Biologie zu überlappen und zu verschmelzen.

Eine Definition von Nanotechnologie ist im Kontext einer ethischen Auslegeordnung unverzichtbar. Denn unterschiedliche Auffassungen davon, was eine Ethik der Nanotechnologie ist und was sie leisten sollte, könnten in einer unterschiedlichen Konzeption der Nanotechnologie selbst begründet liegen. Versteht man beispielsweise Nanotechnologie im Sinne K. Eric Drexlers, handelt es sich dabei um Science Fiction, um etwas, das es nach Ansicht der überwiegenden Zahl der Expertinnen und Experten kaum je geben wird, nämlich um die Konstruktion von beliebigen Gegenständen Atom für Atom und Molekül für Molekül. Dann stellt sich die Frage, welche Relevanz darauf bezogene ethische Reflexionen haben. Alles, was es heute bereits gibt, würde aber nicht unter dem Begriff Nanotechnologie firmieren. Insofern könnten auch entsprechende ethische Probleme, etwa die mit dieser Technologie gegenwärtig bereits verbundenen Risiken, nicht unter dem Rubrum «Ethik der

Nanotechnologie» abgehandelt werden. Aus analogen Gründen wäre eine einheitliche Definition von Nanotechnologie insbesondere auch hinsichtlich Fragen der Rechtsprechung wichtig.

Bei der Nanotechnologie handelt es sich weniger um eine Basistechnologie im klassischen Sinne mit eindeutig abgrenzbarer Definition, sondern vielmehr um eine «neue interdisziplinäre und branchenübergreifende Herangehensweise für weitere Fortschritte in der Elektronik, Optik, Biotechnologie oder bei neuen Materialien» (Luther et al. 2004:15).

Nanotechnologie (griech. nãnnos = Zwerg) ist mithin «ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala befassen.» (Paschen et al. 2004:1). Da deren einziges gemeinsames Merkmal die Grössendimension zu sein scheint, wird gelegentlich statt von Nanotechnologie (im Singular) von Nanotechnolgien (im Plural) gesprochen.

Neben dem Aspekt der Grösse – Nanometerskala – sind aber noch zwei weitere Aspekte für die Nanotechnologien wesentlich: nämlich im Nanometerbereich auftretende neuartige Effekte, die man sich nutzbar machen kann, und bestimmte Möglicheiten der Herstellung von nanoskaligen Strukturen. Zusammen bilden diese drei Aspekte eine umfassende Definition von Nanotechnologie(n), die auch für die im zweiten Teil dieser Studie erfolgende Darlegung der ethischen Aspekte massgebend sein wird.

Definition «Nanotechnologie(n)»[24]

1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind.
2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer[25] Ebene auftauchen.
3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.[26,27]

Die einzelnen Punkte dieser Definition bedürfen der Erläuterung.

Ad 1. Ein Nanometer (nm) ist ein Milliardstel Meter (10^{-9}m) bzw. ein Millionstel Millimeter oder ein Tausendstel Mikrometer (µm). Im Vergleich: ein Haar hat einen Durchmesser von etwa 80'000 nm, ein rotes Blutkörperchen von 7'000 nm, Bakterien von etwa 1'000 nm, Viren von zwischen 60 und 100 nm, ein Wasserstoffmolekül von 0,4 nm. Viele Moleküle – Proteine eingeschlossen – sind 1 nm und mehr. Die Nanoskala beginnt bei 100 nm und geht bis zur Grösse eines Wasserstoffatoms (ca. 0,1 nm).

Mit «Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind», sind so genannte Nanomaterialien gemeint. Es sind drei Arten von Nanomaterialien zu unterscheiden:

1. Materialien mit einer Dimension im nanoskaligen Bereich. Damit sind vor allem dünne Filme und Oberflächenbeschichtungen gemeint, wie man sie beispielsweise auf selbstreinigenden Fenstern oder kratzfestem Lack findet.
2. Materialien mit zwei Dimensionen im nanoskaligen Bereich. Hier sind insbesondere die Nanoröhren («nanotubes») zu erwähnen (s.o. S.16).

[24] Die Definition übernehme ich von Paschen et al. 2004:1. Eine sich damit weitgehend deckende Definition stammt von der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA. Ihr zufolge ist Nanotechnologie «research and technology development at the atomic, molecular, or macromolecular levels using a length scale of approximately one to one hundred nanometers in any dimension; the creation and use of structures, devices and systems that have novel properties and functions because of their small size; and the ability to control or manipulate matter on an atomic scale» (EPA 2005:4).

[25] Als ‹mesoskopisch› werden Systeme bezeichnet, die gross auf der mikroskopischen Skala sind, die aber dennoch so klein sind, dass sie nicht als makroskopische Körper zu beschreiben sind.

[26] Durch dieses Kriterium werden Aktivitäten, die sich natürliche Vorgänge im Nanomassstab zunutze machen, ausgeschieden. «Dazu zählt beispielsweise die biotechnische Produktion von Enzymen mit Hilfe von Mikroorganismen» (Paschen 2004:29).

[27] Auch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung betont diesen Punkt: «Die kontrollierbare Manipulation von Atomen und Molekülen auf der Nanoskala ist (…) 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 unbekannten Eigenschaften zu erzeugen» (BMBF 2002:5).

3. Materialien mit drei Dimensionen im nanoskaligen Bereich. Hierzu zählen unter anderem:
   - alle Arten von Nanopartikeln.[28] Nanopartikel sind Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 100 nm. Die wichtigsten im Einsatz befindlichen Nanopartikel sind: Carbon Black («Industrieruss»), Metalloxide wie Siliziumdioxid (SiO_2), Titandioxid (TiO_2) und Zinkoxid (ZnO), Halbleiter wie Cadmium-Tellurit und Metalle wie Gold und Silber. Nanopartikel sind keine eigenständigen Produkte, sondern dienen als Rohmaterial, das zu verschiedensten Zwecken verwendet werden kann, momentan vor allem dazu, bestehende Produkte zu verbessern. Nanopartikel finden sich z.B. in Sonnencremes und Lippenstiften, die bereits auf dem Markt erhältlich sind. In naher Zukunft könnten sie etwa dazu verwendet werden, Farben leichter zu machen, wodurch sich beispielsweise das Gewicht von Flugzeugen reduzieren liesse. Es wird zudem untersucht, ob Nanopartikel mit Schadstoffen in Erde und Grundwasser reagieren und sie in harmlose Verbindungen umwandeln können. Mittel- bis langfristig möglich ist ein Einsatz von Nanopartikeln in der Drug Delivery, das heisst als Vehikel zum zielgenauen Transport von Wirkstoffen (s.u. S.49f.).
   - Buckminster-Fullerene («Buckyballs») (s.o. S.15)
   - Quantenpunkte: kleinste Partikel von halbleitenden Materialien. Diese werden etwa für die Herstellung von hochauflösenden Flachbildschirmen in Fernsehern oder Computern, für sehr leichte Batterien mit längerer Lebensdauer oder für neuartige Lasersysteme gebraucht.

Ad 2. Nanomaterialien unterscheiden sich nicht bloss durch ihre Kleinheit von konventionellen Materialien im Mikro- und Makrobereich. Sie haben auch – und das ist, was sie eigentlich interessant macht – ganz neue Eigenschaften. Zwei sind besonders wichtig:

[28] Die Verwendung des Worts ‹Nanopartikel› ist nicht einheitlich. So werden Nanoröhrchen und Buckyballs zwar häufig als eigene Klasse von Nanomaterialien betrachtet, gelegentlich werden sie aber auch zu den Nanopartikeln gerechnet und entsprechend bezeichnet.

- Nanopartikel haben eine grössere Oberfläche (per Masseneinheit) als nicht-nanoskalige Partikel desselben Materials: «Im Verhältnis zu ihrem Volumen besitzen Nanopartikel eine sehr grosse Oberfläche. So liegen beispielsweise bei einem Partikel mit 10 nm Durchmesser ca. 20% aller Atome an der Oberfläche, bei einem Partikel von 1 nm Durchmesser können es über 90% sein. Atome an der Oberfläche haben nicht so viele Bindungspartner wie Atome im Inneren. Sie besitzen daher andere Eigenschaften und sind z.B. reaktiver» (Paschen et al. 2004:35). Je kleiner die Partikel, desto reaktiver wird die entsprechende Substanz.
- Nanopartikel, die kleiner als 50 nm sind, unterliegen den Gesetzen der Quantenphysik und zeigen somit ganz spezielle Quanteneffekte.

Diese Faktoren können Eigenschaften wie Reaktivität (chemische Aktivität), Stabilität/Härte, Farbe oder elektrische Charakteristik verändern:

«Ein beliebiges Material, das auf die Grösse von Nanopartikeln reduziert wird, kann sich auf einmal ganz anders verhalten als vorher. So zeigen zum Beispiel elektrisch isolierende Stoffe plötzlich ein leitendes Verhalten, und nicht lösliche Stoffe werden auf einmal löslich. Andere ändern ihre Farbe und werden durchsichtig – völlig neue Eigenschaften, die Tür und Tor für neue Anwendungen und Produkte öffnen und damit für die Wirtschaft als auch für die Gesellschaft äusserst interessant werden (…).» (Swiss Re 2004:5)

Um ein Beispiel zu geben, ist nanoskaliges Titandioxid – anders als nicht-nanoskaliges Titandioxid – nicht nur transparent, sondern zugleich auch ein sehr effektiver UV-Blocker – weshalb es in Sonnencremes verwendet wird.

Man sollte zwischen natürlichen und künstlichen (oder synthetischen) Nanopartikeln unterscheiden.

1. Als natürliche Partikel oder als technische Nebenprodukte sind Nanopartikel nichts Neues. Beispiele hierfür sind Salznanokristalle in der Meeresluft, Kohlenstoffpartikel ausstossende

Dieselmotoren, Nanopartikel im Rauch von Zigaretten, brennenden Kerzen und Kaminfeuern.[29]

2. Künstliche oder synthetische Nanopartikel werden erst seit kurzem kommerziell hergestellt.

Viele natürliche Nanopartikel sind wasserlöslich: «Sobald sie eingeatmet werden und mit dem Gewebe in Kontakt kommen, lösen sie sich auf und verlieren ihre Partikelform» (Swiss Re 2004:13). Nicht-wasserlösliche Nanopartikel, etwa aus Verbrennungsmotoren, sind kurzlebig: «Sie weisen eine sehr hohe Tendenz auf, sich zusammenzulagern. Damit bilden sie grössere Partikel und werden von Nano- zu Mikropartikeln mit einer anderen Grösse und anderen Eigenschaften». Diese Verklumpungstendenz haben auch künstlich hergestellte Nanopartikel. Damit würden sie aber weniger reaktiv und weniger mobil. Weil man dies vermeiden will, werden sie oft speziell beschichtet. «Folglich bleiben die Partikel in vielen handelsüblichen Produkten – wie zum Beispiel Sprays oder Pulvern[30] – reaktiv und hochbeweglich» (Swiss Re 2004:13).

Ad 3. Nanostrukturen können mittels verschiedener Techniken oder Verfahren gezielt hergestellt und/oder manipuliert werden. Zu erwähnen sind hier vor allem der Top-down- und der Bottom-up-Ansatz.

Top down bedeutet, aus grösseren Materialstücken immer kleinere Strukturen herzustellen. Dieser Ansatz dient insbesondere der Miniaturisierung bereits vorhandener mikroelektronischer Systeme wie etwa Computerchips. Die bekannteste Technik ist die optische Lithographie. Sie wird zur Produktion

[29] Natürliche Nanopartikel finden sich auch «als natürliche Kolloide (kleine Molekülhaufen) (…) in zahllosen Lebensmitteln, etwa Kasein (100 nm) und Molkenprotein (3 nm) in der Milch» (TA Swiss 2006:2).

[30] Zu den entsprechenden nanohaltigen Produkten gehören etwa desinfizierende oder geruchsneutralisierende Raumsprays, Farben, Lacke, Imprägniersprays für Kleidung oder für poröse Materialien wie Holz oder Ton. Nanopartikel entstehen bereits bei der Herstellung solcher Sprays (und nicht erst bei ihrer Anwendung). «Besonders bei Sprühverfahren, die für Beschichtungen eingesetzt werden, können grössere Mengen an Partikelstaub freigesetzt werden» (Swiss Re 2004:15).

von Halbleiterstrukturen, die letztlich die Basis der gesamten Elektronikindustrie darstellen, verwendet. Die mit Top-down-Techniken erzeugten nanoskaligen Strukturen (wie z.B. Nanopartikel) können zudem «entweder gezielt wieder zu grösseren Strukturen zusammengefügt oder anderen Materialien beigemischt» werden (Swiss Re 2004:9).[31] Das Hauptproblem dieses Ansatzes ist die Produktion von immer kleineren Strukturen mit der erforderlichen Genauigkeit.

Bottom up bedeutet die kontrollierte Zusammenfügung von Atomen und Molekülen. Das bekannteste und für die Nanotechnologie bedeutsamste Bottom-up-Organisationsprinzip ist die so genannte Selbstorganisation:

«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» (BMBF 2002:7).

Die Natur nutzt den Bottom-up-Ansatz aber auch zum Aufbau von komplexen biologischen Nanostrukturen wie z.B. die für den Transport in der Zelle wichtigen Mikrotubulin, die sich aus Tausenden einzelner Tubulinmoleküle bilden. Allgemein kann man sagen, dass alle natürlichen Wachstumsprozesse Prozesse der Selbstorganisation sind. Das erklärt, warum das «zunehmende Verständnis biologischer Prinzipien und Baupläne und deren Anwendung in technologischen Umgebungen (…) der Nanotechnologie zugute» kommt (Paschen et al. 2004:31f.).

Eine weitere Technik ist die so genannte «Positional Assembly». Sie ist das idealtypische Bottom-up-Verfahren, erlaubt

[31] Dieser Prozess, so heisst es weiter im Bericht der Swiss Re, «ist energieaufwändig, produziert viel Abfall und verschwendet daher Ressourcen. Allerdings können die hergestellten Materialien dank verbesserter Eigenschaften von grossem Nutzen sein» (Swiss Re 2004:9).

sie es doch, einzelne Atome und Moleküle kontrolliert zu manipulieren und zu positionieren und auf diese Weise makroskopische Gegenstände zu produzieren – ganz im Sinne von Drexlers Vision der Herstellung von Nanoassemblern, die dann vielfältige Produkte erzeugen. Mit Hilfe der Rastersonden-Techniken kann man sehr kleine Flächen bearbeiten, allerdings sind diese Techniken vorläufig noch viel zu ineffizient für Anwendungen. Deshalb versucht man heute vor allem das Prinzip der Selbstorganisation praktisch zu nutzen.

Viele Beobachter sind der Meinung, dass die Nanotechnologie(n) drei weitere Merkmale aufweist: Sie sei ein interdisziplinäres Unternehmen (4); eine ermöglichende («enabling») Technologie (5); und eine disruptive Technologie (6). Die ersten beiden Merkmale sind weitgehend unbestritten. Ob Nanotechnologie eine disruptive Technologie ist, ist dagegen strittig. Wie die Beurteilung ausfällt, hängt dabei nicht zuletzt davon ab, was man unter «disruptiv» versteht.

Ad 4. Nanotechnologie(n) als interdisziplinäres Unterfangen:

«Die Nanotechnologie erfordert einen hohen Grad an interdisziplinärer (…) Kooperation (…). Dies liegt zum einen darin begründet, dass auf der Nanoebene Begriffswelten der Physik, Chemie und Biologie miteinander ‹verschmieren›, zum anderen darin, dass die Methoden einer einzelnen Disziplin durch Verfahren und Fachkenntnisse aus den anderen Fachrichtungen ergänzt werden können oder müssen» (Paschen et al. 2004:2).

Man bezeichnet die Nanotechnologie daher auch als Querschnittstechnologie:

«Um nanoskalige Objekte zu untersuchen, werden beispielsweise hauptsächlich physikalische Verfahren verwendet. Auch die Miniaturisierung und Strukturierung nutzt Techniken, die auf physikalischen Prinzipien basieren. Die Herstellung nanoskaliger Partikel hingegen ist in erster Linie eine Domäne der Chemie. Biologische Nano-Objekte wie Proteine, Enzyme oder Viren entstehen durch Selbstorganisation nach Bauplänen der Natur, in der ein Grossteil der grundlegenden Prozesse wie z.B. die Photosynthese auf der Nanoskala bzw. auf molekularer Ebene abläuft. (…) In der Nanotechnologie werden (…) die klassischen Disziplinen Chemie, Physik und Biologie nicht mehr getrennt zu wissenschaftlichen Erkenntnissen gelangen, sondern durch transdisziplinäre Forschungsarbeit gemeinsam die Potenziale physikalischer Gesetzmässigkeiten, chemischer Stoffeigenschaften und biologischer Prinzipien erschliessen.» (Paschen et al. 2004:34)

Ad 5. Nanotechnologie(n) als ermöglichende Technologie(n): Als «enabling technologies» werden Technologien bezeichnet, die in Zusammenarbeit mit anderen Technologien Anwendungen ermöglichen, die vorher nicht möglich waren, auch wenn man schon lange davon geträumt hatte. «Entscheidende Weiterentwicklungen bereits bekannter Produkte und Verfahren werden durch den Einsatz von Nanotechnologie ermöglicht, auch wenn man dem Produkt nicht in allen Fällen auf den ersten Blick «ansieht», dass es sich dem Einsatz von Nanotechnologie verdankt» (Baumgartner 2004:39f.). Das gilt beispielsweise für den Bereich der Computertechnologie genau so wie etwa für den medizinischen Bereich der Implantate und Prothesen (s.u. S.34f. und S.51f.)

Ad 6. Nanotechnologie(n) als disruptive Technologie(n): Disruptiv werden gemäss Johann Ach und Norbert Jömann solche Technologien genannt, «die das Potenzial haben, alte Technologien abzulösen und neue Produkte oder Produktionsweisen an ihre Stelle zu setzen» (Ach/Jömann 2005:188). Gemäss Alexander Arnall ist dagegen nicht das Potential ausschlaggebend, sondern die tatsächliche Fähigkeit einer Technologie, ältere Technologien zu ersetzen und radikal neue Produkte herzustellen (vgl. Arnall 2003:10). Geht man vom Potenzial aus, ist die Nanotechnologie zweifellos disruptiv. Geht man dagegen von ihrem tatsächlichen jetzigen Leistungsvermögen aus, ist dies nicht der Fall. Vielmehr hat sie momentan eher einen inkrementellen und evolutionären Charakter. Inkrementell ist sie insofern, als sie die Eigenschaften von Werkstoffen zu verbessern sucht, indem sie deren Struktur auf dem Nanolevel kontrolliert. Beispiel hierfür sind kratzfeste oder wasserabweisende Beschichtungen. Evolutionär ist sie insofern, als sie existierende Technologien durch Verkleinerung auf

Nanoformat zu optimieren sucht. Beispiel hierfür ist die Computertechnologie. Disruptiv wäre sie etwa, wenn es ihr gelänge, durch neuartige Biochip-Systeme die Diagnostik zu revolutionieren.[32]

Diese Beispiele machen im Übrigen deutlich, dass eine Beurteilung der Nanotechnologie leicht in die Irre führt, wenn man sie als eine homogene Technologie versteht. Nanotechnologie ist ein heterogenes Gebilde, weshalb es angemessener ist, von Nanotechnologien im Plural zu sprechen, und deren inkrementellen, evolutionären oder disruptiv-revolutionären Charakter von Fall zu Fall zu beurteilen.

[32] So auch Luther et al. 2004:15: «Im Produktbereich vollzieht sich derzeit (…) eher eine evolutionäre als eine revolutionäre Entwicklung. (…) Revolutionär veränderte Marktbereiche wird es eher in der Zukunft geben, beispielsweise im Pharma- und Medizinbereich oder (…) in der Beleuchtungstechnik».

4. Einige (mögliche) Anwendungen

Ziel der Nanotechnologie ist die Herstellung von nanobasierten Produkten mit Hilfe der beschriebenen Verfahren und Techniken. Einige dieser Produkte aus dem Bereich Nanomaterialien, Kosmetik und Computertechnologie sollen im Folgenden kurz beschrieben werden. Dabei wird keinerlei Vollständigkeit angestrebt. Es geht vielmehr nur darum, durch einige illustrative Beispiele das realistische Potential der Nanotechnologie zu verdeutlichen. Produkte aus dem Bereich der Nanobiotechnologie werden ausgeklammert, da diese noch gesondert diskutiert werden (vgl. Kap. 5.2 und 5.3).

Nanomaterialien:

- Ultradünne Beschichtungen von Oberflächen, die eine selbstreinigende Wirkung haben. Dabei macht man sich den so genannten Lotuseffekt, ein natürliches Anti-Haft-System, zunutze. Wie funktioniert dieser Effekt? Nanoskalige Erhebungen auf den Blättern des Lotos machen die Oberfläche rau und sorgen für eine Minimierung der Kontaktflächen. Diese Nanostruktur lässt Wasser abperlen, dabei wird der Schmutz mitgerissen. Auf gleiche Weise kann man Fenster herstellen, die nicht mehr geputzt werden müssen, oder Textilien, die Wasser und Schmutz abweisen. (Bereits erhältlich)
- Aerogel-Fensterscheiben: Mit nanoporigem Schaum[33] aus glasartigem Material gefüllte Doppelscheiben geben gutes Fensterglas mit hervorragenden Wärmedämmwerten ab. (Bereits erhältlich)

[33] «Weil solche Schäume fast nur aus Luft bestehen, nennt man sie Aerogele» (BMBF 2004:19).

Kosmetik:

- Transparente Sonnenschutzmittel, die nanoskaliges Titandioxid zum Schutz vor UV-Strahlung enthalten: «Mineralische UV-Filter aus Titandioxid werden im Gegensatz zu organischen UV-Absorbern nicht von der Haut aufgenommen und zeichnen sich durch besonders gute Hautverträglichkeit und hervorragende Stabilität aus. Je kleiner die Partikel in der Mischung, desto dichter bedecken sie die Haut und schützen vor der Sonne. Wegen der Nanoskaligkeit der Partikel ist die Schutzschicht im sichtbaren Bereich transparent» (Paschen et al. 2004:154). (Bereits erhältlich)
- Liposomen in Wasser, so genannte Emulsionen, können als Nanopartikel bezeichnet werden. Sie bestehen aus Lipidmolekülen, die durch Selbstorganisation Membranen von einigen Nanometer Dicke bilden. Solche Liposomen können massgeschneidert werden mit Durchmessern von 50 bis 1000 nm und auch Wirksubstanzen enthalten, z.B. Vitamine. Der Vorteil solcher Nano-Container ist, dass sie durch die Haut besser aufgenommen werden und eine langsame Abgabe der eingeschlossenen Wirkstoffe in das Gewebe ermöglichen.[34]

Computertechnologie:

- Um dem so genannten Moore'schen Gesetz[35] – demzufolge sich die Anzahl Transistoren pro Prozessor alle 18–24 Monate verdoppelt – Genüge zu tun, muss sich die Chip-Produktion immer tiefer in die Nanowelt hineinbegeben. Gegenwärtig läuft die konkurrenzfähige Herstellung der Chips für den Weltmarkt mit Strukturen zwischen 130 und 90 nm. In Vorbereitung für die Massenfertigung befindet sich die 65 nm Technik. Man will aber noch weiter gehen, nämlich zuerst auf 45 nm, dann auf 32 nm und schliesslich, sofern dies mit der Technik der adaptierten optischen Lithographie noch möglich ist[36] – was, anders als ursprünglich gedacht, der Fall zu sein scheint –, auf 22 nm. Ziel 2010: eine Milliarde Transistoren in einem Chip.
- Zudem werden neue Speichertechnologien auf nanotechnischer Basis entwickelt, etwa der «Millipede» von IBM.[37] «Auf der Fläche einer Briefmarke sollen (…) 25 DVDs [oder 25 Millionen gedruckte Buchseiten, A.B.] gespeichert werden können, also über 100 Gigabyte» (Swiss Re 2004:39). Neben der hohen Speicherdichte sollen sich nanotechnologische Speicher auch durch extreme Schnelligkeit auszeichnen. Zudem sollen die Daten ohne Stromversorgung erhalten bleiben, und eine lange Lebensdauer soll gewährleistet sein.
- Noch in den ersten Anfängen befindet sich das Quanten-Computing. Mit Quantencomputern liessen sich Datenverarbeitungsfunktionen auf molekularer Ebene realisieren, wozu quantenphysikalische Effekte genutzt würden:

  «Die fundamentalen Informationseinheiten des Quantencomputers – die so genannten Quantum Bits oder Qubits – vermögen nicht nur in zwei Zuständen wie ein klassisches Bit, sondern auch in einer Überlagerung (Superposition) dieser beiden Zustände zu existieren. Dass ein Qubit in der Lage ist, die Zustände «0» und «1» gleichzeitig einzunehmen, gehört zu den Eigentümlichkeiten der Quantenwelt» (Paschen et al. 2004:189).

  In diesem Zusammenhang spricht man auch von «Quantenparallelismus». Dieser «eröffnet die Möglichkeit einer massiv parallelen Informationsverarbeitung durch einen Quantencomputer» (Paschen 2004:190).

[34] «Darüber hinaus werden Nanopartikel aus verschiedenen Metalloxiden zur Verbesserung des Hautgefühls, als Faltenaufheller und für Effektpigmente eingesetzt. Die Partikel halten Wirkstoffe länger bioaktiv und können die biologischen Barrieren der Haut teilweise durchdringen. In den letzten Jahren sind zu diesem Zweck bereits eine Reihe von Nanoemulsionen entwickelt worden, die weniger Zusatz- und Konservierungsstoffe enthalten und damit hautverträglicher sind» (Paschen et al. 2004:106).

[35] Nach Gordon E. Moore, Mitbegründer der Firma Intel.

[36] «Die optische Lithographie ist ein bewährtes Verfahren, um elektronische Schaltkreise aus Abermillionen von Transistoren auf einen Mikrochip zu «drucken». Man projiziert dazu Laserlicht durch eine Maske und ein Linsensystem hindurch auf einen Chip, der mit einem lichtempfindlichen Lack beschichtet ist. Durch Wegätzen der vom Licht getroffenen Bereiche und weitere Verfahrensschritte wird das Muster der Maske auf den Chip übertragen» (NZZ 2006).

[37] «Bei dem unter dem Namen «Millipede» (Tausendfüssler) bekannt gewordenen Verfahren werden mit Tausenden von feinsten Spitzen winzige Vertiefungen, die einzelne Bits repräsentieren, in einen dünnen Film aus Kunststoff geprägt» (Paschen et al. 2004:177).

5. Nanobiotechnologie

Die Nanobiotechnologie verbindet die Forschung an biologischen und nicht-biologischen Systemen auf der Nanoskala und hat deren Nutzung in verschiedenen Bereichen zum Ziel.[38] Dabei strebt sie zum einen danach, biologische Nanoobjekte in technische Systeme zu integrieren; zum anderen arbeitet sie darauf hin, nanotechnologische Verfahren und Materialien im Bereich der Lebenswissenschaften zum Einsatz zu bringen.

Ob man beim gegenwärtigen Entwicklungsstand bereits von Nanobiotechnologie sprechen kann, ist allerdings strittig. Hans-Joachim Güntherodt, Leiter des Nationalen Forschungsschwerpunkts «Nanowissenschaften», etwa meint in einem 2005 veröffentlichten Interview, dazu sei es noch zu früh. Treffender sei der Begriff Nano(bio)wissenschaft. Denn erst «wenn eine Wissenschaft zu technologischen Anwendungen führt, ist es eine Technologie» – und das sei bei der Nanobiotechnologie noch nicht der Fall (vgl. Gen-Dialog 2005).

Wie dem auch sei – Tatsache ist, dass sich in der wissenschaftlichen wie auch in der öffentlichen Debatte der Begriff Nanobiotechnologie etabliert hat, weshalb er im Folgenden verwendet werden soll und nicht Nanobiowissenschaft. Dabei muss man sich aber stets bewusst sein, dass diese Technologie – bei der es sich wiederum um eine Mehrzahl von zum Teil sehr unterschiedlichen Technologien handelt – in der Tat noch ganz am Anfang steht und, von wenigen Ausnahmen abgesehen, noch keine Anwendungen in industriellen Produkten hervorgebracht hat.

[38] In diese Richtung geht auch die Definition der Royal Society: «Bio-nanotechnology is concerned with molecular-scale properties and applications of biological nanostructures and as such it sits at the interface between the chemical, biological and the physical sciences. It does not concern the large-scale production of biological material such as proteins or the specific genetic modification of plants, organisms or animals to give enhanced properties» (RSRAE 2004:20).

5.1 Die zwei Bereiche der Nanobiotechnologie: Nano2Bio und Bio2Nano

Es hat sich eingebürgert, die Nanobiotechnologie nach Anwendungsbereichen zu strukturieren. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Bereichen bzw. Transferrichtungen. Sie werden als «Nano2Bio» (lies: Nano to Bio) und «Bio2Nano» bezeichnet.

Nano2Bio: Der Bereich «Nano2Bio» umfasst (mögliche) Anwendungen nanotechnologischer Entwicklungen in den Life Sciences. Zu den Life Sciences zählen dabei nicht nur Biologie, Human- und Veterinärmedizin sowie die entsprechenden anwendungsorientierten Disziplinen wie Medizintechnik und Biotechnologie, sondern auch Pharmazie, Ernährungs-, Agrar-, Forst- und Umweltwissenschaften. Ziel ist es, nanotechnologische Verfahren und Materialien für die Steuerung und Behandlung biologischer Systeme nutzbar zu machen.

Bio2Nano: Im Bereich «Bio2Nano» geht es, umgekehrt, um die Nutzung bio(techno)logischer Materialien und Baupläne zum Zweck der Herstellung technischer Nanosysteme.[39] Die Wirkungsprinzipien der Biologie sollen auf nanotechnologische Verfahren übertragen und nanobiologische Objekte wie etwa molekulare Motoren für die Technik nutzbar gemacht werden.

Um sich eine konkretere Vorstellung von diesen beiden Bereichen der Nanobiotechnologie machen zu können, ist es sinnvoll, sie an ausgewählten Beispielen zu illustrieren.

[39] Insofern ist das «Bio» in Nanobiotechnologie in einem ähnlichen Sinn zu verstehen wie das «Bio» in Biotechnologie – zumindest wenn Biotechnologie die Lehre der Methoden bezeichnet, mit denen lebende Materie für technische Zwecke verwendet wird (vgl. Broschüre «Streitfall Biotech-Patente», Bern 2004, S.48).

Zunächst einige (mögliche) Anwendungen aus dem Bereich «Bio2Nano»:

- Biomineralisation. Unter Biomineralisation versteht man das biologisch kontrollierte Kristallwachstum, das zur Bildung von Knochen und Zähnen, aber auch von nanostrukturierten natürlichen Materialien wie etwa Muschel- oder Schneckenschalen führt. Diese Materialien haben erstaunliche Eigenschaften, insbesondere sind sie besonders bruchzäh und hart. Man versucht, die zugrunde liegenden Prinzipien technisch nutzbar zu machen, etwa für die Produktion von neuen nanostrukturierten Kompositmaterialien. Zur Herstellung von neuartigen Kompositmaterialien könnten auch Viren-Partikel als Nano-Bausteine verwendet werden. Wie bei der Biomineralisation geht es hier um die technische Nutzung von bestimmten natürlichen Selbstorganisationsprozessen.[40]
- Biomoleküle für fälschungssichere Dokumente. Dazu wird der biologische Farbstoff Bakteriorhodopsin verwendet, ein aus Bakterien gewonnenes Biomolekül, das unter Licht seine Farbe von Violett nach Gelb ändert. Chemisch verändert und als Nanopartikel verpackt wird das Biomolekül als optisches Sicherungselement erprobt.
- DNA-Computing (nanobasierte Bioelektronik). Das DNA-Computing hat mit herkömmlichen Elektronik-Architekturen nichts mehr gemeinsam. Die Idee – und mehr ist es gegenwärtig noch nicht – besteht darin, Datenverarbeitungsfunktionen auf molekularer Ebene zu realisieren. Das DNA-Computing ist der Nanobiotechnologie zuzuordnen, weil synthetische DNA-Moleküle bzw. deren Speichereigenschaften als digitale Speicher von Computerdaten benutzt werden sollen. Funktionelle Biomoleküle, etwa Nanodrähte aus biologischen DNA-Molekülen, könnten dabei als elektronische Bauelemente eingesetzt werden.
- Biomimetik. Die Biomimetik «befasst sich mit dem Verständnis biologischer Funktionsmechanismen und der technischen Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse. Biomimetik fördert den Aufbau von Nanostrukturen nach dem Bottom-up-Ansatz – im Gegensatz zum in der Nanotechnologie vorherrschenden Top-down-Ansatz» (Paschen et al. 2004:231). Nanostrukturen nach dem Vorbild der Natur herstellen, ist eine der wesentlichen Zielsetzungen von «Bio2Nano». Hier einige Beispiele:
  - «Viren (…) sind unter anderem deshalb in der Lage, ihr Erbgut effizient in Wirtszellen einzuschleusen, weil virale Hüllproteine differenziert auf unterschiedliche Umgebungseigenschaften an der Zelloberfläche und innerhalb der Zelle reagieren. Diese Eigenschaften sollen mit nanobiomimetischen DNA-Vektoren auch für die Gentechnologie und Gentherapie verfügbar gemacht werden» (Paschen et al. 2004:231).
  - Nanobasierte biomimetische Membranen. Nanoskopische Untersuchungen haben ergeben, dass die Zellhüllenmembran von Bakterien eine regelmässige nanoporöse Struktur besitzt, die den Stoffaustausch mit der Umwelt und zugleich die Abschirmung gegen die Umwelt ermöglicht. Diese so genannten bakteriellen S-Schichten könnten in Zukunft in Form von nanobasierten Biomembranen als spezielle Filtersysteme zur Produktereinigung bei der Medikamentenherstellung oder zur Trinkwasseraufbereitung eingesetzt werden.
  - Biomimetische Energieerzeugung. Das Prinzip der natürlichen Photosynthese soll zum Zweck der Energieerzeugung in künstliche Systeme umgesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die biomimetische Photovoltaik (so genannte Grätzel-Zelle, auch als biomimetische Solarzelle oder Bio-Solarzelle bezeichnet[41]): Dabei handelt es sich um Nano-Solarzellen, die auf einer Art künstlicher Photosynthese basieren und im Wesentlichen mit TiO_2-Nanopartikeln arbeiten. (Solche Zellen gibt es bereits seit mehreren Jahren.)
  - Biomimetisch sind auch Versuche, biologische Haftsysteme, die auf Nanoeffekten beruhen, nachzuahmen, etwa die Hafthärchen von Geckos.[42]

[40] Daneben gibt es Experimente, deren Seriosität aus Sicht eines Nicht-Experten nur schwer zu beurteilen ist. Beispielsweise soll es Proteine geben, mit denen man Nanoröhren füllt, welche man etwa in die Flügel von Flugzeugen einbaut. Wenn der Flügel beschädigt wird und die Nanoröhren aufbrechen, werden die Proteine freigesetzt. Diese wirken wie ein Leim und beheben den Schaden (vgl. ETC Group 2003:31).

[41] Die Bezeichnung als Bio-Solarzelle ist allerdings irreführend. Die Grätzelzelle enthält nämlich keinerlei biologische Komponenten.

[42] «An den Füssen von Geckos ermöglicht eine Vielzahl extrem feiner Härchen, dass sich der Fuss auf wenige Nanometer an die Unterlage anschmiegt. Bei solch geringer ▸

– Biomolekulare Motoren und Maschinen. «Biologische Motoren sind hochspezialisierte Protein-Maschinen von wenigen nm Grösse, die auf ihre speziellen Aufgaben hin optimiert sind, z.B. als Schalter, Pumpen oder für den Transport» (Wevers/Wechsler 2002:51). Eine mögliche Anwendung von biologische Motoren nachahmenden künstlichen Motoren könnte der gerichtete Transport winzigster Substanzmengen in so genannten «Lab-on-a-Chip»-Systemen – Labors im Miniaturformat – sein (s.u. S.47). «Auch wenn artifizielle Nanomaschinen noch reine Grundlagenforschung sind, gelingt die gezielte Herstellung künstlicher Motoren (…) über chemische Synthese zunehmend besser. Mehrere Arbeitsgruppen weltweit konnten zeigen, dass sich biologische Motoren, wie z.B. ATPase, künstlich modifizieren und sich deren Eigenschaften so gezielt einstellen lassen. Dieser Bereich der Grundlagenforschung ist also heute schon Realität. Alle weiteren Schritte sind bislang aber noch weitgehend ungeklärt» (Paschen et al. 2004:305).

In diesem Kontext wird häufig ein Zusammenhang zwischen Nanobiotechnologie und synthetischer Biologie hergestellt. Die synthetische Biologie ist ein relativ neues Forschungsgebiet, in dem es um die Erforschung von «minimalem Leben» und die Erzeugung von lebenden Maschinen geht, die so programmiert sind, dass sie spezifische Aufgaben optimal erfüllen.[43] Solche Maschinen werden auch nanoskalige biologische und nicht-biologische Bestandteile enthalten. So wollen etwa Wissenschaftler der Universität Berkley einen so genannten «Biobot» konstruieren, einen autonomen Roboter zur Entdeckung und Beseitigung von gefährlichen Chemikalien, der die Grösse eines Virus oder einer Zelle hat und der aus biologischen und artifiziellen Teilen besteht. Dieser Roboter soll mit molekularen Motoren und spezifischen Nanosensoren ausgestattet werden. Zu seiner Konstruktion würde es der Rastersonden-Technik, etwa des Kraftmikroskops, bedürfen.[44]

Die biomimetischen Aspekte sowie die Integration von biologischen und artifiziellen Bestandteilen auf der Nanoebene rechtfertigen es, den Biobot und ähnliche Konstrukte – bei denen es sich weitgehend noch um Zukunftsmusik handelt – der Nanobiotechnologie zuzuordnen. Sofern dabei auch synthetische DNA eine Rolle spielt, kann man sagen, dass dies letztlich auf eine Integration der Gen-, Bio- und Nanotechnologie hinausläuft.[45]

Auf ein Beispiel einer (offenbar) gelungenen Verbindung von Nano- und Biotechnologie sei abschliessend noch hingewiesen. Es handelt sich hierbei um winzige Roboter (weniger als einen Millimeter gross), die sich durch lebende Muskeln selbst – ohne externe Energiequelle – bewegen können. Dazu lässt man Herzzellen von Ratten auf mikroskopischen Silikonchips wachsen. Die Chips bilden zusammen mit winzigen «Knochen» aus Plastik oder Silikon

Distanz wirken anziehende Kräfte zwischen den Molekülen der Haare und der Unterlage, was dem Gecko ein problemloses Spazieren kopfüber an der Zimmerdecke erlaubt» (TA Swiss 2006:1).

[43] Mit der im November 2002 erfolgten Ankündigung des Nobelpreisträgers Craig Venter, er werde das im Humangenomprojekt gespeicherte Wissen für die Konstruktion minimaler Zellen einsetzen, wurde das Startsignal für diese Entwicklung gesetzt. Venters Ziel ist die Herstellung von synthetischen Organismen (künstlichen Zellen), die umweltfreundliche Energie (etwa Wasserstoff) produzieren und auf diese Weise den Klimawandel mildern können.

[44] Ob so etwas überhaupt machbar ist, ist allerdings strittig.

[45] Synthetische DNA (synthetisierte Nukleotide) und synthetische Gene gibt es schon seit längerem. Sie wird heute routinemässig in grossem Umfang weltweit verwendet. Inzwischen kann man das Genom von gewissen einfachen Lebewesen synthetisieren (etwa die 7'440 Buchstaben des Poliovirus) und diese damit gleichsam von Grund auf rekonstruieren. (Zudem ist es Wissenschaftlern in Florida auch gelungen, artifizielle Nukleotide zu schaffen – zusätzlich zu den vier chemischen Komponenten, aus denen die «natürliche» DNA besteht – und diese dazu zu bringen, Kopien von sich herzustellen.) Venters Team etwa modifiziert die DNA eines genetisch sehr simplen Bakteriums, mit dem Ziel, die DNA auf die Gene zu reduzieren, die für das Überleben nötig sind. Diese minimierte DNA soll dann in eine normale Bakterienzelle eingefügt werden, aus der man die natürliche DNA vorher entfernt hat. Das ist der «Top-down»-Ansatz: «Aus dem Erbgut primitiver Bakterien werden immer mehr Gene herausamputiert, bis nur noch jene übrig sind, die für das Überleben und die Fortpflanzung in der Petrischale oder im Bioreaktor absolut notwendig sind. Die werden dann neu zusammengebaut – so, dass eine neue, «künstliche» Zelle auch mit den Genen umgehen, die gespeicherten Informationen abrufen und umsetzen könnte» (Kröher 2005). Daneben gibt es aber auch einen «Bottom-up»-Ansatz: Aus «toten Chemikalien» sollen programmierbare künstliche Zellen etwa zur Krebserkennung und Krebsbekämpfung hergestellt werden.

gleichsam das Skelett des Roboters. Dieses bewegt sich fort, wenn die darauf angebrachten Rattenzellen kontrahieren. Wie erreicht man, dass die Zellen funktionsfähige Muskeln bilden? Hier kommt die Nanotechnologie ins Spiel:

«(…) by nanoscale manipulation of the surface chemistry, the muscle cells get the cues to say, ‹Oh! I want to attach at this point and not attach at another point›. And so the cells assemble, then they undergo a change, so that they actually form a muscle» (Pease 2005).

Solche Roboter mit künstlichem Muskelgewebe könnte man dazu verwenden, Computer-Chips anzutreiben. Ihr Erfinder, Prof. Carlo Montemagno von der Universität von Kalifornien, Los Angeles, beschreibt sie als «absolutely alive (…). I mean the cells actually grow, multiply and assemble – they form the structure themselves. So the device is alive» (Pease 2005).

Betrachten wir als nächstes einige Beispiele aus der Transferrichtung «Nano2Bio». Wir beschränken uns dabei auf drei Bereiche, die besonders wichtig sind: Humanmedizin, Landwirtschaft und Ernährung.

5.2 Nanomedizin

Der dem Umfeld von Drexlers foresight-Institut zuzurechnende Robert A. Freitas definiert Nanomedizin folgendermassen. Nanomedizin ist:

«(1) the comprehensive monitoring, control, construction, repair, defense, and improvement of all human biological systems, working from the molecular level, using engineered nanodevices and nanostructures; (2) the science and technology of diagnosing, treating, and preventing disease and traumatic injury, of relieving pain, and of preserving and improving human health, using molecular tools and molecular knowledge of the human body; (3) the employment of molecular machine systems to address medical problems, using molecular knowledge to maintain and improve human health at the molecular scale» (Freitas zit. nach Gordijn 2004:196).

Zentral für die «seriöse» Nanomedizin ist Punkt zwei, wogegen Punkt eins (und zum Teil auch Punkt drei), insbesondere die mit «engineered nanodevices» wohl gemeinten nanobots, die durch die Blutbahnen kreisen, um defekte Zellen zu reparieren oder zu vernichten, eher in den Bereich der Science Fiction gehört.[46]

Überblicksmässig lässt sich die Nanomedizin in folgende vier Bereiche gliedern:[47]

1. Nanoanalytik: Rastersondentechniken
2. Diagnostik: Molekulare Bildgebung, Biochip- und «Lab-on-a-Chip»-Systeme, Nanosensoren
3. Therapeutik: Magnetflüssigkeitshyperthermie, Drug Delivery, biokompatible Implantate, Tissue Engineering, (Neuro-)Prothetik
4. Medikamentenentwicklung

Allgemein ist zu sagen, dass auch die Nanomedizin noch am Anfang steht. Zwar befinden sich einige therapeutische Ansätze in der klinischen Phase, und auch gewisse diagnostische Instrumente sind bereits über die Reissbrett-Phase hinaus. Dennoch wird es noch lange dauern, bis einige der medizinischen Anwendungen der Nanobiotechnologie verwirklicht werden können.

Ad 1. Die analytischen Werkzeuge der Nanotechnologie, insbesondere die auf dem Rastertunnel- und dem Kraftmikroskop basierenden Rastersonden-Techniken sind für die biomedizinische (Grundlagen-)Forschung besonders bedeutsam. Sie erlauben eine Untersuchung von biologischen Objekten auf der Nanoskala:

---

[46] Von Freitas stammt auch die Idee einer nanobasierten Neukonstruktion der Körperzellen, die so gegen alle bekannten Krankheitserreger immunisiert werden sollen, womit das herkömmliche Immunsystem entbehrlich würde. Der Science Fiction zuzuordnen ist auch das so genannte *uploading*, d.h. die Übertragung des Inhalts des menschlichen Geists auf einen Computer: «Mit Hilfe entsprechend spezialisierter Nanomaschinen liesse sich beispielsweise das Gehirn in ausreichender Auflösung scannen und Atom für Atom demontieren. Anschliessend könnten die neuronalen Netzwerke des Gehirns auf einem elektronischen Medium implementiert werden» (Godijn 2004:207).

[47] Vgl. hierzu Wagner/Wechsler 2004:165ff.

«Da die funktionellen Einheiten der Zelle, wie DNA, Proteine, Membranen und Reaktionszentren, in dieser Grössenordnung liegen, werden von der Nanobiotechnologie entscheidende Beiträge zur Aufklärung der Funktionsweise der Zelle erwartet. Die Kenntnis der Zellfunktionen auf molekularer Ebene wiederum ist eine Voraussetzung, um Krankheiten zu verstehen und neue Heilverfahren zu entwickeln» (Wagner/Wechsler 2004:1).

Ad 2. Das langfristige Ziel der nanotechnologischen Diagnostik ist die möglichst frühzeitige, idealerweise präsymptomatische Identifikation von Krankheiten, die schon in dieser Phase eine gezielte therapeutische Intervention ermöglicht.[48] In einigen wenigen Fällen ist dies bereits heute ansatzweise möglich.[49] Ein Beispiel ist die Arthrose:

«Derzeit analysieren Forscher mit Hilfe von so genannten Kraftmikroskopen die Kniegelenke von Arthrosepatienten. Zu ihrem Erstaunen hat sich gezeigt, dass bei diesen Patienten winzige Strukturen (Fibrillen) auf der Knorpeloberfläche alle in die gleiche Richtung zeigen. Bei gesunden Menschen sind diese Strukturen untereinander stärker verflochten. So könnte man in Zukunft sicher und rasch eine Arthrosediagnose stellen, bevor die Krankheit voll ausbricht» (Gen-Dialog 2005).

Das verbesserte Zusammenspiel von Diagnose und Therapie wird zu einer Verlängerung der krankheitsarmen Lebenszeit und vermutlich auch zu einer weiteren Zunahme der Lebenserwartung führen. Damit einhergehend wird es zu Verschiebungen in den Todesursachen kommen.

Kurz und mittelfristig wird tendenziell eher ein Auseinanderdriften der diagnostischen und der therapeutischen Möglichkeiten erwartet. Mittelfristig könnte es etwa durch Nanosensoren zwar möglich werden, «kleinste Veränderungen in biologischen Abläufen zu erkennen. Die mit der Frühphase der Demenzkrankheit Alzheimer verbundenen geringfügig erhöhten Eiweisskonzentrationen liessen sich mit solchen Mitteln nachweisen und die Krankheit in einem wesentlich früheren Stadium erkennen» (BMBF 2005:1). Das heisst aber, wie gerade das Beispiel Alzheimer deutlich macht, keineswegs, dass die Entwicklung neuer Therapien im Gleichschritt mit der Entwicklung neuer nanobasierter diagnostischer Instrumente vonstatten geht.

Eine Möglichkeit zur frühen Erkennung von Krankheiten ist die Molekulare Bildgebung. Bei der Molekularen Bildgebung werden Nanopartikel genutzt, «um Kontrastmittel mit Hilfe von molekularen Markern im kranken Gewebe anzureichern. Da die molekularen Signaturen vieler Krankheiten bereits vor Ausbruch der Symptome auftreten, können mit solchen Methoden Krankheiten bereits im Frühstadium diagnostiziert werden.[50] Dies geht einher mit einem Paradigmenschift in der Medizin, demzufolge sich ihr Fokus zunehmend von der Wiederherstellung auf die Erhaltung der Gesundheit verschieben wird» (Wagner/Wechsler 2004:165). Als Nanoteilchen kommen dabei insbesondere Quantenpunkte, Partikel von einigen wenigen Nanometer

[48] «Die Tendenz in der Medizin geht dahin, dass der Arzt mit weniger Blut eine exaktere und raschere Analyse in der Praxis durchführen kann. Ein Tropfen Blut sollte genügen für eine unmittelbare Diagnose – dahin geht die Reise» (Gen-Dialog 2005).

[49] In vivo Diagnostik mittels synthetischer Nanopartikel wird seit beinahe 20 Jahren praktiziert. Dazu werden Magnetit-Nanopartikel von 3 bis 200 nm Durchmesser, die mit einer Schutzschicht aus Polymeren versehen wurden, ins Blut appliziert. Innert wenigen Minuten werden diese Partikel durch Leberzellen und durch die Milz vollständig aufgenommen. Da die Leber das natürliche Speicherorgan für Eisen ist, kann angenommen werden, dass Magnetitpartikel, die aus Eisenoxid bestehen, dort ins natürliche Eisendepot gelangen. Der Zweck dieser Magnetit-Partikel ist, einen Kontrast in Magnetresonanz-Aufnahmen (magnetic resonance imaging, MRI) zu erzeugen. Gesundes Gewebe kann nämlich solche Partikel aufnehmen; weshalb in MRI-Bildern Läsionen, wo keine Partikel aufgenommen wurden, leicht identifiziert werden können. Solche Magnetpartikel werden auch mit einem Antikörper versehen, der an Tumorzellen bindet. Durch dieses so genannte Targeting erhofft man sich ein frühzeitiges Erkennen von Metastasen, wenn diese noch sehr klein sind, was die Therapieaussicht wesentlich verbessert. Bisher wurden noch keine akuten Nebenwirkungen bei dieser Diagnosemethode festgestellt (vgl. Tiefenauer 2006).

[50] «Das Prinzip der Molekularen Bildgebung beruht darauf, ein bildgebendes Molekül an ein Transportmolekül oder -partikel zu koppeln, das ausserdem über eine Zielfindungseinheit [etwa tumorerkennende Antikörper] verfügt (…). Das Zielfindungssystem ist dabei spezifisch für molekulare Marker einer bestimmten Krankheit und bewirkt die Anreicherung des Kontrastmittels im kranken Gewebe» (Wagner/Wechsler 2004:41).

Durchmesser, zum Einsatz, da diese in verschiedener Hinsicht – breitere Farbpalette, längere Leuchtkraft – den herkömmlichen fluoreszierenden Stoffen überlegen sind. Sie bedürfen allerdings einer geeigneten Umhüllung, denn sie bestehen im Kern meist aus giftigen Schwermetallverbindungen wie Cadmiumselenid.[51]

Ein wichtiges diagnostisches Werkzeug sind auch Biochips.[52] Biochips sind heute vor allem DNA-Chips.[53] Hierbei handelt es sich um kleine Probenträger, die krankheitsverursachende Gene identifizieren oder deren Sequenz bestimmen. Sie sollen zukünftig verstärkt in der Diagnostik genutzt werden, «z.B für die Früherkennung von Krankheiten oder um die Medikamentenverträglichkeit von Patienten zu untersuchen» (Wagner/Wechsler 2004:53).[54] Das Gros dieser Chips, wie sie heute in der

[51] «Die US-Firma Evident Technologies hat unlängst aber immerhin die ersten, nach eigenen Angaben nicht-toxischen Quantenpunkte auf den Markt gebracht, die ohne Cadmiumselenid auskommen» (Boeing 2005:38f.). Dennoch: «Bevor QDs [Quanten Dots, A.B] als Biomarker für *in vivo* Studien in Tierexperimenten und später gegebenenfalls auch in der medizinischen Diagnostik weite Verbreitung finden können, muss erst noch ihre toxikologische Unbedenklichkeit nachgewiesen werden» (Wagner/Wechsler 2004:48).

[52] Biochips bestehen aus einer grossen Anzahl von Biosensoren. Biosensoren sind Messfühler, die eine biologische Komponente wie DNA-Schnipsel, Enzyme oder ganze Zellen einsetzen, um gemäss dem «Schlüssel-Schloss»-Prinzip bestimmte Moleküle oder Substanzen zu erkennen und ihre Menge zu bestimmen.

[53] «Die häufigste Anwendung für DNA-Chips sind Genexpressionsstudien, in denen die Genaktivität zwischen gesundem und krankem Gewebe verglichen wird, um auf diesem Wege jene Gene zu bestimmen, die an einem bestimmten Krankheitsbild beteiligt sind» (Wagner/Wechsler 2004:56). Die Herstellung von Proteinchips erweist sich aufgrund der grösseren Komplexität der Proteine als wesentlich schwieriger als die Herstellung von DNA-Chips. «Von den vier verschiedenen Biochip-Typen, DNA-Chips, Proteinchips, Labs-on-a-Chip und Zellchips, haben in der biomedizinischen Forschung bislang nur die DNA-Chips breite Anwendung gefunden. Die Marktdurchdringung von Proteinchips und Labs-on-a-Chip wird mit einer Zeitverzögerung von etwa fünf Jahren erwartet» (Wagner/Wechsler 2004:98).

[54] Dabei soll mittel- bis langfristig ein Massenmarkt in der medizinischen Diagnostik erschlossen werden, «insbesondere, um teure und zeitaufwändige Laboruntersuchungen durch Schnelltests vor Ort beim praktizierenden Arzt oder in der Klinik zu ersetzen» (Wagner/Wechsler 2004:166).

biomedizinischen Forschung verwendet werden, wird nicht als Nanotechnologie klassifiziert. «Jedoch gibt es mittlerweile verschiedene Ansätze, um mit Hilfe von Nanotechnologie derzeitige Chip-Plattformen zu verbessern oder um bestimmte Funktionalitäten zu erweitern» (Wagner/Wechsler 2004:53). Bis sich diese Ansätze etablieren, werden aber noch Jahre vergehen, da die regulatorischen Hürden hoch sind und an die Verlässlichkeit der Chip-Systeme hohe Anforderungen gestellt werden.

Dabei wird die Nanobiotechnologie «in diesem Bereich nicht für die weitere Miniaturisierung eine Rolle spielen, sondern vielmehr für die Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit und der Zuverlässigkeit der Systeme» (Wagner/Wechsler 2004:166). Eine Möglichkeit hierzu sind sogenannte Cantilever-Sensoren. Winzige (nanoskalige) Biegebalken (cantilevers), die ursprünglich im Kraftmikroskop zum Einsatz kamen, kann man kammförmig anordnen und so zu einem Sensor zusammenfassen, der es erlaubt, die Anwesenheit verschiedener molekularer Strukturen in einer Probe festzustellen.[55] Vorteil dieser Methode ist 1) die hohe Empfindlichkeit des Sensors und 2) die grössere Schnelligkeit, mit der das Vorhandensein verschiedener genetischer Sequenzen (DNA- oder Proteinmoleküle) in einer Probe festgestellt werden kann.

Eine spezielle Art von nanobasierten Biochips sind so genannte «Lab-on-a-Chip»-Systeme. Hierbei handelt es sich um «(…) hoch komplexe Chips, die mit Mikromechanik, Mikrofluidik, Nanosensorik und -elektronik komplexe Untersuchungen an Zellen [sowie DNA und Proteinen, A.B.] vornehmen können, für die man heute noch ein Institut braucht» (BMBT 2004:48). «Lab-on-a-Chip-Systeme befinden sich momentan noch in der Entwicklung» (Paschen et al. 2004:97f.).[56]

[55] «Die Nanobiotechnologie bietet vielleicht eine noch empfindlichere Möglichkeit als die Genchips: die sogenannte Federbalken-Anordnung. Das sind winzige Strukturen, die aussehen wie ein Kamm. Auf den einzelnen Zähnen werden DNA-Moleküle befestigt, an die zum Beispiel Tumor-DNA andocken kann. Vereinigen sich die beiden Moleküle, so ändert die Biegung des Federbalkens – dies können die Forscher nachweisen. So könnte auf einem neuen Weg Tumor-DNA im Körper entdeckt werden» (GenDialog 2005).

[56] «Aufgrund der sehr breit gefächerten Anwendungsmöglichkeiten der Labs-on-a-Chip (LOCs) gibt es eine Vielzahl von Möglicheiten, mit Hilfe von Nanotechnologie ▸

Nanobasierte Biochips bzw. Nanosensoren könnten z.B. auch zur regelmässigen Überwachung der mütterlichen Blutwerte während der Schwangerschaft verwendet werden. Zudem könnten auf diese Weise chronisch Kranke permanent überwacht werden, «ohne durch diese Überwachung in ihrer Lebensqualität eingeschränkt zu sein» (Paschen et al. 2004:283). Sie gewännen damit mehr Sicherheit und Handlungsfreiheit.[57] Beispielsweise könnten implantierte Nanosensoren bei Diabetikern ein Signal an die Insulinpumpe senden, mehr Insulin freizusetzen. Dieses Verfahren könnte auch für andere Medikamente eingesetzt werden.

Nanoskalige Biochips und Biosensoren werden, sofern sie sich technisch verwirklichen und günstig produzieren lassen, langfristig eine wichtige Rolle spielen, da sie neben der Medizin auch in verschiedenen anderen Bereichen eingesetzt werden können: Zur Überwachung der Trinkwasserqualität ebenso wie zum Messen von Gebäudebelastungen, zum Nachweis von Umweltschadstoffen ebenso wie zur Kontrolle der Qualität von Nahrungsmitteln.[58]

diese Systeme mit neuen Funktionalitäten auszustatten, wie z.B. Oberflächenstrukturierungen, Detektionssysteme, Nanoporen (…)» (Wagner/Wechsler 2004:85). Nanoporen etwa sind Membranöffnungen, deren Durchmesser nur wenige Nanometer beträgt. Sie können zur Detektion von DNA oder Proteinen genutzt werden. So genannte molekulare Siebe – spezielle Siliziummembranen, die Millionen Poren mit einem sägezahnförmigen Profil enthalten – könnten für die Trennung empfindlicher biologischer Nano-Objekte, wie Viren oder Zellfragmente, auf kleinstem Raum eingesetzt werden (vgl. Wagner/Wechsler 2004:87).

[57] «Durch den breiten Einsatz von Nanosensoren gewinnen präventive Massnahmen gegenüber kurativen Massnahmen an Bedeutung. Die systematische Überwachung einer grossen Anzahl von Patienten erfordert eine entsprechende Informations- und Kommunikationsinfrastruktur. Die Entwicklung der Telemedizin würde voraussichtlich gefördert werden» (Paschen et al. 2004:283). Einsparungen durch stärkere Prävention und Früherkennung von Krankheiten stehen Mehrkosten durch das vermehrte Behandeln von Abweichungen vom «Normalzustand» gegenüber.

[58] Zwei weitere Anwendungsmöglichkeiten: 1) die Firma Nanomix Inc. «is engineering nanotube-based sensors to detect dangerous gas leakages in chemical plants and refineries» (ETC Group 2003:51). 2) Die so genannte «Nano-Nose». Nose steht dabei für Nanomechanical Olfactory Sensor, also ein nanomechanischer Geruchssensor. «Die einzelnen Federbalken sind bei «Nose» so beschichtet, dass die Gase, die man untersuchen möchte, am jeweiligen Federbalken hängen bleiben. «Nose» kann alle möglichen ▸

Ad 3. Nanobasierte Therapien eröffnen neue Therapiemöglichkeiten, die wirksamer sind als konventionelle Therapien und weniger Nebenwirkungen aufweisen. Gemäss einer Studie der TA Swiss sind Fortschritte vor allem bei Tumorerkrankungen und bei viralen Erkrankungen, aber auch allgemein bei medikamentösen Therapien zu erwarten (vgl. TA-Swiss 2003:86).

Die Magnetflüssigkeitshyperthermie ist eine neue Krebstherapie, die sich gegenwärtig im Stadium der klinischen Erprobung befindet. In dieser Therapie werden eisenhaltige Nanopartikel in den Tumor gespritzt und mit Hilfe eines Magnetwechselfeldes erhitzt. Die kranken Tumorzellen sterben auf diese Weise ab, das umliegende gesunde Gewebe wird dagegen nicht beschädigt.

Auch in der AIDS-Therapie werden inzwischen Nanopartikel eingesetzt. So sind Buckyballs in der Lage, den AIDS-Erreger partiell zu hemmen: «Solche Buckyballs können ein Enzym blockieren, das zur Vermehrung des Virus notwendig ist. Die Blockierung entsteht einfach dadurch, dass sich der Buckyball in der Andockstelle des Enzyms festsetzt und dort bleibt. Damit soll eine dauerhafte und irreversible Hemmung des Botenstoffs erreicht werden» (Swiss Re 2004:25).

Besonders intensiv geforscht und entwickelt wird momentan im Bereich Drug Delivery.[59] Dabei handelt es sich um eine neue, nanotechnologische Art der Medikamentenverabreichung, bei der Nanopartikel als Transportmittel für Wirkstoffe gebraucht werden. Die Wirkstoffe werden in Nanopartikel eingeschlossen – deshalb spricht man auch von Nanocontainern –, zielgenau an ihren «Einsatzort» gebracht[60] und dort kontrolliert freigesetzt.[61]

Stoffe nachweisen und voneinander unterscheiden: etwa einen «single malt whisky» von einem «blended scotch». Dabei reagiert das Gerät extrem empfindlich – nur wenige Moleküle reichen zur Detektion aus» (Gen-Dialog 2005).

[59] Auch im Deutschen hat sich der englische Fachbegriff «Drug Delivery» eingebürgert.

[60] «Die Nanoteilchen werden auf ihrer Aussenhülle mit speziellen Biomolekülen (z.B. Antikörpern) versehen, damit sie exakt dorthin gelangen, wo sie gebraucht werden» (Gen-Dialog 2005).

[61] Dieses so genannte Targeting ist ein altes Konzept, das in der Medizin bislang nur in wenigen Fällen erfolgreich realisiert werden konnte. Der Vorteil der Nanocontainer könnte darin bestehen, dass grössere Mengen von Wirksubstanzen transportiert und am Wirkungsort freigesetzt werden könnten.

Neben ihrer Transportfunktion haben die Nanopartikel insbesondere eine Schutzfunktion: Die Nano-Verkapselung der medikamentösen Wirkstoffe soll verhindern, dass die Wirkstoffe während ihres Weges durch den Körper durch Abbau und Zerfall ihre Wirksamkeit verlieren; zugleich soll sie auch die Auslösung einer Immunantwort verhindern. Die Nanopartikel «werden aufgrund ihrer Kleinheit vom Immunsystem des menschlichen Körpers nicht erkannt, migrieren unterhalb einer bestimmten Grösse durch Zellwände[62] und sind dazu in der Lage, die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden» (Baumgartner 2004:40).

Wann sich diese zielgerichtete und dosierte nanotechnologische Medikamentenabgabe etablieren wird, ist offen. Man scheint sich aber in Fachkreisen einig zu sein, dass dies noch Jahre dauern wird. Klar ist, dass der Bedarf an Drug Delivery-Systemen sehr hoch ist.[63] Ein Umsatz in Milliardenhöhe ist realistisch, wenn man berücksichtigt, dass der weltweite Markt für Medikamente etwa 400 Milliarden Dollar beträgt. Entsprechend viel wird denn auch in Forschung und Entwicklung investiert.[64]

Was diese nanobasierte Transporttechnologie zusätzlich interessant macht, ist, dass sie ähnlich wie Nanosensoren vielfältig anwendbar ist. Sie ist, wenn sie denn einmal funktioniert, keineswegs auf den Medikamententransport beschränkt, sondern kann auch für den Transport von Impfstoffen, Pestiziden, Zusatzstoffen in Lebensmitteln oder giftigen Substanzen in Biowaffen verwendet werden.

Im medizinischen Bereich überlegt man sich auch, diesen Ansatz für die somatische Gentherapie fruchtbar zu machen. Nanopartikuläre Transportsysteme könnten als Alternative zu viralen

[62] Dies ist experimentell nachgewiesen (vgl. TA-Swiss 2003:43).

[63] Was etwa im Bereich der Krebstherapien zusätzlich angestrebt wird, ist die Entwicklung von multifunktionalen Nanopartikeln, die zugleich als tumorsuchende Sensoren, bildgebende Kontrastmittel und als Toxine fungieren, die die Krebszellen abtöten. Dies bezeichnet man als Theranostik: Diagnose und Therapie erfolgen in einem Schritt.

[64] Für die Pharmaindustrie sind Drug Delivery-Systeme auch deshalb interessant, weil auf diese Weise nicht nur neue, sondern auch alte Wirkstoffe neu verwertet werden könnten, insbesondere solche, die die klinischen Tests beim ersten Mal nicht überstanden haben. Denn diese liessen sich zielgenau einsetzen, also ohne die Nebenwirkungen, deretwegen sie nicht zugelassen wurden.

Transportsystemen (Retroviren) zum Einsatz kommen. Das spezifische Problem hierbei ist, dass sich bei der Anwendung neuer Transportsysteme bislang unbekannte gesundheitliche Risiken nicht ausschliessen lassen.

Eine weitere therapeutische Anwendungsmöglichkeit der Nanobiotechnologie besteht darin, mit Hilfe nanostrukturierter körperähnlicher Oberflächenmaterialien biokompatible und biofunktionale Implantate[65] zu entwickeln, d.h. Implantate, die nicht abgestossen werden und daher eine längere Lebensdauer haben.[66]

Langfristig geht es nicht nur um die Ersetzung bestehender Implantate durch Nano-Modelle,[67] sondern auch um neue Formen der Implantation:

[65] «Ein Material wird als biokompatibel bezeichnet, wenn es biologisch verträglich ist, also weder toxische noch immunologische Reaktionen hervorruft» (Wagner/Wechsler 2004:117). Biofunktionale Materialien sind nicht nur biokompatibel, sondern «wechselwirken darüber hinaus aktiv mit biologischen Materialien, das heisst, sie haben beispielsweise einen aktiven Einfluss auf die Proteinexpression oder das Zellwachstum. Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung von nano-strukturierten Implantatmaterialien ist es, die Biokompatibilität zu optimieren und so weit wie möglich auch eine gewisse Biofunktionalität zu erreichen» (ebd.).

[66] Die Lebensdauer künstlicher Gelenkimplantate soll etwa durch die Verwendung von nanostrukturierten Oberflächenbeschichtungen von 10 bis 15 auf mehr als 40 Jahre verlängert werden. «Weltweit werden jährlich etwa 1,2 Mio. künstliche Hüft- und Kniegelenke implantiert, und der Gesamtmarkt für Hüft- und Knieimplantate wird auf etwa 5 Mrd. US$ geschätzt (…). Für Implantate, die durch nanostrukturierte Oberflächen (wie etwa Diamantbeschichtungen oder Metallkeramik-Beschichtungen) verbesserte mechanische Eigenschaften aufweisen und über eine erhöhte Biokompatibilität verfügen, wird daher ein beträchtliches Marktpotenzial erwartet» (Wagner/Wechsler 2004:123).

[67] Bei diesen Implantaten sind bloss einzelne Komponenten, insbesondere die Oberflächenbeschichtungen, der Nanotechnologie zuzuordnen. Von der Grösse her gehören sie in den Bereich der Mikrotechnologie. «Hierbei wird ein häufig anzutreffendes Prinzip der Nanotechnologie deutlich: Obwohl Nanotechnologie bei vielen Produkten nur einen sehr geringen Anteil an der Wertschöpfung hat, so lassen sich bestimmte Produkteigenschaften nur mit ihrer Hilfe realisieren. Dadurch ergibt sich eine Hebelwirkung, denn der geringe Anteil an Nanotechnologie führt zu einem grossen Mehrwert des Produkts und erzeugt damit einen entsprechenden Konkurrenzvorteil» (Wagner/Wechsler 2004:167).

«Indem Nano- und Biotechnologie zusammenwirken, verwischen sich zum Teil die Grenzen zwischen Implantation und Transplantation. Diskutiert wird beispielsweise, alternde Organe durch frische Organe zu ersetzen, die auf einer nanotechnologischen Matrix mit Hilfe körpereigener Stammzellen in vitro neu aufgebaut werden» (Paschen et al. 2004:223).[68]

Allerdings werden hier vor dem Jahr 2020 keine grossen Fortschritte erwartet. Nanomaterialien könnten dann «als Transplantate, z.B. als «künstliche Haut», zum Einsatz kommen oder den Aufbau solcher Transplantate aus Zellkulturen unterstützen» (Paschen et al. 2004:17).[69] Ziel ist der nanobasierte Aufbau von künstlichem Gewebe (tissue engineering), Organen und Knochen, um Gewebedefekte und Organversagen bzw. Organschäden zu beheben.

Noch weiter in der Zukunft liegt wohl die Verbindung von Kybernetik und Nano(bio)technologie zur Entwicklung von nanobasierten Neuroimplantaten. Neuroimplantate oder Neuroprothesen sind technische Systeme, «die ausgefallene Nervenfunktionen wieder herstellen oder ersetzen. Sie überbrücken z.B. gestörte Nervenbahnen, geben Impulse an Muskeln weiter oder ersetzen die Sinnesorgane. Die bekannteste Neuroprothese ist der Herzschrittmacher (…). Andere Beispiele für neurale Prothesen sind der Blasenstimulator, das Cochlea-Implantat (Innenohr-Implantat), die Tiefenhirnstimulation[70], das Retina-Implantat [künstliche Netzhaut, A.B.],[71] Greifprothesen und der Fallfussstimulator»

[68] «Synergien zwischen Stammzelltherapie und Nanotechnologie sind denkbar, indem Nanotechnikmaterialien ein Gerüst bilden, das den Aufbau neuen Gewebes mit Hilfe von Stammzellen ermöglicht» (Paschen et al. 2004:17).

[69] «Diese Entwicklung setzt einerseits ein vertieftes Verständnis biologischer Prozesse auf molekularer Ebene und andererseits Fortschritte bei der Produktion von Nanomaterialien voraus» (Paschen et al. 2004:223).

[70] Auch «Hirnschrittmacher» genannt. Dieser wird heute erfolgreich – wenn auch bisweilen nicht nebenwirkungsfrei – eingesetzt, um z.B. die Krankheitssymptome von Parkinson- oder Epilepsiepatienten zu lindern.

[71] In den USA wurden mit Retina-Implantaten erste klinische Versuche durchgeführt. Dennoch wird es aufgrund der hohen regulatorischen Hürden und der hohen Kosten der Technologie auch in den USA voraussichtlich noch Jahre dauern, bis mit einer klinischen Zulassung dieser Implantate gerechnet werden kann.

(Wagner/Wechsler 2004:147). Bei den heute bereits vorhandenen Implantaten handelt es sich, von der Grösse her gesehen, nicht um Nano-, sondern um Mikroimplantate. Allerdings wird der Nanobiotechnologie in der weiteren Entwicklung eine wichtige Rolle zukommen. Denn «obwohl Nervenzellen bereits auf der Mikrometerskala angesprochen werden können, sollte durch die Nanobiotechnologie besonders in Bezug auf die Entwicklung molekularer Schnittstellen eine Verbesserung des technischbiologischen Informationsaustausches zu erzielen sein. Durch Fortschritte bei der Nanoinformatik könnten so die o.g. Implantate den Dimensionen der natürlichen Systeme und deren Leistungsfähigkeit angenähert werden» (Paschen et al. 2004:305).

Ad 4. Auch im Bereich der Medikamentenentwicklung wird die Nanotechnologie vermehrt zum Einsatz kommen. So ermöglichen nanotechnologische Techniken wie etwa das Kraftmikroskop die Messung der Bindungskräfte zwischen Medikamentenmolekülen und einzelnen Rezeptormolekülen. Auch Nanopartikel werden in der Medikamentenforschung oft verwendet. So haben Forscher am MIT Gold-Nanopartikel an bestimmten DNA-Abschnitten festgemacht. Werden diese Abschnitte einem Magnetfeld ausgesetzt, brechen sie auseinander; entfernt man das Magnetfeld, schliessen sie sich unmittelbar wieder zu ihrer vorherigen Form zusammen. «(…) the researchers have effectively developed a switch that will allow them to turn genes on and off. The goal is to speed up drug development, allowing pharmaceutical researchers to simulate the effects of a certain drug that also turns genes on or off» (ETC Group 2003:33).

5.3 Nanobiotechnologie in der Landwirtschaft und in der Ernährung

Die möglichen Entwicklungen der Nanotechnologie und Nanobiotechnologie im Bereich Landwirtschaft und Ernährung sind anders als diejenigen im humanen, insbesondere medizinischen Bereich,[72] noch nicht umfassend aufgearbeitet worden.

[72] Dazu gibt es bereits mehrere grossangelegte Überblicksstudien (etwa Paschen et

Einer der ersten Berichte, der sich dieses Themas ausführlicher annimmt, ist der von der ETC-Group verfasste, 2004 erschienene Bericht «Down on the Farm. The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture». Die im Folgenden aufgeführten nano(bio)technologischen Entwicklungen im Bereich Landwirtschaft und Ernährung sind weitgehend diesem Bericht entnommen.

Allgemein gilt: Die Nanobiotechnologie steht auch bezüglich Landwirtschaft und Ernährung noch am Anfang. Sie eröffnet ebenso faszinierende wie beunruhigende Möglichkeiten, die keineswegs unrealistisch erscheinen, auch wenn es vermutlich noch Jahre, wenn nicht Jahrzehnte dauern wird, bis sie Wirklichkeit werden.

Dabei unterscheiden sich die verwendeten Techniken – Delivery-Systeme, Nanosensoren, Einsatz von Nano-Partikeln – im Kern kaum von den nanobiotechnologischen Instrumenten im humanen bzw. humanmedizinischen Bereich, auch wenn sie natürlich auf andere Gegenstände angewendet werden und damit andere Auswirkungen haben.

1. Landwirtschaft

Mikroinjektion

Die Mikroinjektion ist eine Technik, die Nanopartikel einsetzt, um fremde DNA in Millionen von Zellen gleichzeitig einzuschleusen. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Nanofaserchip hergestellt. Auf einem Silikonchip lässt man unzählige Kohlenanofasern mit einem Durchmesser von 50 nm wie kleine Nadeln «wachsen». An deren Spitzen befinden sich die einzuschleusenden synthetischen Gensequenzen. Eine Zentrifuge schleudert sodann Zellen auf diese Fasern. Jede Faser spiesst genau eine Zelle auf. Auf diese Weise gelangt das Fremdgen in den Zellkern. Im Test wurde so ein grün fluoreszierendes Gen in Hamsterzellen eingeschleust. Die Zellen leuchteten danach grün.

Bis jetzt wurde mit Tierzellen (Hamsterzellen) experimentiert. Geplant ist aber auch, bakterielle und Pflanzenzellen mit dieser Technik zu «behandeln». Zudem arbeiten die Forscher an Möglichkeiten, die Fasern nach der Injektion vom Chip abzulösen.

Eine Einsatzmöglichkeit sieht der Bericht der ETC-Group in der (Nano-) Terminatortechnologie. Das selektive Aktivieren und Deaktivieren von Kerneigenschaften wie Fruchtbarkeit könnte dazu genutzt werden, die Bauern daran zu hindern, geerntete Samen erneut zu verwenden.

Nanotechnologische Modifikation von lokalen Reissorten in Thailand

Thailändische Forscher, so wird berichtet, sollen Nanometer kleine Löcher in die Membranen von Reiszellen «gebohrt» haben, um ein Stickstoff-Atom einzuführen, das eine Änderung der DNA des Reises stimulieren soll. Ziel ist die Entwicklung von Jasmin-Reissorten mit kürzeren Stängeln und «verbesserter» Farbe, die das ganze Jahr über angepflanzt werden können. Weiter soll mit dieser Methode die Qualität von Seide, einem Hauptexportprodukt von Thailand, verbessert werden. Diese nanoskalige Technik soll auf direkte Weise, ohne kontroverse gentechnologische Methoden, genetische Modifikationen bewirken können.[73]

«Nanozide»: nanoverkapselte Pestizide

Pestizide in Form von Nanopartikeln oder nanoskaligen Emulsionen sind bereits auf dem Markt. Viele der grossen agrochemischen Firmen sind zudem dabei, neue nanoskalige Verabreichungsformen für Pestizide zu entwickeln.
Drei prominente Beispiele seien hier erwähnt:

- BASFs «Nanoparticles Comprising a Crop Protection Agent» (zur Patentierung angemeldet). Dieses Produkt hat folgende vorteilhaften Eigenschaften: a) es löst sich leichter in Wasser auf (was die Anwendung erleichtert); b) es ist stabiler; c) die «killing-capacity» der Chemikalie – Herbizid, Insektizid oder Fungizid – wird optimiert.

al. 2004), Expertenberichte (etwa RSRAE 2004 oder TA Swiss 2003) sowie zahllose Studien und Artikel, die sich mit spezifischen Fragestellungen beschäftigen.

[73] Ob die vorgeschlagene gezielte «Mutation» so von statten gehen kann, ist allerdings mit einem Fragezeichen zu versehen. Sie basiert auf einer mechanistischen Vorstellung von biologischen Prozessen, die doch eher realitätsfremd ist.

- Bayer Crop Sciences hat eine Pestizid-Emulsion – «Mikroemulsion Konzentrat» – zur Patentierung angemeldet, in der nanoskalige Tröpfchen als aktive Bestandteile enthalten sind. Dieses Pestizid soll zuverlässiger und länger wirksam sein – weshalb man es sparsamer einsetzen kann.
- Syngenta verkauft bereits Pestizid-Emulsionen mit nanoskaligen Tröpfchen. Etwa «Syngenta's Primo MAXX Plant Growth Regulator». Zweck dieser Emulsion ist, das Gras auf Golfplätzen am zu schnellen Wachsen zu hindern.

Diese Beispiele beziehen sich auf nanoskalige, aber nicht-verkapselte Pestizide. Verkapselte Pestizide befinden sich dagegen noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Sie würden nach dem gleichen Prinzip funktionieren wie Drug Delivery-Systeme. Der nanoskalige aktive Bestandteil des Pestizids wird in Nanokapseln verpackt, zielgenau an seinen Bestimmungsort gebracht und dort kontrolliert freigesetzt.[74]

Die wesentlichen Vorteile von Nanoziden (Pestizide, Herbizide, aber auch Insektizide) sind gemäss den in diesem Bereich tätigen Firmen – Monsanto und vor allem Syngenta – folgende: Sie sind länger biologisch aktiv, sie sind effizienter, Feldarbeiter kommen weniger mit den aktiven Bestandteilen in Kontakt, das Getreide wird weniger beschädigt, sie haben weniger negative Auswirkungen auf andere Arten und die Umwelt.

«Precision Farming»

Das gegenwärtig eher noch als Vision zu beurteilende Precision Farming ist für die grossflächige kommerzielle Landwirtschaft gedacht. Das Land bzw. der Boden soll mittels Computern, GDP, Überwachung der Felder via Satelliten, geographischen Informationssystemen und unzähligen kabellosen Biosensoren bewirtschaftet werden. Ziel sind höhere Erträge bei insgesamt geringeren Kosten.

[74] Gedacht ist hierbei unter anderem auch an DNA-Kapseln: «Once the capsule breaks down, the DNA hijacks the cell's machinery to produce compounds that would be expected in a virus attack, thus alerting and training the immune system to recognize them» (ETC Group 2004:33). Man könnte diese Technologie aber auch dazu nutzen, um Zellen dazu zu bringen, bestimmte Proteine oder Toxine (z.B. für Waffen) zu produzieren.

Gegenwärtig finden in den USA etwa im Weinbau Versuche statt, in denen es darum geht, kabellose Sensoren-Netzwerke zu testen, die die verschiedensten Parameter – wie Temperatur, Frostwarnung, Pestizidanwendung, Erntezeitbestimmung, Wasserqualität, Nährstoffe etc. – überwachen und entsprechende Eingriffe ohne menschliches Zutun auslösen sollen. Auf diese Weise liessen sich Krankheiten frühzeitig erkennen und entsprechend frühzeitig behandeln. Das gilt für Pflanzen ebenso wie für (Nutz-)Tiere.

Aufgabe der netzwerkartig aufgebauten Biosensoren im Getreideanbau ist es, detaillierte Daten zum Zustand des Getreides und des Bodens zu liefern:

«Since many of the conditions that a farmer may want to monitor (e.g. the presence of plant viruses or the level of soil nutrients) operate at the nanoscale, and because surfaces can be altered at the nanoscale to bind selectively with particular biological proteins, sensors with nano-scale sensitivity will be particularly important in realizing this vision» (ETC Group 2004:16f.).

Biosensoren sind heute von ihrer Grösse her gesehen zumeist Makro- oder Mikrosensoren. Ziel ist es, sie zu Nanosensoren zu verkleinern und leistungsfähiger zu machen. Sensoren aus Kohle-Nanoröhrchen oder Nano-Cantilever wären klein genug, um einzelne Moleküle zu ‹fangen› und zu messen.[75] Da sie, wenn sie erst einmal funktionieren, vielfältig einsetzbar sind (s.o. S.47f.),[76]

[75] Der entscheidende Faktor ist freilich nicht die Sensitivität, d.h. der Nachweis von einzelnen Molekülen, sondern die Spezifizität, d.h. das Ausschalten des Einflusses von Fremdsubstanzen. Dieses Problem kann nicht durch nanobasierte Techniken gelöst werden.

[76] Ein Stichwort hier lautet «ambient intelligence»: «smart environments that use sensors and artificial intelligence to predict the needs of individuals and respond accordingly: offices that adjust light and heating levels throughout the day or clothes that alter their colours or warmth depending on the external environment» (ETC Group 2004:18). Ein einfaches, bereits funktionierendes Beispiel für ‹ambient intelligence› sind die in Airbags verwendeten Sensoren. Nanosensoren könnten aber auch so konstruiert werden, dass sie etwa in der Gegenwart von Verunreinigern wie Bakterien ein elektrisches oder chemisches Signal oder auch eine Enzymreaktion auslösen. Auf diese Weise könnten sie als ziviles oder militärisches Frühwarnsystem für chemische, biologische und radiologische Bedrohungen dienen.

kann nicht überraschen, dass in diesem Bereich eine rege Forschungstätigkeit zu beobachten ist.[77]

Partikel-Farming

Auch das Partikel-Farming ist gegenwärtig noch weitgehend Vision. Diese besteht darin, Nanopartikel nicht im Labor, sondern mit Hilfe von gentechnologisch veränderten Pflanzen auf Feldern zu produzieren. Pflanzenwurzeln können nicht nur Nährstoffe und Mineralien aus dem Boden extrahieren, sie können auch Nanopartikel aufnehmen, die sich dann, so die Idee, industriell ernten liessen.[78] Dabei hat die genetische Modifikation der Pflanzen den Zweck, die Nanopartikel-Produktion zu verbessern und zu optimieren.[79]

2. Veterinärmedizinische Anwendungen

Die Anwendungsmöglichkeiten der Nanobiotechnologie in der Veterinärmedizin unterscheiden sich im Allgemeinen kaum von den Anwendungsmöglichkeiten in der Humanmedizin. Das gilt für den diagnostischen Bereich, in dem man sich dank nanoskaliger Biochips eine Früherkennung von Tierkrankheiten erhofft, ebenso wie für den therapeutischen Bereich, in dem man von nanometergrossen Drug-Delivery-Systemen wirksamere und nebenwirkungsärmere medikamentöse Behandlungen und von neuen nanotechnologischen Materialien langlebigere Implantate erwartet.

Daneben gibt es auch einige spezielle Ansätze, wie Nanobiotechnologie im Bereich der Veterinärmedizin nutzbar gemacht werden könnte.

Nanopartikel gegen Hühner-Bakterien

Eine bestimmte Gruppe von Bakterien wird üblicherweise durch den Verzehr von kontaminiertem Geflügel auf den Menschen übertragen. Dies verursacht Magen-Darmkrämpfe und blutigen Durchfall. Um die entsprechenden bakeriellen Pathogene, die zunehmend antibiotikaresistent werden, zu bekämpfen, testet man gegenwärtig einen Ansatz, der mit Nanopartikeln operiert. Speziell designte Nanopartikel werden von den Hühnern aufgenommen und binden die schädlichen Bakterien in ihrem Magen. Diese werden dann auf dem normalen Verdauungsweg ausgeschieden.

«Smart Herds»

So wie Netzwerke von Nanosensoren eines Tages die Gesundheit der Feldpflanzen überwachen sollen (s.o. S.57), so sollen sie auch die Gesundheit des Viehs überwachen. Langfristig geht es aber nicht nur um den Aspekt der Überwachung. Vielmehr soll es durch eine Kombination von nanobasierten diagnostischen und therapeutischen Instrumenten möglich werden, dass bei der Entdeckung einer Krankheit automatisch und ohne weiteres menschliches Zutun eine entsprechende medikamentöse Behandlung eingeleitet wird.

«Nano-Aquaculture»

- Spezielle Nanopartikel absorbieren Phosphate und verhindern Algenwachstum in Swimming-Pools und Fischteichen. Diese Methode wird gegenwärtig getestet.
- DNA Nano-Impfstoffe für Fische. Nanokapseln, die DNA-Abschnitte enthalten, werden in einen Fischteich gegeben, wo sie von den Zellen der dort lebenden Fische aufgenommen werden. Mittels Ultraschall werden die Kapseln aufgebrochen, die DNA wird freigesetzt und bewirkt eine Immunisierung der Fische. Auch diese Methode befindet sich in der Testphase.

[77] «(…) wireless micro- and nano-sensors (…) are an area of intense research for large corporations from Intel to Hitachi, a focus of development at all US national defence laboratories and in fields as wide apart as medicine, energy and communications» (ETC Group 2004:18). Es versteht sich, dass diese Technologie auch, etwa für heimliche private Überwachung, missbraucht werden und mit dem Recht auf Privatheit kollidieren könnte (s.u. S.103f.)

[78] Dass Pflanzen Nanopartikel aufsaugen können, ist experimentell bestätigt (vgl. ETC Group 2004:27).

[79] Es bleibt unklar, wofür solche Nanopartikel verwendet werden sollen und mit welchem Aufwand sie aus dem geernteten Pflanzenmaterial isoliert werden können.

- Schnelleres Fischwachstum. Junge Karpfen sind in einem Experiment wesentlich schneller gewachsen, nachdem man ihrem Essen Eisen-Nanopartikel beigemischt hat.

3. Ernährung («Nanofood»)

Im Bereich nanobiotechnologisch veränderter Lebensmittel gibt es momentan eine intensive Forschungs- und Entwicklungstätigkeit, an der die grossen Lebensmittelkonzerne – Kraft Foods, Nestlé, Unilever etc. – ebenso beteiligt sind wie kleine Nanotech-Startups. Man erhofft sich vom Nanofood ein Milliardengeschäft. Gemäss einer Prognose wird das Umsatzvolumen auf dem Nanofood-Markt von 2,6 Milliarden Dollar im Jahr 2004 auf 20,4 Milliarden Dollar im Jahr 2010 anwachsen.

Neben den wenigen Nanofood-Produkten – Nahrungsmittel mit nanoskaligen Zusatzstoffen –, die bereits auf dem Markt sind, befinden sich momentan rund 130 nanotechnologische Anwendungen im Ernährungsbereich in verschiedenen Stadien der Entwicklung. Diese Zahl wird in den nächsten Jahren weiter anwachsen.

Dabei stehen gegenwärtig Verpackungen mit sensorischen Nanostrukturen sowie Farb- und Zusatzstoffe im Vordergrund. Künftig dürfte Nanotechnologie aber auch «im Bereich des «Functional Food» eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht» (Paschen 2004:106). Hierbei wird die Delivery-Technik eine zentrale Rolle spielen. So sollen die gesundheitsfördernden Substanzen in Nanocontainer eingepackt werden, die so präpariert werden, dass sie ihren Inhalt an einen ganz bestimmten Ort im menschlichen Körper bringen. «Soll eine Substanz etwa nur im Darm wirken, wird sie in Nanocontainer verpackt, die Mund und Magen unbeschadet überstehen, unter den Bedingungen im Darm dann aber ihren Inhalt entlassen» (Vogel 2006:26).

Nanotechnologische Verfahren für Verpackungen («smart packaging»)

Wenn Verpackungen als ‹smart› oder ‹intelligent› bezeichnet werden, meint man in erster Linie, dass in der Packung enthaltene Nanomaterialien oder Nanosensoren auf Umweltbedingungen reagieren und den Konsumenten auf Kontamination bzw. auf die Anwesenheit von Krankheitserregern aufmerksam machen.[80]

Kraft Foods etwa ist dabei, einen Nanopartikel-Film zu entwickeln, der Sensoren enthält, die Krankheitserreger in Lebensmitteln entdecken können. Sie bewirken dann eine Farbänderung der Verpackung, um den Konsumenten zu warnen, dass das Nahrungsmittel verdorben ist.[81] Noch einen Schritt weiter gehen Forscher in den Niederlanden. Sie möchten eine Verpackung entwickeln, die ein Konservierungsmittel freisetzt, wenn das Nahrungsmittel zu verderben beginnt. «This «release on command» preservative packaging is operated by means of a bioswitch developed through nanotechnology» (ETC Group 2004:42).

Weiter arbeitet man an nanobasierten Verpackungen, deren Zweck der bessere Schutz der eingepackten Lebensmittel vor Bakterien und Mikroorganismen ist, was auch eine Reduzierung der Konservierungsstoffe ermöglichte. Kodak etwa setzt nanotechnologische Fabrikationsmethoden ein, um ein antimikrobielles Verpackungsmaterial zu entwickeln. Zudem entwickelt Kodak auch andere Arten von ‹aktiven Verpackungen›, etwa solche, die Sauerstoff absorbieren und so das Nahrungsmittel länger frisch halten. Dazu verwendet man Nano-Siliziumoxid oder Nanopartikel aus Silber. Dieses macht den Kunststoff von Frischhaltefolien undurchlässig für Sauerstoff. «Eine darin verpackte Gänseleberpastete bleibt länger frisch – und sieht durch die voll transparente Folie immer appetitlich aus» (Kröher 2004). Ein anderes Beispiel ist ein von Bayer produzierter transparenter Plastikfilm, der Nanopartikel aus Tonerde enthält.[82] Diese verhindern, dass Sauerstoff,

[80] «Ein Frühstück mit Folgen, im Jahr 2020: Gibt es noch Kaffee? Wohl doch, und Orangensaft? Natürlich, aber an der Verpackung könnte etwas Besonderes sein, wie eine «Elektronische Zunge» im Inneren, die den Saft auf eventuelles Verdorbensein vorkostet. Oder einen Sensor aussen, der aus dem Schweiss der greifenden Finger Calciummangel und andere Defizite herausanalysiert, die durch «Functional Food» behoben werden könnten» (BMBF 2004:31).

[81] Nanosensoren «sollen in Zukunft über den Zustand von Lebensmitteln informieren – unter anderem sauer gewordene Milch rot werden lassen oder durch die Blaufärbung der Verpackung zeigen, dass das Verbrauchsdatum des Pouletfleischs überschritten ist» (Vogel 2006:27).

[82] Auch Mars produziert einen Nanofilm, mit dem aber die Produkte direkt beschichtet ▸

Kohlendioxid und Feuchtigkeit an frisches Fleisch und andere Nahrungsmittel gelangen kann. Die Nano-Tonerde macht den Plastik zudem leichter, stärker und hitzeresistenter. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Nanokristallen. Diese erlauben zum Beispiel, Bier in Plastikflaschen abzufüllen, ohne dass es an Geschmack verliert bzw. den Geschmack verändert. Dies ermöglicht einen günstigeren Transport. Zudem ist das Bier wesentlich länger haltbar.

Bis heute werden Produkte mit abgelaufenem Haltbarkeitsdatum aus den Regalen entfernt, auch wenn sie noch problemlos konsumiert werden könnten. Dank Nanotechnik könnte es möglich werden, den genauen Zeitpunkt festzustellen, an dem ein Lebensmittel ungeniessbar wird. Bis dann würden die Produkte in den Regalen bleiben. In vielen Fällen wäre das einige Tage länger als das heute der Fall ist. Das könnte sie wesentlich günstiger machen. Dies umso mehr als sich beispielsweise Preisetiketten mit Sensoren so kombinieren liessen, dass die Waren mit zunehmendem Alter automatisch günstiger werden.

Herstellen von Nahrungsmitteln mit nanoskaligen Komponenten

- Interaktive Lebensmittel und Getränke
  Nanobiotechnologie, so die Idee, könnte zur Individualisierung von Lebensmitteln verwendet werden:

  «Vielleicht essen wir bald nur noch eine einzige Multigeschmackpizza, die je nach Wattzahl im Mikrowellengerät die Geschmacksstoffe für Pilze, Käse oder Meeresfrüchte freisetzt. (…) vielleicht geniessen wir Milchshakes und Pommes Frites ohne schlechtes Gewissen, weil wir die darin enthaltenen Kalorien gar nicht mehr aufnehmen.» (Fossgreen 2006)

  Auch Getränke könnten auf diese Weise besser auf den individuellen Geschmack abgestimmt werden:

werden (etwa M&Ms). Dieser anorganische Film enthält nanoskaliges Titandioxid oder Silicondioxid. Er soll die Produkte länger haltbar machen.

«Sie haben Gäste und wollen allen einen Milchdrink servieren, wissen aber nicht, welchen Geschmack die Besucher mögen. Kein Problem. Kaufen Sie «Shake»-Drinks, und Ihre Gäste können durch unterschiedlich starkes Schütteln selbst entscheiden, ob das Getränk nach Erdbeere oder Banane schmecken soll.» (Vogel 2006:26)

Noch ist es nicht möglich, Lebensmittel und Getränke auf die beschriebene Weise individuell zusammenzustellen. Aber die Entwicklung ist in vollem Gang. So arbeitet etwa Kraft Foods an Nanokapseln, deren Wände bei unterschiedlichen Mikrowellen-Frequenzen aufbrechen. Auf diese Weise soll der Konsument neue Geschmäcke oder Farben aktivieren können. Auch der Shake-Drink würde auf der gezielten Freisetzung basieren: Die Nanocontainer werden so geformt, dass sie auf unterschiedlich starkes Schütteln unterschiedlich reagieren. Auf diese Weise können «interaktive Produkte hergestellt werden – unter anderem Drinks, die ihre Farbe oder ihren Geschmack verändern» (Vogel 2006:26).

- Nanoskalige Lebensmittelzusätze
  Nanocontainer können nicht nur mit Farb- und Geschmacksstoffen, sondern auch mit andern Zusatzstoffen gefüllt werden. Ein Beispiel ist der Nährstoff Carotinoid. BASF etwa produziert ein nanoskaliges synthetisch hergestelltes Carotinoid,[83] ein Zusatz, der Lebensmittel orange einfärbt. BASF verkauft dieses Produkt an grosse Lebensmittel- und Getränkeproduzenten in der ganzen Welt. Es wird eingesetzt in Limonaden, Fruchtsäften und Margarine.[84] Das Problem ist, dass Nährstoffe wie Carotinoide vom Körper nur schwer aufgenommen werden. Wenn man diese Stoffe aber mittels Nanokapseln zu sich nehmen könnte, würde die Aufnahme wohl verbessert werden.

- «Functional Food»
  Mit «Functional Food» sind Nahrungsmittel gemeint, die durch

[83] Carotinoide sind natürlicherweise in Karotten und Tomaten enthalten.

[84] Carotinoide werden auch in Lachsfarmen verwendet, um die Lachsfilets rosa werden zu lassen.

die Zugabe bestimmter Stoffe über den reinen Nährwert hinaus gesundheitsfördernd wirken. Diese Stoffe könnten in Nanokapseln verpackt den Lebensmitteln beigegeben werden. Auf diese Weise liessen sie sich gezielt an bestimmte Orte des Körpers bringen, wo sie ihre Wirkung optimal entfalten können.

Zum ‹Nanofood› ist noch folgendes anzumerken. Da es bislang keine Kennzeichnungspflicht gibt, kann die Konsumentin nicht erkennen, ob Nano-Zusatzstoffe in Lebensmitteln enthalten sind oder nicht. Deshalb ist auch nicht klar, wie weit verbreitet nanoskalige Zusätze sind. Dieser Umstand wird noch verschärft dadurch, dass nicht bekannt ist, wie viele herkömmliche Lebensmittelzusätze, die offiziell zugelassen sind, nanoskalige Komponenten enthalten, da es für diese Verkleinerung zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein neue Zulassung braucht.

II. Teil: Nanobiotechnologie – eine «ethische Landkarte»

6. Zum Stand der ethischen Diskussion

Die Debatte zu den verschiedenen ethischen Aspekten der Nano(bio)technologie bewegt sich im Allgemeinen noch auf einem relativ bescheidenen Niveau.[85] Auch wenn in vielen Berichten und Studien Bedarf an Ethik angemeldet wird und einzelne ethische Fragen abgehandelt werden, gibt es erst wenige ethische Analysen, die der Heterogenität der Nanotechnologien gerecht werden.[86] Diese Analysen haben in erster Linie einen Überblickscharakter. Ihr Ziel ist es, die einschlägigen ethischen Fragestellungen und Problemkreise im Bereich der Nano(bio)technologie zu identifizieren. Dagegen gibt es noch keinen detailliert ausgearbeiteten Vorschlag einer Antwort auf diese Fragestellungen.

Die Mehrheit der Kommentatoren ist der Meinung, ethische Reflexionen zur Nano(bio)technologie seien dringend geboten. Ob es eine Nano-Ethik im Sinne einer neuen Bindestrichethik geben wird und geben sollte, wird indes eher skeptisch beurteilt. Das liegt zum einen an der Heterogenität der Nanotechnologien; es liegt zum anderen aber vor allem daran, dass sich im Bereich der Nano(bio)technologie keine grundlegend neuen ethischen Fragen zu stellen scheinen.[87] Diese Situation würde sich gemäss der Ansicht der meisten Expertinnen und Experten vermutlich erst dann

[85] Armin Grunwald beschreibt dies wie folgt: «Bislang herrscht ein eher intuitives Verständnis für die ethische Relevanz von Nanotechnologie vor. Darüber hinaus werden – mit Ausnahme der Nanopartikel – fast ausschliesslich die visionären und spekulativen Aspekte der Nanotechnologie (…) als ethisch relevant thematisiert. Kriterien dafür, warum bestimmte Aspekte wie selbstreplizierende Nanoroboter oder Nanopartikel ethisch relevant sein sollen, werden nicht angegeben» (Grunwald 2004:72).

[86] Zu erwähnen sind besonders Ach/Jömann 2005, Baumgartner 2004 und Grunwald 2004.

[87] «Die Analyse zeigt, dass es kaum genuin neue ethische Aspekte in der Nano- ‣

ändern, wenn man an den Punkt gelangte, an dem absehbar würde, dass sich auch Nano-Utopien à la Drexler verwirklichen lassen.

Was kann, was soll die Ethik leisten? Sie soll, so Armin Grunwald, einen Beitrag zur Gestaltung der Nano(bio)technologie leisten: «Es geht nicht um eine Analyse ex post, sondern um Orientierungen ex ante. Ethik kann hierbei einen Beitrag zur Klärung der normativen Ebene leisten (Ziele, Intentionen, Akzeptabilitäten)» (Grunwald 2004:71). Dabei sollte die Ethik davon profitieren, dass sich die Nanotechnologie noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet. Deshalb sind nämlich «Chancen und auch Zeit für frühzeitige Reflexion(en) vorhanden, als auch die Möglichkeit, die Ergebnisse der Reflexion in den Entwicklungsprozess einzuspeisen und damit zur weiteren Gestaltung der Nanotechnologie beizutragen» (Grunwald 2004:76).

Die meisten der durch die Nano(bio)technologie aufgeworfenen ethischen Probleme sind zwar nicht neu, erfahren aber eine eigene Akzentuierung, die mit den Eigenheiten dieser Technologie zu tun haben. Folgendes sind die wichtigsten Problemfelder: risikoethische Probleme (7); Gerechtigkeitsprobleme (Stichwort «Nano-Divide») (8), Probleme militärischer Anwendungen (9); Probleme des Missbrauchs (Datenschutz/Privatsphäre) (10); medizinethische Probleme (11); Probleme des menschlichen Selbstverständnisses (Stichwort: Enhancement) (12).

Kurz- und mittelfristig, d.h. in einem Zeitraum von 5 bis 15 Jahren, besonders relevant sind die risikoethischen und die Gerechtigkeitsaspekte der Nanobiotechnologie. Auch die militärischen Anwendungsmöglichkeiten könnten in diesem Zeitraum bedeutsam werden, zumal schon jetzt in diesem Bereich mit Abstand am meisten investiert wird. Eher in einer längerfristigen Perspektive zu betrachten sind Datenschutzprobleme, die sich insbesondere aus der Entwicklung im Bereich Nanoelektronik und Nanosensorik ergeben werden. Das gilt auch für ethische Probleme im Zusammenhang mit neuen Möglichkeiten der Nanomedizin sowie den daraus erwachsenden Möglichkeiten der Verbesserung bestimmter sensorischer und kognitiver Fähigkeiten.

technologie gibt. Vielmehr sind es zumeist graduelle Akzent- und Relevanzverschiebungen in prinzipiell bereits bekannten Fragestellungen, die zu ethischen Diskussionen der Nanotechnologie Anlass geben» (Grundwald 2004:71).

7. Die risikoethische Dimension

Grundlegende ethische Einwände gegen die Nanobiotechnologie in dem Sinn, dass es sich hierbei um etwas moralisch Verwerfliches handelt, das auf jeden Fall zu unterlassen ist, werden in der Fachdiskussion kaum vorgebracht.[88] Es gibt jedoch starke Bedenken, ob die Manipulierung von Materie auf atomarem Niveau nicht mit unkalkulierbaren Risiken verbunden ist, vor allem wenn dies der Erzeugung vollkommen neuer Materialien oder sogar «lebender Maschinen» dient.

Konkret besteht die Befürchtung darin, dass genau die Eigenschaften, die man ausnützt, um aus Nanobestandteilen Produkte herzustellen – in erster Linie die höhere chemische Reaktivität sowie die Fähigkeit, die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden und Zellmembranen zu durchdringen –, auch negative Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt haben könnten. Gegen diese Befürchtung wird gelegentlich eingewendet, Nanopartikel habe es in der Natur seit eh und je gegeben; der Mensch sei ihnen schon immer ausgesetzt gewesen. Es gebe aber keine Hinweise, dass diese natürlichen Partikel besonders schädlich gewesen wären, schädlicher als grössere Partikel desselben Stoffs (vgl. Rickert 2005). Dieses Argument übersieht allerdings den Umstand, dass die Exposition im Verlauf der letzten 100 Jahre infolge menschengemachter Quel-

[88] Ein möglicher Einwand dieser Art, der aber nur selten erwähnt wird, lautet, dass der Mensch durch die kontrollierte Manipulation von Materie auf atomarer Ebene Gott spielen würde. «Taking God's creation apart in the most extreme form and putting it together in a molecule-by-molecule way is likely to offend those who believe that the structure of creation is already pervaded by divine rationality and heavenly benevolence» (Gordijn 2003:9). Es ist denkbar, dass dieser Einwand an Gewicht gewinnen würde, wenn es eines Tages im Sinne von Drexlers «molecular manufacturing» möglich werden sollte, nach einem bottom up-Verfahren auf molekularer Ebene beliebige Gegenstände herzustellen.

len – Verbrennungsmotoren, Kraftwerke etc. – dramatisch zugenommen hat; und dass mit künstlich hergestellten Nanopartikeln eine weitere Quelle geschaffen worden ist (vgl. Oberdörster et al. 2005).

Es stellt sich daher aus ethischer Sicht die Frage: Welchen Risiken darf die Gesellschaft ihre Mitglieder, aber auch die natürliche Umwelt bei der Einführung der Nanobiotechnologie aussetzen? Und welche Massnahmen sind zu ergreifen, um die Risiken zu eliminieren oder zumindest auf ein akzeptables Mass zu reduzieren?

Betrachtet man die in der Literatur diskutierten Antworten auf diese Fragen, fällt auf, dass die normativen Grundlagen des Risikobegriffs praktisch ausgeklammert bleiben. Es wird so getan, als ob klar sei, was mit Risiko ethisch gesehen gemeint ist. Das aber ist keineswegs der Fall. Zudem: Je nach dem, welches Risikokonzept man vertritt, ob man sich etwa am utilitaristischen Bayes-Kriterium (das heisst am maximalen Erwartungswert) oder eher am Maximin-Kriterium (das heisst der Vermeidung des grössten Schadens) orientiert, kommt man unter Umständen zu anderen Einschätzungen. Es wäre deshalb aus ethischer Sicht wünschenswert, ja dringend geboten, zunächst die risikoethischen Grundfragen zu klären, und sich erst dann dem konkreten Problem zuzuwenden, wie die mit der Nanobiotechnologie verbundenen Risiken zu beurteilen sind.

Die gegenwärtige Risikodebatte zur Nanobiotechnologie bewegt sich auf zwei Ebenen. Auf der empirischen Ebene geht es um die Erforschung der Human- und Öko-Toxizität von Nanopartikeln und Nanoröhren. Auf der normativen Ebene geht es um die Frage, wie die empirisch ermittelten Risiken zu bewerten sind. In diesem Zusammenhang spielt das Vorsorgeprinzip eine zentrale Rolle. Dabei ist kaum umstritten, dass angesichts der potenziellen Risiken der Nanobiotechnologie vorsorgliche Massnahmen erforderlich sind. Nicht einig ist man sich hingegen, welche Massnahmen das sind. Diesbezüglich stehen sich Vertreter des starken und des schwachen Vorsorgeprinzips gegenüber. Während die einen ein Moratorium fordern, solange die Unbedenklichkeit der Nanobiotechnologie nicht hieb- und stichfest erwiesen sei, mahnen die anderen einen vorsichtigen Umgang mit Nanopartikeln an, ohne aber Herstellung und Gebrauch entsprechender Produkte vom Beweis ihrer Ungefährlichkeit abhängig zu machen.

Diese zwei Ebenen der Risikodiskussion, die empirische und die normative Ebene, sollen nun ausführlicher dargestellt werden. Dabei gehe ich davon aus, dass sich die relevanten Nanokomponenten in drei Risikoklassen gliedern lassen (vgl. zum folgenden Boeing 2005:35ff.).

In der ersten Klasse sind diese Komponenten isoliert, das heisst sie sind fest in eine Trägersubstanz eingebunden und damit von der Umwelt isoliert. Ein Beispiel hierfür sind Materialien mit selbstreinigenden oder Antihaft-Beschichtungen. «Zwar verdanken sie ihre Eigenschaften Nanopartikeln. Doch diese sind in einer Matrix aus Kunststoffen verankert» (Boeing 2005:35) und insofern für Mensch und Umwelt unbedenklich. In einer Hinsicht können sie aber dennoch zu einem Problem werden. Denn: «Was passiert mit den Nanokomponenten, wenn die Geräte und Materialien entsorgt werden? Konzepte für Recycling oder Wiederverwendung gibt es noch nicht. Sollte es möglich sein, dass sich diese Nanoanwendungen am Ende ihres Lebenszyklus zersetzen, würden sie in die nächste Klasse rutschen: die bioaktive NT» (Boeing 2005:36).

Bioaktiv bedeutet, dass die Nanopartikel mit Zellen wechselwirken und dabei Schäden verursachen können. Das gilt insbesondere für künstlich hergestellte Nanopartikel wie Buckyballs und Nanotubes, die nicht in einer Matrix gebunden sind. Es gibt drei Möglichkeiten, wie solche Partikel Zellen schädigen können:

- Sie verursachen so genannten «oxidativen Stress» in oder direkt an der Zelloberfläche. «Das bedeutet, dass sich freie Radikale bilden, also Moleküle, die ein freies Elektron aufweisen und damit ausgesprochen reaktionsfreudig sind.[89] Die Folge: Der Kalziumspiegel innerhalb der Zelle steigt, und im Zellkern kann eine unerwünschte Transkription von Genen in Proteine

[89] Genauer sind freie Radikale kurzlebige, aggressive Atome bzw. Moleküle, die ein freies Elektron haben und daher besonders reaktionsfreudig sind. Sie «entreissen» anderen Verbindungen ein Elektron oder geben eines ab, wodurch Kettenreaktionen ausgelöst werden und neue Radikale entstehen. Viele Vorgänge in den Zellen werden dadurch gestört und Zellmembranen sowie die Zellkerne geschädigt. Dies kann die Entstehung von Tumoren, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, rheumatischen Erkrankungen, Augenerkrankungen etc. fördern. Auch haben freie Radikale eine negative Auswirkung auf Gehirnzellen, die nur eine beschränkte Regenerationsfähigkeit besitzen, und beschleunigen somit den Alterungsprozess.

aktiviert werden. Die Proteine können ihrerseits eine Entzündung im Gewebe auslösen» (Boeing 2005.37).

- Es werden Rezeptormoleküle an der Zellhülle aktiviert, weil sich Metallatome aus den Nanopartikeln lösen. Die Konsequenzen wären dieselben wie in Fall a).
- «Das Nanoteilchen wird als Ganzes von der Zelle verschluckt und gelangt beispielsweise in die Mitochondrien, die «Kraftwerke» der Zellen. Deren Arbeit wird durch die Anwesenheit des Partikels empfindlich gestört» (Boeing 2005:37).[90]

Die dritte Klasse kann man als disruptive Nanotechnologie bezeichnen. Darunter lassen sich die Versuche fassen, «künstliche Mikroorganismen herzustellen; also autonom agierende Nanosysteme, die fähig sind, sich zu vervielfältigen und Lebewesen massiv zu schädigen». Als Beispiele sind hier Drexlers Nanoroboter oder Venters synthetische Bakterien zu erwähnen. Da es sich bei Drexlers Nanosystemen um reine Science Fiction handelt, spielen sie für eine Darstellung der realitätsbezogenen Risikodebatte keine Rolle und werden daher im Folgenden nicht mehr erwähnt werden. Die synthetische Biologie wird im Regelfall als eigenständiger Forschungsansatz betrachtet und nicht der Nanobiotechnologie zugerechnet. Das erklärt, warum sie aus der bisherigen nanotechnologiebezogenen Risikodiskussion praktisch vollständig ausgeklammert worden ist. Allerdings kann man sehr wohl auch die Auffassung vertreten, sie sei ein Bestandteil der Nanobiotechnologie (s.o. S.40f.). Unabhängig davon aber ist festzustellen, dass es momentan noch keine ethische Debatte zur synthetischen Biologie gibt, die diesen Namen verdient.[91] Nur einige wenige Stimmen,

[90] Nanopartikel können auch in Gewebe eingelagert und dann nicht oder nur langsam abgebaut werden. Welche Auswirkungen etwa eine Erhöhung der Konzentration von biogenen Magnetit-Nanopartikeln durch die Verabreichung oder ungewollte Aufnahme von synthetischen Magnetit-Nanopartikeln hat, ist nicht bekannt. Immerhin konnten in den letzten 20 Jahren keine Reaktionen bei Patienten, welchen verschiedenartige Magnetit-Nanopartikel als Kontrastmittel verabreicht wurden, festgestellt werden.

[91] Was zu bedauern ist. Ethische Reflexionen zur synthetischen Biologie, die den wohl problematischsten Teilbereich von Bio2Nano darstellt, sind dringend erforderlich. Dabei wären die mit dieser neuen Forschungsrichtung verbundenen Risiken ein wichtiger Aspekt.

die auch eine ethische Beurteilung abgeben, haben sich bisher zu Wort gemeldet. Dazu zählen insbesondere die Europäische Kommission und die ETC Group, eine kanadische NGO, die sich schon seit Jahren intensiv mit Fragen der Nanotechnologie auseinandersetzt. In einem 2005 erschienenen Expertenbericht der Europäischen Kommission werden die Risiken der synthetischen Biologie folgendermassen beschrieben:

«It is obvious that genetic manipulation of organisms can be used, or can result by chance, in potentially dangerous modifications for human health or the environment. The possibility of designing a new virus or bacterium ‹à la carte› could be used by bioterrorists to create new resistant pathogenic strains or organisms, perhaps even engineered to attack genetically specific subpopulations. Thus, the combination of engineering with the possibility of synthesizing whole genomes is clearly problematic» (European Commission 2005:18).

Um diese Risiken zu minimieren, schlägt der Bericht zwei Massnahmen vor: erstens eine strenge Kontrolle der Lieferanten von synthetischen DNA-Sequenzen; zweitens die Einsetzung eines internationalen Komitees, das mögliche Missbräuche der Technologie benennen und Richtlinien zu deren Verhinderung erarbeiten soll (ebd.). Zugleich macht er aber deutlich, dass es angesichts des positiven Potentials der synthetischen Biologie keinen Grund gibt, darüber hinaus gehende Vorsorgemassnahmen zu ergreifen.

Der Risikoanalyse des Expertenberichts der Europäischen Kommission würde sich die ETC Group wohl weitgehend anschliessen. Zugleich ergänzt sie diese Analyse durch einen weiteren Aspekt, den sie in Abwandlung von Drexlers Gray Goo-Szenario als «Green Goo» bezeichnet:

«‹Green Goo› is the term the ETC Group uses to describe potential dangers associated with synthetic biology or nanobiotechnology. Researchers (…) envision harnessing living cells and custom-made living organisms to perform specific biochemical tasks, such as producing hydrogen or sequestering carbon dioxide. But what if new life forms, especially those that are designed to function autonomously in the environment, prove difficult to control or contain?

What if something goes wrong? That's the spectre of Green Goo.» (ETC Group 2004:38).

Auch wenn die ETC Group den potentiellen Nutzen der synthetischen Biologie durchaus anerkennt, zieht sie aus ihrer Risikoanalyse andere Schlussfolgerungen als der Expertenbericht der Europäischen Kommission. Sie plädiert nämlich für eine Anwendung des starken Vorsorgeprinzips. Konkret heisst das: Sie fordert ein sofortiges Moratorium für Laborexperimente und die Freisetzung in der Umwelt von Materialien aus der synthetischen Biologie, bis es zu einer gründlichen Analyse der Gesundheits-, Umwelt- und sozioökonomischen Implikationen gekommen ist (ETC Group 2004:54).[92]

Im Zentrum der gegenwärtigen risikoethischen Auseinandersetzung steht zweifellos die mit bioaktiven Nanopartikeln operierende Nanobiotechnologie. Gemäss Klassifizierung handelt es sich hierbei um den Bereich Nano2Bio (s.o. S.37). Der diesem Bereich gewidmeten Risikodebatte wollen wir uns nun zuwenden.

7.1 Risiken von Nanopartikeln für den Menschen

Wie sich nicht gebundene Nanopartikel im menschlichen Körper verhalten, wird für viele Anwendungen der Nanobiotechnologie von entscheidender Bedeutung sein. Das gilt insbesondere für die vielfältigen möglichen Anwendungen, die auf Delivery-Systemen basieren. Über die toxischen Wirkungen solcher Partikel weiss man freilich noch relativ wenig. Erste Studien deuten zwar darauf hin, dass sie nicht ungefährlich sind. Aber es ist unbestritten, dass es noch intensiver Forschung bedarf, um ihre Gesundheitsrisiken einigermassen zuverlässig abschätzen zu können.

Aus diesem Grund unterstützt etwa die EU gleich mehrere grosse Projekte, die sich mit Risikoaspekten der Nanobiotechnologie befassen.[93] Unabhängig davon sind auch auf nationaler Ebene, etwa in Frankreich, Deutschland,[94] England, Japan, China und den USA, verschiedene Studien lanciert – und zum Teil bereits abgeschlossen – worden, die sich mit Risikofragen beschäftigen.[95]

In der Grosszahl der Studien werden sowohl Nanomaterialien aus natürlichen Quellen als auch künstlich hergestellte Nanomaterialien – Nanopartikel und Buckyballs bzw. Nanotubes – untersucht. Dabei konzentrieren sich die meisten Studien auf die Auswirkungen von Nanopartikeln auf die Lungen; nur wenige befassen sich mit den Auswirkungen auf Magen und Verdauungstrakt – was etwa für die Beurteilung von nanotechnologisch veränderten Lebensmitteln wichtig wäre.

Toxikologische in vivo Studien sind bis jetzt vor allem an Ratten und Mäusen durchgeführt worden. Sie haben unter anderem folgende Resultate erbracht:[96]

Es hat sich gezeigt, dass Nanopartikel einen beinahe uneingeschränkten Zugang zum Körper haben. Ob sie durch die Haut absorbiert werden können, ist zwar noch offen.[97] Aber sicher kön-

[92] Bisweilen wird argumentiert, dies käme einem Moratorium für die Gentechnologie gleich, da eine klare Unterscheidung zwischen synthetischer Biologie und Gentechnologie kaum möglich sei.

[93] Vgl. auch den Aktionsplan für Europa 2005-2009 der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, in dem der Risikoforschung – und auch anderen ethischen Aspekten der Nanotechnologie – erhebliche Bedeutung beigemessen wird (vgl. KOM 2005).

[94] Anfang 2006 wurde in Deutschland das wegweisende Projekt «NanoCare» auf den Weg gebracht. Dessen Ziel ist es, herauszufinden, «ob Nanopartikel ein besonderes Gefahrenpotenzial für Wissenschaftler in Forschungsabteilungen und für die Arbeiter in der Fertigung bilden» (Schwägerl 2006). Zu diesem Zweck sollen bei Degussa, Bayer und BASF Luftmessungen vorgenommen, die Nanopartikel genau charakterisiert und standardisierte Testsysteme für Wechselwirkungen mit dem Körper entwickelt werden. Auf diese Weise hofft man weltweit gültige Standards für den Umgang mit Nanopartikeln entwickeln zu können.

[95] Dennoch sind einige Forscher der Ansicht, in gewissen Bereichen werde zu wenig investiert: «(…) much of the research now happening is focused on the lungs. Very little is focused on the gastrointestinal tract – even though there are new toothpastes being developed that use nanotechnology (…). There's also very little so-called lifecycle research – how nanomaterials break down in the environment» (*More Research Urged on Nanoparticle Risks*, in: Herald News Daily, 11. Dezember 2005). Dieser Ansicht sind auch Oberdörster et al. 2005:829.

[96] Zum Folgenden vgl. Gen-Dialog 2005, Nanoforum Report 2005, Iku 2005, Nel et al. 2006, Oberdörster et al. 2005, Raloff 2005, RSRAE 2004.

[97] «(…) the published evidence on toxic hazards from such particles [wie das in Sonnencremes verwendete Titandioxid, A.B.] for skin penetration is incomplete, particularly in

nen zumindest einige von ihnen via Atmung (Lunge) sowie über den Verdauungstrakt in den Blutkreislauf gelangen[98] und von dort in Leber, Milz und Knochenmark vordringen und die Blut-Hirn-Schranke passieren.[99]

Wird eine hohe Dosis von Nanopartikeln eingeatmet, können diese toxisch wirken und Herzkrankheiten oder Asthma verstärken. Dabei haben künstlich hergestellte Nanopartikel (ebenso wie viele natürliche Nanopartikel) die Tendenz zu verklumpen. Sobald sich ein Mikrometer grosser Cluster von Nanopartikeln bildet, nimmt die Reaktivität ab. Zudem sind diese verklumpten Nanopartikel zu gross, um über die Lunge in den Blutkreislauf zu gelangen. Für vereinzelte Nanopartikel[100] gilt das genaue Gegenteil: sie sind hoch reaktiv und klein genug, um via Lunge in den Blutkreislauf zu gelangen. Das macht sie gefährlich.

Selbst Substanzen, die normalerweise unbedenklich sind – wie etwa Gold oder Titandioxid –, können, wenn sie als Nanopartikel auftreten, bestimmte chemische Reaktionen auslösen und entsprechende Schäden anrichten. Studien an Ratten, Mäusen, Kaninchen

individuals using these preparations on skin that has been damaged by sun or by common diseases such as eczema. Further careful studies of skin penetration by nanoparticles being considered for use, and the propensity of such particles to potentiate free radical damage, are desirable» (RSRAE 2004:50). Es gibt zudem Hinweise, dass Nanopartikel via Haut ins Lymphsystem und die Lymphknoten gelangen können (vgl. Oberdörster et al. 2005:837).

[98] Zwar scheinen die Mengenanteile der Nanopartikel in der Blutbahn nicht sehr hoch zu sein, «dennoch ist es ein neues Phänomen, dass körperfremde, unlösliche Partikel aus der Lunge ins Blut aufgenommen werden. (…) Bekannt ist [zudem], dass ein Teil der Nanopartikel beim Einatmen ohne Umwege sogar direkt ins Gehirn transportiert wird. Der Weg führt über die Nasenschleimhaut: Setzen sich Partikel auf den Riechfasern in der Nasenschleimhaut ab, können sie möglicherweise über Nervenzellen von der Nase direkt ins Riechzentrum des Gehirns gelangen. (…) unbekannt bleibt bisher, ob die Partikel im Gehirn weiter wandern und wie sie sich dort verhalten» (Swiss Re 2004:17).

[99] Es ist experimentell nachgewiesen, «dass diese Partikel in das Lungengewebe und in die dortigen Zellen eindringen und sich in weniger als einer Stunde mittels des Blutstroms weiter im Körper verteilen. Derzeit wird diskutiert, in welche Organe die Teilchen in welcher Anzahl transportiert werden, etwa Herz, Leber, Niere, Gehirn und Muskulatur, und was für eine Wirkung sie dort haben könnten» (Gen-Dialog 2005).

[100] Die für die Nanobiotechnologie von grosser Bedeutung sind, weshalb man sich bemüht, Verklumpungen zu vermeiden (s.o. S.28).

und Schweinen haben gezeigt: Nicht-verklumpte und nicht-gebundene Nanopartikel führen, wenn sie in einer gewissen Dosis eingeatmet werden, zu Entzündungszuständen in der Lunge.[101] Zudem sind diese Nanopartikel in der Lage, die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden und damit ins Gehirn zu gelangen.[102] Gewisse Nanopartikel wie etwa Zinkoxid können in die Haut eindringen[103] und hierdurch eventuell Zellen schädigen und allergische Reaktionen auslösen.

Natürlich stellt sich hier die Frage, ob bzw. inwieweit sich diese Resultate auf den Menschen übertragen lassen. Es gibt Hinweise, dass dies problematisch ist, weil der Prozess der Partikelinhalation etwa bei Ratten anders funktioniert als bei Menschen und anderen grossen Säugetieren: sie scheinen zum einen sensibler zu reagieren, zum anderen aber die Partikel dank eines aktiveren Immunsystems auch schneller abzubauen. Bei den wenigen direkten Messungen, die bei Menschen vorgenommen worden sind, hat sich allerdings gezeigt, dass zumindest gewisse Risikogruppen wie etwa Asthmatiker auf Nanopartikel empfindlicher reagieren als gesunde Menschen.

Auch zu den Risiken von Fullerenen («Buckyballs») und Nanoröhren («Nanotubes»), die für die Nanotechnologie insgesamt, aber auch für viele Bereiche der Nanobiotechnologie von zentraler Bedeutung sind, liegen erste Resultate vor. Experimente an Mäusen haben gezeigt, dass Nanoröhren giftiger sein können als Quartz, der schwerwiegende Gesundheitsschäden bei Menschen hervorrufen kann. Freilich stellt sich auch hier wiederum die Frage der Übertragbarkeit, zumal ähnliche Experimente bei Ratten keine eindeutigen Resultate erbracht haben.

Experimente mit Forellenbarschen zeigen dagegen klare Resul-

[101] Neue Tierstudien zeigen, dass besonders Mitarbeitende, die Nanotubes herstellen, gefährdet sind. Am NASA Center in Houston wurden etwa Mäuseversuche durchgeführt, aus denen hervorgeht, dass kommerziell verwendete Nanoröhren innerhalb von drei Monaten zu massiven Lungenschäden führen, infolge welcher einige Tiere sogar sterben. Die verabreichte Menge entspricht dabei etwa derjenigen, die Mitarbeitende in 17 Tagen einatmen könnten (vgl. Raloff 2005).

[102] «Whether nanoparticles in the brain have any pathological or clinical significance is uncertain» (Nel et al. 2006:625).

[103] Ob das in Sonnencremes verwendete Titandioxid in die Haut eindringen kann, ist nach wie vor strittig (vgl. Nanoforum Report 2005:17).

tate. Die Aufnahme von Buckyballs führt bei ihnen innerhalb von 48 Stunden zu schweren Hirnschäden. Wiederum kann man daraus nicht direkt auf den Menschen schliessen. Aber eine gewisse Sorge scheint doch gerechtfertigt, zumal man festgestellt hat, dass Buckyballs offenbar auch die Genexpression beeinflussen können, indem sie gewisse Gene aktivieren und andere deaktivieren. Sorge muss zudem machen, dass sich solche Buckyballs durch die Nahrungskette akkumulieren könnten, was sich schliesslich auch auf die Gesundheit des Menschen auswirken könnte.

Versuche an menschlichen Zellen haben gezeigt, dass Buckyballs von den Zellen offenbar nicht als Fremdkörper erkannt werden. Was das für die Gesundheit bedeutet, ist unklar und muss weiter erforscht werden.

Unbeschichtete Buckyballs können je nach Konzentration mehr oder weniger menschliche Zellen töten. Beschichtet man sie aber mit bestimmten Molekülen, wirken sie weniger toxisch.[104] Durch die Beschichtung wird verhindert, dass Sauerstoff- und Wassermoleküle sowie Ionen mit den Radikale der Kohlenstoffatome in den Buckyballs wechselwirken können.

Auch Quantenpunkte können Zellen schädigen, sofern sie unbeschichtet sind.

Nanoröhren ähneln in ihrer Form Asbestfasern: sie sind lang und nadelähnlich. Aber sie sind wesentlich kleiner. Was das hinsichtlich ihres Schadenspotenzials bedeutet, ist unklar:

«Carbon and other nanotubes have physical characteristics that raise the possibility of similar toxic properties [wie Asbest, A.B], although preliminary studies suggest that they may not readily be able to escape into the air in fibrous form. Such materials require careful toxicological assessment and should be treated with particular caution in laboratories and industry» (RSRAE 2004:50).

[104] «Die Chemikerin Vicki Colvin vom Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN) an der Rice University in Houston fügte bei *In-vitro*-Versuchen Buckyballs Kulturen von Hautzellen hinzu. Bei einer Konzentration von 20 Buckyballs pro Milliarde Lösungsmolekülen starb die Hälfte der Zellen ab. Colvin fand allerdings auch heraus, dass die Buckyballs weniger giftig sind, wenn man sie mit einfachen Molekülen umhüllt. «Dieses Verfahren könnte nützlich sein, um die Toxizität von Nanopartikeln zu tunen», sagt Colvin» (Boeing 2005:36).

Erste Studien scheinen die Gefährlichkeit von Nanoröhrchen zu bestätigen. So haben Forscher an der EMPA herausgefunden, dass Nanoröhrchen gerade dann besonders schädlich für Lungenzellen sind, wenn sie zu grösseren Nadeln zusammengeklebt sind. Der Zellbiologe Peter Wick kommentiert diesen Befund wie folgt: «Diese Agglomerate gleichen Asbestfasern – sowohl im Aussehen wie auch in ihrer Toxizität (…) Die scheinen also nicht ganz unbedenklich zu sein» (EMPA-News 2/2006, vgl. auch TA Swiss 2006:8f.).

Zusammenfassend kann man sagen, dass Nanopartikeln, Buckyballs und Nanoröhren in Tierversuchen gewisse toxische Wirkungen nachgewiesen werden konnten.[105] Inwiefern sie die menschliche Gesundheit schädigen können, ist aber noch nicht hinreichend geklärt. Man kann jedoch sicherlich nicht davon ausgehen, dass sie für den Menschen ungefährlich sind, vor allem, wenn sie in grossen Mengen in den Körper gelangen.[106] Dabei scheinen folgende Eigenschaften die wesentlichen Aspekte der Toxizität von Nanopartikeln zu sein:

- die Gesamtoberfläche[107] der Nanopartikel, denen ein Organ ausgesetzt ist (ihre Dosis);[108]

[105] Allerdings muss jede Art von Partikel separat untersucht werden. Hinsichtlich Lungentoxizität zeigt sich etwa, dass TiO_2 relativ gutmütig ist, auch wenn es als Nanopartikel wesentlich grössere Entzündungsauswirkungen hat als nicht-nanoskaliges TiO_2. Andere Nanopartikel dagegen sind sehr giftig, «possibly related to reactive groups on the large surface per unit» (Oberdörster et al. 2005: 826).

[106] «Nanopartikel, die als Rohmaterialien dienen, werden in grösseren Mengen in spezialisierten Fabriken hergestellt. Eine Exposition findet also hauptsächlich an den Orten am Arbeitsplatz statt, wo solche Grundstoffe hergestellt und verpackt werden. (...) Ein höheres Verbreitungspotenzial haben Nanopartikelpulver, die zur Verhinderung von Verklumpung behandelt wurden und somit länger in der Luft verweilen. Es versteht sich von selbst, dass besonders die hoch reaktiven Partikel für die exponierten Arbeiter kritisch sind» (Swiss Re 2004:33ff.).

[107] «It is not yet known to what extent the new or enhanced properties of nanomaterials will be associated with differences in their toxicity but (…) there is evidence that some substances are more toxic when in nanoparticulate form, probably caused in part by their greater surface area» (RSRAE 2004:71).

[108] Gesamtoberfläche und Gesamtpartikelzahl können zu einer Überforderung der Makrophagen, der Fresszellen des Immunsystems, führen. Es tritt ein so genannter ▸

- die chemische Reaktivität der Oberfläche, insbesondere die Fähigkeit, sich an Reaktionen zu beteiligen, welche freie Radikale freisetzen;[109]
- die Oberflächenladung und Benetzbarkeit durch Wasser, die im Wesentlichen bestimmt, ob Partikel durch Blutproteine (vor allem Albumin) spontan beschichtet werden;
- die physische Dimension der Partikel (Länge, Durchmesser), die es ihnen erlaubt, in ein Organ oder in Zellen einzudringen oder die ihre Entfernung durch das Immunsystem verhindert;
- möglicherweise auch ihre Löslichkeit, da sich zumindest gewisse Partikel auflösen könnten, bevor sie eine toxische Reaktion in Gang setzen können.

7.2 Risiken von Nanopartikeln für die Umwelt

Hinsichtlich der Umwelt ist davon auszugehen, dass mit der Entwicklung der Nanotechnologie, d.h. dem quantitativ zunehmenden Einsatz von Nanopartikeln in verschiedensten Produkten auch mehr ungebundene Nanopartikel in die Umwelt gelangen, nicht zuletzt deshalb, weil diese Produkte entsorgt bzw. rezykliert werden müssen.[110] Wie sich diese Partikel auf die Umwelt auswirken

«Overload» ein: «Diese Überlastung führt zu Stressreaktionen, die eine Entzündung im umliegenden Gewebe bewirken. Schlimmer noch: Die Fresszellen ziehen sich in tiefer liegendes Gewebe zurück und stehen somit im Aktionsfeld nicht mehr zur Verfügung. Weiter anfallende Partikel werden nicht mehr entfernt und können ihre reaktive Wirkung voll entfalten. Auch andere, zusätzlich eintretende Erreger wie Bakterien werden nicht mehr effektiv angegriffen» (Swiss Re 2004:16). Auch Oberdörster et al. 2005:824 halten fest: «The extraordinarily high number concentrations of NSPs per given mass will likely be of toxicologic significance when these particles interact with cells and subcellular components. Likewise, their increased surface area per unit mass can be toxicologically important if other characteristics such as surface chemistry and bulk chemistry are the same.»

[109] «Von diesen ist bekannt, dass sie das Körpergewebe schädigen und u.a. auch an der Entstehung von Tumoren beteiligt sein können» (TA Swiss 2003:43).

[110] Gemäss Oberdörster gibt es folgende Möglichkeiten, wie ungebundene Nanopartikel in die Umwelt gelangen können (vgl. auch TA Swiss 2006:8): 1) «Some [manufactured nanomaterials] are and others will be produced by the ton, and some of any material ▸

und welche Konsequenzen sie für die Nahrungskette haben, ist weitgehend unbekannt.[111] Man ist sich deshalb einig, dass die Risikoforschung in diesem Bereich unbedingt intensiviert werden muss.

Gemäss dem Bericht der Royal Society sollte sich eine Analyse der Risiken von Nanopartikeln für die Umwelt an folgenden Kriterien orientieren (vgl. RSRAE 2004:45):

- Persistenz. Eine Substanz ist persistent, wenn sie nicht innerhalb von zwei Monaten (im Wasser) bzw. sechs Monaten (in der Erde) um die Hälfte ihrer ursprünglichen Menge abgebaut wird.
- Bioakkumulation. Stoffe bzw. Substanzen sind bioakkumulativ, wenn sie eine ausgeprägte Tendenz haben, sich im Körperfett, in den Knochen oder Proteinen abzulagern – und sich über die Glieder der Nahrungskette zunehmend anzureichern

produced in such mass quantities is likely to reach the environment from manufacturing effluent or from spillage during shipping and handling». 2) «They are being used in personal-care products such as cosmetics and sunscreens and can therefore enter the environment on a continual basis from washing off of consumer products». 3) «They are being used in electronics, tires, fuel cells, and many other products, and it is unknown whether some of these materials may leak out or be worn off over the period of use». 4) «They are also being used in disposable materials such as filters and electronics and may therefore reach the environment through landfills and other methods of disposal». [Zu diesen Materialien gehörten auch Lebensmittelverpackungen, die Nanopartikel enthalten.] 5) «Scientists have also found ways of using nanomaterials in remediation. Although many of these are still in testing stages (…) dozens of sites have already been injected with various nanomaterials, including nano-iron» (Oberdörster et al. 2005:825). Welche gefährlichen Folgen es haben kann, wenn ungebundene Nanopartikel in die Umwelt gelangen, zeigt das Beispiel der Silber-Nanopartikel, die etwa aus Kleidern ausgewaschen werden: «Für den Menschen stellen diese Partikel kaum eine Gefahr dar, für Wasserlebewesen sind Silber-Nanopartikel jedoch hoch giftig, wie die amerikanische Umweltorganisation für sauberes Wasser im Juni 2006 in der Washington Post ausführte» (TA Swiss 2006:8).

[111] Es gibt – neben den oben erwähnten Experimenten – nur wenige Untersuchungen zur Auswirkung von künstlich hergestellten Nanopartikeln auf die Gesundheit von Tieren, und noch weniger Untersuchungen gibt es zu deren Auswirkung auf Pflanzen, Mikroorganismen und Ökosystemprozesse. Entsprechend dünn sind die diesbezüglichen gesicherten Kenntnisse.

(Erhöhung der Konzentration). Bei Nanopartikeln hängt dies vor allem von deren Oberflächeneigenschaften ab. So scheinen etwa Buckyballs in diesem Sinn bioakkumulativ zu sein (vgl. auch Nanoforum Report 2005:32f.).

- Toxizität. Stoffe, die toxisch sind, bewirken in den ihnen ausgesetzten Organismen direkte Schäden.

Je persistenter, bioakkumulativer und toxischer ein Stoff ist, so die diesen Kriterien zugrunde liegende Idee, desto grösser ist das Risiko, dass er die Umwelt schädigen könnte und desto dringender ist daher der Bedarf, ihn genau zu untersuchen.

Erste Untersuchungen lassen zumindest erahnen, was passieren könnte, wenn grosse Mengen von ungebundenen Nanopartikeln in die Umwelt gelangen.

Man könnte sich etwa vorstellen, dass die Kleinheit der Nanopartikel zu einer höheren Beweglichkeit führt. Da nicht gebundene Nanopartikel im Regelfall sehr reaktiv sind, ist damit zu rechnen, dass sie sich mit anderen Substanzen, möglicherweise auch Giften, in der Umwelt verbinden und diese dank ihrer Beweglichkeit weit verteilen könnten.[112] Wie dieses Risiko zu beurteilen ist, hängt neben ihrer Beweglichkeit auch von ihrer Aktivitätsdauer ab. Erste Tests mit eisenhaltigen Nanopartikeln haben gezeigt, dass diese Partikel im Boden wie im Wasser während mehrerer Wochen (re)aktiv sind (vgl. Nanoforum Report 2005:27).

Bekannt ist auch, dass Nanopartikel zur Klumpenbildung neigen. Verklumpte Partikel wie etwa Buckyballs können aber (im Wasser) für Bakterien giftig sein.

Zudem wurde der Nachweis erbracht, dass nanoskaliges Titandioxid hoch reaktiv ist, das heisst es erzeugt freie Radikale, die z.B. in der Lage sind, Bakterien zu vernichten. Deshalb machen

[112] Nanopartikel könnten Schadstoffe binden und durch das Erdreich transportieren. Angenommen, sie sind wegen ihrer Grösse sehr mobil, könnten «Schadstoffe in grösseren Mengen und mit höherer Geschwindigkeit in verschiedene Erdschichten gelangen. Problematisch könnte es mit Düngern und Pestiziden im Boden werden. Diese sind eigentlich nur begrenzt mobil, könnten aber durch die beweglichen Nanopartikel im Erdreich «huckepack» über weite Strecken transportiert werden. Da solche Partikel zum Teil sehr reaktiv sind, kann man sich auch diverse Reaktionen mit in der Umwelt vorhandenen Stoffen vorstellen, die zu neuen und unter Umständen toxischen Verbindungen führen» (Swiss Re 2004:29).

sich einige Experten Sorgen über die Auswirkungen dieser Partikel auf die Bodenökologie, wenn sie in grossen Mengen in die Umwelt gelangen sollten. Die gleiche Sorge gilt auch mit Blick auf die Freisetzung von Buckyballs.

Welche Auswirkungen ungebundene Nanopartikel auf Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen und Ökosystemprozesse haben, wird vielleicht schon bald etwas deutlicher werden, wenn man sich in den USA dazu entschliessen sollte, Nanopartikel dieser Art zur Sanierung von Altlasten bei grossflächigen Umweltverschmutzungen einzusetzen. Die Idee dabei ist folgende:

«Anstatt verschmutztes Grundwasser aufwändig hochzupumpen und zu behandeln, könnten reaktive Nanopartikel in den Boden gepumpt werden, wo sie Schadstoffe – zum Beispiel organische Lösungsmittel und Schwermetalle – durch eine chemische Reaktion in harmlose Substanzen umwandeln. (…) Neue, nanotechnologische Verfahren beruhen auf der Anwendung von künstlich hergestellten Nanopartikeln, die aufgrund ihrer kleinen Partikelgrösse eine Gesamtoberfläche von bis zu 1'000 Quadratmetern pro Gramm haben können. Diese aktive Oberfläche kann chemisch mit gewissen toxischen Kontaminanten im Erdreich, Grundwasser oder in der Luft reagieren und sie «neutralisieren». Zur Trinkwasseraufbereitung werden derzeit Nanopartikel getestet, die Silber enthalten und antibakteriell wirken. (…) Ähnliche Reinigungsmethoden werden auch im Zusammenhang mit der Verschmutzung durch industrielle Herstellungs- und Prozessverfahren diskutiert. Man geht davon aus, dass diese Art der Nanotechnologie umweltgerechte, industrielle Herstellungsprozesse begünstigt, indem toxische Abgase und andere prozessbedingte Nebenprodukte durch Nanopartikel entgiftet würden» (Swiss Re 2004:27).[113]

[113] Neben der Wasseraufbereitung und der Dekontamination von verseuchten Böden erhofft man sich auch dank des Energiesparpotenzials der Nano(bio)technologie Fortschritte im Bereich Umweltschutz. Einen Beitrag könnten hier neue Brennstoffzellen mit Nanotubes, innovative Beleuchtungsmittel oder neuartige Solarzellen, «die sich nach der Vorstellung der Forscher künftig auf Gebäude sprühen oder in Kleidung einbauen lassen sollen» (Swiss Re 2004:31), leisten, aber auch neue «Herstellungsverfahren, für die weniger Rohstoffe und Basismaterialien gebraucht werden und die weniger toxisches Abfallmaterial produzieren» (Swiss Re 2004:31). Zu erwähnen sind zudem ▸

Der weltweit führende Nanotoxikologe Günter Oberdörster gibt hier allerdings zu bedenken, dass zunächst in Tests geklärt werden müsste, ob diese Nanopartikel ungefährlich sind. Solche grossflächigen Umweltinjektionen mit Nanopartikeln könnten nämlich sowohl auf die Tiere wie auch auf Fauna und Flora – und damit auch auf die Nahrungskette gravierende Auswirkungen haben. Zudem warnt er vor zu grossen Hoffnungen. Denn es sei keineswegs ausgemacht, dass sich die in Frage kommenden Nanopartikel genügend schnell durch das Erdreich bzw. Wasser bewegen, um den ihnen zugedachten Zweck auch erfüllen zu können (vgl. Oberdörster et al. 2005:825).

Wenn Organismen ungebundene Nanopartikel, die sich im Wasser befinden oder in der Vegetation abgelagert haben, zu sich nehmen, könnten diese in die Nahrungskette gelangen.[114] Welche Auswirkungen das hätte, ist noch weitgehend unbekannt. Hierzu müsste man insbesondere wissen, wie bioakkumulativ solche Partikel sind. Zu dieser Frage gibt es bisher nur ganz wenige Studien. Eine davon hat untersucht, ob sich Buckyballs in der Nahrungskette aufwärts bewegen. Erste Resultate deuten darauf hin, dass sich diese Partikel tatsächlich in lebenden Zellen ansammeln, dass ihre Konzentration in Mikroben, in Würmern, die diese Mikroben essen, und in Tieren, die von diesen Würmern leben, über die Zeit zunimmt. Es ist daher möglich, dass solche Nanopartikel am Schluss via Konsum der entsprechenden Nahrungsmittel auch von Menschen aufgenommen werden (vgl. Nanoforum Report 2005:32).

Neben den aufgeführten allgemeinen Risiken von ungebundenen Nanopartikeln für die Gesundheit von Mensch, Tier und natürliche Umwelt, kann es, je nach nanobiotechnologischer Anwendungsmöglichkeit, spezielle Risiken geben, die einer eigenen Analyse bedürfen.

Bei der Technik der Mikroinjektion (s.o. S.54f.) etwa sollte man gemäss ETC Group neben dem Toxizitätsrisiko der Nanofasern für Mensch und Umwelt auch untersuchen, was passieren würde, wenn diese Fasern mit den an ihnen befestigten Gensequenzen via Nahrung von Tieren oder Menschen aufgenommen würden. Zudem wäre zu prüfen, welche ökologischen Auswirkungen es hätte, wenn sie in die Zellen anderer Organismen eindringen würden und diese dazu brächte, neue Proteine zu exprimieren. Und schliesslich bliebe auch zu klären, was mit ihnen geschieht, wenn die Pflanzen, in die sie injiziert worden sind, absterben und zerfallen (vgl. ETC Group 2004:10).

Die Risiken von nanoskaligen Pestiziden (s.o. S.55f.) können nach Meinung der ETC Group gegenwärtig nicht abgeschätzt werden (vgl. ETC Group 2004:14). Abzuklären ist – neben dem Toxizitätsrisiko für Mensch, Tier und Umwelt – nicht nur, ob nanoskalige Pestizide von den Pflanzen aufgenommen und so in die Nahrungskette gelangen könnten.[115] Es gibt auch andere potenzielle Gefahren, die, selbst wenn sie nicht als gravierend eingeschätzt werden, ernstzunehmen sind. So haben Mikrokapseln (in Insektiziden) eine ähnliche Grösse wie die von Bienen gesammelten Pollen. Sie könnten damit in den Bienenstock gelangen und den Honig vergiften. Die Frage ist, ob das auch für Nanokapseln zutreffen würde.

Eine besondere Risikoanalyse ist laut ETC Group auch dann erforderlich, wenn die nanobiotechnologische Anwendung mit gentechnologischen Modifikationen verbunden ist. Das ist etwa beim Partikel-Farming der Fall (s.o. S.58): «The release of plants genetically engineered to improve nanoparticle production would raise significant biosafety concerns, as could the prospect of crops containing bioactive nanoparticles mixing with the food supply» (ETC Group 2004:28).

nanotechnisch hergestellte Oberflächen, die etwa toxische und schwer zu entsorgende Chromverbindungen ersetzen könnten (vgl. Swiss Re 2004:34).

[114] Das könnte auch geschehen, wenn nanoskalige Wirkstoffe via Drug Delivery-Systeme in den Körper von Tieren gelangen. «It is not understood how nanoparticles persist in and move around the body, nor whether they can migrate to milk, eggs and meat» (ETC Group 2004:33).

[115] «Würden Pflanzen Nanopartikel über die Wurzeln absorbieren, könnten diese durch den Konsum von Nutzpflanzen in die Nahrungskette von Mensch und Tier gelangen. Abgesehen davon könnten die Nanopartikel zusätzlich noch Schadstoffe mitschleppen. Ob Pflanzen auch über die Luft Nanopartikel aufnehmen können, ist noch unbekannt» (Swiss Re 2004:29).

7.3 Für und wider ein Moratorium

In informierten Kreisen ist aufgrund der oben geschilderten Experimente und der daraus gewonnenen Erkenntnisse unumstritten, dass besonders die Verwendung von ungebundenen Nanopartikeln mit Risiken für Mensch, Tier, Pflanzen und Umwelt verbunden ist. Hinsichtlich der Frage, wie diese Risiken zu gewichten sind und was daraus praktisch folgt, gibt es allerdings keine Einigkeit.

Die Positionen sind freilich nicht so weit auseinander, wie man vielleicht vermuten könnte (und wie die Protagonisten selbst bisweilen zu glauben scheinen). Mit Ausnahme einer kleinen Minderheit von Interessenvertretern aus Wissenschaft und Industrie, nach deren Ansicht die beschriebenen Risiken vernachlässigbar sind, vertreten nämlich alle Parteien, seien das staatliche Stellen, Expertengremien, NGOs oder Versicherungen, die Meinung, diese Risiken seien von einer Art, dass bestimmte Vorsorgemassnahmen ethisch geboten sind. Die Auseinandersetzung dreht sich dann vor allem darum, welche Massnahmen das sind.

In diesem Zusammenhang spielt das Vorsorgeprinzip eine zentrale Rolle. Allerdings fehlen systematische Reflexionen zu den ethischen Grundlagen dieses Prinzips weitgehend. Zudem leidet die Diskussion daran, dass gewisse für eine klare Analyse unentbehrliche Differenzierungen ignoriert werden. So wird kaum je zwischen starkem und schwachem Vorsorgeprinzip unterschieden. Das führt dazu, dass die Positionsbezüge aus ethischer Sicht häufig nicht befriedigend begründet sind. Es wäre wünschenswert, dieses Manko zu beheben, auch wenn verständlich ist, dass die Diskussion in erster Linie mit praktisch-politischen Absichten geführt wird.

Zwei wichtige Stimmen in der bisherigen Debatte sind die kanadische ETC Group und die englische Royal Society. Die schon mehrfach erwähnte ETC Group, die sich bereits seit mehreren Jahren ebenso kritisch wie kompetent mit der Nano(bio)technologie beschäftigt, plädiert – zumindest in gewissen Hinsichten – für das starke Vorsorgeprinzip, während die Royal Society, die im Jahr 2004 einen viel beachteten Bericht zu Nanowissenschaft und Nanotechnologien veröffentlicht hat, eher das schwache Vorsorgeprinzip für angemessen hält.

Um diese Positionen besser verstehen zu können, ist es sinnvoll, sich das Vorsorgeprinzip und seine zwei wesentlichen Lesarten kurz zu vergegenwärtigen (zum Folgenden vgl. Rippe 2002).

Das Vorsorgeprinzip besagt, dass der Staat die Verantwortung für die Ergreifung derjenigen Vorsorgemassnahmen trägt, die erforderlich sind, um schwerwiegende oder irreversible Schäden an der Umwelt und/oder am Menschen, die durch neue Technologien und die durch sie hervorgebrachten Produkte einzutreten drohen, zu verhindern; und dies auch dann, wenn es noch keine wissenschaftlich hinreichend fundierte Risikoabschätzung gibt. Die starke Lesart dieses Prinzips betont drei Punkte:

- Umkehr der Beweislast. Nicht der Staat, sondern der Befürworter (Produzent) einer riskanten Technologie muss ihre Ungefährlichkeit beweisen (wie etwa im Bereich Arzneimittel oder Lebensmittelzusätze).
- Betonung des Nicht-Wissens. Das Prinzip der wissenschaftlichen Beweisbarkeit wird abgelehnt. Ökologische und biologische Zusammenhänge sind zu komplex, um mit den Mitteln der Wissenschaft vollständig erklärt werden zu können.
- Enthalte Dich im Zweifel. Jede Tätigkeit, die die Umwelt oder den Menschen langfristig gesehen schwerwiegend schädigen könnte, muss verboten werden.

Die schwache Lesart setzt sich von diesen drei Punkten auf folgende Weise ab:

- Beibehalten der Beweislast. Gemäss der allgemeinen Regel «im Zweifel für die Freiheit» darf der Staat erst dann regulierend eingreifen, wenn ihm der Nachweis der Gefährlichkeit einer Technologie oder eines Produkts gelungen ist.
- Führe eine sorgfältige Risikoanalyse durch. Deren Ziel ist es, die Risiken einer Technologie – Wahrscheinlichkeit und Schadensausmass – wissenschaftlich zu bestimmen.
- Sorge vor, aber handle. Auch wenn der wissenschaftliche Beweis der Ungefährlichkeit einer Technologie aussteht, ist es erlaubt, diese zu entwickeln. Allerdings hat der Staat das Recht bzw. die Pflicht, deren Befürwortern Vorsichtsmassnahmen aufzuzwingen, die die Risiken minimieren.

Im Kern geht die gegenwärtige Debatte darum, ob sich mit Bezug auf die Nano(bio)technologie ein Moratorium rechtfertigen lässt oder nicht.[116] Die ETC Group ist ein entschiedener Verfechter

[116] Moratorium bedeutet soviel wie Aufschub oder Verzögerung (lateinisch morare: ▸

eines Moratoriums. Mit Berufung auf das (starke) Vorsorgeprinzip (vgl. ETC Group 2003:72) fordert sie ein Moratorium für den Einsatz von synthetischen Nanopartikeln in Laboratorien und in kommerziell vertriebenen Produkten:

«ETC group has called for a moratorium on nanotech research and new commercial products until such time as laboratory protocols and regulatory regimes are in place to protect workers and consumers, and until these materials are shown to be safe» (ETC Group 2005:16).

Das impliziert auch: 1) Alle Nahrungsmittel und Getränke, die künstlich hergestellte Nanopartikel enthalten, sollten von den Gestellen entfernt werden, bis eine Regulierung in Kraft gesetzt wird, die die speziellen Eigenschaften dieser Partikel berücksichtigt, und bis der Nachweis erbracht ist, dass die Produkte sicher sind. 2) Nanohaltige Pestizide und Düngemittel sollten nicht verwendet werden, bis ihre Sicherheit geklärt ist. Zudem wird ein sofortiges Moratorium für Laborexperimente und die Freisetzung von Materialien aus der synthetischen Biologie gefordert, solange, bis eine gründliche Analyse der Gesundheits-, Umwelt- und sozioökonomischen Implikationen vorliegt (vgl. ETC Group 2004:54).[117]

Die ETC Group macht die Aufhebung des Moratoriums von zwei Bedingungen abhängig: Erstens müssen Arbeiter und Konsumenten vor den Gefahren von Nanoprodukten geschützt sein; zweitens muss der Nachweis erbracht sein, dass die verwendeten Materialien auch mit Blick auf die natürliche Umwelt sicher sind.

«verzögern, aufschieben») und bezeichnet die Unterbrechung einer bestimmten Tätigkeit für einen festgelegten Zeitraum bzw. die zeitlich begrenzte Aufhebung der Erlaubnis dieser Tätigkeit. Während des Nanotech-Moratoriums soll die Risikoforschung im Nanobereich bis zu dem Punkt vorangetrieben werden, an dem die mit Nanopartikeln verbundenen Risiken zuverlässig abgeschätzt werden können. (Allerdings ist fraglich, wie das möglich sein soll, wenn auch die Forschung im Labor unter das Moratorium fällt.)

[117] Der Bericht der ETC Group von 2003 hat die viel beachtete öffentliche Intervention von Prinz Charles provoziert, in der er vor den Gefahren der Nanotechnologie warnt. Auch Greenpeace (2004) fordert ein Moratorium für die Freisetzung von Nanopartikeln in die Umwelt, solange nicht klar ist, ob diese für Mensch und Umwelt ungefährlich sind.

Wer den Nachweis erbringen soll, wird nicht gesagt. An anderer Stelle (vgl. ETC Group 2003:72) aber ist explizit die Rede davon, dass die Befürworter einer neuen Technologie die Beweislast tragen. Insofern vertritt die ETC Group in diesem Punkt das starke Vorsorgeprinzip. Der Aspekt der Betonung des Nicht-Wissens spielt dagegen auch bei den Verfechtern eines Moratoriums eine eher untergeordnete Rolle. Allgemein halten die Moratoriumsbefürworter es durchaus für möglich, mit wissenschaftlichen Mitteln Schadensausmass und Eintrittswahrscheinlichkeit mit hinreichender Genauigkeit bestimmen zu können, selbst wenn man sich nicht an einem unerreichbaren Objektivitätsideal orientiert und daher bereit ist zuzugestehen, dass die wissenschaftliche Diskussion nie zu einem definitiven Ende kommt.

Das erklärt auch, warum das ‹Enthalte Dich im Zweifel› nur eine Enthaltung unter Vorbehalt ist: In der gegenwärtigen Situation ist es angesichts des mangelnden Wissens, aber auch angesichts der bereits bekannten Indizien, die belegen, dass Nanopartikel nicht ungefährlich sind und im schlimmsten Fall langfristig durchaus schwerwiegende Schädigungen zeitigen können, ethisch geboten, sich zu enthalten (Moratorium), bis man ausreichende Kenntnisse der Risiken der Nanobiotechnologie hat. Auch die nanokritische ETC Group verlangt also keinen definitiven Verzicht. Diese radikale Position wird von niemandem vertreten. Allerdings hätte die Forderung, bis auf weiteres auch die Nano-Forschung auszusetzen, würde sie umgesetzt, weitreichende Konsequenzen, würde hierdurch die Risikoforschung doch sehr stark eingeschränkt, was in der Folge die Entwicklung der Nano(bio)technologie erheblich verzögern könnte.

Im Unterschied zur ETC Group lehnt die Royal Society ein Moratorium ab. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine bedingungslose, sondern bloss um eine qualifizierte Ablehnung. Sie argumentiert wie folgt (vgl. RSRAE 2004:77f., 83): Ein Moratorium, wie es die ETC Group fordert, wäre gerechtfertigt, wenn es (i) bereits hinreichende wissenschaftliche Belege für die negativen Auswirkungen von Nanopartikeln auf Mensch und Umwelt gäbe;[118] oder wenn es (ii) einen Konsens gäbe, dass ein Moratori-

[118] «(…) a sufficiently robust body of scientific evidence already available to politicians and regulators to warrant such a major intervention» (RSRAE 2004:77).

um auf der Grundlage des Vorsorgeprinzips nötig ist. Weder (i) noch (ii) ist gegeben. Wir haben nur einige erste Indizien, dass Nanopartikel toxischer sein könnten als grössere Partikel desselben Materials. Zudem scheint das Risiko von schwerwiegenden und irreversiblen Schädigungen relativ klein zu sein, sofern die entsprechenden angemessenen Vorsichtsmassnahmen getroffen und eingehalten werden. Insofern vertritt die Royal Society das schwache Vorsorgeprinzip.[119] Es wird nicht eine, wenn auch zeitlich befristete, Enthaltung gefordert, sondern verhältnismässige Vorsorgemassnahmen bei gleichzeitiger konsequenter Weiterentwicklung der Nano(bio)technologien.[120] Mit ‹verhältnismässigen Vorsorgemassnahmen› ist zweierlei gemeint: 1) eine Intensivierung der Risikoforschung und 2) Massnahmen zur Risikominimierung.

Die Royal Society verlangt, dass innerhalb der Risikoforschung besonderes Augenmerk auf die toxikologische Erforschung von ungebundenen Nanopartikeln gelegt wird (vgl. RSRAE 2004:42) (1).[121] Solange man aber hinsichtlich der Toxizität von Nanopartikeln keine gesicherten Erkenntnisse hat, sollte man davon ausgehen, dass sie schädlich sein können. Die Arbeitnehmer, die solche Partikel herstellen, sollten deshalb durch die üblichen Methoden industrieller Hygiene – Atemschutz, angemessene Informationen über potentielle Gefahren, Überwachung der Konzentration von Nanopartikeln an den Produktionsstätten, Verwendung von Filtern – geschützt werden (2).[122] Zudem sollten die für eine praktische Anwendung vorgesehenen Nanopartikel einem von den zuständigen Behörden kontrollierten, umfassenden «Safety Assessment» unterzogen werden, bevor sie in Produkten verwendet werden dürfen. Die von den Herstellern zu liefernden Daten und auch die zur Datenerzeugung benutzten toxikologischen Testverfahren bzw. deren Methodologie sollten gemäss Auffassung der Royal Society während dieses Assessment-Verfahrens öffentlich

[119] Ebenfalls für ein schwaches Vorsorgeprinzip plädiert die Swiss Re in ihrem viel beachteten Bericht von 2004. Sie tritt ein für die Weiterentwicklung der Nano(bio)technologie, hält es aber gleichzeitig für erforderlich, die Risikoforschung zu intensivieren und adäquate Schutzmassnahmen zu ergreifen. Die Autoren beschreiben die gegenwärtige Situation aus ihrer Versicherungsoptik als eine der Ungewissheit: Weder Wahrscheinlichkeit noch Ausmass der Schäden, die durch Nanopartikel bzw. nanohaltige Produkte entstehen könnten, sind nach ihrem Dafürhalten versicherungstechnisch berechenbar. Schäden, auch solche schwerwiegender und irreversibler Art, können indes nicht ausgeschlossen werden Deshalb fordern sie die «proaktive Einführung von Schutzmassnahmen angesichts möglicher Risiken, die von der Wissenschaft heute – aufgrund mangelnden Wissens – weder bestätigt noch dementiert werden können» (Swiss Re 2004:47). Dabei besteht folgende Schwierigkeit: «Einerseits möchte man nicht unnütz teure Schutzmassnahmen ergreifen, die sich möglicherweise negativ auf die weitere wirtschaftliche Entwicklung auswirken könnten. Andererseits dürfen weder Mensch noch Umwelt mit Gefahren belastet werden, die hätten vermieden werden können» (Swiss Re 2004:47). Ohne sich dessen bewusst zu sein, geht die Swiss Re teilweise – beinahe – noch einen Schritt weiter und plädiert für ein starkes Vorsorgeprinzip. Für dieses gilt insbesondere eine Beweislastumkehr: der Produzent eines Nanoproduktes müsste dessen Unbedenklichkeit nachweisen. Allerdings schränkt der Bericht sogleich wieder ein, einzelne Industrieunternehmen seien damit überfordert. Es müsse hier um eine koordinierte und gesetzlich geregelte Anstrengung gehen, in die auch öffentliche Forschungsinstitute eingebunden sind (vgl. Swiss Re 2004:48).

[120] «(…) we are of the view that sensible, pragmatic steps can be taken now by regulators to control possible risks from new manufactured nanoparticles without the need for a cessation of development activity, and that such steps should be taken alongside action to understand further the possible mechanisms of toxicity» (RSRAE 2004:75).

[121] Es ist zu bemerken, dass insbesondere die Toxizitätsforschung in den letzten Jahren stark angezogen hat. Jeden Monat werden eine oder zwei Studien zur Toxizität von Nanopartikeln veröffentlicht (vgl. Nano Report 2005:1). Auf Europäischer Ebene sind die Forderungen des Berichts der RSRAE inzwischen positiv aufgegriffen worden. So heisst es im ‹Aktionsplan für Europa› der Europäischen Kommission: «Auf allen Stufen des Lebenszyklus der Technologie, vom Entwurf einschliesslich der FuE, über die Herstellung, Verteilung und Verwendung bis zur Entsorgung oder der Wiederverwertung muss eine verantwortungsvolle Bewertung der Risiken für die menschliche Gesundheit, die Umwelt, die Verbraucher und die Arbeitnehmer durchgeführt werden. So müssen etwa vor Beginn der Massenproduktion technisch hergestellter Nanomaterialien geeignete Vorabbewertungen erfolgen und Verfahren für die Risikobeherrschung erarbeitet werden. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei Produkten zu widmen, die bereits oder beinahe auf dem Markt sind, wie etwa Haushaltprodukte, Kosmetika, Pestizide, Materialien, die in Berührung mit Lebensmitteln kommen, medizinische Produkte und Geräte» (KOM 2005).

[122] Der Bericht der Swiss Re macht allerdings darauf aufmerksam, dass Filter zumindest beim gegenwärtigen Stand der Filtertechnik keinen hinreichenden Schutz gewährleisten können (vgl. Swiss Re 2004:33ff.).

zugänglich sein (vgl. RSRAE 2004:73, 83) (2). Insofern vertritt auch die Royal Society eine Umkehr der Beweislast und damit ein starkes Vorsorgeprinzip.[123]

Hinsichtlich der Freisetzung von Nanopartikeln in der Umwelt vertritt die Royal Society eine Position, die sich von derjenigen der ETC Group bestenfalls graduell unterscheidet und einer Moratoriumsforderung bisweilen sehr nahe kommt. Sie empfiehlt nämlich allgemein, dass die Freisetzung von Nanopartikeln in die Umwelt so weit wie möglich vermieden werden sollte, bis man mehr über deren Auswirkungen weiss. Hinsichtlich des Gebrauchs von ungebundenen Nanopartikeln für die Entgiftung von kontaminierten Böden und verschmutztem Grundwasser geht sie noch einen Schritt weiter: dieser sollte vollständig verboten sein, bis der Nachweis erbracht ist, dass der potenzielle Nutzen den potenziellen Schaden überwiegt (vgl. RSRAE 2004:47).

Die Royal Society räumt ein, dass ihre Position auf dem gegenwärtigen, noch sehr unvollständigen Kenntnisstand beruht und insofern als vorläufig zu verstehen ist. Das heisst natürlich auch, dass eine Neubeurteilung dieser Position erforderlich werden könnte, wenn die Risikoforschung zeigen sollte, dass sich die mit Nanopartikeln tatsächlich verbundenen Gefahren für Mensch und Umwelt wesentlich von den zum jetzigen Zeitpunkt eher hypothetisch angenommenen Gefahren unterscheiden.

[123] «(…) responsibility for the assessment of the safety of the inclusion of free nanoparticles in products rests with the manufacturer or supplier» (RSRAE 2004:73). Die Royal Society betont dies vor allem mit Blick auf bereits auf dem Markt erhältliche Kosmetika und Sonnencremes, die Nanopartikel wie Titandioxid (TiO_2) enthalten. Freilich müssen neue Substanzen in Kosmetika von den zuständigen EU-Behörden bereits jetzt zugelassen werden. Das galt auch für Titandioxid und Zinkoxid (als UV-Filter), auch in ihrer nanoskaligen Grösse. Titandioxid wurde im Jahr 2000 in allen Formen zugelassen, für Zinkoxid wurden 2003 zusätzliche Abklärungen für Partikel unter 200 nm verlangt (vgl. RSRAE 2004:73). Kriterien der Zulassung von TiO_2 waren: 1) TiO_2 stellt kein Risiko dar, weil es offenbar nicht in die Haut eindringen kann; 2) Beschichtungen können seine Reaktivität reduzieren (ebd.). Obwohl nanoskaliges TiO_2 in Sonnencremes für sicher erklärt worden ist, bleibt gemäss Royal Society zu klären, ob es, wenn es z.B. auf durch Sonnenbrand oder Ekzeme beschädigte Haut aufgetragen wird, Schaden anrichten kann. Angesichts des Gefahrenpotentials hält es die Royal Society sogar für erwägenswert, Sonnencreme-Produkte, die Nanopartikel enthalten, als Medikamente zu betrachten (vgl. RSRAE 2004:44). Zudem tritt sie für eine Kennzeichnungspflicht ein: Produkte der genannten Art sollten im Sinne transparenter Kundeninformation einen Hinweis auf die in ihnen vorhandenen Nano-Substanzen enthalten (vgl. RSRAE 2004:73,83).

8. Die Gerechtigkeitsdimension: Nachhaltigkeit und Nano-Divide

Neben den risikoethischen Fragen sind vor allem Fragen der Gerechtigkeit für eine ethische Beurteilung der Nano(bio)technologie in kurz- und mittelfristiger Perspektive bedeutsam. Wiederum ist festzustellen, dass die Diskussion – im deutschen wie im angelsächsischen Raum – über eine ansatzweise Identifikation der relevanten ethischen Probleme noch nicht hinaus gekommen ist. Deshalb wäre es auch in diesem Zusammenhang wünschenswert, eine systematischere Analyse durchzuführen, die die verwendeten Begriffe wie Gerechtigkeit oder Nachhaltigkeit zunächst definiert, und sie erst in einem zweiten Schritt zu den Nanobiotechnologien in Beziehung setzt.

In einer ersten Annäherung lässt sich sagen, dass mit Blick auf die Nanobiotechnologien primär Fragen der Verteilungsgerechtigkeit für relevant erachtet werden. Dabei wird befürchtet, dass insbesondere die armen Länder des Südens, aber auch die armen Bevölkerungsschichten in den reichen Ländern des Nordens, von den Errungenschaften der Nanotechnologie ebenso wenig werden profitieren können wie von anderen technologischen Entwicklungen und dass dies die Kluft zwischen Arm und Reich auf ethisch nicht zu rechtfertigende Weise vertiefen wird (vgl. RSRAE 2004:52).[124]

Dieser intragenerationelle Gerechtigkeitsaspekt, der unter dem Stichwort der ‹Nano-Divide› thematisiert wird, wird ergänzt durch einen intergenerationellen Gerechtigkeitsaspekt. Bei diesem Aspekt geht es um die erhofften positiven sowie die möglichen negativen Auswirkungen der Nano(bio)technologie auf die Lebensgrundlagen künftiger Generationen. Die mit diesen beiden Aspekten verbundenen Fragen werden häufig als Fragen der Nachhaltigkeit der Nano(bio)technologie diskutiert (vgl. zum Folgenden Ach/Jömann 2005:197ff., Baumgartner 2004:44f., Grunwald 2004:73ff).[125]

Betrachten wir zunächst den intergenerationellen Aspekt. Nachhaltigkeit bedeutet in dieser Hinsicht: die Erhaltung oder Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen in Einklang zu bringen mit der langfristigen Sicherung der Lebensgrundlagen. So verstanden, hat die Nanobiotechnologie nach übereinstimmender Meinung praktisch aller Fachleute ein grosses Nachhaltigkeitspotenzial. Von ihrem Einsatz erwartet man insbesondere «deutliche Entlastungseffekte für die Umwelt (…): Einsparung von stofflichen Ressourcen, die Verringerung des Anfalls von umweltbelastenden Nebenprodukten, die Verbesserung der Effizienz bei der Energieumwandlung, die Verringerung des Energieverbrauchs und die Entfernung umweltbelastender Stoffe aus der Umwelt» (Grunwald 2004). Für diese Nachhaltigkeitsbewertung zentral sind vor allem Lebenszyklus-Analysen, die die positiven und negativen Auswirkungen der Produkte der Nanotechnologie über ihren ganzen «Lebensweg» – vom Rohmaterial bis zur Entsorgung – hinweg analysieren. Da sich die Nanobiotechnologie noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet, sind in dieser Hinsicht allerdings erst mögliche Nachhaltigkeitseffekte abschätzbar.

Bezüglich des intragenerationellen Aspekts wird unterschieden zwischen den möglichen Auswirkungen der Nanobiotechnologie auf die Gesellschaften der reichen Länder des Nordens einerseits, auf das Verhältnis zwischen diesen Ländern und den armen Ländern des Südens andererseits.

[124] Auch hierbei, so Grundwald, handelt es sich nicht um neue ethische Aspekte von Technik, «sondern um Verstärkungen auch bislang schon virulenter Verteilungsprobleme. Probleme der Verteilungsgerechtigkeit gehören prinzipiell zu den ethischen Aspekten moderner Technik» (Grundwald 2004:74f.).

[125] Zum Konzept der Nachhaltigkeit gehören allerdings nicht nur die intra- und die intergenerationelle Gerechtigkeit, sondern auch Aspekte wie die Integration von Ökonomie und Ökologie, eine bestimmte Vorstellung von Lebensqualität – dass menschliches Wohlergehen nicht bloss in wachsendem Einkommen besteht –, sowie ein Partizipationsgedanken, nach welchem das, was nachhaltig ist, in einer Diskussion gemeinsam bestimmt werden sollte (vgl. Grunwald/Kopfmüller 2006). Vereinfacht gesagt besteht der philosophische Kerngehalt des Nachhaltigkeitskonzepts darin, die so genannte Lockesche Proviso-Idee auf das Verhältnis zwischen gegenwärtigen und zukünftigen ▸

In beiden Hinsichten stehen Fragen der gerechten Verteilung von und des fairen Zugangs zu den Produkten der Nanobiotechnologie im Mittelpunkt. Es besteht allgemein die Befürchtung, dass sich im Verlauf der Entwicklung dieser Technologie die Kluft zwischen Reich und Arm auf ethisch problematische Weise weiter vertiefen wird. Als Beispiel wird die Nano-Medizin angeführt (vgl. Baumgartner 2004:44, Grunwald 2004). Diese Medizin, so die Annahme, wird zumindest am Anfang sehr teuer sein, so teuer, dass sich nicht nur die zwischen den reichen Gesellschaften des Nordens und den armen Gesellschaften des Südens, sondern auch die innerhalb der reichen Gesellschaften des Nordens bestehenden Ungleichheiten im Zugang zu medizinischen Leistungen weiter verstärken könnten.[126]

Der Begriff der ‹Nano-Divide› – der den Begriffen ‹Digital Divide› und ‹Genomics Divide› nachgebildet ist (vgl. Mnyusiwalla et al. 2003:11, Singer et al. 2005) – bezieht sich auf diese Befürchtung einer durch die Nano(bio)technologie verursachten zunehmenden Kluft zwischen Reich und Arm, besonders zwischen den reichen Ländern des Nordens und den armen Ländern des Südens.

«Allen drei Begriffen ist gemein, dass sie auf die Wahrscheinlichkeit einer ungleichen Verteilung von Chancen und Lasten neuerer Technologien hinweisen sollen. Wird die Ungleichheit zwischen Gruppen mit und ohne Zugang zu den Vorteilen neuer Technologien zu gross, kann von einer Spaltung (divide) gesprochen werden» (Ach/Jömann 2005:198).

Es herrscht die Meinung vor, dass man solche Spaltungen im Zugang zu neuen Technologien – vor allem eine allzu grosse Differenz zwischen dem reichen Norden und dem armen Süden – vermeiden sollte, weil diese Technologien gerade für die ökonomische Entwicklung der armen Länder unverzichtbar sind (vgl. Mnyusiwalla et al. 2003:11). Falls sie von deren Vorteilen nicht profitieren können, drohen die Armen noch ärmer und damit die Kluft zwischen Arm und Reich noch grösser zu werden.

Angenommen, es gibt eine moralische Pflicht der reichen Industriegesellschaften, den Entwicklungs- und Schwellenländern nicht nur nicht zu schaden, sondern ihnen zu helfen,[127] stellen sich aus ethischer Sicht hinsichtlich der Rolle der Nano(bio)technologie zwei Fragen. 1. Inwieweit könnte Nano(bio)technologie dazu beitragen, die Lebensverhältnisse der Menschen in Entwicklungs- und Schwellenländern zu verbessern? 2. Werden durch die Förderung der Nano(bio)technologie wichtige Interessen oder Rechte der Menschen des Südens verletzt?

Ad 1. Auch wenn die These: die industrialisierte Welt gewinnt – die Entwicklungsländer verlieren, vermutlich zu einfach ist (vgl. UNESCO 2006:13), ist die überwiegende Mehrheit der Fachleute der Meinung, dass die Anfangsinvestitionen und das erforderliche Know-how im Bereich Nano(bio)technologie so hoch sind, dass vielen Entwicklungsländern die nötigen finanziellen Mittel und das nötige Wissen fehlen werden. Dagegen ist eine Minderheit der Ansicht, dass die Entwicklungsländer sehr wohl von dieser Technologie profitieren könnten, vor allem wenn eine günstige Massenproduktion nanotechnologischer Produkte möglich wäre (Mnyusiwalla et al. 2003:11) – und dass sie auch in der Lage sind, solche Produkte weitgehend aus eigener Kraft zu entwickeln.

Mehrere Entwicklungs- und Schwellenländer scheinen sich für diesen Weg entschieden zu haben und investieren zum Teil beträchtliche Summen in die Nanotechnologie. Zu erwähnen ist hier

Generationen zu übertragen. Diese Idee besagt: Niemand darf so viel Natur in sein Eigentum verwandeln, dass andere keine Möglichkeit mehr haben, selbst Eigentum zu erwerben (durch Erstaneignung und Arbeit). Auf Generationen übertragen bedeutet das: Keine Generation hat das Recht, die natürlichen Grundlagen allein für sich zu verwenden. Sie muss künftigen Generationen genügend davon übriglassen, damit diese entweder a) die Chance haben, ihre eigenen Lebenspläne zu verwirklichen, worin auch immer diese bestehen mögen (schwache Nachhaltigkeit); oder b) die Chance haben, bestimmte Optionen zu verwirklichen (starke Nachhaltigkeit).

[126] Was häufig nicht erwähnt wird: Unter Gerechtigkeitsgesichtspunkten wäre ein solcher ungleicher Zugang nur ungerecht, wenn es ein Recht auf gleichen Zugang zu denjenigen medizinischen Leistungen gibt, die die bestmögliche Behandlung garantieren. Dieses Recht bildet zwar die faktische normative Grundlage unseres Gesundheitswesens. Ob es aber ethisch begründet bzw. begründbar ist, ist umstritten.

[127] Auch dies ein Punkt, der in der Diskussion zumeist als selbstverständlich vorausgesetzt wird. Aber es ist weder selbstverständlich, dass es eine solche Pflicht gibt, noch ist selbstverständlich, was diese, wenn es sie gibt, konkret verlangt.

vor allem China und Indien, aber auch Thailand, Südafrika oder Brasilien.[128] Singer et al. (2005) meinen, es wäre das klügste, diese Länder würden vor allem in für sie wichtige nanotechnologische Anwendungen investieren, die von den Industrieländern nicht als prioritär betrachtet werden, insbesondere im Bereich Energiespeicherung und Energieproduktion (etwa: Solarenergie oder Wasserstoffspeicherung mit nanobasierten Materialien[129]), sowie Produktionsverbesserungen in der Landwirtschaft und (Trink-) Wasseraufbereitung (etwa: günstige tragbare Nanofilter-Systeme zur Reinigung von kontaminiertem Wasser).[130] Die reichen Länder sollten ihnen dabei finanziell behilflich sein. Auf diese Weise könne die Ungleichheit zwischen Nord und Süd reduziert werden. Und die Nanotechnologie könnte viel zu einer besseren Befriedigung bestimmter elementarer Bedürfnisse beitragen.

Bloss, wäre es nicht gescheiter und auch ethisch besser, Entwicklungsländer würden diese Bedürfnisse auf andere Weise – und das heisst auch mit anderen, nämlich bereits ausgereiften und günstigeren Technologien befriedigen, statt viel Geld und Energie in eine Technologie zu stecken, deren kurzfristigen Erfolgsaussichten gering sind? Dies, so meinen Singer et al., «is a short-sighted view. All available strategies, from the simplest to the most complex, should be pursued simultaneously» (Singer et al. 2005).

Ad 2. Betrachtet man die möglichen Auswirkungen der Nano(bio)technologie auf die Entwicklungs- und Schwellenländer, sind drei Optionen zu berücksichtigen. Zwei Optionen sind bereits angesprochen worden: 1. Bestimmte nanobiotechnologische Entwicklungen etwa in der Nanomedizin könnten dazu führen, dass es den Menschen in den reichen Industriegesellschaften (noch) besser geht, wogegen die Menschen in den armen Ländern des Südens keinen Zugang zu diesen Entwicklungen haben und daher auch nicht davon profitieren können. 2. Andere nano(bio)technologische Entwicklungen etwa im Bereich Energieproduktion oder Wasseraufbereitung könnten für alle Menschen, vor allem aber für die Bewohner der Entwicklungs- und Schwellenländer, von Nutzen sein. 3. Noch nicht erwähnt wurde die Möglichkeit, dass sich die Nano(bio)technologie negativ auf basale Interessen der Entwicklungsländer auswirken könnte. Genau diese Befürchtung hegt etwa die ETC Group besonders mit Bezug auf Rohstoffe wie Baumwolle, Kautschuk (Naturgummi) oder Kupfer. Sie hält es für möglich, Nanomaterialien zu entwickeln, die hinsichtlich ihrer Funktionalität konventionelle Materialien (bzw. Rohstoffe) übertreffen; dies könnte bei entsprechend günstiger Produktion zu einer weitgehenden Ersetzung dieser konventionellen Materialien führen. In Textilien würden dann an Stelle von Baumwolle Nanofasern,[131] in

[128] «Most government investments are aimed at improved national corporate competitiveness in nanotechnology. Few seem to focus directly or even indirectly on the needs of the poor. The South African Nanotechnology Initiative (SANI) is an exception. SANI aims to establish a critical mass in nanotechnology R&D in South Africa for the benefit of all its citizens. Projects include the development of better and cheaper solar cells and nanomembrane technology for water. Another exception is an agreement among the governments of India, Brazil, and South Africa, who have identified potential areas of scientific cooperation, including nanotechnology research and efforts to treat HIV/AIDS» (Barker et al. 2005:12).

[129] Vgl. Barker et al. 2005:6.

[130] Zum gegenwärtigen Stand der Nanotechnologie-basierten Filter Systeme, vgl. Barker et al. 2005:5f. Im Unterschied zur Gentechnik spielen Fragen der Ernährung in diesem Zusammenhang keine Rolle. Das kann nicht überraschen, denn Nanofood – interaktive Lebensmittel und Getränke, nanoskalige Lebensmittelzusätze und nanotechnologisch hergestelltes Functional Food – ist bestenfalls für den Lebensmittelmarkt der reichen Länder des Nordens von Interesse, für die Linderung des Welthungers dagegen scheint er ohne Bedeutung zu sein.

[131] Die US-amerikanische Firma Nano-Tex hat eine nanobasierte Technologie zur Produktion von Textilien entwickelt und patentiert (vgl. ETC Group 2004:23). (In der Schweiz hat die Firma Schöller eine ähnliche Technologie für fleckenfreie Textilien entwickelt, die «NanoSphere» heisst.) Diese Technologie besteht aus drei Elementen: 1) ‹Nanohaare› werden mittels ‹Nanohaken› – eine Art Flaum aus molekularen Haken – an Textilfasern festgemacht. Die Haare verhindern, dass Flüssigkeiten in die Textiloberfläche eindringen können und machen sie so resistent gegen Flecken. 2) «Coolest Comfort». Versucht die Qualitäten von natürlicher Baumwolle wie das schnelle Trocknen in synthetischen Stoffen zu reproduzieren. 3) «Nano Touch». Hierbei handelt es sich um eine synthetische Faser, die die gleiche Beschaffenheit wie Baumwolle hat, nur dass sie viel stärker ist. Würde diese Technologie, wie erhofft, zu einem Blockbuster, würde sie die Nachfrage nach Baumwolle noch mehr reduzieren als dies bereits der Fall ist – mit gravierenden Auswirkungen auf die davon abhängigen Menschen in den Entwicklungsländern.

Autoreifen an Stelle von Kautschuk Nanopartikel[132] zum Einsatz kommen. Darunter würden in erster Linie die Entwicklungs- und Schwellenländer, die auf den Export dieser Rohstoffe angewiesen sind, leiden – die Kluft zwischen reichem Norden und armem Süden würde noch grösser.[133]

Besorgt äussert sich die ETC Group auch mit Bezug auf die (mögliche) Entwicklung einer nanobasierten Landwirtschaft. Technologien wie das ‹Precision Farming›, die eine grössere Produktivität bei geringeren Kosten versprechen, beruhen auf einer grossflächigen Landwirtschaft. Sollten sie sich etablieren, werden die Kleinbauern in allen Ländern unter zunehmenden Druck geraten (ETC Group 2004:20).[134] Dieser könnte sich durch Technologien wie die mikroinjektionsbasierte Terminatortechnologie noch weiter verstärken.

Weniger klar sind gemäss ETC Group die Auswirkungen des Partikel-Farmings (vgl. ETC Group 2004:28). Die Gewinnung von Nanopartikeln durch speziell gezüchtete gentechnisch veränderte Pflanzen, die auf einem entsprechend mineralreichen Boden angepflanzt werden, könnte auch in ärmeren Regionen eine gewisse Bedeutung bekommen. Allerdings ist dies doch eher unwahrscheinlich. Zumindest für Kleinbauern ist Partikel-Farming kaum geeignet, da es eine Technologie voraussetzt, die für sie unerschwinglich sein dürfte.

Und noch ein weiterer Punkt könnte das Ungleichgewicht zwischen reichem Norden und armem Süden vergrössern: die Verteilung und der Schutzumfang der (Schlüssel-)Patente im Bereich der Nano(bio)technologien (vgl. zum Folgenden Ach/Jömann 2005:201f., Barker et al. 2005:13ff., Baumgartner 2004:45, UNESCO 2006:17ff.). Wenn vor allem Firmen im reichen Norden Patente auf nano(bio)technologische Produkte haben, und wenn diese Patente sehr umfangreich sein sollten, besteht die Gefahr, dass der arme Süden von der Patentnutzung weitgehend ausgeschlossen bleibt. Die Produkte wären für einen Grossteil der Bevölkerung zu teuer. Und die einheimischen Firmen würden nicht über die Mittel verfügen, um Lizenzgebühren zu bezahlen, und wären deshalb auch im Bereich Forschung und Entwicklung benachteiligt.

Abgesehen davon werden in diesem Kontext ähnliche Probleme erörtert, die auch die Diskussion um die Biotech-Patente prägen. Analog zur Biotechnologie, wo es eine Kontroverse darüber gibt, ob es sich bei Genen oder Proteinen um patentierbare Erfindungen oder um nicht-patentierbare Entdeckungen handelt, ist in der Nanotechnologie-Debatte umstritten, ob Nanopartikel oder Nanoröhren patentierbare Erfindungen sein können. Zudem wird die Frage aufgeworfen, ob Patente auf nanobiotechnologische Anwendungen, die eine Mischung aus biologischen und artifiziellen Komponenten darstellen – wozu etwa die Mischwesen der synthetischen Biologie zählen – ethisch zulässig sind.[135] Und schliesslich wird

[132] Mehr als 50 Prozent des produzierten Naturgummis wird gegenwärtig für Autoreifen verwendet. Zur Qualitätsverbesserung und zur längeren Haltbarkeit benutzt man schon seit geraumer Zeit Carbon Black (so genannter amorpher Kohlenstoff bzw. Industrieruss), das auch Nanopartikel enthält. Im Moment werden Nanopartikel entwickelt, deren Zweck es ist, die Lebenszeit von Reifen wesentlich zu verlängern. Zunächst einmal sollen Reifen zweimal länger halten. Ziel ist, dass sie eine längere Lebensdauer haben als das Auto selbst. Dies schon würde die Nachfrage nach natürlichem Gummi massiv reduzieren mit den entsprechenden Folgen für die Kautschuk-Bauern in den Entwicklungs- und Schwellenländern, insbesondere in Thailand, Indonesien, Indien, Malaysia und China. Damit aber nicht genug. In letzter Konsequenz wird nämlich eine vollkommene Ersetzung des Gummis angepeilt, etwa durch ein Aerogel, ein superleichtes, extrem hitzebeständiges und wasserdichtes Nanomaterial, das aus 98% Luft und Milliarden von Nano-Luftblasen in einer Silikondioxid-Matrix besteht (vgl. ETC Group 2004:25).

[133] Vgl. auch Morrison 2005: «(…) many developing countries rely on natural resources such as metals, minerals and oil for much of their income. Nanotechnology offers the potential to reduce the dependency on these resources or even circumvent their use entirely. While this may have advantages for the environment and, in the long-term, costs, what is considered less is the effect that this decreased dependency will have on the economies of these developing countries» (Morrison 2005).

[134] «It is not small-scale farmers who will benefit from ubiquitous sensor networks, but the giant grain traders such as Cargill and ADM, who are positioned to aggregate data from several thousand farms in order to determine which crops are grown, by whom and what price will be paid, depending on market demand and global prices. Sensors will marginalize farmers' most unique assets – their intimate local knowledge of place, climate, soils, seeds, crops and culture» (ETC Group 2004:20).

[135] Der Einwand hier lautet, dass Lebewesen grundsätzlich nicht patentiert werden dürfen, weil sie hierdurch auf die gleich Stufe wie etwa Glühbirnen gestellt und so wie eine Ware behandelt würden (Kommodifizierungseinwand).

noch darauf hingewiesen, dass die Entwicklung neuer Produkte wegen der Verschränkung bisher getrennter Technologien in der Nano(bio)technologie deutlich erschwert werden könnte: «unüberschaubare Patentknäuel sind zu entwirren» (Boeing 2005:42).[136]

[136] «The danger created by excessive patenting in nanotechnology is that of the ‹patent thicket› (…). Patents on basic nanoparticles and processes using nanoparticles could end up being so finely and acutely propertized that the ability to create a novel material – for instance a water filtration system that uses carbon nanotubes to produce clean drinking water – could face nearly unnavigable complexity in terms of competing and overlapping patent claims» (UNESCO 2006:18).

9. Die militärische Dimension

In militärischer Hinsicht wird der Nanobiotechnologie ein ausserordentlich grosses Potenzial zugesprochen (vgl. zum Folgenden Ach/Jömann 2005:202ff., Arnall 2003:29ff., Altmann 2006, Boeing 2004:142ff., Boeing 2005:39f., ETC Group 2004:15f., Gsponer 2002, RSRAE 2004:55f., Paschen et al. 2004:107ff., 310ff., UNESCO 2006:19). Das erklärt auch, warum viel Geld in die Forschung und Entwicklung von militärischen Anwendungsmöglichkeiten fliesst.[137] Einige dieser Möglichkeiten scheinen kurz- und mittelfristig, das heisst in den nächsten 5 bis 15 Jahren, andere dagegen, falls überhaupt, nur langfristig realisierbar zu sein.

Auch im militärischen Bereich spielen viele der Nano(bio)techniken, die im zivilen Bereich wichtig sind, eine zentrale Rolle. Folgende drei Beispiele machen das deutlich.

[137] Das Nanobudget des amerikanischen Militärs beispielsweise beträgt gegenwärtig jährlich rund 200 Millionen Dollar. Ein relativ grosser Teil dieser Mittel, nämlich 50 Millionen Dollar, geht an das 2002 gegründete «Institute for Soldier Nanotechnology» am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Hauptziel dieses Instituts ist die Entwicklung einer neuen Uniform: Aus der heutigen Baumwoll-Nylon-Kleidung und der sperrigen Ausrüstung soll mit Hilfe der Nano(bio)technologie ein leichter und kugelsicherer Kampfanzug werden, «in den Schutzmassnahmen, medizinische Überwachung und Kommunikationsgeräte integriert sind» (Boeing 2004:143). Dazu sollen unter anderem neue nanobasierte und mit Nanosensoren ausgerüstete Materialien entwickelt werden, die die Soldaten dadurch, dass sich ihre Nanoporen schliessen, sobald die Sensoren einen biologischen Kampfstoff anzeigen, besser schützen. Zudem sollen diese Sensoren auch eine direkte medizinische Kontrolle und Betreuung der Soldaten möglich machen. Weiter plant man Camouflagetextilien, die eine eindeutige Erkennung der eigenen Truppen ermöglichen und dadurch «Friendly Fire»-Unfälle – das heisst den Beschuss der eigenen Truppenteile – verhindern.

1. Bei Land- und Luftfahrzeugen hofft man, durch nanobasierte Materialien Gewichtsverringerungen und verbesserte Panzerungen zu erreichen.
2. Es wird an der Entwicklung von nanobiotechnologischen Sensorsystemen – so genannten «Labs-on-a-Chip»-Systemen – gearbeitet, die in Lage sind, schon kleinste Mengen von Kampfstoffen zu entdecken.
3. Im Bereich der biologischen und chemischen Waffen ist der Einsatz von Nano-Trägerkapseln, die auf der Delivery-Technik basieren, vorstellbar. Damit rücken auch «ethnische Waffen», die auf der gezielten Zuschneidung von neuen Krankheitserregern beruhen, in den Bereich des Möglichen.

In der ethischen Diskussion der militärischen Anwendungsmöglichkeiten der Nano(bio)technologie stehen die Missbrauchsgefahren im Vordergrund.

1. Da die Grenze zwischen nicht-militärischer und militärischer industrieller Aktivität zusehends unscharf wird, wird auch die Proliferation von Waffen schwieriger zu kontrollieren sein. Wer das entsprechende nano(bio)technologische Wissen hat, wird die Waffen herstellen können. Das gilt dann natürlich auch für Diktaturen oder Terroristen. Diese könnten sich das erforderliche Know-how erwerben und nanobasierte Waffen produzieren.
2. Gewarnt wird in diesem Zusammenhang auch immer wieder vor einem neuen Wettrüsten:

   «Die Entwicklungsdynamik könnte sich dabei, wie vom Beispiel der chemischen und biologischen Waffen bekannt, daraus ergeben, dass ‹Verteidigungs›-Systeme gegen nanobasierte Waffen des Gegners für erforderlich gehalten werden» (Ach/Jömann 2005:203).

   Denn, so die Logik, man braucht nanobasierte Verteidigungs-Systeme, um sich gegen die Nano-Waffen des Gegners verteidigen zu können. Angesichts dieser möglichen gefährlichen Entwicklungen wird diskutiert, ob die bestehenden Rüstungskontrollen zur Überwachung ausreichen.

10. Privatheit und Datenschutz

Auf zweifache Weise könnte die Nano(bio)technologie bereits bestehende Datenschutzprobleme verschärfen und mit dem Recht auf Privatheit kollidieren (zum Folgenden vgl. Ach/Jömann 2005:194f., Baumgartner 2004:43f., ETC Group 2004:20f., Mehta 2002, Moor/Weckert 2004:306f., RSRAE 2004:53f.):[138] Einerseits durch den Einsatz von nanoskaligen Instrumenten in der medizinischen Diagnostik (a); andererseits durch die Entwicklung von Nanosensornetzwerken und Nanokameras, die an extrem leistungsfähige, mit Nanoelektronik ausgerüstete Computer gekoppelt sind und so vielfältige Formen einer besonders effektiven heimlichen Überwachung von Gruppen und Einzelpersonen ermöglichen (b).

Ad a. Die nanotechnologieunterstützte medizinische Diagnostik – zu denken ist insbesondere an die «Labs-on-a-Chip»-Systeme – wird, sofern sie sich technisch verwirklichen lässt, eine permanente Überwachung des Gesundheitszustands von kranken – aber auch von gesunden – Menschen erlauben. Das bedeutet auch, dass erhebliche Mengen von sensiblen und daher schützenswerten gesundheitsrelevanten Daten erhoben werden, Daten, die zudem «in manchen Fällen auch Auskunft über die Aktivitäten und Lebensgewohnheiten eines Patienten geben, in anderen nicht nur den aktuellen Zustand widerspiegeln, sondern auch eine

[138] Privatheit ist ein Begriff, der drei Interessen abdeckt, die alle etwas mit Kontrolle zu tun haben: 1) das Interesse an Kontrolle über Informationen, die einen selbst betreffen; 2) das Interesse an Kontrolle des Zugangs zum eigenen Körper bzw. zu sich selbst als Person; 3) das Interesse an Kontrolle über die Fähigkeit, selbst zu entscheiden, wie man leben möchte. Der moralische Wert der Privatheit besteht darin, dass sie uns durch den Schutz vor unerwünschten Eingriffen durch andere die freie Entfaltung unserer Individualität im Sinne dieser drei Interessen allererst ermöglicht. Das Recht auf Privatheit ist der gerechtfertigte moralische Anspruch, dass die so definierte Privatsphäre vor Verletzungen geschützt wird.

gesundheitliche Prognose erlauben» (Paschen et al. 2004:309). Problematisch an dieser Situation ist die Gefahr, dass diese Daten missbräuchlich verwendet werden. Wie kann das Recht auf informationelle Selbstbestimmung gewährleistet werden? Wie kann verhindert werden, dass Unbefugte sich einen Zugang zu diesen Daten verschaffen? Diese Fragen sind nicht neu. Sie werden schon seit geraumer Zeit vor allem im Zusammenhang der Gendiagnostik und der Errichtung von Biobanken intensiv diskutiert. Was aber befürchtet wird, ist, dass die damit verbundenen Datenschutzprobleme durch die beschriebenen nanobiotechnologischen Entwicklungen noch einmal eine ganz neue Dringlichkeitsqualität annehmen werden.[139]

Ad b. Eine nanotechnologische Vision ist das so genannte «Ubiquitous Computing»:

«Darunter wird die Allgegenwart von Informationsverarbeitung, die umfassende Vernetzung von Menschen und technischen Geräten und der damit einhergehende jederzeitige Zugriff auf Informationen von beliebiger Stelle aus verstanden» (Paschen et al. 2004:155).

Ein wesentliches Mittel hierzu sind kleinste, miteinander drahtlos vernetzte Computer (vgl. Paschen et al. 2004:195). «In Form von nanoskaligen Bauelementen, neuartigen Werkstoffen (z.B. für Displays) oder bislang nicht realisierbaren Bio-Sensoren ist die Nanotechnologie einer der entscheidenden Faktoren in dieser Entwicklung» (ebd.).[140] Die Verbindung von Nano-Sensor-Netzwerken, Computern und praktisch unentdeckbaren ferngesteuerten Nano-Kameras und Nano-Mikrophonen würde die Möglichkeiten, Individuen oder Gruppen heimlich und unter Verletzung ihrer Privatsphäre zu überwachen, beinahe ins Unermessliche steigern. Um die damit verbundene Gefahr zum Ausdruck zu bringen, hat Michael Mehta den Ausdruck «Nano-panopticism» geprägt (vgl. Mehta 2002).

[139] Zumal auch vorstellbar ist, dass «Körper, die gewissermassen als Datensender fungieren, mit technischen Systemen (…) vernetzt werden (…)» (Baumgartner 2004:44). Dies könnte etwa auf die Weise geschehen, dass am Körper direkt befestigte Sensoren und Labs-on-a-Chip medizinisch relevante Vitalparameter erfassen und die Daten an eine mobile Basisstation und von da aus an eine zentrale Datenbank oder Überwachungszentrale weiterleiten (vgl. Paschen et al. 2004:198ff.).

[140] Die ETC Group befürchtet, dass solche Nanosensoren auch verwendet werden könnten, um zu kontrollieren, ob die Bauern sich an Patentbestimmungen halten, und um auf fragwürdige Weise Informationen zu sammeln: «As sensors shrink to a size smaller than seeds, legal, security and environmental safeguards will be needed to prevent abuses of smart dust, including surveillance of foreign crops. Will smart dust be packaged along with patented seeds to police farmers' growing practices and patent compliance? Will corporate seeds or other inputs be laced with inexpensive sensors for companies to collect information in much the same way Internet companies collect data by infecting personal computers with invisible monitoring programs and tags (known as ‹spyware› and ‹cookies›)?» (ETC Group 2004:20f.).

11. Ethische Probleme der Nanomedizin

Neben der bereits erwähnten Missbrauchsgefahr durch nanobasierte diagnostische Instrumente wie Labs-on-a-Chip gibt es verschiedene weitere ethische Probleme der Nano-Medizin, von denen vier als besonders wichtig erachtet werden. Alle Kommentatoren sind sich einig, dass es sich hierbei um Probleme handelt, die, wiewohl sie in der Medizinethik schon seit einiger Zeit intensiv diskutiert werden, durch die (möglichen) mittel- und langfristigen Entwicklungen der Nanomedizin an Dramatik gewinnen könnten (vgl. zum Folgenden Ach/Jömann 2005:192ff., Baumgartner 2004:43, Gordijn 2004:205ff., TA Swiss 2003).

1. Zunehmende Diskrepanz zwischen diagnostischem Wissen und therapeutischem Können:

   «Allgemein wird erwartet, dass die Entwicklung neuer und besserer diagnostischer Instrumente und Verfahren deutlich schneller voranschreiten wird als die Entwicklung neuer Therapien. Die Nanomedizin wird somit voraussichtlich zu einem weiteren Anwachsen der Kluft zwischen diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten beitragen» (Ach/Jömann 2005:193).

   Eine solche Kluft besteht etwa in der klinischen Genetik bereits heute: Via Gentests können zum Beispiel unbehandelbare tödliche Erbkrankheiten wie Chorea Huntington – die unter Umständen erst viel später ausbrechen – diagnostiziert werden. Sie könnte sich aber mit der zunehmenden Fähigkeit zur präsymptomatischen Erkennung von Krankheiten, wie sie gerade ein zentrales Kennzeichen der Nanomedizin ist, weiter vertiefen. Umso wichtiger wird in diesem Kontext das Recht auf Nicht-Wissen werden, das den Patienten vor schweren Belastungen schützen soll, die für sein Leben eine existenzielle Bedrohung darstellen (können). Dieses Abwehrrecht schränkt das Recht auf Wissen natürlich nicht ein: Der Patient hat weiterhin einen Anspruch darauf, dass er über die Resultate einer Diagnose informiert wird, wenn er das wünscht.

   Es wird befürchtet, dass sich der Druck auf die Patientinnen und Patienten weiter erhöhen könnte, wenn sich eines Tages mit Hilfe von «Labs-on-a-Chip»-Systemen multiple Tests durchführen liessen. Denn sie müssten sich dann zwischen verschiedensten Tests entscheiden und sich zu diesem Zweck mit weiteren Krankheitsbildern auseinandersetzen – was von vielen als Belastung erfahren werden könnte.[141] Zudem liefern solche Tests oftmals sekundäre Informationen, das heisst Informationen, nach denen gar nicht gesucht wurde. Aus diesem Grund wird die Frage, wie man mit solchen Informationen umgehen sollte, zunehmend an Bedeutung gewinnen, dies erst recht, wenn der Einsatz von Nanobiotechnologie in der Herstellung entsprechender Tests dazu führen sollte, «dass sie den professionalisierten Raum ärztlichen Handelns verlassen und in den privaten Bereich wandern, indem sie zu Hause durchgeführt werden können, vergleichbar einem heutigen Schwangerschaftstest» (Baumgartner 2004:43).
2. Steigende Kosten? Wie stets bei Einführung von neuen medizinischen Diagnose- und Therapieinstrumenten stellt sich die Frage, ob dies zu einem Kostenanstieg führen wird. Viele Kommentatoren gehen davon aus, dass die neuen diagnostischen und therapeutische Möglichkeiten der Nanomedizin zum Zeitpunkt ihrer Einführung einen Preisschub bewirken werden. Zugleich werden aber zumindest längerfristig auch Kostensenkungen für möglich gehalten, da dank besserer Diagnosemöglichkeiten Krankheiten früher erkannt und entsprechend besser therapiert werden können; und da Medikamente dank der Drug Delivery-Technik viel gezielter verabreicht werden können und daher sowohl besser wirken als auch weniger Nebenwirkungen verursachen.
3. Primat der Vermeidung von Krankheiten. Sollte sich das Potenzial der Nanomedizin auch nur einigermassen umsetzen

[141] Andererseits wird durch die Zunahme an Tests die Entscheidungsautonomie der Patientinnen und Patienten gestärkt. Diese hätten entsprechend mehr Optionen zur Überprüfung verschiedenster Gesundheitsaspekte, zwischen denen sie – vorzugsweise unter fachlicher Beratung durch einen Arzt – wählen könnten.

lassen, werden viele Krankheiten sehr früh diagnostiziert und, sofern eine Therapie vorhanden ist, behandelt werden können. Das würde einerseits zu einer höheren Lebensqualität führen, könnte aber auch den gesellschaftlichen Druck zur präventiven Frühdiagnostik so weit erhöhen, dass der einzelne verantwortlich gemacht wird bzw. sich selbst die Schuld gibt, wenn eine Krankheit doch eintritt, etwa weil man ihm oder er sich selbst vorwirft, eine mögliche Präventionsmassnahme nicht ergriffen zu haben. Das «Sich-gut-und-gesund-Fühlen» liesse sich subjektiv immer weniger als Beleg oder Indiz für «tatsächlich gesund sein» verstehen. Das Verhältnis zum eigenen Körper würde sich insofern verändern, nämlich objektivieren: der eigene Körper würde tendenziell zu einem Gegenstand, demgegenüber man eher misstrauisch eingestellt ist, da sich ja immer etwas entdecken lässt, was nicht der Norm entspricht.

4. Auswirkung auf die Lebenserwartung und die Gesellschaft. Wenn sich die Hoffnung erfüllen sollte, dass – unter anderem – dank Nanobiotechnologie für eine grosse Anzahl Bürger eine gute (bzw. noch bessere) Lebensqualität bis ins hohe Alter erreicht werden kann, hätte das Auswirkungen auf die Lebensplanung jedes Einzelnen (z.B. infolge einer verlängerten Lebensarbeitzeit) und damit auch auf die Gesellschaft insgesamt. Die gesellschaftliche Entwicklung der letzten Jahrzehnte würde durch nanobiotechnologische Anwendungen somit weiter akzentuiert. Die Problematik der gerechten Verteilung der Lasten zwischen den Generationen und der Zweiklassen-Medizin würde durch die erwartete teurere Nanomedizin weiter verschärft.

12. Enhancement

Unter «Enhancement» versteht man die gezielte «Verbesserung» des Menschen in dem Sinne, dass nicht medizinisch indizierte Massnahmen genutzt werden, um bei Gesunden eine Leistungssteigerung zu erzielen (zum Folgenden vgl. Ach/Jömann 2005:190ff., Baumgartner 2004:42ff., Bachmann/Rippe 2006, Grunwald 2004:75, Moor/Weckert 2004:306, Paschen et al. 2004:300f., Roco/Bainbridge 2002, RSRAE 2004:54f., Talbot/Wolf 2006). Man unterscheidet drei Arten von Enhancement: genetisches Enhancement (z.B. eine Verbesserung der Intelligenz durch einen genetischen Eingriff), Body-Enhancement (z.B. schönheitschirurgische Eingriffe oder Anabolikaverwendung im Leistungssport) und Neuro-Enhancement. Zum Neuro-Enhancement zählt die Verbesserung von kognitiven Fähigkeiten (z.B. Steigerung der Gedächtnisleistung durch die off-label Einnahme von Ritalin), von sensorischen Leistungen (z.B. Steigerung des Sehvermögens oder gar neue Sehfähigkeiten wie Infrarotsicht) sowie die Veränderung von emotionalen Eigenschaften oder Befindlichkeiten (so genanntes Mood enhancement: z.B. Steigerung des Selbstwertgefühls oder Erzeugung von Glücksgefühlen durch Psychopharmaka wie Prozac).

Die Nanobiotechnologie ist in erster Linie für die Verbesserung von sensorischen Leistungen von Bedeutung. Wie weiter oben beschrieben (s.o. S.52f.), spielen dabei nanostrukturierte biofunktionalisierte Implantate und die Nanoinformatik, die vielleicht einmal auch einen bidirektionalen Informationsaustausch zwischen Implantat und Nervenzellen ermöglichen werden,[142] eine

[142] Vorläufig handelt es sich bei Neuroprothesen um unidirektionale Stimulatoren: «Das bedeutet, dass die Mikroprozessoren die Nervenzellen bisher lediglich stimulieren oder deaktivieren können. Zukünftig könnte es aber auch möglich werden, die Signale aus dem Nervensystem durch Mikroprozessoren zu registrieren, zu analysieren und damit gezielter zu beeinflussen» (Wolf 2005:359).

wichtig Rolle. Auf diese Weise könnte die Nanobiotechnologie einen Beitrag zur Entwicklung von Implantaten bzw. Prothesen liefern, die sich eines Tages eventuell nicht nur zur Verbesserung von Körperfunktionen, sondern auch zur Realisierung von ganz neuen körperlichen Fähigkeiten nutzen lassen.

«Ein einfaches Gedankenbeispiel mag dies verdeutlichen: Ist die Übertragung von Bildern einer kleinen Digitalkamera über den Sehnerv an das Gehirn erst einmal etabliert, könnten technische Veränderungen an der Kamera, z.B. das Hinzufügen einer zuschaltbaren Infrarot- oder Zoomfunktion oder die Verarbeitung der digitalen Information, gänzlich neue Sehfähigkeiten schaffen» (Ach/Jömann 2005:190f.).

Zudem sind mit der von vielen prognostizierten und propagierten Integration der NBIC-Technologien (Nano-, Bio-, Informations- und Kognitionswissenschaften)[143] Enhancement Visionen verbunden, die noch viel weiter gehen: z.B. direkte neuronal-zu-Computer-Interfaces, eine massive Verlängerung der Lebenszeit oder eine schier unbeschränkte Steigerung des intellektuellen Leistungsvermögens.

Die bereits möglichen, aber auch die bislang nur denkbaren Verbesserungen des Menschen unter anderem auch mit Hilfe der Nanobiotechnologie werfen eine Reihe von ethischen Fragen auf:

- Wie riskant sind die für das Enhancement erforderlichen Eingriffe für den Einzelnen?
- Welche Möglichkeiten der Verbesserung sensorischer, kognitiver und emotionaler Fähigkeiten sollten allen zugänglich gemacht werden? Und wie kann man garantieren, dass alle den gleichen Zugang haben? Andererseits: sollten diese Verbesserungen immer freiwillig sein, oder darf man z.B. unter Umständen jemanden dazu zwingen, ein Psychopharmakon einzunehmen oder sich eine Prothese zu implantieren? Dürfen gesellschaftlich erwünschte Verbesserungen, etwa um die Gewaltbereitschaft auffällig gewordener Menschen zu senken, auf diese Weise auch gegen den Willen der Betroffenen durchgesetzt werden?
- Wie sind Neuro-Implantate zu beurteilen, die eine Art Fernsteuerung und damit eine Einschränkung der Autonomie bzw. des freien Willens ermöglichen?[144]
- Besteht nicht die Gefahr, dass durch solche Enhancement-Technologien Minderheiten wie etwa Behinderte stigmatisiert werden?[145]
- Wann wäre der Punkt erreicht, an dem wir die menschliche Natur, das heisst die eigenen Gattungsgrenzen hin zu hybriden Wesen, zu Mensch-Maschine-Mischwesen überschreiten? Wäre dies vereinbar mit unserem menschlichen Selbstverständnis, unserer Auffassung von Leiblichkeit und menschlicher Identität?

[143] Optimistische Schätzungen, denen zufolge es im Verlauf des nächsten Jahrzehnts zu einer beschleunigten Integration dieser vier Technologien kommen wird (vgl. Ach/Jömann 2005:190, Roco/Bainbridge 2002), werden von vielen Experten eher skeptisch beurteilt.

[144] «Nanotech implants, injected or ingested, might literally turn control of one's body over to others. The chips, for example, might stimulate the brain's pleasure center when certain actions were performed. This would be an effective way for some people to control others without them being aware of being controlled» (Moor/Weckert 2004:306).

[145] «In a world where human «enhancement» becomes a technological imperative, the rights of the disabled will be further eroded and disability will be perceived as a technological challenge rather than an issue of social justice» (ETC Group 2005:9).

13. Schluss

Obwohl die Nanotechnologie bzw. die Nanobiotechnologie noch am Anfang steht, lassen sich ihre Anwendungsmöglichkeiten inzwischen gut erfassen. Damit sind auch die relevanten ethischen Aspekte dieser Technologie erkennbar geworden. Analytisch gesehen geht es in einem ersten Schritt darum, diese Aspekte möglichst präzis zu beschreiben. Diesem Ziel dient die vorliegende Studie. In einem zweiten Schritt ist es darum zu tun, Antworten auf die ethischen Probleme der Nano(bio)technologie zu geben.

Bis heute ist die ethische Debatte noch nicht über den ersten Schritt, die Identifizierung der ethischen Probleme, hinaus gekommen. Das ist durchaus verständlich, da es sich bei der Nano(bio)technologie um eine neue, in sich sehr heterogene Technologie handelt. Dies macht es nicht einfach, einen Überblick über die nanospezifischen ethischen Fragestellungen zu gewinnen. Dennoch sind wir an einem Punkt angelangt, an dem sich die ethische Diskussion den möglichen Antworten auf diese Fragestellungen zuwenden sollte. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass die Entwicklung der Nano(bio)technologie selbst an Tempo zu gewinnen scheint, was unter anderem auch bedeutet, dass damit zu rechnen ist, dass immer mehr Produkte, die nano(bio)technologische Komponenten enthalten, auf den Markt kommen.

In dieser Situation und angesichts des Umstands, dass spezifische gesetzliche Regelungen (noch) fehlen, sollte darauf geachtet werden, dass die Ethik ihre orientierende Funktion wahrnehmen kann, indem sie sich auf fundierte Weise mit den anstehenden Fragen auseinandersetzt. Hierzu gehört momentan insbesondere die ethische Risikobeurteilung von Nanopartikeln und die Frage, ob ein Moratorium gerechtfertigt ist. Aber auch Gerechtigkeitsaspekte sowie der Umgang mit der synthetischen Biologie sollten so schnell wie möglich thematisiert und diskutiert werden.

Es besteht kein Zweifel, dass auch eine breitere interessierte Öffentlichkeit in diese Auseinandersetzung einbezogen werden sollte. Sie sollte möglichst umfassend über die Risiken und Chancen der Nano(bio)technologie informiert werden, um sich auf dieser Basis ein eigenes Urteil bilden zu können. In diesem Zusammenhang wird gelegentlich geäussert, man müsse die Fehler, die man bei der Einführung der Biotechnologie gemacht habe, bei der Einführung der Nano(bio)technologie vermeiden. Daran ist gewiss so viel richtig, dass der potenzielle Nutzen dieser Technologie sich nur verwirklichen lassen wird, wenn sie auf gesellschaftliche Akzeptanz stösst. Allerdings ist gelegentlich eine Tendenz spürbar, diesen Nutzen so in den Vordergrund zu stellen, dass die potenziellen Nachteile dabei von vornherein zu wenig Beachtung finden. Diese Tendenz ist problematisch, weil sie dazu führen kann, dass man den ethischen Fragestellungen nicht gerecht wird. So ist zum Beispiel die Nano(bio)technologie, wie die Toxizitätsforschung zu den Nanopartikeln aufgezeigt hat, mit nicht zu unterschätzenden Risiken für Mensch und Umwelt verbunden. Aus ethischer Sicht ist daher beim gegenwärtigen Wissensstand zu kritisieren, wenn diesen Risiken, wie es bei einigen Nanotechnologiebefürwortern bisweilen geschieht, ein so geringes Gewicht beigemessen wird, dass man auf diese Weise etwa die Möglichkeit eines Moratoriums allein schon mit Hinweis auf das positive Potenzial der Nano(bio)technologie ausschliessen zu können meint. Zudem ist der Nutzen je nach Gebiet wohl auch unterschiedlich zu beurteilen. Es gibt nano(bio)technologische Bereiche, bezüglich derer die Frage berechtigt scheint, ob der Nutzen, selbst, wenn er sich realisieren lässt, das Risiko aufwiegen kann. Hinsichtlich Sonnencremes, fleckenfreien Hosen und Lebensmittelzusätzen etwa meint Pat Roy Mooney, Direktor der ETC Group: «Frankly, I don't think that skin creams or stain resistant pants or food additives are a good reason to sacrifice someone's health» (Smith 2005). Ob Mooneys Beurteilung ethisch gesehen richtig ist, kann hier dahingestellt bleiben. Wichtig ist aber, dass man sich jeden Bereich der Nano(bio)technologie gesondert anschaut und sich um eine möglichst unvoreingenommene Risiko-Nutzen-Abschätzung bemüht.[146]

[146] Insbesondere bei der Frage der Nanopartikel-Toxizität hat sich herauskristallisiert, dass man nicht ein allgemeines Urteil abgeben kann, sondern dass für jedes Partikel die Toxizität gesondert beurteilt werden muss (vgl. hierzu den Artikel «Wie reagieren ▸

Dies ist nicht nur für eine angemessene normative Beurteilung der Nano(bio)technologie unverzichtbar, sondern auch mit Blick auf die Akzeptanz dieser Technologie in der Gesellschaft. Zwar sieht die informierte Öffentlichkeit in der Nano(bio)technologie anders als in der Kernenergie oder der Gentechnik gegenwärtig noch keine eminente Gefahr. Das kann sich jedoch schnell ändern. Sollte etwa ein Zwischenfall publik werden oder von der Presse Risiken gross thematisiert werden, könnte die Stimmung schnell umschlagen und sich gegen die Nano(bio)technologie wenden.[147] Deshalb braucht es einen offenen und verantwortungsvollen Risikodialog. Und es braucht wohl auch vertrauensbildende Massnahmen wie etwa Produktedeklarierung oder strenge(re) Gesundheits- und Sicherheitsauflagen.

Aus ethischer Sicht ist dies umso wichtiger, als die Nanobiotechnologie in verschiedenen Bereichen, insbesondere in der Humanmedizin, aber auch in der Landwirtschaft und im Umweltschutz unbestrittenermassen ein erhebliches positives Potenzial hat. Es wäre bedauerlich, wenn sich die öffentliche Meinung gegen diese Technologie wenden und damit die Umsetzung ihres Potenzials verhindern würde, nur weil zu wenig offen informiert und diskutiert wird und weil die berechtigten Bedenken der Menschen zu wenig ernst genommen werden.

---

menschliche Zellen auf Nanopartikel?» in den EMPA-News 2/2006).

[147] Wie schnell so etwas passieren könnte, zeigt das Beispiel «MagicNano»: «Ende März 2006 machte der in Deutschland neu in den Handel gebrachte Haushaltspray «MagicNano» negative Schlagzeilen. Angepriesen als Versiegelung für Glas- und Keramikoberflächen, löste das Mittel bei über 110 Personen Atemnot aus; sechs Patienten mussten wegen einem Lungenödem im Spital behandelt werden. Man befürchtete, dass Nanopartikel im Spray die Gesundheitsprobleme ausgelöst haben. Untersuchungen zeigten dann: im problematischen Haushaltspray waren keine Nano-Partikel enthalten. Es waren die durch das Treibmittel erzeugten ultrafeinen Tröpfchen und die darin enthaltenen Chemikalien, die die Beschwerden verursachten. Ein Nano-Produkt ist der Spray aber trotzdem, denn der Versiegelungsfilm, den er auf der Oberfläche hinterlässt, ist nur einige Nanometer ‹dick›» (TA Swiss 2006:1). Auch wenn der Fall «MagicNano» einigermassen glimpflich ausgegangen ist, hat er doch einen nicht unerheblichen Imageschaden angerichtet; und dies obwohl das Problem, wie es scheint, letztlich nicht durch Nanopartikel verursacht worden ist.

14. Literatur

Mit * gekennzeichnete Literaturangaben sind aus ethischer Sicht besonders interessant.

*Ach, Johann S., Norbert Jömann (2005), «Ethische und soziale Herausforderungen der Nanobiotechnologie. Eine Übersicht», in: Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik 10, S. 183–213.

*Altmann, Jürgen (2006), Military Nanotechnology: Potential Application and Preventive Arms Control, London.

*Arnall, Alexander Huw (2003), Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies, http://www.greenpeace.org.uk.

*Bachmann, Andreas, Klaus Peter Rippe (2006), «Wieso es die Stepford Wives nicht geben darf. Über die moralischen Grenzen der Forschungsfreiheit», in: Johann S. Ach, Arnd Pollmann (Hg.), no body is perfect. Baumassnahmen am menschlichen Körper. Bioethische und ästhetische Aufrisse, Bielefeld, S. 79–107.

*Barker, Todd, Michael Lesnick, Tim Mealey, Rex Raimond, Shawn Walker, Dave Rejeski, Lloyd Timberlake (2005), Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks, http://www.meridian-nano.org/gdnp/NanoandPoor.pdf.

BASF (2004), «Nanotechnologie bei BASF», http://corporate.basf.com/file/22315.file1?id=444fV8EhQbcp*5k.

BASF (2004a) «Verhaltenskodex Nanotechnologie» http://corporate.basf.com /file/22627. file2?id=444fV8EhQbcp*5.

*Baumgartner, Christoph (2004), «Ethische Aspekte nanotechnologischer Forschung und Entwicklung in der Medizin», in: Das Parlament B 23–24, S. 39–46.

*Baumgartner, Walter, Barbara Jäckli, Bernhard Schmithüsen, Felix Weber (2003), Nanotechnologie in der Medizin, Bern (zitiert als TA Swiss 2003).

Boeing, Niels (2004), Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts, Berlin.

*Boeing, Niels (2005), «Unsichtbare Gefahr», in: Technology Review 11, November 2005, S. 32–42.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2002), Standortbestimmung. Nanotechnologie in Deutschland, http://www.bmbf.de/pub/nanotechnologie_ in_deutschland-standortbestimmung.pdf. (zitiert als BMBF 2002)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2004), Nanotechnologie. Innovationen für die Welt von morgen, http://www.bmbf.de/pub/nanotechnologie_inno_fuer_die_welt_v_morgen.pdf. (zitiert als BMBF 2004)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2005), «Nanobiotechnologie», http://www.bmbf.de/de/1155.php. (zitiert als BMBF 2005)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2005), «Synthetische Nanopartikel – Entwicklungschancen im Dialog», http://www.bmu.de/files/service/downloads/application/pdf/ themenpapier_nanopartikel.pdf. (zitiert als BMU 2005)

Davidson, Keay (2005), «Big troubles may lurk in supertiny tech. Nanotechnology experts say legal, ethical issues loom», http://sfgate.com, 31. Oktober 2005.

Davies, Clarence J. (2006), Managing the Effects of Nanotechnology, www.wilsoncenter.org.

Decker, Michael (2003), «Definitions of Nanotechnology – Who needs them?» in: Europäische Bad Neuenahr-Ahrweiler, Akademie-Brief Nr. 41, S. 1–3.

Drexler. K. Eric (1986), Engines of Creation. The Coming Era of nanotechnology, http://www.foresight.org/EOC/Engines.pdf.

Drexler, K. Eric, David Forrest, Robert A. Freitas Jr., J. Storrs Hall, Neil Jacobstein, Tom McKendree, Ralph Merkle, Christine Peterson (2001), «A Debate about Assemblers», http://www.imm.org/SciAmDebate2/smalley.html#StickyFinger.

Economist, The (2002), «Trouble in Nanoland», 5. Dec 2002, http://www.economist.com/science/displaystory.cfm?story_id=1477445.

Eikenbusch, Heinz, Andreas Hoffknecht, Dirk Holtmannspötter, Volker Wagner, Axel Zweck (2003), Ansätze zur technischen Nutzung von Selbstorganisation, http://www.zukuenftigetechnologien.de/bd481.pdf.

EMPA-News 2/2006, http://www.empa.ch/plugin/template/empa/1030/48763/---/l=1.

*ETC Group (2003), From Genomes to Atoms. The Big Down. Atomtech: Technologies Converging at the Nano-scale, www.etcgroup.org.

ETC Group (2003a), «Nanotech and the Precautionary Prince», www.etcgroup.org.

*ETC Group (2004), Down on the Farm. The Impact of Nano-scale Technologies on Food and Agriculture, www.etcgroup.org.

ETC Group (2004a), «Nano's Troubled Waters», www.etcgroup.org.

ETC Group (2005), A Tiny Primer on Nano-scale Technologies and «The little Bang Theory», www.etcgroup.org.

*European Commission Community Research (2005), Synthetic Biology. Applying Engineering to Biology. Report of a NEST High-Level Expert Group, http://www.univ-poitiers.fr/recherche/documents/pcrdt7/syntheticbiology.pdf. (zitiert als European Commission 2005)

Eurekalert (2005), «NJIT study shows nanoparticles could damage plant life», www.eurekalert.org/pub_releases/2005-11/nijo-nss112205.php, 22. November 2005.

Feynman, Richard P. (1959), «There's Plenty of Room at the Bottom», http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.htm. (deutsche Version (leicht gekürzt) mit dem Titel «Unten ist jede Menge Platz» zugänglich auf http://www.hnf.de/NanoAusstellung/feynmanvortrag.html.)

Fossgreen, Anke (2006), «Winziger Zusatz verheisst grossen Nutzen», in: Tages-Anzeiger vom 25.1.2006, S. 36.

Gardner, Elisabeth (2002), «Brainy Food: Academia, Industry sink their Teeth into edible Nano», www.smalltimes.com.

Gen-Dialog (2005), «Nanobiotechnologie», http://www.gensuisse.ch/focus/nano.

*Gordijn, Bert (2003), «Nanoethics. From Utopian Dreams and Apocalyptic Nightmares towards a more Balanced View», http://portal.unesco.org/shs/en/file_download.php/7c19013ff6599f7bfd12e38868a1fbcaNanoethics.pdf.

*Gordijn, Bert (2004), Medizinische Utopien. Eine ethische Betrachtung, Göttingen.

Greenpeace (2004), «Report of oral evidence session with Doug Parr (Greenpeace) and Sue Dibb (National Consumer Council)», http://www.nanotec.org.uk/ evidence/ Parr& Dibboralevidence.htm.

*Grunwald, Armin (2004), «Ethische Aspekte der Nanotechnologie. Eine Felderkundung», in: Technikfolgenabschätzung 13/2, S. 71–78.

*Grunwald, Armin (2005), «Nanotechnology – A New Field of Ethical Inquiry?» in: Science and Engineering Ethics 11/2, S. 187–201.

Grunwald, Armin, Jürgen Kopfmüller (2006), Nachhaltigkeit, FfM.

Gsponer, André (2002), «From the Lab to the Battlefield? Nanotechnology and Fourth-Generation Nuclear Weapons», http://www.acronym.org.uk/dd/dd67/67op1.htm.

Hauptman, Aharon, Yair Sharan (2005), Envisioned Developments. Nanobiotechnology in Expert Survey, http://www.ictaf.tau.ac.il/N2L_expert_ survey_results.pdf.

Hassan, Mohamed H.A. (2005), «Nanotechnology: Small Things and Big Changes in the Developing World», http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/309/5731/65.

Holister, Paul (2002), Nanotech. The tiny Revolution, http://www.nanotech-now.com/CMP-reports/NOR_White_Paper-July2002.pdf.

Iku GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes (2005), Synthetische Nanopartikel. Blick auf Umwelt- und Gesundheitsaspekte, http://www.dialog-nanopartikel.de/Synthetische%20 Nanopartikel%20-%20Sachstandsbericht.pdf.

Imhasly, Patrick (2003), «Debatte um Kleinigkeiten», in: Der kleine Bund, 23. August 2003.

Joy, Bill (2000), «Why the future doesn't need us», in: Wired 8.04, April 2000.

Jopp, Klaus (2003), Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge, Wiesbaden.

Koechlin, Florianne (2003), «Quantensprung Nanotechnologie», in: WoZ 27, 3. Juli 2003.

Kröher, Michael O.R. (2004), «Clevere Krümel», http://www.manager-magazin.de/magazin/artikel/0,2828,324018,00.html.

Kröher, Michael O.R. (2005), «Zellen im Tank», http://www.manager-magazin.de/magazin/artikel/0,2828,371281,00.html.

Kommission der europäischen Gemeinschaften (2005), «Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament und den Wirtschafts- und Sozialausschuss. Nanowissenschaften und Nanotechnologien: Ein Aktionsplan für Europa 2005–2009», http://europa.eu.int/comm/research/industrial_technologies/pdf/nano_action_de.pdf (zitiert als KOM 2005).

Locatelli, Sandrine, Carole Nicollet, Jean Charles Guibert, Manuela Denis (2005), «Potential Risks of Nanotechnologies», Part 3 of the 4th Nanoforum Report, www.nanoforum.org (zitiert als Nano Report 2005).

Luther, Wolfgang, Norbert Malanowski, Gerd Bachmann, Andreas Hoffknecht, Dirk Holtmannspötter, Axel Zweck (2004), Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt, http://www.innovationsanalysen.de/de/download/endbericht_wirt_potenzial_nano.pdf.

Luxresearch (2004), «Revenue from nanotechnology-enabled Products to equal IT and Telecom by 2014, exceed Biotech by 10 times», http://www.luxresearchinc.com/ press/RELEASE_SizingReport.pdf.

Meili, Christoph (2006), «Die Achillesfersen der Nanotechnologie. Wie man (noch) unbekannte Risiken kommuniziert und reguliert», in: Neue Zürcher Zeitung, 30. Januar 2006.

Meili, Christoph (2006a), Nano-Regulation. A multi-stakeholder-dialogue-approach towards a sustainable regulatory framework for nanotechnologies and nanosciences, http://www.innovationsgesellschaft.ch/images/publikationen/Nano_Regulation_final3.pdf.

Mehta, Michael D. (2002), «Privacy vs. Surveillance. How to avoid a nano-panoptic future», in: Canadian Chemical News, Nov–Dec. 2002, S. 31–33.

*Mnyusiwalla, Anisa, Daar, Abdallah S, Singer, Peter A. (2003), «‹Mind the gap›: science and ethics in nanotechnology», in: Nanotechnology 14, S. 9–13.

*Montague, Peter (2004), «Welcome to NanoWorld. Nanotechnology and the Precautionary Principle Imperative», http://multinationalmonitor.org/mm2004/09012004/september04corp2.html.

*Moor, James, John Weckert (2004), «Nanoethics: Assessing the Nanoscale from an Ethical Point of View», in: D.Baird, A.Nordmann, J.Schummer (eds.), Discovering the Nanoscale, Amsterdam, S. 301–310.

*Morrison, Mark (2005), «The Ethical Aspects and Political Implications of Nanotechnolgy», Part 5 of the 4th Nanoforum Report, www.nanoforum.org.

Morrissey, Susan R. (2005) «Taking The Nano Pulse – Nanotechnology. Good and Green», www.industryweek.com, 5. Dezember 2005.

Müller, Thomas (2003), «Nanotechnologie: Die nächste Kandidatin für ein Moratorium», in: Basler Zeitung, 15. Juli 2003.

*Nanologue (2005), «Nanologue Background Paper on selected nanotechnology applications and their ethical, legal and social implications», http://www.nanologue.net/custom/user/Downloads/NanologueBackgroundPaper.pdf.

Nel, Andre, Tian Xia, Lutz Mädler, Ning Li (2006), «Toxic Potential of Materials at Nanolevel», in: Science 311, 3 February 2006, S. 622–627.

NZZ (2006), «Der lange Atem der optischen Lithographie. Noch kleinere Chip-Strukturen möglich», in: Neue Zürcher Zeitung, 1. März 2006, S. 61.

*Oberdörster, Günter, Eva Oberdörster, Jan Oberdörster (2005), «Nanotechnology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles», in: Environmental Health Perspectives 113/7, S. 823–839.

*Paschen, H., C. Coenen, T. Fleischer, R. Grünwald, D. Oertel, C. Revermann (2004), Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung, Berlin.

Pease, Roland (2005), «‹Living› robots powered by muscle», http://news.bbc.co.uk/ 1/hi/sci/tech/4181197.stm.
Raloff, Janet (2005), «Nano hazards: Exposure to minute particles harms lungs, circulatory system», http://www.sciencenews.org/articles/20050319/fob1.asp.

Regalado, Antonio (2004), «Nanotechnology Patents Surge as Companies Vie to Stake Claim», in: Wall Street Journal, June 18, 2004, S. 1.

Rehm, Bern, Dirk Schüler (2005), «Klein – Kleiner – am Kleinsten», http://www.i-s-b.org/2020/10/index.htm.

Rickert, Scott E. (2005), «Nanotech's Safety Risks», http://pubs.acs.org/cen/nanofocus/ top/83/8349gov1.html, 7. Dezember 2005.

Rippe, Klaus Peter (2002), «Vorsorge als umweltethisches Prinzip», http://www.ethikdiskurs.ch/umweltethik/projekte/Vorsorgeprinzip.pdf.

Roco, Mihail C, Bainbridge, Williams Sims (eds.) (2001), Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. NSET Workshop Report, http://www.wtec.org/loyola/nano/ NSET.Societal.Implications/nanosi.pdf.

Roco, Mihail C, Bainbridge, Williams Sims (eds.) (2002), Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, http://wtec.org/ ConvergingTechnologies/ Report/NBIC_report.pdf.

Roco, Mihail C, Bainbridge, Williams Sims (eds.) (2003), Nanotechnology. Societal Implications – Maximizing Benefits for Humanity, http://www.nano. gov/nni_societal_ implications.pdf.

Roco, Mihail C (2003a), «Nanotechnology: convergence with modern biology and medicine», in: Current Opinion in Biotechnology 14, S. 337–346.

Saxl, Ottilia (2002), «Nanotechnology – What it means for the Life Sciences», Business Briefing: Life Sciences Technology, www.nano.org.uk/saxl.pdf, abgerufen am 24.01.2006.

Schwägerl, Christian (2004), «Er widerruft. Eric Drexler hält replizierende Nanoroboter für überflüssig», in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 26. Juni 2004, S.33.

Schwägerl, Christian (2006), «Nanotechnologie. Lauert im Zwergenreich Gefahr?» in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 20. Februar 2006, S. 34.

Service, Robert F. (2005), «Nanotechnology Takes Aim at Cancer», in: Science 310, 18. November 2005, S. 1132–1133.

*Singer, Peter A., Fabio Salamanca-Buentello, Abdallah S. Daar (2005), «Harnessing Nanotechnology to Improve Global Equity», http://www.issues.org/ issues/21.4 /singer.htm.

Smalley, Richard E. (2001), «Of Chemistry, Love and Nanobots», in: Scientific American 285, S. 76–77.

Smith, Michelle R. (2005), «More Research Urged on Nanoparticle Risk», www.heraldnewsdaily.com/stories/news-00110447.html.

*Swiss Re (2004), Nanotechnologie. Kleine Teile – grosse Zukunft? http://www.swissre.com

*Talbot, Davinia, Julia Wolf (2006), «Dem Gehirn auf die Sprünge helfen. Eine ethische Betrachtung zur Steigerung kognitiver und emotionaler Fähigkeiten durch Neuro-Enhancement», in: Johann S. Ach, Arnd Pollmann (Hg.), no body is perfect. Baumassnahmen am menschlichen Körper – Bioethische und ästhetische Aufrisse, Bielefeld, S. 253–278.

TA Swiss (2006), Nano! Nanu?, http://www.ta-swiss.ch/www-remain/ reports_ archive/Infoblaetter/2006_TAP8_IB_Nanotechnologien_d.pdf.

Technology Review (2005), «The Neatest Nanotech of 2005», http://www.technologyreview.com/NanoTech/wtr_16096,303,p1.html?trk=nl.

*The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004), nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties, London. (zitiert als RSRAE 2004)

The Wellcome Trust (2005), Big Picture on Nanoscience, http://www.wellcome.ac.uk/assets/wtd015798.pdf.

Tiefenauer, Louis (2006), «Magnetic nanoparticles as contrast agents for medical diagnosis», in: T. Vo-Dinh (ed.), Nanotechnology in Biology and Medicine, CRC Press, LCC S. 413–432.

UNESCO (2006), The Ethics and Politics of Nanotechnology, http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001459/145951e.pdf.

U.S. Environmental Protection Agency (2005), Nanotechnology White Paper. External review Draft, http://cohesion.rice.edu/CentersAndInst/ICON/ emplibrary/EPA_Nanotechnology_White_Paper_EXTERNAL_REVIEW_ DRAFT_12-1-05.pdf. (zitiert als EPA 2005)

Vogel, Benno (2006), «Prost Mahlzeit!», in: Beobachter 3, S. 26–27.

Vonarburg, Barbara (2003), «Schrecklich schöne neue Welt», in: Tages-Anzeiger, 24. Juni 2003.

Wagner, Volker, Dietmer Wechsler (2004), Nanobiotechnologie II: Anwendungen in der Medizin und Pharmazie, http://www.zukuenftigetechnologien.de/50.pdf.

Wehner-v. Segesser, Sibylle (2006), «Organismen vom Reissbrett. In der synthetischen Biologie wollen Ingenieure lebende Systeme optimieren», in: NZZ, 23. August 2006, S. 57.

Wevers, Marcus, Dietmar Wechsler (2002), Nanobiotechnologie I: Grundlagen und technische Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme, http:// zukuenftigetechnologien.de/band38_w.pdf

Weiss, Rick (2005), «Nanotechnology Regulation Needed, Critics Say», www.washington-post.com, 5. Dezember 2005.

Wolf, Julia (2005), «Die Verbindung von Gehirn und Elektronik – Mögliche Konsequenzen und ethische Implikationen der Neurobionik», in: Christoph S. Herrmann, Michael Pauen, Hochem W. Rieger, Silke Schicktanz (Hg.), Bewusstsein. Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik, München, S. 355–382.