

Liebe Leserinnen und Leser,

der Begriff »Nanotechnologie« ist seit längerer Zeit ein häufig genannter. Das Bundesforschungsministerium fördert diese Technologie in beachtlichem Umfang. Verschiedene eher geisteswissenschaftlich ausgerichtete Institutionen im deutschsprachigen Raum widmen sich dem neuen Themenfeld. Und es finden insbesondere in den USA große Kongresse zum Themenfeld statt, die gelegentlich allerdings eher an »Road-Shows« einschlägig tätiger Unternehmen erinnern und weniger an wissenschaftliche Veranstaltungen. »Nano« scheint attraktiv – daher der Name »Magic Nano« eines Bad-Pflege-Sprays. Die sinnvolle Unterscheidung zwischen der Arbeit mit nano-skalierten Materialien und der Veränderung von Molekülstrukturen im Nano-Bereich (etwa im Rahmen der Werkstoff-Forschung) findet in der öffentlichen Diskussion nur selten Platz.

Gleichwohl: Man sollte die Frage stellen, ob sich durch mittlerweile zunehmend besser beobachtbare nano-skalierte Partikel für die menschliche Gesundheit, für Tiere oder für die Ökosysteme Wirkungen beschreiben lassen, die auch in ethischer Perspektive relevant sein können. Auch wenn wir uns hier im kleinsten erkennbaren Raum bewegen – die Fragen können große Wirkungen zum Gegenstand der Reflexion machen.

TTN will sich mittelfristig eingehend mit den Herausforderungen durch die Nano-Technologie befassen. Hier wird es zuerst einmal darum gehen, zu erfassen, was denn in diesem Bereich bereits erforscht und was in absehbarer Zukunft an Innovationen zu erwarten ist. Dann sollen ethische Kriterien einer fallweisen Bewertung entwickelt werden.

Die aktuelle Ausgabe von **FORUMTTN** bietet Ihnen einen Überblick über Anwendungen der Nanotechnologie (Dr. Alexander W. Holleitner, Center for NanoScience, CeNS, und Departement für Physik, LMU München) sowie einen Beitrag aus der Perspektive der Wissenschaftstheorie (Prof. Dr. Angelika Karger, Privatdozentin für Wissenschaftstheorie am Institut für Philosophie der Universität Stuttgart und Professorin an der Hochschule für Gestaltung, Schwäbisch-Gmünd) und der Ethik (Mette Ebbesen, Center for Bioethics and Interdisciplinary Nanoscience Center, University of Aarhus).

Des Weiteren bieten wir Ihnen u.a. einige Informationen über die

von TTN organisierte Dialog-Initiative zur Ethik in der Nutztierhaltung und über die Fortführung der TTN-Aktivitäten zum Schwerpunktthema Alzheimer-Demenz.

Auch in dieser Ausgabe weisen wir auf die Möglichkeit für Studierende aller Fachrichtungen hin, dem Trägerverein des TTN zu stark vergünstigten Konditionen beizutreten. Wir würden uns freuen, wenn viele Studierende davon Gebrauch machen wollten.

Ich wünsche Ihnen wie immer eine anregende Lektüre und grüße Sie im Namen des ganzen Teams von TTN herzlich.

Ihr Roger J. Busch, Herausgeber

Wissenschaftstheoretische Fragen und Aufgaben zur Nanotechnologie

Angelika Karger

Fragenkatalog

Wissenschaftstheoretische Fragen zur Nanotechnologie fächern sich in eine Reihe umfassender spezifischer Aufgabenstellungen auf, welche ich erfassen möchte, und zwar im Bemühen um, jedoch ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

Die erste wissenschaftstheoretische Aufgabe umfasst die chronologische und systematische *Wissenschaftsgeschichte*, wenn gegeben unter Einbeziehung der *Wissenschaftsforschung*, die zweite Aufgabe umfasst die *erkenntnistheoretische Frage der Möglichkeiten und Grenzen der Erkennbarkeit, Darstellbarkeit und Vermittelbarkeit* des Gegenstandes, drittens ferner die wissenschaftstheoretische Frage des Bezuges zwischen *Theorie und Praxis* bzw. zwischen *Erkenntnis und Handeln*. Wo immer Erkenntnis und Handeln im Spiel sind, ergeben sich selbstverständlich verschiedene auf die *Erkenntnis bezogene a) primär ästhetische Fragen und auf das Handeln bezogene b) primär ethische Fragen der Grenzen der grundsätzlichen Machbarkeit und der ethisch verantwortbaren Anwendung* in allen Bereichen der Wissenschaft, Wirtschaft, Kultur etc. So entstehen beispielsweise Aufgaben ästhetisch-ethisch praktischer Art der Gestaltung im weitesten Sinne, d.h. z.B. der Umsetzung von Anwendungen der Nanotechnologie in der Produktge-

staltung und der Abschätzung ihrer Folgen und Risiken, aber auch in der ästhetischen Gestaltung ihrer Kommunikation, einerseits als Frage ihrer grundsätzlichen wissenschaftsinternen und wissenschaftsexternen Vermittlung, andererseits durch die Abschätzung der Folgen eines stets durch neu eröffnete Wahrnehmungsräume sich verändernden *Welt- und Menschenbildes*.

Die vierte große Aufgabe liegt in der Entdeckung oder Aufdeckung auch *metaphysischer Darstellungen und Hintergründe in der Philosophie*, welche geeignet sind, erhellende Schlaglichter auf die benannten Fragen zu werfen.

Zu allen von mir benannten Aufgaben möchte ich einige Anmerkungen und Ausführungen darlegen, in der Hoffnung Klärendes beitragen zu können.

Kurze Wissenschaftsgeschichte der Nanotechnologie

Wer eine heitere, nicht immer ganz ernst gemeinte und zum Teil auch zynische, jedoch korrekt recherchierte Geschichte der Nanotechnologie goutieren möchte, der greife z.B. zu Mathias *Schulenburg* (1995). Wer sich mehr für die technischen Fakten interessiert, greife je nach Hintergrund zur Fachliteratur, z.B. zu *Rubabns Nanophysik* (2004), zu den inzwischen zahlreich erschienenen wissenschaftlichen Sonderheften z.B. von »Spektrum der Wissenschaft spezial« oder zu Themenheften des »M.I.T. Technology Review, Magazin für Innovation 2005« u.v.a.m.

Die Wissenschaft von der Erkenntnis der kleinsten Materieteilchen beginnt theoretisch selbstverständlich schon bei den Vorsokratikern und führt über *Leukipp*, *Demokrit* u.a., dann über *Aristoteles* u.s.f. bis zur heutigen theoretischen Physik, immer unter salopp gesprochen der faustischen *Erkenntnis-Frage* nach dem, was die Welt im Innersten zusammenhält.

Die *Frage der Anwendung* hat in allen Kulturen zur Kunst der Miniaturisierung der Werkzeuge und Werkstücke geführt, zu immer feinerem *Präzisionswerkzeug*, von denen die Werkzeuge und Arbeiten Schweizer Uhrmacher pars pro toto bei uns sprichwörtlich sind, die schon im 19. Jahrhundert Messskalen mit Einteilungen von 10 Mikrometern benutzen. Und der Ingenieur *Joseph Whitworth*, der 1841 den britischen Standard für Industrieschrauben einführte, konnte bereits Oberflächen mit einer Präzision von weniger als einem Mikrometer bearbeiten. Interessanterweise entstand zur selben Zeit ein Technikgebiet der Miniaturisie-

rung außerhalb der Feinmechanik: nämlich die Fotografie, vertreten durch den Pionier Joseph *Niepee*, der 1827 den ersten Film entwickelte. Wenn man so will, führt von der Fotografie ein fast direkter Weg zum Intel-Chip 1971, da die Fotografie und die Chiptechnologie durch das natürliche Werkzeug elektromagnetischer Strahlung verbunden sind, von der Licht nur ein Sonderfall ist.

Gemeinsam ist der methodischen, wissenschaftlichen Erkenntnis und der Anwendung ihrer positiven Ergebnisse das Streben nach stets sich steigender Präzision (sowohl der Erkenntnis als auch der Werkzeuge zur Anwendung) als Ideal, was uns zu der grundsätzlich erkenntnistheoretischen Frage der letzten Erkenntnis- und Anwendungsgrenze und zu den Wurzeln des Ideals der höchsten Präzision im *Platonischen* Idealismus führt – dazu später.

Weitere wichtige Eckdaten möchte ich hier holzschnittartig angeben und nur die Daten kommentieren, die für die aktuelle Diskussion wichtig sind: 1900 führt der Physiker Max *Planck* das Wirkungsquant ein, 1913 publiziert Niels *Bohr* sein Atommodell, 1925/26 formulieren Werner *Heisenberg*, Erwin *Schrödinger* und Paul *Dirac* die Quantenmechanik und 1931 erfindet Ernst *Ruska* das Elektronenmikroskop. 1953 endlich der Durchbruch zur kleinsten biologischen Informationseinheit: James *Watson* und Francis *Crick* veröffentlichen die DNA-Struktur.

Ein bis heute gefeiertes Datum unter Nanotechnologien ist die berühmte Rede von 1959 »There's plenty of room at the bottom« des amerikanischen Physikers Richard *Feynman*, die er an der Universität Berkeley hielt. Und zwar gefeiert, weil er darin behauptet, dass es im Prinzip der Physik möglich wäre, jeden chemischen Stoff herzustellen, welcher ihr von der Chemie in Auftrag gegeben würde, indem man eines Tages die Atome einfach dort plaziere, wohin die Chemie sie haben wolle. Soweit eine der vielen Visionen Feynmans.

Der Begriff »Nano-Technology« taucht aber das erste Mal dann erst 1974 in einem Fachartikel des Ingenieurs Norio *Taniguchi* von der Universität Tokio auf, und 1981 schließlich gelang es dem Schweizer Physiker Heinrich *Rohrer* vom IBM-Labor in Rüschlikon bei Zürich zusammen mit dem Deutschen Physiker Gerd *Binnig*, durch die Entwicklung des *Rastertunnelmikroskopes* die grundsätzlichen Voraussetzungen für die Umsetzung von Feynmans Vision zu schaffen. Sie erhielten den Nobelpreis. Die Manipulation einzelner Atome wurde vollends möglich durch das im selben Jahr von Gerd *Binnig*, Christoph *Gerber* und Calvin *Quate* entwickelte *Rasterkraftmikroskop*.

Es war auch das Jahr 1986, in dem der Ingenieur und heute als ein

solcher weltbekannte Nanovisionär Eric Drexler sein Buch »*Engines of Creation*« herausbrachte, in dem Fabriken und Nanometer-Roboter beschrieben werden. Die Arbeit ist in keiner Weise ein wissenschaftliches Buch, sondern vielmehr eine Art Manifest, das sich die hypothetische Weiterentwicklung von Feynmans Visionen auf seine Fahnen geschrieben hat. Für die gedankliche Weiterentwicklung hatte Drexler schon Jahre zuvor das bis heute existierende »*Foresight Institute*« in Los Altos gegründet.

Drexler ist bekannt dafür, dass er nicht mehr selbst in der Öffentlichkeit auftritt und sich durch sein Sprachrohr Ralph Merkle offiziell vertreten lässt. Drexler berät auch die amerikanische Regierung.

Zwischen Richard Smalley, der zusammen mit Robert Curl und Harold Kroto den Aufbau eines *C₆₀-Moleküls* entdeckt hatte, und Drexler hat sich eine bis heute interessante *Auseinandersetzung zu den Grundlagen der Nanotechnik* entsponnen. Auch davon später.

1989 gilt als ein weiterer Meilenstein der technologischen Entwicklung, als Don Eigler (IBM) es gelingt, mittels des Rasterelektronenmikroskopes den *Schreibtzug »IBM«* aus exakt nur 35 Xenon-Atomen auszurichten. 1991 entwickelt Michael Grätzel (ETH Lausanne) eine *Nano-Solarzelle* und Sumio Iijima (NEC) publiziert die Entdeckung verschachtelter Kohlestoffröhrchen. 1994: Dieter Bimberg (TU Berlin), *Quantenpunktlaser*; 1998: Cees Dekker (TU Delft), *Transistor aus Nanotubes*; 1999: James Tour (Rice University) und Mark Reed (Yale University), *Ein-Elektronen-Schalter*; 2001: erste *molekulare Schaltkreise* in vielen Forschungsgruppen; 2002: Stanley Williams und Philip Kuekes (HP), *Chip aus gekreuzten Nanodrähten*; 2004: University Berkeley and Stanford, *erster integrierter Schaltkreis aus Nanoröhren*. Soweit zur Geschichte der Grundlagenforschung.

Theorie und Praxis der Nanotechnologie

Inzwischen ist die Nanotechnologie und ihre verschiedenen Anwendungen in der internationalen Forschungslandschaft fest etabliert und wird durch Mittel der Länder und des Bundes sowie durch die Wirtschaft gefördert (vgl. entsprechende Berichte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung: Die deutsche Regierung hat das Forschungsfeld allein im Jahr 2004 mit 148 Millionen Euro gefördert, die Regierung der USA gab im selben Jahr dafür 850 Millionen Dollar frei). In Deutschland gibt es mittlerweile mindestens neun Kompetenzzentren zur Nanotechnologie, z.B. das *CENTech* (Center of Nanotechnology) in Münster,

zu dem auch Forschungsgruppen unter der Federführung von Harald *Fuchs* zählen, die offiziell zur Universität Münster gehören oder das *Institut für Neue Materialien* (INM) an der Universität Saarbrücken; Helmut *Schmidt*, zuständig für die Materialforschung in Saarbrücken, betont gelegentlich, dass Experimente und Anwendungen im nanoskalaren Bereich Biologen und Chemikern im Grunde nichts Neues seien, wie die *klassische Kolloidforschung* zeige: Schon vor Zeiten wurde zur Gewinnung von Rubinglas Nanopartikel Gold verwendet.

Was aber die heutige Grundlagenforschung natürlich auszeichnet, ist der Versuch der »punktgenauen Manipulation«, des exakten Eingriffes bzw. Angreifens am Atom.

Bereits populär bekannt gewordene Anwendungen der Nanotechnologie sind neu entwickelte Materialien zur Veredelung von *Oberflächen*: Easy-to-Clean-Produkte mit Lotus-Blüten-Effekt, Kosmetika, insbesondere Sonnenschutzmittel: die Herstellung *kratzfester* und/oder *hitzebeständiger* Materialien zum Feuerschutz u.v.a.m.

Leider machen notwendig gewordene Rückholaktionen vom Markt einiger dieser Produkte von sich reden, da diese in Verdacht geraten sind, gesundheitlich bedenkliche Schäden ausgelöst zu haben. In der Tat weiß man aus Experimenten, dass man berücksichtigen muss, dass viele nano-skalierte Moleküle andere Eigenschaften als mikro-skalierte Moleküle desselben Stoffes in der Makrowelt zeigen können und so in der Anwendung durchaus nicht nur *Chancen*, sondern auch *Risiken* bestehen können.

Weniger bekannt in der Öffentlichkeit sind noch die Arbeiten im Bereich der angewandten Medizin: Forschern in der *Charité Berlin* um Andreas *Jordan* gelang es, Eisenoxid-Nanopartikel genau deshalb, weil deren Oberflächen mit speziellen organischen Molekülen durch die Saarbrücker behandelt wurden, quasi »punktgenau« und ungeheuer schnell ausschließlich in die Zellen von Tumoren, z.B. in Glioblastome, einzuschleusen, sogar dann, wenn diese sich in schwer zugänglichen Körperregionen befinden, wie z.B. dem Gehirn. Die behandelten superparamagnetischen Teilchen werden nach Einschleusung in die Tumorzellen einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt und beginnen zu oszillieren sowie das Zellplasma auf mehr als 45 Grad zu erwärmen, worauf die Tumorzellen nach ca. einer halben Stunde abgestorben sind. Die umgebenden gesunden Zellen, die ja keine Nanomagnetiten aufgenommen haben, erwärmen sich dagegen nicht. Wie gesagt haben nanoskalierte Moleküle oft andere Eigenschaften als mikrometergroße Körnchen. In diesem Fall wirkt sich dies positiv für die Patienten aus. Zudem

verlieren die Nanomagneten ihren magnetischen Charakter wieder, wenn das Feld abgeschaltet wird, so dass kein magnetisches Partikel im Körper zurückbleibt. Die Teilchen werden mit dem abgetöteten Gewebe vom Körper abgebaut und entsorgt. Die ersten klinischen Studien, die Jordan durchgeführt hat, sind ermutigend und es wurde der *Sonderforschungsbereich 273 »Hypertberme Methodik und Klinik«* begründet.

Die Liste von Anwendungen ließe sich leicht erweitern.

Die spezifischen Chancen und Risiken, die hier am Beispiel aufgezeigt wurden, gelten selbstverständlich auch im Allgemeinen, wie dies in der Normalwissenschaft immer der Fall ist, sobald neue Ergebnisse aus der theoretischen Grundlagenforschung in der Praxis der empirischen Wirkwelt erprobt werden.

Es besteht m. E. weder ein besonderer Anlass zur Euphorie noch – wie hierzulande gern einmal in einem technikskeptischen bis technikfeindlichen Klima gepflegt – ein Anlass zu paranoider Hysterie.

Erkenntnistheoretische Fragen zur Nanotechnologie

Aufgeregtheit herrscht immer dann in der Öffentlichkeit, wenn uns aufgrund einer aktuell diskutierten Wissenschaftsfrage wieder einmal zu Bewusstsein kommt und deutlich wird, dass wir uns »normalerweise« im *Mesokosmos*, im uns wahrnehmbaren Bereich mittlerer Dimension der Phänomene bewegen (unsere alltäglichen Normen haben sich in diesem Bereich evolutionär entwickelt) und dass wir darüber hinaus verspannt sind zwischen den »realen« (? – so fragen wir uns) Welten des *Mikrokosmos* und des *Makrokosmos*. Beide Welten führen ins Grenzenlose, zum Thema der Unendlichkeiten: des unendlich Kleinen und des unendlich Großen sowie zur zeitlichen Entgrenzung, zur Ewigkeit: Jedoch unser Leben erfahren wir als zeitlich und materiell endlich und begrenzt.

Intuitiv erlauben wir eher dem unendlich Großen sich uns zu entziehen, indem wir i. a. noch akzeptieren können, dass der entgrenzte Makrorraum, mag er real unendlich sein oder nicht, in seiner prinzipiellen denkbaren Entgrenzung sich nach »außen« auszudehnen scheint und als solcher an seinen »Enden« unbeherrschbar, nicht ohne weiteres manipulierbar, nicht begreifbar, nicht erreichbar, nicht antastbar sein kann/darf. Die äußersten »Enden« dürfen, ja müssen rein mathematische Denkräume sein und es ist nicht vorstellbar, dass wir dort durch »Handeln« eingreifen können.

Anders sieht es aus, wenn vom im Prinzip »unendlich« Kleinen die

Rede ist und uns eine Entgrenzung nach »innen« als Gehirnjogging ab-
verlangt wird: Den Paradoxien der Welten des unendlich Kleinen schei-
nen wir »entkommen« zu »müssen«, denn sonst »treffen« wir erkennt-
nistheoretisch »ins Schwarze« und unser »Innerstes« gerät zur »black box«
in einem verschachtelten System von »black boxes«. Der Aufforderung
»*Erkenne Dich selbst*« nachzukommen, müsste zwangsläufig ins »Dunkle«
führen und so freuen wir uns – ein bisschen unphilosophisch gespro-
chen – dann doch darüber, dass wenn schon unser »Innerstes« *theoretisch*,
d.h. im Erkenntnisbereich »dunkel« bleibt, *praktisch* betrachtet *Achill* die
Schildkröte mit Vorsprung dennoch »übergehen«, ja überholen wird,
auch wenn er theoretisch nach *Zenon* nicht einmal loslaufen kann (Lau-
werier 1993).

Es besteht eine absolute erkenntnistheoretische Grenze nach »in-
nen«, so wie sie uns z.B. der Physiker Werner *Heisenberg* verdeutlichen
wollte, indem er deklarierte, dass »jedes Bild«, das wir uns vom Atom
machen, a priori falsch sei (Karger 1986). Mag die Wirkung dieser Ein-
sicht demütig stimmen oder resigniert, so ist sie doch Anlass zur philo-
sophischen Reflexion, zumindest darüber, warum die Bilder und Model-
le, die wir uns seit *Rutherford* zumindest hypothetisch vom Atom und
vom »Teilchenzoo« machen, unter gewissen wissenschaftshistorischen
Voraussetzungen immer gerade so aussehen, wie sie aussehen. Viele
subatomare Teilchen sind von Physikern z.B. zunächst als rein mathe-
matische Entitäten, als berechnete Größen, semiotisch gesehen als reine
Symbole determiniert worden, deren Realgehalt im Rahmen der gesam-
ten Theorie erst einen rein hypothetischen Charakter hatte, bevor sie in
unseren empirisch wahrnehmbaren Mesokosmos als »sichtbare« Spur ei-
nes Ereignisses, das auf ihre Existenz verwies, semiotisch betrachtet als
phänomenaler Index in Erscheinung traten und somit ihren eigenen em-
pirischen Existenzbeweis antraten.

Dies ist als ein Fall eines semiotisch degenerativen Prozesses zu
werten, bei dem ein höherstufiger Objektbezug eines Zeichens, einer
Repräsentation, zu einem Objektbezug auf niedriger empirischer Stufe
degeneriert und somit Zeugnis eines geistig vorweg genommenen Ereig-
nisses gibt, bei dem modal gesprochen eine gesetzesmäßige Notwendig-
keit zu einer wirklichen wirksamen Wirklichkeit degeneriert, um den
großen amerikanischen Semiotiker Charles S. *Peirce* (1839–1914) hier zu
interpretieren.

Als *Binnig* und *Rohrer* mittels des Rastertunnelmikroskopes und des
Rasterkraftmikroskopes gezielt einzelne »Atome« »ertasten« lassen und
»manipulieren«, arbeiten sie bereits mit Bild gebenden Verfahren, d.h.

die von ihren Instrumenten »erfassten« Atome reagieren auf das Kraftfeld der Instrumentenspitze, welches diese Reaktion wiederum so zu Messinstrumenten weiterleiten kann, dass diese über ein Programm analoge Bilder berechnen können.

Dass beabsichtigt ist, die visuellen Bilder auch in tastbare (warum nicht auch in hörbare?) zu übersetzen, ändert nichts an der grundsätzlichen Virtualität der Bilder, wenngleich diese auch der Schlüssel zum eigentlich entscheidenden Verfahren sind, nämlich im Nanobereich einzelne Atome *nicht nur für die Erkenntnis »begreifbar« zu machen, sondern praktisch manipulierbar.*

Und wie Rohrer dabei immer wieder betont, geht es dabei gar *nicht* so sehr um den Aspekt des *»immer kleiner und immer schneller«*, sondern um den Aspekt des *»immer intelligenter und intelligenter«*.

Aber was heißt »immer intelligenter« Manipulation von Atomen in diesem Kontext?

Das Leitideal der Nanotechnologie

Im Jahr 1992 hat der Nanovisionär Eric Drexler mit einer voluminösen Arbeit von mehr als 500 Seiten und mit dem Titel *»Nanosystems«* nachgelegt. Er präsentierte damit thermodynamische Modellrechnungen, welche die prinzipielle Machbarkeit molekularer Fertigungstechniken begründen sollten.

Wie wir aus der nun fast 200 Jahre anhaltenden Debatte um den Determinismus wissen, besteht ein Unterschied zwischen z.B. einer prinzipiellen Berechenbarkeit der Welt im Sinne des Laplaceschen Dämons und ihrer tatsächlichen Berechenbarkeit, worauf ja Pierre Simon Laplace letztendlich selbst hinwies. Nichtsdestotrotz ist die »Leitidee« des Determinismus als Forschungsprogramm seit Laplace von denkbar höchstem heuristischem Wert für die Wissenschaften geworden (Karger 2004).

Die Leitidee zur Nanotechnologie, die Drexler nun verfolgt, ist *nicht nur die der prinzipiellen Berechenbarkeit der Welt (und ihrer Atome), sondern die prinzipielle Manipulierbarkeit der Welt: Atom für Atom.*

Das alte *Wissenschaftsideal*, die Welt im Prinzip immer präziser und präziser Atom für Atom zu begreifen, wird lediglich ergänzt durch das Prinzip des nicht nur intellektuellen »Be-Greifens«, sondern auch des praktischen »Er-Greifens«.

Dieses prinzipielle Ideal würde auch Gerd Binnig unterschreiben, wenn ich seine Äußerungen zum Thema richtig interpretiere.

Der berühmte Streit zwischen Drexler und Smalley

Uneinigkeit mit Drexler würde sich aber sicherlich in vielerlei Hinsicht bezüglich der unmittelbaren praktischen Umsetzbarkeit ergeben, wie dies auch im bekannten Streit zwischen Drexler und *Smalley* um den *Assembler* deutlich wird.

Nach Drexler ließe sich jedes beliebige Produkt von der Schraube bis zur Rakete mittels »Nanomaschinen«, so genannten »Assemblern« herstellen, die nach der Methode der »*Mechanosynthese*« alles bauen könnten, indem sie die richtigen Atome im richtigen Muster binden. Die wesentlichen Baumaterialien der Assembler wären Kohlenstoff, Methan, Stickstoff, Sauerstoff, Silizium, Schwefel, Phosphor, Fluor und Chlor, und zwar in Lösungen. Die Assembler, lauter nanoskopische Gegenstücke zu den Teilen einer heutigen Industriemaschine (Stützbalken, Gehäuse, Kugellager, Förderbandglieder, Schaufelräder, Rollen etc.) setzen das gewünschte Werkstück zusammen oder lassen es wachsen wie einen Kristall (*Boeing* 2004).

Nun ist es nicht so, dass es keinerlei Ansätze für solche Nanomaschinen gäbe: Günter *Tovar* etwa vom Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik erzeugt in Polymer-Nanopartikeln Abdrücke eines bestimmten Moleküls, die als medizinische Biosensoren dienen können; aus Peptiden lassen sich kleine Container erstellen; aus DNS-Strängen lassen sich Gerüste formen; selbst Nano-Schwungräder und Nano-Elektromotoren werden gebaut (*Alex Zettl*, University Berkeley 2003).

Ausgerechnet der Nobelpreisträger Richard Smalley, der Entdecker der »*Buckyballs*« (Buckminster Fullerene – so genannt nach den Kuppelbauten des berühmten am. Architekten und Erfinders Buckminster Fuller – sind kugelförmige oder ellipsoide Kohlenstoffmoleküle mit zu Fünf- und Sechsecken angeordneten Kohlenstoffatomen, die z.B. aus 60 C-Atomen einen »Fußball« formen) ist einer der größten Kritiker Drexlers, indem er kritisiert, Drexlers Idee sei unphysikalisch, denn um alle Atome an der »Baustelle« zu kontrollieren, müsste jedes mit einem eigenen Arm, der ja wiederum aus Atomen bestünde, in Schach gehalten werden. Damit wären sie so dick wie die Bausteine, die sie ja bewegen sollen. Dies nennt Smalley das »*Fat Fingers Problem*« – so viel Platz sei in Feynmans Nanokosmos nun auch wieder nicht.

Drexler reagierte und antwortete mit einem offenen Brief: Smalley wolle ihn nur lächerlich machen, denn die von ihm beabsichtigten Arme seien zwar 30 Nanometer dick, liefen aber wie im Rastertunnelmikros-

- Leibniz G. W. (1714). *Monadologie*, frz./dt. nach André Robinet/Heinrich Köhler 1720.
- Pape H. (1997). *Die Unsichtbarkeit der Welt: eine visuelle Kritik neuzeitlicher Ontologie*; Frankfurt am Main.
- Peitgen H.-O., Richter P.-H. (1986). *The Beauty of Fractals*; Berlin/Heidelberg/New York.
- Rubahn H.-G. (2004). *Nanophysik und Nanotechnologie*; 2. Aufl., Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- Schulenburg M. (1995). *Nanotechnologie, die letzte industrielle Revolution?*; Frankfurt am Main und Leipzig.
- Schuster H. G. (1984). *Deterministic Chaos, An Introduction*; Weinheim 1984.
- Sitte P. (1994). *Die Evolution von Zellen*, in: Wieser W. (Hg.), *Die Evolution der Evolutionstheorie*, p. 80, Heidelberg, Berlin, Oxford.

Nanotechnology: An Introduction to Technological and Scientific Aspects

Alexander W. Holleitner

Introduction

For two decades nanotechnology has evolved from different scientific fields, such as physics, chemistry, molecular biology, and material science. The nanotechnology aims to study and to manipulate real-world structures with sizes ranging between a nanometer, i.e. one millionth part of a millimeter, and up to one hundred nanometers. The set of typical »nano«-objects includes colloidal crystals, molecules, DNA based structures, and integrated semiconductor circuits.

The first scientist who pointed out that »there is plenty of room at the bottom« was Richard Feynman in the year 1959 (see Feynman 1959). He envisioned scientific discoveries and new applications of miniature objects as soon as material systems can be assembled at the atomic scale. To this end, machines and imaging techniques would be necessary which can be controlled at the nanometer or subnanometer scale. Fifty years later, the scanning tunneling microscope and the atomic force microscope are ubiquitous in scientific laboratories allowing to image structures with atomic resolution. As a result, various disciplines of the nanotechnology aim towards manufacturing materials for diverse products with new functionalities.

There are two strategies for assembling nanosystems: the »top down« and the »bottom up« approach. The »top down« approach follows the development of the microelectronic industry to miniaturize in-

egrated semiconductor circuits. Modern lithographic techniques enable to pattern nanoscale structures, such as transistor circuits, with highest precision down to several nanometers (see icknowledge). In 1965 Gordon Moore, co-founder of Intel corporation, predicted that the number of transistors on a computer chip would double about every eighteen months (see Moore 1965). The exponential law, also known as Moore's first law, has described the development of integrated circuits surprisingly well for decades. As the market for information technology continues to grow, the demand for computer hardware instigates more and more sophisticated »top down« techniques to build more densely packed transistor circuits (see icknowledge). Moore's »second law« states that the implementation of a next generation of integrated circuits at minimum cost will be exponentially more expensive as well. Until all the constraints will finally limit the growth of the semiconductor »top down« industry, scientists and engineers assume that the nanotechnology will give solutions to most of the technological challenges. For instance, as soon as the feature size of the semiconductor transistors reaches the level where quantum phenomena are important, different concepts for the assembly need to be considered. One possibility is the »bottom up« approach, which is based upon molecular recognition and chemical self-assembly of molecules (see Wilbur 1999). In combination with chemical synthesis techniques the »bottom up« approach allows assembling of macromolecular complexes with new functionalities.

Nanoscience and nanotechnology will definitely have a strong impact on our lives in many separate areas; e.g. information technology, material sciences, and medicines, to name only a few. The manuscript starts with a paragraph about the most recent developments of lithographic techniques in industry and nanoscience. Moreover, most of the discoveries of the nanotechnologies were initiated by the development of accurate microscopes with atomic resolution. Therefore, the manuscript also gives a short introduction to scanning microscopes. A paragraph about nanoelectronics features approaches and techniques which are supposed to produce successor technologies of the microelectronic industry. Examples include quantum computing and spintronics, two emerging fields of nanoscale electronic circuits. Alternative materials and approaches are currently being investigated for novel products consisting of nanostructures. Aspects of nanoscale materials as well as the impact of the nanotechnology on health sciences are finally described in the manuscript.

Lithography: »top down« and »bottom up«

The optical »top down« lithography has been the backbone of the semiconductor industry for 45 years (see icknowledge). In this technique a so-called photoresist – a liquid, photosensitive chemical that resists etching processes – is spin-coated onto the polished surface of a semiconductor wafer. After hardening of the photoresist, e.g. by heating, the semiconductor sample with the photoresist layer on top is exposed to light. Hereby, patterns can be defined in the photoresist. After a developing process, the exposed (or the unexposed) parts of the semiconductor wafer are bared. By follow-up processes such as etching, metallization, and oxidation the patterns can be translated to conductor paths, logical circuits, or memory cells. Since the eighties of the last century, the demise of the optical lithography has been predicted as being only a few years away (see icknowledge). However, each time the optical lithography has reached a limitation, new techniques extended the economically useful lifetime of the »top down« technique.

The minimum feature size of optically defined patterns depends on the wavelength of the utilized light as well as factors, which are due to e.g. the shape of the lenses and the quality of the photoresist. In 2003, the linewidth of semiconductor circuits fell below one hundred nanometers (see icknowledge); i.e. the semiconductor industry can be literally seen as being part of the nanotechnologies. For this achievement, Argon Fluoride Excimer lasers are applied with an optical wavelength of 193 nm in the deep ultraviolet. For lithography in this optical range tricks such as »optical proximity correction« and »phase shifting« were invented and successfully implemented. On one hand, the miniaturizing of semiconductor circuits is limited by economic costs for the semiconductor industry, since the implementation of new techniques to realize an ever smaller feature size results in ever increasing costs. On the other hand, physical material properties, such as the high absorption level of refractive mirrors at short optical wavelengths, give a natural limit of only a few tens of nanometers for the miniaturization process (see icknowledge). Assuming Moore's laws (see Moore 1965), the final limit for the optical lithography is supposed to be reached in less than a decade.

At present, there are several possible »top down« successor nanotechnologies: e.g. the extreme ultraviolet light technique (EUV), the electron beam lithography with multicolumn processing facilities, the focused ion beam technique (FIP), and last but not least the ultraviolet nanoimprinting technique (see Tennant 1999). The implementation of each

of the above techniques implies vast technical challenges to overcome. The most promising technique is the one utilizing extreme ultraviolet light of a wavelength of only thirteen nanometers. For this technique, fabrication errors of the »optical« components need to be in the nanometer or subnanometer range. For comparison, the state-of-the-art x-ray telescopes, such as the »XXM Newton« telescope of the Zeiss AG, exhibit a granularity of the mirror surfaces of 0.4 nm (see Zeiss). In addition to the »state of the art« optical requirements, all metrological components of the extreme ultraviolet technique need to exhibit subnanometer resolution. As a result, the costs of a stepper machine, by which photoresists in the extreme ultraviolet can be exposed, are expected to be in the order of fifty million dollars per system; enabling a linewidth of 35 nanometers (see icknowledge).

For medium-sized businesses, the »ultra-violet nano-imprinting technique« seems to be the most promising method to fabricate nanoscale circuits (see Ventra et al. 2004). Here, nanostructures are mechanically imprinted into a photoresist. The stamp with the nanoscale patterns is made out of fused quartz; a material which is transparent for ultraviolet light. As soon as the stamp is plunged into the photoresist, a short ultra-violet light pulse causes the photoresist to polymerize according to the patterns on the stamp. In line with the optical lithography, follow-up processes allow defining nanoscale circuits in various geometries. The minimum feature size of the nano-imprinting technique is about ten nanometers (see Chou). At the same time, the technique is applicable to metals and plastic materials. The costs for an industrial nano-imprinting machine are supposed to be less than one million Dollars. However, the throughput of nano-imprinting machines is much lower than for stepper machines.

The antipole of the »top down« approach is the so-called »bottom up« technique. Generally, »bottom up« assembly techniques seek to fabricate composite materials comprising of nanoscale objects which are spatially ordered via molecular recognition. The primary examples of the technique are self-assembled monolayers (SAMs) of molecules. A substrate, usually made out of metals, is immersed into a dilute solution of a surface-active organic material that adsorbs onto the surface and organizes via a self-assembly process. The result is a highly ordered and well-packed molecular monolayer. The method can be extended towards layer-by-layer (LBL) assembly; by which polymer light-emitting devices (LED) have already been fabricated (see Ventra 2004). The self-assembly technique also allows positioning of single molecules in between two

- Alivisatos A.P. (1996). *Science* 271: 933–937.
- Awschalom D.D., Buhrman R.A., Daughton J.M. (2004). *Spin Electronics*. Kluwer Academic Publishers.
- Badolato A. et al. (2005). *Science* 308: 1158–1161.
- Badzey R.L., et al. (2004). *Appl. Phys. Lett.* 85: 3587.
- Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. (1982). *Phys. Rev. Lett.* 50: 120. Nobel Prize 1986.
- Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. (1986). *Phys. Rev. Lett.* 56: 930.
- Biominalization, more information can be found e.g. at <http://chem1.snu.ac.kr/~lii/biomineral1.htm>
- Biophysics, see e.g. <http://www.biophysik.physik.uni-muenchen.de/>
- BMBF, http://www.bmbf.de/pub/nanotechnologie_inno_fuer_die_welt_v_morgen.pdf
- Brus L.E. (1991). *Appl. Phys. A* 53: 465–474.
- Chan V. Z.-H. et al. (1999). *Science* 286: 1716.
- Chou group Princeton, <http://www.princeton.edu/~chouweb/newproject/page3.html>
- Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M. (1993). *Nature* 363: 524.
- Efros A.I., Rosen M. (2000). *Annu. Rev. Mater. Sci.* 30: 475, 521.
- R. P. Feynman (1959). oral presentation given on December 29th 1959 at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology (Caltech).
- Feynman R.P., Allen R.W., Hey R.J.G. (2000). *Feynman Lecturs on Computation*. Perseus Books Group
- Holleitner A.W., Blick R.H., Hüttel A.K., Eberl K., Kotthaus J.P. (2002). *Science* 297: 70.
- Hyperthermia, more information can be found e.g. <http://www.geocities.com/HotSprings/Villa/5443/alts/hytherm.html>
- icknowledge, <http://www.icknowledge.com>; and publications therein.
- Joannopoulos J.D., Winn, J.D., Meade R.D. (1995). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press.
- Kittel Ch. (2004). *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley and Sons (WIE)
- Kroemer H. (2000). Nobel lecture on December 8, <http://nobelprize.org/physics/laureates/2000/kroemer-lecture.pdf>
- Lahav M., Shipway A.N., Willner I. (1999). *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2*: 1925–1931.
- Liu A., Jones R., Liao L., Samara-Rubio D., Rubin D., Cohen O., Nicolaescu R., Paniccia M. (2004). A High-Speed Silicon Optical Modulator Based on a Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor. *Nature*, 427: 615–618.
- Moore G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics* vol. 38, 8.
- Nanoref, http://nano-ev.de/content/cms/upload/pdf/Staubbuch_final.pdf; ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/nano_brochure_en.pdf <http://www.techportal.de/de/b/2/start,public,start/>; <http://www.wellcome.ac.uk/assets/wtd015798.pdf>
- Nanoptics, see e.g. <http://www.nano.physik.uni-muenchen.de/%7Ekarrai/index.html>
- Philips, <http://www.philips.com/>
- Rong H. et al. (2005). *Nature* 433: 725–728
- Reed M.A., Zhou C., Muller C.J., Burgin T.P., Tour J.M. (1997). Conductance of a molecular junction. *Science* 278: 252.
- Ruska E., Knoll M. (1932). Nobel Prize 1986.
- Sakurai J.J., (1993). *Modern Quantum Mechanics*. Addison Wesley.
- Simmel F.C., Dittmer W.U. (2005). *DNA Nanodevices*. *Small* 1: 284.
- Tennant D.M. (1999). Limits of conventional lithography. In: *Nanotechnology* edited by G. Timp, Springer-Verlag New York Inc.
- Ventra M. di, Evoy S., Heflin J.R. (2004). *Introduction to nanoscale science and technology*. Kluwer Academic Publishers.

Wilbur J.L., Whitesides G.M. (1999). Self-Assembly and Self-Assembled Monolayers in Micro- and Nanofabrication. In: Nanotechnology edited by G. Timp, Springer-Verlag New York Inc.
Zeiss, <http://www.zeiss.com>

What can nanotechnology learn from the ethical and societal implications of biotechnology?

Mette Ebbesen

Introduction

The leading industrialised countries consider the mastering of nanotechnology to be vital to the economic and technological competitiveness in the 21st century, and it is often said that nanotechnology may lead to the next industrial revolution. Therefore, research into nanotechnology has advanced rapidly in recent years, the funding of nanotechnology has increased dramatically and nanotechnology has become a buzz word and is currently highly profiled compared to many other fields of research. Several researchers, including Canadian researchers at the University of Toronto Joint Centre for Bioethics, however, warn that there is a paucity of research into the ethical, legal and social implications of nanotechnology and they caution that ethical reflections on nanotechnology lag behind the fast developing science.

The present article questions their conclusion, pointing out that the predicted concrete ethical issues related to the field of nanotechnology are rather similar to the ethical considerations related to the field of biotechnology and biology. Furthermore, the ethical challenges of these fields have been considered by researchers within the area of ethics and by ethical boards since the establishment of the academic discipline of bioethics during the 1970s and 1980s. Hence, the fact that only few articles dealing specifically with the ethical issues of nanotechnology have been published so far, does not imply that the discussion of concrete ethical issues in the field has to start from scratch. A knowledge base has already been acquired from the ethical reflections on biotechnology and biology, which may be a good starting point and foundation for a discussion of ethical reflections on nanotechnology.

In addition, it is argued in this article that a promising approach to the ethics of nanotechnology is so-called 'principlism', i.e. the claim that a limited number of basic ethical principles is generally accepted. By considering the use of nanorobots (nanobots) for detection of early disease and the delivery of therapeutic agents, it is shown how the bioethical theory of principles by the two American ethicists Tom L. Beauchamp and James F. Childress can be applied to ethical issues of nanotechnology.

The last part of this article focuses on the societal implication of nanotechnology. A large number of reports on strategies for research into nanotechnology stress the importance of perceiving nanotechnology research in relation to the society in which it is to be implemented. It appears from European and American reports that particular effort is devoted to integrating the humanities and the social sciences into the interdisciplinary approach to nanotechnology. The overall objective is to gain the general public's acceptance of nanotechnology in order not to provoke a consumer boycott, as it happened with genetically modified (GM) food products. It is stated implicitly in the reports that this acceptance depends on the public's confidence in the technology and that the confidence is created on the basis of information, education, openness and debate. However, researchers and empirical studies point out that information and education are not the only factors influencing the public attitudes towards new technology. In the public mind, risk also involves moral considerations, democratic considerations and uncertainties. Several of these aspects belong to the research areas of the humanities and the social sciences.

This article objects that it is a narrow apprehension of the role of the humanities and the social sciences to focus exclusively on creating trust in and acceptance of nanotechnology in the general public. The humanities and the social sciences have a critical function making a critical assessment of new technology so that the public may make an *informed judgement*. Moreover, the motive for integrating the humanities and social sciences may be to establish interdisciplinary research environments enabling a daily dialogue between for instance ethicists and nanotechnologists facilitating ethical reflection as an integral part of the research process.

Ethics in nanotechnology

Must the ethical discussion of nanotechnology start from scratch?

The Canadian research group at the University of Toronto Joint Centre for Bioethics is undoubtedly right in their claim that few articles have been published so far specifically on ethical issues of nanotechnology (Mnyusiwalla et al. 2003). However, in those published the ethical issues of nanotechnology fall into three groups (Table 1): *Risk problems* (a–d), *privacy problems* (e–f) and *problems of transhumanism* (g–h). None of these can be regarded as unknown hitherto. Risk and privacy problems are addressed within a number of areas. Transhumanism, indicating a transgression of the limits of the human, is a rather new concept, but it is not totally unknown either. In order to show that the potential ethical problems of nanotechnology are not new and unique, this article points to parallels within the fields of biotechnology and biology that have been widely analysed.

Parallels drawn to currently considered ethical issues:	The literature mainly focuses on the hypothesis that the introduction of nanotechnology could lead to:
Uncontrolled spread of GM crops and toxicity of asbestos	a) Prospects of runaway proliferation of self-replicating nanosystems <i>Ethical issues: Risk-benefit analysis, beneficence, nonmaleficence</i>
Terrorist attack September 11th (anthrax powders)	b) Uncontrolled function of nanorobots (nanobots) <i>Ethical issues: Risk-benefit analysis, beneficence, nonmaleficence</i>
Cell phones and internet 24 hours a day	c) Possible toxic nature of nanoparticles dispersed in the environment <i>Ethical issues: Risk-benefit analysis, beneficence, nonmaleficence</i>
Genetic enhancement (gene therapy)	d) Biological warfare and terrorism <i>Ethical issues: Risk-benefit analysis, beneficence, nonmaleficence</i>
	e) Invasion of privacy as a result of improved communication capabilities <i>Ethical issues: Respect for autonomy and integrity</i>
	f) Invasion of privacy as a result of dispersed nano-sensing structures (e.g. microphones) in the environment <i>Ethical issues: Respect for autonomy and integrity</i>
	g) Enhancement of human capabilities <i>Ethical issues: What is a human being?</i>
	h) Transhumans caused by the incorporation of nanostructures and nanomachines in the human body. How many nano-prosthesis will make you non-human? <i>Ethical issues: What is a human being?</i>

Table 1. Parallels drawn between currently analysed ethical issues and ethical issues of nanotechnology pointed out in the literature (Rickerby 2004; Robison 2004; NSF 2001; Gorman 2004; Satava 2002; Drexler 1986).

As to *risk problems* one can draw parallels between the fear of the uncontrolled spread of GM crops and the prospects of runaway proliferation of self-replicating nanosystems (a) and the uncontrolled function of nanorobots (b). The discussion of the possible toxic nature of nanoparticles (c) can be compared with the discussion of the toxicity of asbestos which has run for years. The fear of biological warfare and terrorism caused by nanotechnology (d) is not only a future issue but of current interest, especially since the terrorist attack on the US September 11th 2001 and the subsequent mail deliveries of anthrax powders.

On the matter of *privacy problems*, the fact that nanotechnology could lead to an invasion of privacy as a result of improved communication capabilities (e) is a currently discussed issue, as people can be reached by cell phones and internet connections 24 hours a day. But, of course, the ethical problem of invasion of privacy could grow if nanotechnology leads to the spread of spying nanomicrophones in the environment (f).

As to *problems of transhumanism*, one can draw a parallel between the ethical issues of the enhancement of human capabilities and *transhumans* caused by nanotechnology (g, h) and the issue of genetic enhancement. Since the first experiments of gene therapy in cell cultures during the 1980s, ethicists have warned that gene therapy may lead to the enhancement of normal characteristics in contrast to treatment of disease.

In light of the parallels drawn between ethical issues of nanotechnology and ethical issues of biotechnology and biology, a survey of three scientific databases was made – ISI Web of Science, PubMed and Philosopher's Index. The data demonstrates a general pattern of an average increase during the last 20 years in the number of publications on ethical aspects of genetics, biotechnology and environment which parallel ethical issues of nanotechnology. This means that a reasonably sound knowledge base has already been acquired in the field of bioethics that can be extended to nanotechnology. There is no reason the ethical discussion of nanotechnology should not gain from this knowledge base acquired from previous ethical reflection on biotechnology and biology.

In short, this section concludes that the fact that only a few articles dealing specifically with ethical reflections of nanotechnology have been published so far does not imply that the ethical discussion of nanotechnology needs to start from scratch. Nanotechnology can draw on matters already considered by researchers within the area of ethics and by ethical boards since the establishment of the academic discipline of bioethics during the 1970s and 1980s.

General ethical principles at stake

In this section it is argued that a promising approach to the ethics of nanotechnology is so-called ›principlism‹, i.e. the claim that a limited number of basic ethical principles is generally accepted. It is shown that regarding the ethically relevant features of nanotechnology mentioned above (*risk problems*, *privacy problems*, and *problems of transhumanism*) the general ethical principles about respect for autonomy and integrity and beneficence, nonmaleficence and justice are at stake (Table 1). Several examples will illustrate this.

The first example is the fear that the dispersion of nano-sensing structures (e.g. microphones) in the environment may lead to an invasion of privacy (Table 1, f). Behind the ethical issue of respect for privacy is a general ethical principle that the autonomy and integrity of humans ought to be respected. Autonomy means self-determination, and, as an ethical principle, the respect for autonomy means that in questions concerning his/her own life each individual has the right to make his/her own decisions. The ethical principle of respect for integrity is closely related to respect for autonomy and means a person's sphere of experiences, of information, and of self-disclosure, etc. should not be intruded upon under normal circumstances. It makes sense to speak of respect for integrity especially in the case of human beings who are not able to exercise autonomy. This could be the case for toddlers, drug-dependent patients, persons who are senile or mentally troubled, etc. The principle of respect for integrity means, then, that *prima facie* no-one has the right to access information that is intimately linked to the life and identity of a human being.

Another illustration is the prospect of runaway proliferation of self-replicating nanosystems (Table 1, a) and the spread of possible toxic nanoparticles in the environment (Table 1, c). In light of such a prospect one ought to perform a risk assessment. On this matter, the American bioethicists Tom L. Beauchamp and James F. Childress show that the moral evaluation of risk in relation to probable outcomes can have the character of *risk-benefit analysis*. They use the definition of ›risk‹ as possible future harm, where ›harm‹ is defined as a setback to interests, particularly in life, health and welfare (Beauchamp and Childress 2001: 195, 199). In the field of biomedicine, the term ›benefit‹ commonly refers to something of positive value, such as life or health. Risk-benefit relations may be conceived in terms of a ratio between the probability and magnitude of an anticipated benefit and the probability and magnitude of an

anticipated harm (Beauchamp and Childress 2001: 195). The terms ›harm‹ and ›benefit‹, as defined above, are ethically relevant to nanotechnology since ethical obligations or principles are generally accepted against inflicting harm (nonmaleficence) and promoting good (beneficence) (Beauchamp and Childress 2001: 4).

It should be evident, also, that there are societal implications at stake in relation to nanotechnology. These include issues such as the prioritising and commercialisation of science, public trust and transparency and the question of who should gain from nanotechnology. For instance, do we have a responsibility for sharing this technology with developing countries? Clearly, the ethical principle of justice is at stake.

As most ethicists will recognize, these general principles – respect for autonomy (and integrity), beneficence, nonmaleficence and justice – are part of the bioethical theory developed by Beauchamp and Childress. They published their theory for the first time in 1979 in the work *Principles of Biomedical Ethics*. The general ethical principles mentioned above have been used for years for analysing ethical issues in the field of biomedicine. Thus even though only a few specific articles have been published on ethical issues of nanotechnology, it does not mean that we need to start from scratch with the ethical discussion of nanotechnology. The analysis above shows that nanotechnology does not demand a new kind of ethics and we don't need new ethical principles such as ›nano-beneficence‹, old-fashioned beneficence should suffice as one general ethical principle among others. In short, the problems nanotechnology raises seem, so far, to be analogous to well-known problems raised by biotechnology and biomedicine, so that the problems of ›nanoethics‹ can be dealt with in the framework of bioethics.

The use of Beauchamp and Childress' bioethical theory of principles to analyse ethical issues of nanotechnology

As mentioned above, Beauchamp and Childress have formulated a theory based on four basic principles. These principles are respect for autonomy, beneficence, nonmaleficence and justice. According to Beauchamp and Childress, no principles rank higher than others. It is context-dependent which principles are set-aside in the actual situation. Beauchamp and Childress consider these principles *prima facie binding*, i.e. they must be fulfilled unless they conflict on a particular occasion with an equal or stronger principle. This type of principles is always binding unless a competing moral obligation overrides or outweighs it in a parti-

cular circumstance. According to Beauchamp and Childress: »Some acts are at once prima facie wrong and prima facie right, because two or more norms conflict in the circumstances. Agents must then determine what they ought to do by finding an actual or overriding (in contrast to prima facie) obligation« (Beauchamp and Childress 2001: 14). Thus, the agents must locate the greatest balance of right and wrong.

In the fifth edition of their book *Principles of Biomedical Ethics* (2001), Beauchamp and Childress describe how to specify the principles (Beauchamp and Childress 2001: 15–19). Furthermore, Ben Mepham (1996) has developed a practical way of applying Beauchamp and Childress' theory termed an »ethical matrix«. This approach describes how to move from the general level of the principles to the level of practical questions (Kaiser 2005).

However, Beauchamp and Childress have been criticised for the lack of a concrete rule on how to balance the principles if they conflict (DeGrazia 1992). Soeren Holm (1995) claims that Beauchamp and Childress' method is unable to give solid answers to problems of morality. He states that by the method of principles we can get precisely the answer we want. Holm accuses the balancing method of being intuitive and subjective (Holm 1995). In the third edition of their book *Principles of Biomedical Ethics* (1989), Beauchamp and Childress are aware of the problem of balancing and they specify conditions that should be fulfilled in order to allow one prima facie principle to weigh more than another. They write:

»The following are all requirements for justified infringements of a prima facie principle or rule:

- 1 the moral objective justifying the infringement must have a realistic prospect of achievement;
- 2 infringement of a prima facie principle must be necessary in the circumstances, in the sense that there are no morally preferable alternative actions that could be substituted;
- 3 the form of infringement selected must constitute the least infringement possible, commensurate with achieving the primary goal of the action; and
- 4 the agent must seek to minimize the effects of the infringement« (Beauchamp and Childress 1989: 53).

To follow these directions purely by intuition would hardly be possible. In the fifth edition of *Principles of Biomedical Ethics* (2001), Beauchamp and Childress sharpen the conditions that must be fulfilled in order for

one prima facie principle to outweigh another. Among others, they add the following premise: »The agent must act impartially in regard to all affected parties; that is, the agent's decision must not be influenced by morally irrelevant information about any party« (Beauchamp and Childress 2001: 20).

An example of the application of Beauchamp and Childress' ethical principles to analyse ethical issues of nanotechnology could be an ethical assessment of the use of nanobots for detection of early disease and the delivery of therapeutic agents. The visions are that nanobots may be able to seek out a target within the body (for instance a cancer cell) and perform treatment. The treatment delivered by the nanobots may be that of releasing a drug in a localized area, thus minimizing the potential systemic side effects of generalised drug therapy as for instance chemotherapy (Satava & Wolf 2003; Satava 2002; Haberzettl 2002). Although some of these nanosystems may be manufactured, many may need to be created by self-assembly, analogous to the manner in which the human body »self-assembles«, i.e. puts itself together in prescribed architecture in a naturally driven process (e.g. cells self-assemble into organs). The scientific challenge will then be to control these processes (Satava & Wolf 2003; Satava 2002). Since many macromolecules do not diffuse readily through tissues, delivery systems have to be designed to shuttle the therapeutic agents to the target sites. Some of the target sites such as the brain and solid tumors have unique physiologic barriers to drug delivery which have to be overcome before the therapeutic agents can reach their targets (Li et al. 2004). Thus targeting mechanisms must be incorporated into the nanobot. These targeting mechanisms may include the potential of detection of physiological changes in environment of the nanobot which triggers the desired action (the treatment). Such mechanisms are likely to include the use of nanoscale biosensors and other sensing or detection mechanisms which may also be used as diagnostic tools (Haberzettl 2002). A nanosensor used as diagnostic tool or drug deliverer could for instance be a sensor being able to detect biological changes due to tumour development and metastasis indicated by increased production of proteolytic enzymes or loss of expression of for example the epithelial cell-cell adhesion molecule E-cadherin. Thus rather than indiscriminate destruction in a large area or systemically as is done in chemotherapy, the results of targeted drug delivery may be the delivering of drugs with ultrahigh precision to specific organs, tissues and cells (Satava & Wolf 2003). However, drug delivery in general is not trivial and much research needs to be performed in this field.

Haberzettl (2002) points out that nanobots used in drug delivery may get out of control in the absence of feedback mechanisms to control their function. To take this into account, it may be a possibility to develop nanobots, which are biodegradable or composed of naturally occurring substances which can be eliminated from the body through natural mechanisms of metabolism and excretion. Alternatively, nanobots could have homing devices, which would allow them to be collected and removed after performing the desired function (Haberzettl 2002).

If nanobots are going to be used in the future for the detection of early disease and the delivery of therapeutic agents, one ought to balance the risks of maleficence caused by the nanobots getting out of control, the possible beneficence obtained by the treatment of serious disease and the respect for the autonomy of the patient. As an ethical principle, the respect for autonomy means that in questions concerning his/her own life each individual has the right to make his/her own decisions. Hence the ethical considerations of nonmaleficence, beneficence and respect for autonomy are in conflict and the agents must consciously determine which considerations should have more weight. It should be noted, however, that in addition to the ethical principles pointed out above, the ethical principle of justice plays a role in the actual case at the level of health policy formation.

Societal implications of nanotechnology

The humanities and social sciences as a means of gaining public acceptance

It appears from European as well as American reports that particular effort is devoted to integrating the humanities and the social sciences into the interdisciplinary approach to nanotechnology. The overall objective is to gain the general public's acceptance of nanotechnology in order not to provoke a consumer boycott, as it happened with GM foods (NSF 2001: 63; Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences 2004: 27). It is stated implicitly that this acceptance depends on the public's confidence in the technology and that the confidence is created on the basis of information, education, openness and debate. Thus, in a European report it says:

»Without a serious communication effort, nanotechnology innovations could face an unjust negative public reception. An effective two-

way dialogue is indispensable, whereby the general public's views are taken into account and may be seen to influence decisions concerning R&D¹ policy. The public trust and acceptance of nanotechnology will be crucial for its long-term development and allow us to profit from its potential benefits. It is evident that the scientific community will have to improve its communication skills« (European Commission 2004b: 19).

An American report states that the integration of researchers within the humanities and social sciences can establish a dialogue between nanotechnologists and the public. According to the report, this dialogue will assist in maximising the social benefits of the technology and in minimising the risk of debilitating public controversies:

»The inclusion of social scientists and humanistic scholars, such as philosophers of ethics, in the social process of setting visions for nanotechnology is an important step for the NNI². As scientists or dedicated scholars in their own right, they can respect the professional integrity of nanoscientists and nanotechnologists, while contributing a fresh perspective. Given appropriate support, they could inform themselves deeply enough about a particular nanotechnology to have a well-grounded evaluation. At the same time, they are professionally trained representatives of the public interest and capable of functioning as communicators between nanotechnologists and the public or government officials. Their input may help maximize the societal benefits of the technology while reducing the possibility of debilitating public controversies« (NSF 2001: 15).

In the American report, it is mentioned that informing the public is not enough; the public have to be educated to perceive the advantages of nanotechnology (NSF 2001: 100–101). Thus, it is assumed that informing and educating the public will create trust and consequently an acceptance of nanotechnology. In that way, according to the American report, research into the societal implications of nanotechnology will boost the success of nanotechnology, and hence it will be possible to take advantage of the benefits of nanotechnology sooner, more effectively and with greater confidence (NSF 2001: 2). Hence, it is not assumed that information about nanotechnology may lead to scepticism. The public must perceive and be convinced of the benefits of the introduction of nanotechnology. No importance is attached on the public's informed judgment. However, a few EU reports assume the citizen's

1 Research and Development (R&D).

2 National Nanotechnology Initiative (NNI).

right to informed judgement. But in these reports it is also stressed that educating people in science and technology must be prioritised in order to obtain this informed judgement:

»The Commission's strategy: Promote scientific and education culture in Europe. First of all, people must become more familiar with science and technology [...]. The Commission is committed to improving transparency and consultation between administrations and civil society [...]. If citizens and civil society are to become partners in the debate on science, technology and innovation in general [...] it is not enough simply to keep them informed. They must also be given the opportunity to express their views in the appropriate bodies [...]. They aim to provide a space for scrutiny and informed debate on important issues of public concern, bringing together the public, interest groups and policy makers [...]. The Commission will organise regular events enabling civil society to participate (in the form of public hearings, consensus conferences or interactive online forums)« (European Commission 2004a: 7–18).

However, researchers point out that information and education are not the only factors influencing the public attitudes towards new technology. Returning to the Europeans' sceptical attitude towards GM foods, there is disagreement whether the scepticism is exclusively due to lack of information and education. If we first look at the results of the so-called Eurobarometer survey on the European's attitudes towards GM crops and GM foods, it shows an increasing scepticism from 1996–1999 about GM crops (a rise from 20% to 32%) and about GM foods (a rise from 39% to 52%), respectively. In contrast, the figures were relatively stable from 1999 to 2002. However, regarding the application of biotechnology in medical science, the Europeans' attitudes were very positive in 2002: E.g. only 9% were opposed to genetic testing and 17% to cloning of human cells (European Commission 2003). Hence, the general public's attitudes varied according to the specific biotechnological application. Applications within the plant and food area were assessed considerably more negatively than applications in the field of medicine. The ethicist *Bryn Williams-Jones* from the University of Cambridge writes:

»Indeed, there tends to be widespread positive public regard for technologies that appear to have a clear benefit and minimal or at least well understood risks (e.g. biotechnologies that improve health care, such as genetic diagnostics or bio-pharmaceuticals). But when the benefits are dubious and the risks are potentially very serious and not well understood, as in the case of GM foods, then the public as consumer of new technologies may be very wary. The lesson for a nascent field such