

 SpringerWienNewYork

André Gzásó, Sabine Greßler und
Fritz Schiemer (Hrsg.)

Nano

Chancen und Risiken aktueller Technologien

SpringerWienNewYork

MMag. Dr. André Gzásó
Institut für Risikoforschung, Universität Wien, Wien, Österreich

Mag. Sabine Greßler
Forum Österreichischer Wissenschaftler für Umweltschutz, Wien, Österreich

o. Univ.-Prof. Dr. Fritz Schiemer
Dept. für Limnologie und Hydrobotanik, Universität Wien, Wien, Österreich

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© 2007 Springer-Verlag/Wien
Printed in Austria

SpringerWienNewYork ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.at

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Produkthaftung: Sämtliche Angaben in diesem Fachbuch/wissenschaftlichen Werk erfolgen trotz sorgfältiger Bearbeitung und Kontrolle ohne Gewähr. Insbesondere Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Eine Haftung der Herausgeber, der Autoren oder des Verlages aus dem Inhalt dieses Werkes ist ausgeschlossen.

Textkonvertierung und Umbruch: Grafik Rödl, Pottendorf, Österreich
Druck und Bindearbeiten: Druckerei Theiss GmbH, St. Stefan, Österreich
Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier – TCF
SPIN: 11822615

Mit 35 Abbildungen

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

ISBN 978-3-211-48644-3 SpringerWienNewYork

EDITORIAL

Die vorliegende Publikation ist aus einer Vortragsreihe über Nanotechnologien und deren gesellschaftlich relevanten Aspekten hervorgegangen, die im Sommersemester 2006 an der Universität Wien abgehalten wurde. Organisiert wurde diese Veranstaltungsreihe – insgesamt sechs Abende – vom Forum Österreichischer Wissenschaftler für Umweltschutz und dem Institut für Risikoforschung der Universität Wien. Das Vorhaben wurde von der Österreichischen NANO Initiative der FFG unterstützt und gefördert.

Es gibt im Wesentlichen zwei Gründe, warum Nanotechnologien Gegenstand öffentlichen Interesses sind. Einerseits sind die Erwartungen an dieses Forschungs- und Technologiefeld sehr hoch, Nanotechnologien gelten infolge ihrer universellen Einsetzbarkeit als Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Entsprechend hoch sind demnach auch die Investitionen, die derzeit weltweit in diesem Bereich getätigt werden, und zwar nicht nur in den so genannten hochindustrialisierten Ländern, sondern und bezeichnenderweise auch in Schwellenländern, wo offenbar Technologieentwicklung als ökonomischer und sozialer Entwicklungsmotor verstanden wird. Andererseits tauchen im Zusammenhang mit bestimmten Anwendungen seit einiger Zeit auch vermehrt Befürchtungen, jedenfalls jedoch erhebliche Unklarheiten über ihr mögliches gesundheits- und umweltrelevantes Schadenspotenzial auf, wobei einige Aspekte bereits aus vorangegangenen öffentlichen Technologiewahldebatten (Kernenergie, Gentechnik) bekannt zu sein scheinen. Diese Unklarheit ist ein Beweggrund für manche Regierung wie auch für die Europäische Kommission, proaktive Forschungs- und Begleitmaßnahmen zu initiieren und zu unterstützen.

Da das Forum Österreichischer Wissenschaftler für Umweltschutz seit seiner Gründung im Jahre 1985 darum bemüht ist, einen interdisziplinären Dialog und eine ganzheitliche Betrachtungsweise der vielschichtigen Um-

weltproblematiken zu fördern, war es naheliegend, das Thema „Nanotechnologien“ zum Gegenstand einer ausgewogenen und fundierten Veranstaltungsreihe auszuwählen. Die Universität Wien kommt als Projektpartner ihrem bildungs- und demokratiepolitischen Auftrag nach, indem sie sowohl den Kenntnisstand über ein neues und hochinteressantes Forschungsfeld erhöht als auch eine aktive Auseinandersetzung mit dessen möglichen politischen, gesellschaftlichen und ethischen Implikationen fördert.

Als vor mehr als einem Jahr die ersten internen Diskussionen zu einem entsprechenden Projekt geführt wurden, mussten wir feststellen, dass der Wissensstand über Nanotechnologien und ihren Anwendungen – auch unter Wissenschaftlern – noch sehr gering, das Interesse an diesem Thema und ein entsprechender Diskussionsbedarf jedoch erfreulich hoch waren.

Naturgemäß richtet sich die vorliegende Sammlung von Beiträgen zunächst einmal an Wissenschaftler und Studenten aller Disziplinen, selbstverständlich aber auch an alle wissenschaftlich interessierten Menschen, die sich über den Forschungs- und Entwicklungsstand sowie den gesellschaftlichen und forschungspolitischen Kontext der Nanotechnologien ein Bild machen wollen. Sowohl die moderierte Veranstaltungsreihe als auch die daraus entstandene Sammlung von Fachbeiträgen verfolgen das Ziel, eine offene Diskussion über die Anwendungen der Nanotechnologien und deren Entwicklungspotenziale zu fördern und eine qualifizierte Meinungsbildung zu erleichtern.

Wenn auch – basierend auf dem interdisziplinären Charakter des neuen Forschungsfelds selbst – eine möglichst breite Fächerung der dargestellten Themen angestrebt wurde, um der hohen Diversität und Komplexität möglicher Anwendungen und deren Auswirkungen gerecht zu werden, musste man sich aus rein pragmatischen Gründen auf einige wenige zentrale Themen beschränken. Das sollte einen leichteren und rascheren Einstieg in die zunächst noch unübersichtliche Welt der Nanotechnologien begünstigen. So wurden also – nach einer allgemeinen Einführung – solche Themen gewählt, die einen verständlichen und möglichst wenig aufwändigen Zugang erlauben, da sie das neue Forschungsfeld jeweils im Rahmen unmittelbar erfahrbarer lebensweltlicher Grundbedingungen darstellen. Die Themenabende waren daher den Bereichen Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft, Regulation und Öffentlichkeit gewidmet. Auch die in diesem Buch vereinten Beiträge sind unschwer diesen fünf Schwerpunkten zuzuordnen, auf eine dezidierte Kennzeichnung bzw. entsprechend strikte Kategorisierung der Beiträge wurde jedoch verzichtet. Den Autoren und Autorinnen ist es jedenfalls zu danken, dass sie dem von ihnen abverlangten hohen Grad an Verständlichkeit nicht die dennoch zu erwartende Themenfülle und Gedankentiefe geopfert haben.

Armin Grunwald und **Torsten Fleischer** leiten diese Publikation mit einer dichten, dennoch gut verständlichen und übersichtlichen Darstellung der Nanotechnologien, ihrer Anwendungsfelder und Potenziale, aber auch

ihrer Risikofelder ein. Innovationen werden vor allem bei der Entwicklung neuer Materialien, in der Medizin und im IKT-Bereich erwartet. Demgegenüber steht eine rege Diskussion über mögliche Gesundheits- und Umweltfolgen dieser Applikationen. Sorgen um einen möglichen Kontrollverlust, über die weitgehend unbekanntes Folgen dieser Technologien und die gerechte Verteilung ihres Nutzens werden auch hier die öffentliche Debatten bestimmen.

Mit einer Einführung anderer Art, nämlich einer Übersicht über aktuelle Entwicklungen im Bereich geeigneter Messmethoden zum Nachweis von Nanopartikeln und Nanoaerosolen, setzen **Wladyslaw Szymanski** und **Günter Allmaier** unmittelbar fort. Die Messung von Nanopartikeln und Nanoaerosolen, insbesondere solche organischen Ursprungs, stellt eine große Herausforderung für die Wissenschaft dar. Die beiden Autoren machen darauf aufmerksam, dass sich maßgebliche Entwicklungen derzeit vor allem im Grundlagenbereich (Nanowissenschaft) abspielen.

Wolfgang Luthers Beitrag betont die Bedeutung der Nanotechnologien als wirtschaftlichen Wachstumsmarkt. Für viele Industriebranchen werde nämlich ihre zukünftige Wettbewerbsfähigkeit wesentlich davon abhängen, ob sie die neuen Möglichkeiten, die ihnen durch die Nanotechnologie geboten würden, auch erschließen und für sich nützen könnten, wobei die Verbesserung von bereits bestehenden Produkten und die Eröffnung neuer Marktchancen einerseits durch die Minituarisierung wichtiger Systemkomponenten und andererseits durch gänzlich neue Funktionalitäten, die erst auf nanoskaligem Niveau auftreten, erzielt würden.

Da die konkreten Ausgestaltungen und Anwendungen der Nanotechnologien noch nicht bekannt sind, ja zudem mit neuen, bisher unbekanntes Effekten zu rechnen ist, muss – wie **Arnim von Gleich** und seine Koautoren **Ulrich Petschow** und **Michael Steinfeldt** erklären – eine Analyse an der Charakterisierung der Hauptlinien der Nanotechnologien selbst ansetzen. In diesem Beitrag werden etwaige Nachhaltigkeitseffekte einiger Anwendungsbereiche der Nanotechnologien in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik, die vor allem für den Bereich der Nanomaterialien bereits weit gediehen ist, eingehend dargestellt und diskutiert.

Frank von der Kammer und **Thilo Hofmann** stellen Nutzen und Risiko der Nanotechnologie aus der Sicht der Umweltgeowissenschaften dar, denn in den Umweltwissenschaften wird seit mehr als drei Jahrzehnten intensiv an Prozessen in der aquatischen Umwelt geforscht, die ihren Ursprung im nanoskaligen Bereich haben. Diese Erkenntnisse könnten eine grundlegende Basis liefern, um das Verhalten von industriellen Nanopartikeln abzuschätzen und entsprechende Modelle und Methoden zur Voraussage ihres Umweltverhaltens zu entwickeln. Im anschließenden Beitrag geben **Jörg Wörle-Knirsch** und **Harald Krug** eine Übersicht über den Stand der Risikoforschung und die toxikologische Bewertung von Nanomaterialien, wobei sie sowohl ein mögliches Modell der Risikobewertung vorstellen als auch

etwaige Desiderate identifizieren. Zwar sei erst – so schließen die beiden Autoren – auf der Grundlage eines verbesserten Wissens um die möglichen Gefahren im gesamten Lebenszyklus der Produkte eine eingehende Risikoabschätzung möglich, dennoch könnten schon jetzt zumindest einige konkrete Überlegungen zum ökotoxikologischen Risikomanagement von Nanomaterialien gemacht werden. Der Beitrag von **Alexandra Fischer** und **Doris Hirmann** rundet den Regulationsschwerpunkt in diesem Buch ab. Aus Sicht der Behörde sind Nanomaterialien nämlich Produkte der chemischen Industrie und fallen demnach in die Zuständigkeit des Chemikalienrechts. Der Beitrag erörtert daher auch die Eignung und Angemessenheit aktueller und zukünftiger gesetzlicher Regelungen aus dem Chemikalienbereich – insbesondere REACH – für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien.

An den im Wesentlichen umwelttoxikologischen Teil schließt unmittelbar eine Reihe von Artikeln an, die human- und umweltmedizinische Themen zum Inhalt haben. **Alexander Haslberger**, **Judith Schuster** und **Astrid Gesche** erörtern speziell die Problematik des Einsatzes nanotechnologisch hergestellter Substanzen und Materialien in der Lebensmittelproduktion und schlagen zusätzlich und parallel zu der geforderten Verbesserung der Wissensbasis, die für die Entwicklung zuverlässiger Risikobewertungsmethoden notwendig ist, auch die Erarbeitung und Anwendung eines allgemein verbindlichen Code of Ethics für diesen Bereich vor. Gleich danach geben **Walter Baumgartner** und **Barbara Jäckli** einen fundierten Überblick über die wahrscheinlichen Entwicklungen nanotechnologischer Anwendungen in der Medizin und den Einfluss der Nanotechnologien in sieben Krankheitsfeldern bis 2020. Die Nanotechnologien werden – so schließen die Autoren in der ersten ihrer acht Thesen – die Medizin bereits in den nächsten 20 bis 30 Jahren deutlich verändern, sowohl in der medizinischen Forschung, in der Diagnose wie auch in der Therapie. Allerdings sei auch zu erwarten, dass sich bestehende Konfliktpotenziale, wie sie sich vor allem im Zusammenhang mit der Gentechnologie bzw. ihren direkten und indirekten Anwendungen in der Diagnose und der Therapie gezeigt haben, verstärken würden.

Hanns Moshhammer und **Peter Wallner** gehen aus der Sicht der Umweltmediziner der Frage nach, welche Voraussetzungen ein geeignetes Kontrollinstrumentarium zur Vermeidung möglicher Gesundheitsgefährdungen aufweisen muss. Zu diesem Zweck geben sie eine Übersicht über mögliche Applikationsformen und Wirkmechanismen von Nanopartikeln im menschlichen Körper und kommen unter anderem zu dem Schluss, dass im Falle bestimmter Nanomaterialien hochaktive Stoffe mit sehr spezifischen Eigenschaften produziert und wenigstens langfristig auch in die Umwelt eingebracht werden, über deren Persistenz und Nebenwirkungen bzw. über deren Effekte bei nicht bestimmungsgemäßem Gebrauch derzeit noch kaum Informationen vorlägen. Tierexperimentelle Studien, Untersuchungen am Menschen und epidemiologische Befunde scheinen die Rele-

vanz von Ultrafeinstäuben als Verursacher von ernststen Gesundheitsschäden des Herz-Kreislauf-Systems und der Atmungsorgane zu bestätigen, wie **Manfred Neuberger** in seinem Artikel ausführlich darstellt, wobei Nanopartikel beim Menschen zwar weniger entzündliche Abwehrreaktionen auszulösen scheinen als größere Partikel, dafür aber biologische Membranen leichter überwinden. Vor allem gegen Ultrafeinstäube aus Verbrennungsprozessen (Verbrennung fossiler Energieträger, Tabakrauch) scheinen wir bis heute keine ausreichenden Abwehrreaktionen entwickelt zu haben.

Den Abschluss der vorliegenden Publikation bildet eine Block von Artikeln, die sich mit der öffentlichen Wirkung des Einsatzes neuer Technologien beschäftigen. **Antje Grobes** Beitrag fasst die internationalen Entwicklungen der letzten Jahre in der Risikokommunikation an Hand der praktizierten Dialog- und Partizipationsmodelle im Rahmen der öffentlichen Diskussion um die Nanotechnologien zusammen. Wie die Autorin feststellt, hat man in Europa bisher erfolgreich auf Dialoge und die Integration möglichst aller betroffenen Akteursgruppen gesetzt. Die Kommunikation über Nanotechnologien wurde zwischen Chancenförderung und Risiko-Debatte ausbalanciert, wobei bewusst alle Kommunikationsebenen – sowohl die naturwissenschaftlichen Befunde, als auch die psychosozialen Befindlichkeiten und ethischen Zielverhandlungen – berücksichtigt wurden. Im abschließenden Beitrag unternimmt **Alfred Nordmann** den Versuch einer Entflechtung der Nanotechnologien. Da es uns nämlich unmöglich sei – hält der Autor fest – die Nanotechnologie als ein einheitliches Forschungs- und Entwicklungsprogramm zu denken, müsse der Allgemeinbegriff in spezifische und handhabbare Projekte herunter gebrochen werden. So sollte schließlich dieses Programm der Entflechtung in die aktuelle Zieldiskussion eingreifen und einen Beitrag zur Klärung der Frage leisten, wie mit Hilfe nanotechnologischer Forschung und Entwicklung die Gegenwart – und nicht die Zukunft – korrigiert werden kann.

Die vorliegende Publikation, die gleichsam eine Erweiterung wie auch eine Vertiefung des im Frühjahr an der Universität Wien begonnenen Diskussionsprozesses darstellt, ist ein Versuch, für den komplexen Bereich der Nanotechnologien und ihre vielfältigen gesellschaftlichen Implikationen öffentliche Aufmerksamkeit zu erwirken. Es ist kein leichtes Unterfangen komplexe wissenschaftliche Zusammenhänge ohne Qualitätsverlust anschaulich wiederzugeben. Es ist den Autoren und Autorinnen zu danken, dass dies hier gelungen ist. Somit kann diese Publikation eine Grundlage für eine breitere öffentliche Diskussion bieten, die Polarisierungen meidet und sich nicht scheut, alle interessierten Parteien einzubeziehen und alle strittigen Themen vorurteilsfrei aufzugreifen. Da eine gesellschaftlich sinn- und wertvolle Implementation wissenschaftlicher und technischer Entwicklungen wesentlich vom Vertrauen der Bürger in die Validität der Wissensbestände, die Unabhängigkeit der Expertise und der gerechten Verteilung des Nutzens dieser Entwicklungen abhängen, kann eine offene Diskussion über

die Chancen und Risiken der Nanotechnologien nicht früh genug anfangen. Die Etablierung einer systematischen begleitenden Risiko- und Sicherheitsforschung, die neben der technisch-naturwissenschaftlichen Risikoanalyse und der ökonomischen Kosten-Risiko-Analyse auch soziale, kulturelle und ethische Risiko- und Sicherheitsaspekte berücksichtigt und in einem integrativen und transdisziplinären Ansatz zu vereinen versucht, wäre die logische Folge daraus und dringend geboten.

Wir danken der Fakultät für Lebenswissenschaften, die uns die notwendige Infrastruktur für die Veranstaltungsreihe an der Universität Wien zur Verfügung stellte sowie Birgit Dalheimer vom ORF für die professionelle Moderation.

Die Herausgeber

VORWORT DER ÖSTERREICHISCHEN NANO INITIATIVE

Der Begriff „Nano“ leitet sich vom griechischen Wort für Zwerg (nánnos) ab und ist die Vorsilbe für eine Maßeinheit. Ein Nanometer entspricht 10^{-9} Meter. Zum Vergleich stelle man sich vor, dass ein menschliches Haar einen Durchmesser von ungefähr 80.000 nm hat. „Nano“ ist auch ein Sammelbegriff für die Forschung und Arbeit an Strukturen in der Größenordnung von 0,1 nm bis zu einigen 100 nm. Durch die Manipulation von Materie in dieser Größenordnung entstehen besondere chemische, biologische, elektrische, mechanische oder optische Eigenschaften, welche in der makroskopischen Welt neuartige Anwendungen ermöglichen. Diese reichen von Anti-Haft-Beschichtungen, leistungsstärkeren Computern, „intelligenter“ Kleidung bis zu neuartigen Verstärkungen für Sportgeräte.

Viele Fachgebiete befassen sich mit „Nano“ oder arbeiten sich in den Nanokosmos vor. Das Spektrum umfasst Gebiete der Biologie, Chemie, Physik, Elektronik, Werkstoffwissenschaften, Medizin, Optik, etc. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen diesen Gebieten ist spannend und stellt eine große Herausforderung dar.

Mögliche umweltrelevante und gesundheitliche Effekte von Nanomaterialien können von Größe, Form, Oberfläche und chemischer Zusammensetzung abhängen und sind Gegenstand umfangreicher Forschung. Prognosen, wie sich Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt auswirken werden, sind auf Basis des derzeitigen Wissens aber schwer abzugeben.

Für den Zeitraum 2003–2006 stellt das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie BMVIT insgesamt 35 Millionen Euro für innovative Forschung und Entwicklung, Aus- und Weiterbildung, Vernetzung und begleitende Forschung im Bereich der Nanowissenschaften und Nano-

technologien zur Verfügung. Neben der nachhaltigen Stärkung der Kooperationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sind gerade auch vertrauensbildende Maßnahmen und begleitende Forschungsthemen mit einer objektiven Betrachtung der Chancen und Risiken dieser Zukunftstechnologie ein wesentlicher Schwerpunkt der Österreichischen NANO Initiative.

Die vorliegende Publikation ist das Ergebnis einer von der NANO Initiative geförderten Veranstaltungsreihe mit dem Titel „Nanowissenschaften und Nanotechnologien – Chancen und Risiken“ in welcher hochrangige Fachleute die Bedeutung von „Nano“ für die Gesellschaft einem breiten Publikum erörterten und sich der Diskussion stellten. Ziel war eine umfassende und sachliche Auseinandersetzung unter Einbindung interessierter Akteure aus Wissenschaft, Industrie, Politik und Öffentlichkeit.

Die Österreichische NANO Initiative dankt dem Forum Österreichischer Wissenschaftler für Umweltschutz und dem Institut für Risikoforschung der Universität Wien für die ungemein interessante Gestaltung der Vortragsreihe. Hier konnte ein wichtiger Beitrag zur vertiefenden Diskussion über gesellschafts- und forschungspolitisch relevante Fragestellungen geleistet werden. Wir freuen uns, dass mit dieser Publikation die Vorträge zu den Themengebieten: „Was ist Nano?“, „Nano und Gesundheit“, „Nano und Umwelt“, „Nano und Wirtschaft“, „Nano und Regulation“ sowie „Nano und Öffentlichkeit“ zusammengefasst sind und einer breiten Leserschaft zur Verfügung stehen.

Sollten Sie sich für weitere Aktivitäten der Österreichischen NANO Initiative interessieren, werfen Sie einen Blick auf unsere websites: www.nanoinitiative.at und www.ffg.at.

Kontakt: Mag. Dr. Margit Haas und DI Regina Korntner
FFG Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien
Tel: +43(0)57755-5080 oder 5081
Fax: +43(0)57755-95080
Email: margit.haas@ffg.at, regina.korntner@ffg.at
www.nanoinitiative.at

Die Österreichischen NANO Initiative ist ein Förderprogramm der FFG.

INHALTSVERZEICHNIS

Nanotechnologie – wissenschaftliche Basis und gesellschaftliche Folgen	1
A. GRUNWALD UND T. FLEISCHER	
Nanopartikel und Nanoaerosole – Messmethoden	21
W. W. SZYMANSKI UND G. ALLMAIER	
Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt	39
W. LUTHER	
Nachhaltigkeitspotenziale und Risiken von Nanotechnologien – Erkenntnisse aus der prospektiven Technikbewertung und Ansätze zur Gestaltung	61
A. VON GLEICH, U. PETSCHOW UND M. STEINFELDT	
Beispiele für Nutzen und Risiko der Nanotechnologie aus der Sicht der Umweltgeowissenschaften – Was wir wissen und was wir lernen müssen	83
F. VON DER KAMMER UND T. HOFMANN	
Risikoforschung und toxikologische Bewertung von Nanomaterialien	101
J. M. WÖRLE-KNIRSCH UND H. F. KRUG	
Chemikalienrecht und Regulatorische Toxikologie – Prüfung auf Nano-Tauglichkeit	115
A. FISCHER UND D. HIRMAN	
Nanotechnologie und Lebensmittelproduktion	131
A. G. HASLBERGER, J. SCHUSTER UND A. GESCHE	

Nanotechnologie in der Medizin	149
W. BAUMGARTNER UND B. JÄCKLI	
Gesundheitsrisiken durch Nanopartikel?	165
H. MOSHAMMER UND P. WALLNER	
Umweltepidemiologie und Toxikologie von Nanopartikeln (Ultrafeinstaub) und Feinstaub	181
M. NEUBERGER	
Europa setzt auf Dialoge: Neue Wege der (Risiko-)Kommunikation für Nanotechnologien	199
A. GROBE	
Entflechtung – Ansätze zum ethisch-gesellschaftlichen Umgang mit der Nanotechnologie	215
A. NORDMANN	
Autorenverzeichnis	231
Sachverzeichnis	245

NANOTECHNOLOGIE – WISSENSCHAFTLICHE BASIS UND GESELLSCHAFTLICHE FOLGEN

A. GRUNWALD UND T. FLEISCHER

Nanotechnologie gilt als Forschungsfeld mit revolutionären Möglichkeiten der Innovation in verschiedensten Anwendungsfeldern. Zunächst wird erläutert, wodurch sich Nanotechnologie auszeichnet und worin ihre wissenschaftliche Basis besteht. Vielfältige Potenziale der Innovation werden vor allem in den Bereichen neuer Materialien, in der Informations- und Kommunikationstechnik und im medizinischen Bereich gesehen, jeweils mit einer Fülle von Anwendungsfeldern. Neben den erheblichen Potenzialen sind jedoch auch Risikofelder zu beachten. Vor allem Gesundheits- und Umweltfolgen künstlich hergestellter Nanopartikel, aber auch Fragen der Verteilungsgerechtigkeit und Sorgen vor einem möglichen Kontrollverlust des Menschen über die Technik begleiten die Nanotechnologie.

Schlüsselworte: Nanotechnologie, Potenziale, Risiken, Visionen

Nanotechnology – scientific fundament and social impacts

Nanotechnology is regarded as an emerging field of innovation with possibly revolutionary impacts. In this paper, we characterize the key issues of nanotechnology and its scientific fundament. Potentials for innovation driven by advances in nanotechnology research are expected in the fields of new materials, in information and communication technologies (innovative approaches and architectures), as well as in the life sciences and medicine. Risks, however, cannot be excluded. Especially the unknown consequences of nanoparticles in the natural environment and for human health are currently under consideration. Furthermore,

questions of equity and concerns about technology becoming increasingly autonomous are part of the debate.

Keywords: Nanotechnology, potentials, risks, visions

1. CHARAKTERISIERUNG DER NANOTECHNOLOGIE

Der Begriff der Nanotechnologie hat sich seit ca. zehn Jahren als Oberbegriff für eine Reihe avancierter Wissenschafts- und Technikrichtungen etabliert, deren Gemeinsamkeit darin besteht, gezielte Analyse und Manipulation in einer Größenordnung zu erlauben, die bislang menschlichem Zugriff verschlossen war: in der Nanometer-Dimension (nm). Ein Nanometer entspricht einem milliardstel Meter. In der Größenordnung von einigen Nanometern liegen z.B. komplexe Moleküle wie die DNA oder einfache Viren.

Vielfach wurde versucht, „Nanotechnologie“ genauer zu definieren oder wenigstens in ihren Inhalten zu umreißen. Diese Versuche sind auf den ersten Blick relativ ähnlich, zeigen aber bei detaillierter Analyse deutliche Unterschiede (Schmid et al. 2003). Zudem ist offen, ob und in welchem Umfang Nanotechnologie verwandte oder benachbarte Gebiete wie z.B. Mikroelektronik oder Biotechnologie einschließt, und wo sie sich von ihnen abgrenzt. Es hat sich bislang keine Definition als allgemein anerkannt durchgesetzt (Decker et al. 2004). Wir verwenden im Folgenden eine pragmatische Definition, nach der Nanotechnologie als Sammelbegriff für Techniken für und mit nanoskaligen Systemen (das sind Systeme, die in mindestens einer Dimension einen Größenbereich zwischen 1 und 100 nm aufweisen), fungiert,

- ⊙ die zielgerichtet und individuell (und nicht „nur“ statistisch in Form einer großen Menge) analysiert und manipuliert werden können, z.B. zur Gestaltung von Oberflächeneigenschaften,
- ⊙ bei denen größenspezifische neue Effekte und Eigenschaften beobachtet oder erzeugt werden können, wie z.B. quantenmechanische Effekte (Schmid et al. 2006),
- ⊙ welche wenigstens der Intention nach – worauf der Wortbestandteil „Technologie“ hinweist – technisch nutzbar gemacht werden (können oder sollen).

Dahinter steht die Idee des technischen Operierens auf der Ebene von Atomen und Molekülen,¹ einer Ebene, die bislang nur dem chemischen und damit statistischen Zugriff auf eine große Zahl von Atomen und Molekülen offen stand. Ermöglicht wurde diese (beginnende) „Eroberung“ des Nanokosmos unter anderem durch neuartige physikalische Analyse- und Mani-

¹ „The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom“ (Feynman 1960).

pulationstechniken wie die Rastersonden- und Rasterkraftmikroskopie. Die Rastertunnelmikroskopie (STM), welche den quantenmechanischen Tunnel-effekt zur Messung von Abständen nutzt, wurde 1981 erfunden. Rasterkraftmikroskopie (AFM) und Rastersondenverfahren sind hoch spezialisierte Weiterentwicklungen, die das Abtasten von Oberflächen auf der Basis stark entfernungsabhängiger elektrischer Potenzialverteilungen möglich machen. Auf diese Weise können „Bilder“ von Oberflächen auf der Nanometerebene, d.h. letztlich auf der Ebene von Atomen, erzeugt werden. Wenn die Abtast„nadel“ sodann nicht nur zur Beobachtung und Messung, sondern als eingreifender „Finger“ für Manipulationen genutzt wird, dann ist – wenigstens theoretisch – ein „Shaping the World Atom by Atom“ (NNI 1999) möglich.

Dabei ist jedoch häufig umstritten, ob Nanotechnologie wirklich „Technologie“ ist. Weder handelt es sich bei der Nanotechnologie im engeren Sinne um *eine* Technologie oder eine Gruppe von Technologien, noch können damit zurzeit in nennenswertem Umfang marktgängige Produkte und Verfahren beschrieben werden. Vielmehr stellt der Begriff der Nanotechnologie einen eher forschungspolitisch und forschungsorganisatorisch geprägten Terminus dar, der zu einem großen Teil auch Grundlagenforschung beinhaltet. Manche Forscher bevorzugen daher die Begriffe nanosciences bzw. Nanowissenschaften. Diese sind, wenn auch der Ausgangspunkt der Nanotechnologie in Entwicklungen liegt, die aus der Physik heraus betrieben worden sind, generell durch ein Überschreiten klassischer Grenzen zwischen Physik, Chemie, Biologie und den Ingenieurwissenschaften gekennzeichnet. Diese interdisziplinäre Ausrichtung kennzeichnet Nanotechnologie von Beginn an und hat teilweise bereits Konsequenzen bis hinein in die universitären Studiengänge.

Nanotechnologie hat in den letzten Jahren auch eine Karriere als öffentlicher und medialer Begriff gemacht und Einfluss bis hinein in Kunst und Literatur ausgeübt. Das möglich gewordene Design von Materialien auf atomarer und molekularer Ebene und, damit verbunden, die Erzeugung und Nutzung von teilweise völlig neuartigen Produkteigenschaften sowie die weitere Miniaturisierung von Komponenten, Produkten und Verfahren bis hin zum Bau von „Nanomaschinen“ sind faszinierend und eröffnen weit reichende Anwendungsmöglichkeiten (Kap. 2). Allgemein wird von der Nanotechnologie ein bedeutender Einfluss auf den Güter- und Arbeitsmarkt des 21. Jahrhunderts erwartet. Nanotechnologie gilt teils gar als Grundlage einer „dritten industriellen Revolution“.

Aus diesen Gründen ist Nanotechnologie in den letzten Jahren in den Mittelpunkt eines regen wissenschaftlichen, forschungspolitischen und zunehmend auch medialen und öffentlichen Interesses geraten. Standen dabei zunächst ausnahmslos die erwarteten positiven Eigenschaften im Mittelpunkt, so hat sich – in einer pluralen Gesellschaft nicht überraschend – mittlerweile auch eine eigene Risikodebatte zur Nanotechnologie entwickelt

(Kap. 3). Dementsprechend sind sozialwissenschaftliche Untersuchungen angelaufen, haben Debatten über Regulierung begonnen, sind eine Reihe von Arbeiten der Technikfolgenabschätzung zur Nanotechnologie für verschiedene Fragen und Adressaten angefertigt worden (z.B. Paschen et al. 2004, Schmid et al. 2006) und wurden ELSI (ethical, legal, societal implications) Aktivitäten zur Nanotechnologie gestartet (z.B. Nanoforum 2004). Im Zusammenhang mit den „Converging Technologies“ (Roco und Bainbridge 2002, Nordmann 2004) werden diese Untersuchungen immer stärker auf die Auswirkungen auf den Menschen und die Zukunft seiner „Natur“ fokussiert, wodurch dieser Ast der gesellschaftlichen Debatte über Nanotechnologie zu einer generellen Diskussion über die Zukunft des Menschen Anlass gab (dazu Kap. 4).

2. INNOVATIONSPOTENZIALE UND ANWENDUNGSFELDER

Mit der Nanotechnologie verbindet sich die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in fast allen Branchen der Wirtschaft (Luther und Malanowski 2004). Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch in den Anfängen, eine Reihe von Produkten und Verfahren hat jedoch bereits den Weg in den Markt gefunden. Methodisch schwierig ist jedoch die Quantifizierung der dadurch erreichten Wertschöpfung. Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist – nicht nur in Deutschland – noch sehr lückenhaft. Auch die Berechnungspraxis ist unterschiedlich, etwa bei Bezug auf die direkten Umsätze mit Nanokomponenten oder die Umsätze mit Produkten, die unter Einsatz von Nanotechnologie hergestellt wurden. Häufig wird mit Patentanalysen gearbeitet, um prospektive Aussagen zu besonders innovationsträchtigen Feldern zu gewinnen (Schmid et al. 2006, Kap. 4). Unter Innovationsgesichtspunkten entscheidend sind die Hebelwirkung der neuen Technologien und ihre vielfältigen Auswirkungen in verschiedensten Anwendungsbereichen. Deren antizipative Erfassung ist allerdings noch erheblich schwieriger als die Einschätzung der direkten Marktpotenziale. Bereits kursierende Zahlenwerte zum Umsatz mit Nanotechnologieprodukten in den nächsten Jahren und zu darauf aufbauenden Arbeitsplatzzahlen sind daher mit äußerster Vorsicht zu genießen (Schmid et al. 2003). Viele Potenziale und Folgen lassen sich bislang nur unter großen Unsicherheiten einschätzen. Nach gängiger Einschätzung sind die Bereiche mit den weitestreichenden Innovationspotenzialen der Nanotechnologie: Neue Materialien (2.1), Information/Kommunikation (2.2) sowie die Lebenswissenschaften/Medizin (2.3).²

² In diesem Kapitel können die wesentlichen Potenziale in diesen Bereichen nur kurz angedeutet werden. Für detailliertere Informationen vgl. Paschen et al. 2004 sowie Schmid et al. 2006.

2.1. NEUE MATERIALIEN

Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung neuer Materialien für innovative Anwendungen bilden die Grundlage für Innovationsansätze in praktisch allen wichtigen Technikfeldern und stehen in engem Zusammenhang mit der künftigen wirtschaftlichen Entwicklung. Die Verkleinerung von Materialstrukturen in den Nanometerbereich hinein führt häufig zu neuen, überraschenden Eigenschaften von Werkstoffen, die makroskopisch beim gleichen Material nicht auftreten. Deutlich höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen, die Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände, hohe chemische Selektivität der Oberflächenstrukturen und eine deutlich vergrößerte Oberflächenenergie lassen sich technisch nutzen und sind ein wesentliches Motiv für weitere öffentliche und private Forschung in diesem Bereich.

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

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

In der chemischen Industrie werden durch nanotechnologische Verfahren neue Materialien als Katalysatoren erschlossen (z.B. Gold-Nanopartikel) und es eröffnen sich neue Synthesewege in der organischen Chemie. Oberflächenaktive Membranen, nanoporöse (Bio)Filter und Adsorptionsmittel sind aus nanotechnologischer Sicht optimierbar, z.B. zur Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung. Durch die nanotechnologische Verbesserung bereits verfügbarer Katalysatoren werden Trägerkatalysatoren mit neuen Eigenschaften zugänglich. In Zukunft wird es verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern.

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

2.2. INFORMATIONS- UND KOMMUNIKATIONSTECHNOLOGIE

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

Neue Konzepte für Komponenten beruhen vor allem auf der Nutzung quantenmechanischer Effekte für die Realisierung kleinerer oder schnellerer

Bauelemente (Quanten-Computing). Längerfristig werden durch die Nutzung der Nanotechnologie im IuK-Bereich aber auch neue Architekturen möglich. Angesichts der Bedeutung der Informations- und Kommunikationstechnologien für die globale Wirtschaft, für die Wissensgesellschaft und im privaten Bereich zeichnen sich hier erhebliche ökonomische Potenziale ab, auch wenn diese Entwicklungen sich aktuell noch in der Forschungsphase befinden, teils in der Grundlagenforschung. Die Forschungsaktivitäten weisen ein beträchtliches Ausmaß auf, was für die Bedeutung des Feldes und seine Zukunftsträchtigkeit spricht.

2.3. LEBENSWISSENSCHAFTEN UND MEDIZIN

Grundlegende Lebensprozesse spielen sich im Nanomaßstab ab, da wesentliche Bausteine gerade diese Größenordnung haben (wie z.B. Proteine und die DNA). Der Begriff der *Nanobiotechnologie* – auch das Wort „Bionanotechnologie“ wird gelegentlich verwendet – ist im Kontext der National Nanotechnology Initiative der USA (NNI 1999) entstanden. Nanobiotechnologie schlägt die Brücke zwischen der unbelebten und belebten Natur und zielt darauf ab, biologische Funktionseinheiten in molekularer Hinsicht zu verstehen sowie funktionale Bausteine im nanoskaligen Maßstab unter Einbeziehung technischer Materialien, Schnittstellen und Grenzflächen kontrolliert zu erzeugen (VDI 2002). Häufig wird unterschieden zwischen „Nano2Bio“, wo es um die Nutzung der Nanotechnologie für die Analyse und Herstellung biologischer Nanosysteme (z.B. subzellulärer Strukturen und Vorgänge) geht, und „Bio2Nano“, das für die Nutzung von Materialien und Bauplänen aus lebenden Systemen zur Herstellung technischer Nanosysteme steht.

Die Vorgänge in einer Zelle können mit nanotechnologischen Verfahren analysiert und technisch nutzbar gemacht werden. Molekulare „Fabriken“ (Mitochondrien) und „Transportsysteme“, wie sie im Zellstoffwechsel eine wesentliche Rolle spielen, können Vorbilder für kontrollierbare Nanomaschinen sein (Nachtigall 2002, S. 122ff). Auch Mechanismen der Energieerzeugung und Transportsysteme sowie Datenspeicher und Datenlesesysteme großer Kapazität, in denen funktionelle Biomoleküle als Bestandteile von Lichtsammel- und Umwandlungsanlagen, Signalwandler, Katalysatoren, Pumpen oder Motoren arbeiten, stehen im Interesse der Nanobiotechnologie.

Um die vielfältigen Potenziale zur gezielten Nutzung biologischer Prozesse für technische Zwecke zu nutzen, sind neue interdisziplinäre Ansätze erforderlich, um zu lernen, wie biologische Nanostrukturen gebaut sind, funktionieren und innerhalb von größeren biologischen Systemen interagieren. Es sind Analyse- und Manipulationswerkzeuge sowie Methoden zu entwickeln, um Bauteile zu schaffen, die aus biologischem und anorga-

nischem Material bestehen. Diese Schnittstellen und Übergänge zwischen biologischen und anorganischen Systemen auf der molekularen Ebene zu verstehen, ist ein zentraler Schritt in diese Richtung.

Große Hoffnungen werden in die Potenziale der Nanotechnologie zur besseren medizinischen Versorgung gesetzt. Mit Hilfe Nanotechnologie-basierter Diagnoseverfahren können möglicherweise Krankheiten oder Dispositionen für Krankheiten früher erkannt werden. Bei der Therapie besteht Aussicht, mit Hilfe der Nanotechnologie gezielte und nebenwirkungsfreie Behandlungen zu entwickeln. Vor allem die breite Anwendung nanopartikulärer Dosiersysteme (drug delivery) könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung und zur Vermeidung unerwünschter Nebenwirkungen führen. Durch Verfahren der Nanotechnologie kann die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden.

Ein interessantes Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate (Neurobionik) dar, die Schäden an Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren. Mikroimplantate könnten die Funktionsfähigkeit von Gehör und Sehsinn wieder herstellen. Die wohl weitreichendste Vision zur Rolle von Nanotechnologie wurde Anfang des Jahrzehnts in den USA vorgestellt. Dort wurden unter den Überschriften „konvergierende Techniken“, Converging Technologies (CT) oder NBIC (nano-bio-info-cogno) convergence Ansätze zur technischen Wiederherstellung oder Verbesserung motorischer, sensorischer oder kognitiver Fähigkeiten des Menschen diskutiert und untersucht. Insbesondere durch die synergistische Kombination emergenter Nano-, Bio- und Informationstechniken mit den Erkenntnissen der Kognitionswissenschaften erschlossen sich technische Ansätze, bislang biologisch begrenzte Fähigkeiten des Menschen erweitern und „verbessern“ zu können oder Alterungsprozesse deutlich zu verlangsamen (Roco und Bainbridge 2002; vgl. auch Kap. 4 in diesem Beitrag). Als Schlüssel für diese vermutete, teils auch postulierte Konvergenz gilt dabei das zielgenaue Operieren auf der Ebene von Atomen und Molekülen, wie es die Nanotechnologie mit ihren Analyse- und Manipulationsverfahren ermöglicht.

3. RISIKEN UND BEFÜRCHTUNGEN

Angesichts der genannten Potenziale und der erwartbaren Eingriffstiefe der Nanotechnologie in Entwicklungs- und Produktionsprozesse in der Wirtschaft und in viele technische Produktfelder ist es nicht überraschend, dass ebenfalls gesellschaftliche Folgen, ethische Aspekte und mögliche Risiken der Nanotechnologie thematisiert werden. Im Folgenden werden drei Teilthemen aus dem Spektrum der Themen herausgegriffen: Gesundheitswirkungen von Nanopartikeln (3.1), Aspekte der Verteilungsgerechtigkeit (3.2) und Befürchtungen eines Kontrollverlustes des Menschen über die Technik (3.3).

3.1. GESUNDHEITS- UND UMWELTWIRKUNGEN VON NANOPARTIKELN

Am konkretesten ist die Frage nach Gesundheits- oder Umweltrisiken von Nanopartikeln. Beim Übergang in die Nanometerdimension ändern sich – bei gleicher chemischer Zusammensetzung – viele Eigenschaften von Materialien, insbesondere in Abhängigkeit von der Partikelgröße, von ihrer Gestalt und von ihren Oberflächeneigenschaften. Daher kann der Größenübergang zu einem modifizierten Verhalten von Nanopartikeln in der Umwelt oder in lebenden Organismen führen. Die toxikologische Forschung dazu hat bereits eingesetzt und wird mit Nachdruck vorangetrieben, die bisherigen Kenntnisse sind aber noch spärlich und wenig abgesichert (Schmid et al. 2006, Kap. 5).

Künstlich hergestellte Nanopartikel werden bereits in Cremes, Pasten, Kosmetika, Zahnpasta, im Bereich der Toner für Drucker und Kopierer, zum Sonnenschutz, in Farben, Lacken und Klebern, als Zusatz in Autoreifen, als Nahrungsmitteladditiva sowie zur Oberflächenimprägnierung eingesetzt. Durch Emissionen während der Herstellung oder beim alltäglichen Gebrauch von Produkten könnten sie in die Umwelt gelangen. Nanopartikel können eventuell auf dem Luftweg über weite Strecken transportiert und diffus verteilt werden. Im Hinblick auf die potenzielle Ausbreitung von Nanopartikeln sind Aspekte wie Mobilität, Reaktionsfreudigkeit, Persistenz, Lungengängigkeit, Wasserlöslichkeit etc. zu berücksichtigen (Colvin 2002). Diese Aspekte sind bislang kaum erforscht, ebenso wie über die Lebensdauer von Nanopartikeln in der Umwelt wenig bekannt ist.

Durch Inhalationsversuche an Ratten wurde empirisch gezeigt, dass Kohlenstoff-Nanopartikel beträchtliche Lungenschäden verursachen können. Ihr toxisches Potenzial steigt mit kleiner werdender Partikelgröße und größer werdender Partikeloberfläche. Bei hohen Konzentrationen ist eine hohe Mortalität die Folge, mit der Ursache einer Verstopfung der Hauptatemwege durch Partikel-Agglomerate, nicht also durch mögliche Toxizität der Partikel selbst. Ob diese Ergebnisse etwas über die potenziellen Folgen für Menschen aussagen, lässt sich heute nicht mit Sicherheit sagen.

In den menschlichen Körper können Nanopartikel über die Lunge, durch die Haut oder den Verdauungstrakt gelangen. Ihre Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt, insbesondere potenzielle Langzeitfolgen, sind bisher kaum bekannt (Schmid et al. 2006, Kap. 5). Dies gilt auch und vor allem für Stoffe, die in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes. Zu naheliegenden Fragen der Art

- ⊙ geht mit Produkten auf Basis von Nanopartikeln überhaupt eine nachweisbare Exposition für den Menschen bei Herstellung, Gebrauch oder Entsorgung einher?
- ⊙ auf welchen Wegen erfolgt diese Exposition?
- ⊙ ist mit dieser ein Risiko verbunden und wie ist dieses für das jeweilige Produkt (bei kurativen Anwendungen möglicherweise anders als bei kosmetischen) zu bewerten?

-
- ⊙ sind neue Vorsorgekonzepte (etwa Arbeitsschutz bei Fertigung und Umgang mit nanoskaligen Partikeln sowie Vorkehrungen zur Vermeidung von deren Freisetzung) notwendig und ggf. bereits in der Entwicklung?

ist in den letzten Jahren eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten angelaufen. Im Hintergrund steht unter anderem die Erfahrung mit den gesundheitsschädlichen Auswirkungen des Asbestes, die teils erst Jahrzehnte nach der Exposition gegenüber Asbestfasern in Form von häufig tödlichen Krebserkrankungen erkennbar werden (Gee und Greenberg 2002).

Das Nichtwissen über mögliche Gesundheits- und Umweltfolgen hat angesichts dieser und anderer negativer Erfahrungen, vor allem mit Chemikalien, frühzeitig zur Forderung nach einem Moratorium in Bezug auf die kommerzielle Nutzung von Nanopartikeln geführt (ETC 2003). Bis die Datenlage sich verbessert hat, gebietet das Vorsorgeprinzip (precautionary principle) in der Tat einen besonders sorgsamem Umgang mit Nanopartikeln und eine systematische Langzeit-Beobachtung sowie eine kontinuierliche Auswertung des verfügbaren Wissensstandes (Haum et al. 2004). Eine neuere Analyse hat ergeben, dass das Vorsorgeprinzip in der Tat angesichts der Wissensdefizite anwendbar ist (Schmid et al. 2006, Kap. 5.3), das es allerdings keinen hinreichenden Anlass für ein Moratorium gibt. Jedoch lässt sich eine ganze Reihe von Maßnahmen ableiten, um in der aktuellen Situation verantwortungsvoll zu verfahren. Zu diesen Maßnahmen gehören danach

- ⊙ die Entwicklung einer Nomenklatur von Nanopartikeln, um diese nach toxischen und anderen Kriterien klassifizieren zu können,
- ⊙ die Empfehlung, Nanopartikel wie neue chemische Substanzen zu behandeln, auch wenn ihre chemische Zusammensetzung vertraut ist,
- ⊙ die Entwicklung von Testmethoden, um schnell und vergleichbar erforderliche Daten zu beschaffen,
- ⊙ Forschungsaktivitäten, insbesondere in Umweltchemie und Toxikologie, um die Wissensdefizite zu überwinden,
- ⊙ die Entwicklung von „good practices“ und entsprechenden Leitlinien im Umgang mit Nanopartikeln, z.B. am Arbeitsplatz, etwa in Form der Minimierung oder Vermeidung der Freisetzung von Nanopartikeln,
- ⊙ die ständige Beobachtung und Auswertung des weltweit verfügbaren Wissens über Gesundheits- und Umwelteffekte von Nanopartikeln, um nicht die Versäumnisse der Asbest-Geschichte in dieser Hinsicht zu wiederholen (Gee und Greenberg 2002),
- ⊙ die Führung eines offenen und transparenten Diskurses mit der Öffentlichkeit.

Auf diese Weise würde auch eine gute Chance bestehen, gravierende Pannen in der Kommunikation zwischen Wissenschaft und Gesellschaft, wie sie etwa in der Kernenergie-debatte und in der Auseinandersetzung um gentechnisch veränderte Organismen aufgetreten sind, zu vermeiden.

3.2. VERTEILUNGSGERECHTIGKEIT

Mögliche Nebenfolgen ganz anderer Art der Nanotechnologie ergeben sich aus Gerechtigkeitstheoretischen Überlegungen. Wie werden die Nutzungsmöglichkeiten der Nanotechnologie verteilt sein und welche Folgen wird sie für gesellschaftliche Spaltungen haben (Baumgartner 2004, S. 44f)? Einschlägig zu dieser Frage bereits: „*Nanotech offers potential benefits in areas such as biomedicine, clean energy production, safer and cleaner transport, and environmental remediation: all areas where it could be of help in developing countries. But it is at present mostly a very high-tech and cost-intensive science, and a lot of the current research is focused on areas of information technology where one can imagine the result being a widening of the gulf between the haves and the have-nots*“ (Mnyusiwalla et al. 2003).

Probleme der Verteilungsgerechtigkeit stellen sich grundsätzlich in jedem Feld technischer Innovation. Da wissenschaftlich-technischer Fortschritt erheblicher Investitionen bedarf, findet er in der Regel dort statt, wo bereits die größten ökonomischen und personellen Ressourcen vorhanden sind. Technischer Fortschritt vertieft häufig tendenziell bereits vorhandene Ungleichverteilungen. Die gesamte auf Nanotechnologie basierende Forschung, Entwicklung und Produktion erfordert Fähigkeiten, die praktisch nur durch hoch entwickelte Staaten zu erbringen sind. Durch den Querschnittscharakter dieses Technologiefeldes müssen diese eine Vielzahl unterschiedlicher instrumenteller und organisatorischer Voraussetzungen erfüllen. Hierzu dürften heute und in absehbarer Zukunft nur wenige Hauptakteure wie USA, Europa, Japan, China, Russland und einige High-Tech-Schwelstaaten im Stande sein. Daher ist derzeit nicht erkennbar, dass sich die Technologielücke zwischen Reich und Arm durch Nanotechnologie verringern lässt (Paschen et al. 2004).

Dies sei am Beispiel der Nanotechnologie in der Medizin erläutert (nach Fleischer 2003). Nanotechnologiebasierte Medizin wird mit großer Wahrscheinlichkeit teure Medizin sein. Fragen der Verteilungsgerechtigkeit und des „Zugangs“ zu medizinischen Möglichkeiten könnten zumindest in zweierlei Hinsicht dringlich werden: *innerhalb* industrialisierter Gesellschaften (bestehende Ungleichheiten im Zugang zu medizinischer Versorgung könnten durch eine weiter hoch technisierte Medizin unter Verwendung von Nanotechnologie verstärkt werden) und mit Blick auf weniger entwickelte Gesellschaften, weil sich ebenfalls bereits bestehende und teils dramatische Ungleichheiten zwischen technisierten und Entwicklungsländern weiter verschärfen könnten. Befürchtungen in Bezug auf diese beiden Formen eines möglichen „Nano-divide“ (in Anlehnung an den bekannten „digital divide“, vgl. Riehm und Krings 2006) basieren auf der Annahme, dass Nanotechnologie sowohl zu neuen und erweiterten Optionen individueller Selbstbestimmung (z.B. im gesundheitlichen Bereich) als auch zu erheblichen Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften beitragen kann.

Auch insofern von der Nanotechnologie eine „technische Verbesserung“ des Menschen erwartet wird, werden bereits Aspekte der Verteilungsgerechtigkeit thematisiert (Siep 2005).

Laufende Diskussionen zur Verteilungsgerechtigkeit auf nationaler und internationaler Ebene (auch im Kontext der Nachhaltigkeit, Kopfmüller und Grunwald 2006) dürften von daher in Bezug auf Nanotechnologie neue Relevanz erhalten, zumal es auch große Hoffnungen gibt, dass Nanotechnologie auch und gerade den Entwicklungsländern zugute kommen könnte (so bereits Drexler 1986). Es wird bereits gefordert, in der Bearbeitung ethischer Aspekte der Nanotechnologie Entwicklungsländer zu beteiligen (Mnyusiwalla et al. 2003).

3.3. KONTROLLVERLUSTÄNGSTE

In der Folge des berühmt gewordenen Beitrages von Bill Joy (2000) kam zu den bis dahin fast ausschließlich positiven Zukunftserwartungen in der Öffentlichkeit hinsichtlich der Nanotechnologie eine apokalyptische Dimension hinzu. Nachdem die Nanotechnologie bis dahin als ideale und saubere Technologie galt, entstand innerhalb weniger Monate eine internationale Risikodiskussion. Für viele überraschend, waren die hoch spekulativen Diskussionen über mögliche dramatische Gefahren in weiter Zukunft Auslöser einer Risikodiskussion, während die viel konkreteren Risiken durch neue Materialeigenschaften auf der Nanoebene, insbesondere durch Nanopartikel, erst im Anschluss breiter thematisiert wurden (s.o.). Ausgangspunkt waren Sorgen, dass selbst replizierende Nanoroboter auf der Basis des molekularen Assemblers (Drexler 1986) eines Tages außer Kontrolle geraten und (1) den Menschen überflüssig machen würden (Joy 2000), oder (2) dazu führen könnten, dass Menschen auf diesem Wege zur Beute ihrer eigenen technischen Hervorbringungen würden:

1. Im „grey goo“ Szenario wird befürchtet, dass außer Kontrolle geratene, sich selbst vervielfältigende Nano-Roboter sich eines Tages rasch unbegrenzt und unkontrollierbar vermehren und dabei alles organische Material der Biosphäre verbrauchen könnten. Es könnte sein, dass innerhalb weniger Tage nur noch eine Schicht von Abfallprodukten dieses Prozesses übrig wäre und in Form eines „grauen Schleims“ die Erde überziehen würde.³ Dieser Typ eines apokalyptischen Szenarios ist aus der Science Fiction Literatur bekannt. Vor dem Hintergrund von Hans Jonas' (1979) „Primat der schlechten Prognose“ und seiner „Heuristik der Furcht“ als Orientierungen für eine vorsichtige und im Zweifelsfall

³ „Tough, omnivorous ‚bacteria‘ could out-compete real bacteria: they could spread like blowing pollen, replicate swiftly, and reduce the biosphere to dust in a matter of days“ (Drexler 1986, S. 172).

lieber auch übervorsichtige Herangehensweise an die Zukunft wäre die reine Denkmöglichkeit solcher Entwicklungen bereits Anlass für einen Ausstieg aus der Nanotechnologie, zumindest aus den Bereichen, wo dieses Szenario in den Blick geraten könnte. In dieser Tradition steht die erwähnte Forderung nach einem Moratorium für die Nanotechnologie (ETC 2003).

2. Das „prey“ Szenario basiert ebenfalls auf der Idee von Nano-Robotern, und es geht ebenfalls um einen Kontrollverlust des Menschen. Anders als im „grey goo“ Szenario steht hier jedoch nicht die Möglichkeit eines raschen Endes der gesamten Biosphäre durch einen Amoklauf dieser Roboter im Blickpunkt, sondern die Übernahme der Macht durch die Roboter. Dieses war die Idee in „Why the future doesn't need us“ (Joy 2000): statt menschlich gesetzten Zwecken zu dienen, könnten die Roboter sich selbständig machen und die Kontrolle über den Planeten Erde übernehmen. Eine technische Zivilisation wäre dann auf den Menschen nicht mehr angewiesen.

Obwohl sich diese „dunkle Seite“ der primär positiv gemeinten nanotechnologischen Visionen teils schon in Drexlers frühem Buch (1986, vgl. Fußnote 3) findet, wurden diese Kontrollverlustängste erst in der Folge des genannten Joy-Beitrages (2000) zu einem öffentlichen Thema. Das Aufkommen solcher Szenarien ist dabei nicht überraschend, denn Kontrollverlustängste und die Sorge vor der Übernahme der Macht durch die Technik begleiten den technischen Fortschritt bereits lange. Welche kommunikative Macht derartige Szenarien haben können, wird dadurch deutlich, dass dieser Typ von Befürchtungen die Risikodebatte zur Nanotechnologie auslöste (Schmid et al. 2006).

4. NANOTECHNOLOGIE ALS CHIFFRE DER ZUKUNFT

Die wissenschaftliche Debatte, aber auch – und vielleicht noch mehr – die gesellschaftliche Rezeption und die politische Rhetorik im Umfeld der Nanotechnologie, ist von teils weit reichenden Zukunftserwartungen, Zukunftsvisionen, aber auch Zukunftsbefürchtungen durchzogen, mit einem fließenden Übergang zu technikfuturistischen Überlegungen und zur Science Fiction (Coenen 2006). Diese Debatten zeugen nicht nur von einem großen Interesse an der Nanotechnologie und ihren mutmaßlichen gesellschaftlichen Folgen, sondern sind Ausdruck allgemeinerer gesellschaftlicher „Verhaltungen“ zur Zukunft. Nanotechnologie und die „Converging Technologies“ (Roco und Bainbridge 2002) bezeichnen nicht nur Technologiebereiche mit Zukunftspotenzial, sondern haben gesellschaftliche Zukunftsdiskussionen beträchtlicher Reichweite ausgelöst. Dabei geht es nicht „nur“ um die Zukunft der Technologielinien oder um sich daraus ergebende gesell-