

Synthetische Nanopartikel und das Vorsorgeprinzip

Eine ethische Analyse

Andreas Bachmann, Ethik im Diskurs

1. Einleitung

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

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

Problematisch ist diese Situation insbesondere deswegen, weil erste toxikologische Untersuchungen Hinweise darauf ergeben haben, dass Nanopartikel Mensch und Umwelt schädigen können. Es ist daher dringend erforderlich, eine ethische Evaluation der mit der Herstellung und Verwendung dieser Partikel verbundenen Risiken vorzunehmen.¹

Ich werde die These vertreten, dass man sich bei dieser Evaluation am Vorsorgeprinzip orientieren sollte. Das Vorsorgeprinzip besagt, dass angemessene, die Freiheit von Forschung und Unternehmen einschränkende Vorsorgemassnahmen gerechtfertigt sind, wenn eine (neue) Technologie Mensch und Umwelt einen schwerwiegenden und irreversiblen Schaden zuzufügen droht; und dies selbst dann, wenn noch keine fundierte wissenschaftliche Risikoanalyse vorliegt.

Dass hinsichtlich der möglichen negativen Auswirkungen von Nanopartikeln Unsicherheiten und Wissenslücken bestehen, ist unbestritten. Dennoch hat die Risikoforschung in den letzten Jahren Fortschritte gemacht.² Sie ist an einem Punkt angelangt, an dem eine vorläufige Einschätzung des Risikopotenzials zumindest bestimmter Nanopartikel vorgenommen werden kann. Ihre Resultate liefern erste Hinweise darauf, dass vor allem synthetische Nanopartikel wie Nanoröhren oder Buckyballs mit beträchtlichen Risiken für die menschliche Gesundheit und eine intakte Umwelt verbunden sind. Allerdings wird diese Einschätzung nicht von allen geteilt. Es gibt auch Stimmen, die sagen, zwar seien einige Anzeichen für die potenzielle Gefährlichkeit dieser und anderer Nanopartikel für Mensch und Umwelt erkennbar, gleichwohl bestehe kein Grund, sich ernsthafte Sorgen zu machen (vgl. Brune et al. 2006:376). Ich werde anhand neuerer toxikologischer Studien zeigen, dass es Indizien gibt, die eine solche Beurteilung nicht als angemessen erscheinen lassen.

Wenn richtig ist, dass – zumindest bestimmte – synthetische Nanopartikel Mensch und Umwelt schwerwiegenden Schaden zufügen können und wenn die Anwendung des Vorsorgeprinzips deshalb gerechtfertigt ist, stellt sich die Frage, welche Vorsorgemassnahmen zu ergreifen sind. Die Antwort auf diese Frage lautet: es kommt darauf an, wer den Risiken auf welche Weise ausgesetzt ist. Es ist eines, wenn Forschende in ihren Laboratorien in

¹ Für weiterführende Hinweise und kritische Kommentare möchte sich der Autor bei Ludwig K. Limbach, Olivier Sanvido und Luis Tiefenauer herzlich bedanken

² Links zu den neuesten Aufsätzen in diesem Gebiet finden sich auf der Site des International Council on Nanotechnology ICON (http://icon.rice.edu/research_archive.cfm?mode=yearly&year=2006).

geschlossenen Systemen mit relativ geringen Mengen von Nanopartikeln hantieren, etwas anderes, wenn solche Partikel in Fabriken tonnenweise hergestellt werden, und noch einmal etwas anderes, wenn unbeteiligte Dritte, etwa Konsumenten von Nano-Produkten, mit ihnen in Berührung kommen. Je nach Art der Risikoexposition und je nachdem, ob es sich um freie oder gebundene Nanopartikel handelt, sind gemäss dem Vorsorgeprinzip unterschiedliche Massnahmen gefordert: zum Teil Vorsichtsmassnahmen zur Risikominimierung, zum Teil aber auch Verbote. Wichtig ist, dass es sich hierbei um vorläufige Massnahmen handelt, die nur mit Bezug auf den jeweiligen Wissensstand gerechtfertigt sind. Neubeurteilungen und gegebenenfalls Revisionen sind vorzunehmen, wenn aufgrund neuer Erkenntnisse der Risikoforschung deutlich werden sollte, dass die mit synthetischen Nanopartikeln verbundenen Gefahren für Mensch und Umwelt wesentlich von den bisherigen Annahmen abweichen.

2. Was sind synthetische Nanopartikel und welche Bedeutung haben sie für die Nano- und die Nanobiotechnologie?

Eine allgemein akzeptierte Definition der Nanotechnologie gibt es bis heute nicht. In unserem Zusammenhang genügt der Hinweis, dass drei Aspekte für diese Technologie konstitutiv sind:

1. Der Aspekt der Grösse: Die Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen auf der Nanometerskala. Diese reicht von 1 bis 100 nm (wobei 1 nm ein milliardstel Meter ist)
2. Die Nutzbarmachung von im Nanometerbereich auftretenden neuartigen Effekten
3. Die gezielte Herstellung und/oder Manipulation von nanoskaligen Strukturen.

Was den Grössenaspekt betrifft, spielen in der Nanotechnologie Materialien mit zwei oder drei Dimensionen im nanoskaligen Bereich eine zentrale Rolle. Diese Materialien, die Nanopartikel, zeichnen sich durch zwei Eigenschaften aus, die sie besonders interessant für neue Anwendungen und Produkte machen:

1. Sie haben im Verhältnis zum Volumen eine grössere Oberfläche (per Masseneinheit) als nicht-nanoskalige Partikel desselben Materials und sind daher reaktiver.
2. Sind sie kleiner als 50 nm, unterliegen sie den Gesetzen der Quantenphysik und zeigen somit spezielle Quanteneffekte.

Diese Eigenschaften erklären, warum sich ein beliebiges Material im Nanometerbereich ganz anders verhalten kann: es verändert seine Farbe, wird auf einmal löslich oder zeigt plötzlich ein leitendes Verhalten. Um ein Beispiel zu geben, ist nanoskaliges Titandioxid – anders als nicht-nanoskaliges Titandioxid – nicht nur transparent, sondern zugleich auch ein sehr effektiver UV-Blocker, weshalb es in Sonnencremes verwendet wird.³

Im Folgenden sollen nicht alle Nanopartikel, sondern nur eine bestimmte Klasse näher beleuchtet werden. Hierbei handelt es sich um die so genannten synthetischen Nanopartikel (englisch „engineered“ oder „manufactured nanoparticles“). Synthetische Nanopartikel sind dadurch charakterisiert, dass sie mit einer spezifischen Absicht hergestellt werden, das heisst, dass man ihre speziellen Eigenschaften für ganz bestimmte Zwecke einsetzen will. Sie sind insofern zu unterscheiden a) von Nanopartikeln, die durch natürliche Verbrennungsprozesse wie etwa Waldbrände erzeugt werden; und b) von Nanopartikeln, die nicht beabsichtigte Nebenprodukte von menschlich induzierten Verbrennungsprozessen wie etwa das Rauchen von Zigaretten sind.⁴

³ Allerdings ist auch nicht nanoskaliges Titandioxid ein UV Blocker. Nur ist dieses Titandioxid nicht transparent, sondern weiss.

⁴ Bei a) und b) spricht man in der Regel eher von „ultrafeinen Partikeln“. Dagegen sind mit Nanopartikeln in erster Linie synthetisierte Nanopartikel gemeint.

Die wichtigsten synthetischen Nanopartikel mit zwei Dimensionen im nanoskaligen Bereich sind die Nanoröhren („nanotubes“). Nanoröhren sind röhrenförmige Anordnungen von Kohlenstoffatomen mit einem Durchmesser von einigen Nanometern. Sie gelten als der Werkstoff der Zukunft. Das liegt an ihren aussergewöhnlichen Eigenschaften: sie sind hundert mal fester und fünf bis sechs mal leichter als Stahl; gleichzeitig doch flexibel und verformbar und leiten Wärme und Elektrizität extrem gut. Sie könnten zum Beispiel bei der Herstellung von Transistoren für Computerchips, der Display-Herstellung oder der Herstellung von Sensoren, aber auch als Wasserstoff-Speicher zum Einsatz kommen. Zudem könnten sie bald auch in vielen Baumaterialien Verwendung finden, im Flugzeug- und Autobau oder in Knochenimplantaten und künstlichen Gelenken. Heute werden sie bereits etwa in Tennisbällen und besonders leichten und stabilen Tennis-Rackets sowie in Batterien verwendet.

Es gibt eine ganze Reihe von Nanopartikeln mit drei Dimensionen im nanoskaligen Bereich. Zu erwähnen sind insbesondere:

- Die Buckminsterfullerene. Benannt nach dem amerikanischen Architekten Buckminster Fuller, der durch seine geodätischen Kuppeln bekannt geworden ist, sind sie neben Graphit und Diamant die dritte Form von reinem Kohlenstoff. Es handelt sich bei ihnen um eine Gruppe von Kohlenstoff-Käfigmolekülen, von denen das einer geodätischen Kuppel ähnelnde C_{60} -Molekül das wichtigste ist. Dieses Molekül, dessen Durchmesser etwa 1 nm beträgt, wird auch „Buckyball“ genannt. Solche Buckyballs könnten beispielsweise als Drug Delivery-Vehikel, das heisst als Vehikel zum zielgenauen Transport von Wirkstoffen, oder in elektronischen Schaltkreisen verwendet werden.
- Quantenpunkte: sind kleinste pyramidenförmige Partikel von halbleitenden Materialien. Sie werden etwa für die Herstellung von hochauflösenden Flachbildschirmen in Fernsehern oder Computern, für sehr leichte, länger Energie spendende Batterien oder für neuartige Lasersysteme gebraucht. In der Molekularen Bildgebung werden sie zum Sichtbarmachen einzelner Moleküle eingesetzt. Dazu bedürfen sie freilich einer geeigneten Beschichtung, denn sie bestehen im Kern meist aus giftigen Schwermetallverbindungen wie Cadmiumselenid.
- Carbon Black („Industrieruss“): wird bereits seit geraumer Zeit als verstärkender Füllstoff in Gummireifen eingesetzt.⁵
- Metalloxide wie SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 oder Fe_3O_4 . Metalloxide können zu verschiedensten Zwecken verwendet werden, momentan vor allem dazu, bestehende Produkte wie Kosmetika, Sonnencremes oder Lebensmittelverpackungen zu verbessern.
- Metalle wie Gold oder Silber. Nanosilberpartikel etwa werden aufgrund ihrer antibakteriellen Wirkung in der Medizin zur Verhinderung von Infektionen eingesetzt (Wundbehandlung, nanosilberbeschichtete Katheter etc.). Getestet wird, ob man Nanosilber zur Trinkwasseraufbereitung verwenden kann.
- Halbleiter wie Cadmium-Tellurit (CdTe) oder Gallium-Arsenid (GaAs).

Allein schon die erwähnten Anwendungsmöglichkeiten machen deutlich, wie bedeutsam synthetische Nanopartikel für die Nanotechnologie im Allgemeinen, die Nanobiotechnologie im Besonderen sind. In der Nanobiotechnologie, die die Forschung an biologischen und nicht-biologischen Systemen auf der Nanoskala verbindet und deren Nutzung in verschiedenen Bereichen zum Ziel hat, spielen synthetische Nanopartikel eine zentrale Rolle. Ein grosses Potenzial wird insbesondere der Delivery-Technik zugesprochen. Die dieser Technik zugrunde liegende Idee ist ebenso einfach wie bestechend. Sie besteht darin, Nanopartikel als

⁵ Allerdings handelt es sich hierbei insofern um einen Streitfall, als Carbon Black für einige Forscher kein synthetisches Nanopartikel ist.

Transportmittel zu benutzen, um unterschiedlichste Wirkstoffe mit grosser Präzision an ihren Einsatzort zu bringen und dort kontrolliert freizusetzen. Momentan arbeitet man vor allem in der medizinischen Forschung intensiv an der Entwicklung von Drug Delivery-Systemen. Diese würden es ermöglichen, der Verwirklichung des alten Traums des „Targeting“, das heisst des zielgenauen Einsatzes von medizinischen Wirkstoffen, der Medikamente wesentlich sicherer und wirksamer macht, einen Schritt näher zu kommen. Ein Einsatz der Delivery-Technik ist aber auch in anderen Bereichen denkbar. So könnte man sie, wenn sie denn einmal funktioniert, für den Transport von Impfstoffen, Pestiziden, Zusatzstoffen in Lebensmitteln oder giftigen Substanzen in Biowaffen verwenden.

Synthetische Nanopartikel verfügen also über ein grosses Anwendungspotenzial. Wie weit dieses Potenzial ausgeschöpft werden kann und wie viel Zeit dazu benötigt wird, lässt sich gegenwärtig indes noch nicht abschätzen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass man nicht nur die Chancen, sondern auch die Risiken, die mit dem Einsatz von synthetischen Nanopartikeln verbunden sind, ins Auge fasst. Denn die Nanotechnologie wird auf Dauer nur dann mit gesellschaftlicher Akzeptanz rechnen können, wenn ihre Produkte nicht nur für nützlich, sondern auch für sicher gehalten werden. Aus ethischer Sicht ist es angezeigt, eine Evaluation der Risiken synthetischer Nanopartikel bereits jetzt, das heisst zu einem Zeitpunkt, an dem die Nanotechnologie noch am Anfang steht, vorzunehmen. Denn es zeichnet sich ab, dass in den nächsten Jahren immer mehr Nanoprodukte auf den Markt drängen werden, von denen man nicht mit ausreichender Sicherheit sagen kann, sie seien für Mensch und Umwelt unbedenklich.

Betrachtet man das Risikopotenzial der synthetischen Nanopartikel, sind drei Aspekte hervorzuheben:

- 1) Es gibt hinsichtlich der Risiken dieser Partikel für Mensch und Umwelt noch beträchtliche Unsicherheiten und Wissenslücken.
- 2) Allerdings hat die Risikoforschung in den letzten Jahren vor allem durch in vitro- und in vivo-Studien Erkenntnisse gewonnen, die eine empirisch gestützte vorläufige – und entsprechend vorsichtige – Einschätzung der Risiken erlauben. Dabei zeigt sich immer deutlicher, dass wenigstens bestimmte synthetische Nanopartikel erhebliche Schäden anrichten können. Zugleich ist aber auch klar geworden, dass man diesbezüglich keine allgemeinen Aussagen machen kann, sondern jedes Partikel gesondert analysieren muss.
- 3) Berücksichtigt man die Kerneigenschaften von synthetischen Nanopartikeln, insbesondere ihre Grösse und das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen sowie die damit verbundene höhere Reaktivität, können die Resultate der bereits durchgeführten Risikostudien nicht überraschen.

Im Folgenden möchte ich diese drei Aspekte näher erläutern. Dabei geht es insbesondere darum, sich ein Bild davon zu machen, was aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen bereits bekannt ist. Dies ist deshalb wichtig, weil die Anwendung des Vorsorgeprinzips nur gerechtfertigt werden kann, wenn es empirische Indizien dafür gibt, dass synthetische Nanopartikel tatsächlich schwerwiegende Schäden verursachen können.

Nanopartikel zeichnen sich durch eine im Verhältnis zum Volumen grosse Oberfläche aus. Dem entspricht eine hohe Reaktivität. Im Allgemeinen gilt, dass eine Substanz umso giftiger ist, je reaktiver sie ist. Allerdings muss man hier vorsichtig sein. Denn neben der Oberfläche können andere Faktoren wie Grösse, Form, Oberflächenstruktur oder Löslichkeit die Toxizität beeinflussen (vgl. Brunner et al. 2006). Insofern kann man aus dem blossen Umstand, dass es sich bei einem Partikel um ein Nanopartikel handelt, nicht schon ableiten, dass es toxisch ist. Umgekehrt wäre es aber aufgrund der genannten Eigenschaften eigentümlich, wenn sich Nanopartikel als völlig unbedenklich erweisen sollten. Vernünftigerweise muss man davon ausgehen, dass diesen Partikeln grundsätzlich ein gewisses Gefahrenpotenzial eignet. Allein

schon deshalb – und weil man die Wirkungen von Nanopartikeln nicht aus den bekannten Wirkungen der gleichen Substanzen im Mikro- und Makrobereich extrapolieren kann – ist im Umgang mit ihnen Vorsicht geboten.

Es ist aber wichtig, dass man sich vor vorschnellen Verallgemeinerungen hütet. Ob Nanopartikel tatsächlich toxisch sind, und wenn ja, wie toxisch sie sind, muss in jedem Fall eigens geprüft werden.⁶ In dieser Hinsicht bestehen noch grosse Wissensdefizite. Man hat wenige gesicherte Erkenntnisse darüber, welche Nanopartikel in welcher Grösse und welcher Dosis die Gesundheit von Mensch und Tier schädigen können.⁷ Noch weniger weiss man, wie sich eine Freisetzung von Nanopartikeln auf die Umwelt – Pflanzen, Mikroorganismen, Ökosystemprozesse – auswirkt und welche Konsequenzen dies für die Nahrungskette hat. Man ist sich deshalb einig, dass die Risikoforschung in diesen Bereichen intensiviert werden muss.

Das bedeutet indes nicht, dass wir uns in einer Situation totalen Unwissens befinden. Im Gegenteil: In den letzten Jahren hat sich unser Wissen über die Risiken von synthetischen Nanopartikeln aufgrund einer wachsenden Zahl toxikologischer Studien erweitert. Diese Studien lassen zwar noch viele Fragen unbeantwortet. Gleichwohl zeigen sie mit hinreichender Deutlichkeit, dass wenigstens gewisse synthetische Nanopartikel in der Lage sind, schwere Schäden hervorzurufen.

3. Risiken⁸ von synthetischen Nanopartikeln für Mensch und Umwelt: der gegenwärtige Wissensstand

3.1 Gebundene vs. ungebundene Nanopartikel

Grundlegend für eine Analyse der mit Nanopartikeln im Allgemeinen, mit synthetischen Nanopartikeln im Besonderen verbundenen Risiken ist die Unterscheidung zwischen gebundenen und ungebundenen bzw. freien Nanopartikeln. Gebundene Nanopartikel sind fest in eine Trägersubstanz eingebunden und damit von der Umwelt isoliert. Ein Beispiel hierfür sind Materialien mit selbstreinigenden oder Antihaft-Beschichtungen. „Zwar verdanken sie ihre Eigenschaften Nanopartikeln. Doch diese sind in einer Matrix aus Kunststoffen verankert“ (Boeing 2005:35) und insofern für Mensch und Umwelt unbedenklich. Anders verhält es sich bei ungebundenen Nanopartikeln. Denn diese können mit Zellen wechselwirken und dabei Schäden verursachen. Das gilt vor allem – aber nicht nur – für synthetische Nanopartikel wie Buckyballs und Nanotubes, die nicht in einer Matrix gebunden sind.

Wenn im Folgenden von synthetischen Nanopartikeln die Rede ist, werden solche freien bzw. ungebundenen Partikel gemeint sein. Dabei gehe ich davon aus, dass diese folgende zusätzliche Merkmale aufweisen:

- Sie liegen – falls nicht ausdrücklich anders erwähnt – in nicht-agglomerierter Form vor, weil sie hauptsächlich in dieser Form für die Nanotechnologie interessant sind.
- Sie sind unbeschichtet, sofern es sich bei Beschichtungen um Massnahmen handelt, deren Zweck es ist, eine ohne Beschichtung vorhandene Toxizität zu reduzieren.

⁶ Ob sich bestimmte Partikel ähnlich verhalten, wenn ja, welche das sind, und ob dies eine Einteilung der Nanopartikel in Risikoklassen möglich macht, die einen teilweisen Verzicht auf aufwändige Einzelfallprüfungen ermöglichen würde, ist zurzeit noch nicht klar.

⁷ Neben der Katalyse unerwünschter chemischer Reaktionen wie der Bildung von freien Radikalen haben toxische Effekte noch zwei andere Aspekte: zum einen die „release and incorporation of toxic ions from incorporated particles“, zum anderen „mechanical effects in analogy to asbestos fibres“ (Tiefenauer 2007:15).

⁸ Ein spezielles Risiko, das im Folgenden nicht thematisiert werden soll, ist das Explosionsrisiko. Die höhere Oberflächenreaktivität und das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen erhöhen bei Nanopulvern das Risiko von Staubexplosionen (vgl. Renn/Roco 2006:43).

- Sie sind nicht-löslich und nicht biologisch abbaubar, weil sie sich andernfalls auflösen bzw. abbauen könnten, bevor sie eine toxische Reaktion in Gang setzen.

Es gibt drei Möglichkeiten, wie bioaktive Partikel dieser Art Zellen schädigen können:

1. Sie verursachen oxidativen Stress in der Zelle oder direkt an der Zelloberfläche: „Das bedeutet, dass sich freie Radikale bilden, also Moleküle, die ein freies Elektron aufweisen und damit ausgesprochen reaktionsfreudig sind. Die Folge: Der Kalziumspiegel innerhalb der Zelle steigt, und im Zellkern kann eine unerwünschte Transkription von Genen in Proteine aktiviert werden. Die Proteine können ihrerseits eine Entzündung im Gewebe auslösen“ (Boeing 2005:37).⁹
2. Es werden Rezeptormoleküle an der Zellhülle aktiviert, weil sich Metallatome aus den Nanopartikeln lösen. Die Konsequenzen wären dieselben wie in Fall 1.
3. „Das Nanoteilchen wird als Ganzes von der Zelle verschluckt und gelangt beispielsweise in die Mitochondrien, die „Kraftwerke“ der Zellen. Deren Arbeit wird durch die Anwesenheit des Partikels empfindlich gestört“ (Boeing 2005:37).

3.2 Risiken von synthetischen Nanopartikeln für Mensch und Tier

Betrachten wir zunächst die Risiken von synthetischen Nanopartikeln für die Gesundheit von Menschen und Tieren. Hinsichtlich der Aufnahmewege von Nanopartikeln in den menschlichen und tierischen Körper präsentiert sich aufgrund der vorliegenden in vitro- und in vivo-Studien folgendes Bild (vgl. Borm et al. 2006):

- Nanopartikel haben einen beinahe uneingeschränkten Zugang zum Körper. Sie können via Atmung (Lunge) und via Verdauungstrakt in den Blutkreislauf und von da in alle Organe (Leber, Milz, Knochenmark etc.) gelangen.
- Umstritten ist, ob die Absorption über die Haut erfolgen kann. Bei normaler Haut scheint dies kaum möglich zu sein; es ist aber nicht klar, was geschieht, wenn die Haut zum Beispiel durch Ekzeme geschädigt ist. Es gibt zudem Hinweise, dass Nanopartikel via Haut ins Lymphsystem und die Lymphknoten gelangen können.
- Gewisse Nanopartikel können unter bestimmten Umständen die Blut-Hirn-Schranke überwinden.
- Via Riechfasern der Nasenschleimhaut können Nanopartikel direkt ins Hirn gelangen. Wie sie sich dort verhalten, ist nicht bekannt.
- Nanopartikel können Zellmembranen durchdringen und in den Zellkern gelangen.

Auch wenn man nicht genau weiss, wie sich (unlösliche) Nanopartikel im menschlichen Körper verhalten, ist der Umstand, dass sie in der Lage sind, sich im ganzen Körper zu verteilen und dabei mit Zellen wechselzuwirken und die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden, ein weiterer Grund, im Umgang mit ihnen Sorgfalt und Vorsicht walten zu lassen. Gewiss, natürliche wie synthetische Nanopartikel haben die Tendenz zu verklumpen, das heisst sich zu traubenförmigen Agglomeraten zusammenzulagern. Das bedeutet, dass ab einer Cluster-Grösse von einem Mikrometer ihre Reaktivität abnimmt. Zudem sind sie dann zu gross, um über die Lunge in den Blutkreislauf zu gelangen. Toxische Wirkungen, die auf der geringen Grösse und der höheren Reaktivität beruhen, sind in diesem Fall nicht mehr von Bedeutung. Bloss, gerade synthetische Nanopartikel können den ihnen zgedachten Zweck in den meisten Fällen nur erfüllen, wenn sie nicht verklumpen. Die Verklumpung versucht man in der Regel zu verhindern, indem man sie speziell beschichtet. Das bedeutet freilich, dass diese Partikel reaktiv und hochbeweglich und damit potenziell toxisch bleiben (auch wenn durch die Beschichtung die Toxizität reduziert werden mag).

⁹ Vgl. hierzu Limbach et al. 2007.

Toxikologische in vivo Studien sind bis jetzt vor allem an Ratten, Mäusen und Fischen durchgeführt worden. Diese Studien machen deutlich, dass synthetische Nanopartikel schwerwiegende Schäden bewirken können:

- Verschiedene Studien haben gezeigt, dass insbesondere Fullerene und Nanotubes zu Entzündungszuständen in der Lunge führen, wenn sie in einer gewissen (hohen) Dosis eingeatmet werden (vgl. etwa Bottini et al. 2006). Dies gilt aber auch für Stoffe wie Gold, Carbon Black oder TiO_2 ,¹⁰ die normalerweise unbedenklich sind, in nanoskaliger Form jedoch toxisch wirken können.
- Das bekannte – wenn auch nicht unumstrittene – Experiment von Eva Oberdörster mit Forellenbarschen hat gezeigt, dass die Aufnahme von Buckyballs in diesen Fischen innerhalb von 48 Stunden zu schweren Hirnschäden führt (vgl. Oberdörster 2004).
- Eine Studie aus dem Jahr 2006 (vgl. Long et al. 2006) zeigt, dass die höhere Reaktivität von nanoskaligem Titandioxid die Mikroglia, deren Funktion der Schutz des zentralen Nervensystems ist, schädigen können (oxidativer Stress infolge der Bildung freier Radikale).
- Eine neuere chinesische Studie (Chen et al. 2006) mit Kupfernanopartikeln an Mäusen hat unter anderem folgendes festgestellt: „Nanoparticles induce gravely toxicological effects and heavy injuries on kidney, liver and spleen of experimental mice, but micro-copper particles do not, on mass basis“. Allgemein werden diese Partikel in Giftklasse 3 (mässig toxisch) eingeordnet, dies im Unterschied zu Mikro-Kupfer, das praktisch nicht toxisch ist. Zudem ist die Toxizität geschlechtsabhängig: männliche Mäuse zeigen bei gleicher Partikelmasse stärkere Vergiftungserscheinungen als weibliche Mäuse.

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

Zudem haben in vitro-Experimente an menschlichen Zellen Anhaltspunkte dafür geliefert, dass synthetische Nanopartikel, insbesondere Nanotubes und Buckyballs, die menschliche Gesundheit schwerwiegend schädigen können. So hat sich zum Beispiel gezeigt, dass Buckyballs in einer bestimmten Konzentration zu einem Absterben von 50% der betroffenen menschlichen Hautzellen führt.¹¹

Forscher an der EMPA haben im Jahr 2006 herausgefunden, dass Nanotubes dann besonders schädlich für Lungenzellen sind, wenn sie zu grösseren Nadeln zusammengeklebt sind. Zellbiologe Peter Wick: „Diese Agglomerate gleichen Asbestfasern – sowohl im Aussehen wie in der Toxizität (...). Die scheinen also nicht ganz unbedenklich zu sein“ (EMPA-News 2/2006).

¹⁰ „For poorly soluble, low-toxicity dusts such as titanium dioxide, smaller particles in the nanometer-size range appear to cause an increase for lung cancer in animals on the basis of particle size and surface area“ (Schulte 2007:6).

¹¹ Beschichtet man sie mit bestimmten Molekülen, wirken sie dagegen weniger toxisch. Durch die Beschichtung wird verhindert, dass Sauerstoff- und Wassermoleküle sowie Ionen mit den Radikale der Kohlenstoffatome in den Buckyballs wechselwirken können.

Zu erwähnen ist schliesslich noch, dass auch (unbeschichtete) Quantenpunkte toxisch wirken, das heisst Zellen schädigen können. Dies liegt daran, dass sie im Kern aus giftigen Schwermetallverbindungen wie Cadmiumselenid bestehen.¹²

Zusammenfassend kann man sagen, dass synthetischen Nanopartikeln wie Buckyballs, Nanoröhren oder Quantenpunkten in Tierversuchen und in Versuchen an menschlichen Zellen gewisse toxische Wirkungen nachgewiesen werden konnten. Inwiefern sie die menschliche Gesundheit schädigen können, ist aber noch nicht hinreichend geklärt. Gleichwohl gibt es aufgrund der bereits durchgeführten in vitro- und in vivo-Versuche vernünftige Gründe anzunehmen, dass sie auch für den Menschen gefährlich sein und ähnlich schwerwiegende Schäden wie bei Tieren und menschlichen Zellkulturen verursachen können, vor allem, wenn sie in grossen Mengen in den Körper gelangen.¹³

3.3 Risiken von synthetischen Nanopartikeln für die Umwelt

Bezüglich der Auswirkungen von synthetischen Nanopartikeln auf die Umwelt, insbesondere ihre Ökotoxizität, und den Konsequenzen für die Nahrungskette liegen erst wenig gesicherte Erkenntnisse vor. Einige dieser Erkenntnisse sind indes beunruhigend.

- So hat eine 2005 durchgeführte Studie beispielsweise gezeigt, dass Nanopartikel aus Tonerde, die heute bereits im Einsatz sind, in bestimmten Pflanzen das Wurzelwachstum stören können (vgl. Yang/Watts 2005).
- Es gibt Hinweise darauf, dass Buckyballs bioakkumulativ sind, das heisst die Tendenz haben, sich im Körper abzulagern und über die Nahrungskette zunehmend anzureichern (vgl. Locatelli et al. 2005:32).
- Es ist bekannt, dass Nanopartikel zur Klumpenbildung neigen. Verklumpte Partikel wie etwa Buckyballs können aber (im Wasser) für Bakterien giftig sein (vgl. Borm et al. 2006, Locatelli et al. 2005:30).
- Silber-Nanopartikel, die für den Menschen unbedenklich zu sein scheinen, können für nützliche Bakterien und Wasserlebewesen hochgiftig sein (vgl. Weiss 2006).
- Nanoskaliges Titandioxid ist hoch reaktiv ist, das heisst es erzeugt chemisch „heisse“ freie Radikale, die in der Lage sind, Bakterien zu zerstören. Deshalb machen sich einige Experten Sorgen über die Auswirkungen dieser Partikel auf die Bodenökologie, wenn sie in grossen Mengen in die Umwelt gelangen sollten. Die gleiche Sorge gilt auch mit Blick auf die Freisetzung von Buckyballs (vgl. Locatelli et al. 2005:27).
- Es ist vorstellbar, dass die Kleinheit der Nanopartikel zu einer höheren Beweglichkeit führt. Da nicht gebundene Nanopartikel im Regelfall sehr reaktiv sind, ist damit zu rechnen, dass sie sich mit anderen Substanzen, möglicherweise auch Giften, in der Umwelt verbinden und diese dank ihrer Beweglichkeit weit verteilen könnten.¹⁴ Wie

¹² Die Zytotoxizität scheint auch durch Beschichtung nicht ganz neutralisiert werden zu können. Zudem stellt sich die Frage: Was passiert, wenn die Quantenpunkte im Körper verweilen und die Beschichtung abgebaut werden sollte?

¹³ Eine weitere Gefahr besteht darin, dass Gesamtoberfläche und Gesamtpartikelzahl zu einer Überforderung der Makrophagen, der Fresszellen des Immunsystems, führen können. Es tritt ein so genannter „Overload“ ein: „Diese Überlastung führt zu Stressreaktionen, die eine Entzündung im umliegenden Gewebe bewirken. Schlimmer noch: Die Fresszellen ziehen sich in tiefer liegendes Gewebe zurück und stehen somit im Aktionsfeld nicht mehr zur Verfügung. Weiter anfallende Partikel werden nicht mehr entfernt und können ihre reaktive Wirkung voll entfalten. Auch andere, zusätzlich eintretende Erreger wie Bakterien werden nicht mehr effektiv angegriffen“ (Swiss Re 2004:16). Auch Oberdörster et al. 2005:824 halten fest: „The extraordinarily high number concentrations of NSPs per given mass will likely be of toxicologic significance when these particles interact with cells and subcellular components. Likewise, their increased surface area per unit mass can be toxicologically important if other characteristics such as surface chemistry and bulk chemistry are the same.“

¹⁴ Nanopartikel könnten Schadstoffe binden und durch das Erdreich transportieren. Angenommen, sie sind wegen ihrer Grösse sehr mobil, könnten „Schadstoffe in grösseren Mengen und mit höherer Geschwindigkeit in verschiedene Erdschichten gelangen. Problematisch könnte es mit Düngern und Pestiziden im Boden werden. Diese sind eigentlich nur begrenzt mobil, könnten aber durch die beweglichen Nanopartikel im Erdreich

dieses Risiko zu beurteilen ist, hängt neben ihrer Beweglichkeit auch von ihrer Aktivitätsdauer ab. Erste Tests mit eisenhaltigen Nanopartikeln haben gezeigt, dass diese Partikel im Boden wie im Wasser während mehrerer Wochen (re)aktiv sind.

Welche Auswirkungen ungebundene synthetische Nanopartikel auf Pflanzen, Mikroorganismen und Ökosystemprozesse haben, könnte deutlicher werden, wenn man sie, wie das in den USA ansatzweise bereits geschieht, zur Sanierung von Altlasten bei grossflächigen Umweltverschmutzungen einsetzen sollte. Die Idee dabei ist folgende:

Anstatt verschmutztes Grundwasser aufwändig hochzupumpen und zu behandeln, könnten reaktive Nanopartikel in den Boden gepumpt werden, wo sie Schadstoffe – zum Beispiel organische Lösungsmittel und Schwermetalle – durch eine chemische Reaktion in harmlose Substanzen umwandeln. (...) Neue, nanotechnologische Verfahren beruhen auf der Anwendung von künstlich hergestellten Nanopartikeln, die aufgrund ihrer kleinen Partikelgrösse eine Gesamtoberfläche von bis zu 1'000 Quadratmetern pro Gramm haben können. Diese aktive Oberfläche kann chemisch mit gewissen toxischen Kontaminanten im Erdreich, Grundwasser oder in der Luft reagieren und sie „neutralisieren“. Zur Trinkwasseraufbereitung werden derzeit Nanopartikel getestet, die Silber enthalten und anti-bakteriell wirken. (...) Ähnliche Reinigungsmethoden werden auch im Zusammenhang mit der Verschmutzung durch industrielle Herstellungs- und Prozessverfahren diskutiert. Man geht davon aus, dass diese Art der Nanotechnologie umweltgerechte, industrielle Herstellungsprozesse begünstigt, indem toxische Abgase und andere prozessbedingte Nebenprodukte durch Nanopartikel entgiftet würden.“ (Swiss Re 2004:27).¹⁵

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

Obwohl hinsichtlich der Ökotoxizität synthetischer Nanopartikel noch grosse Wissenslücken bestehen, lassen die bereits vorhandenen Erkenntnisse den Schluss zu, dass Partikel dieser Art die Umwelt vor allem in grossen Mengen beträchtlich schädigen können. Nicht nur mit Blick auf den Menschen, sondern auch mit Blick auf die natürliche Umwelt des Menschen scheint daher ein vor- und umsichtiger Umgang mit synthetischen Nanopartikeln angezeigt zu sein.

Nur, was heisst das konkret? Welche Massnahmen sind zu ergreifen, um Mensch und Umwelt auf angemessene Weise vor den Risiken synthetischer Nanopartikel zu schützen? Um diese Frage zu beantworten sollte man sich nach meinem Dafürhalten am Vorsorgeprinzip orientieren. In seiner allgemeinsten Form kann man dieses Prinzip wie folgt formulieren: Um drohende Schäden für Mensch und Umwelt zu vermeiden, ist der Staat auch unter Bedingungen wissenschaftlicher Unsicherheit legitimiert, angemessene Vorsorgemassnahmen zu ergreifen, die die Freiheit von Unternehmen und Forschung einschränken können.

„huckepack“ über weite Strecken transportiert werden. Da solche Partikel zum Teil sehr reaktiv sind, kann man sich auch diverse Reaktionen mit in der Umwelt vorhandenen Stoffen vorstellen, die zu neuen und unter Umständen toxischen Verbindungen führen“ (Swiss Re 2004:29).

¹⁵ Neben der Wasseraufbereitung und der Dekontamination von verseuchten Böden erhofft man sich auch dank des Energiesparpotenzials der Nanotechnologie und Nanobiotechnologie Fortschritte im Bereich Umweltschutz. Einen Beitrag könnten hier neue Brennstoffzellen in Form von Nanotubes, innovative Beleuchtungsmittel oder neuartige Solarzellen, „die sich nach der Vorstellung der Forscher künftig auf Gebäude sprühen oder in Kleidung einbauen lassen sollen“ (Swiss Re 2004:31), leisten, aber auch neue „Herstellungsverfahren, für die weniger Rohstoffe und Basismaterialien gebraucht werden und die weniger toxisches Abfallmaterial produzieren“ (Swiss Re 2004:31). Zu erwähnen sind zudem nanotechnisch hergestellte Oberflächen, die etwa toxische und schwer zu entsorgende Chromverbindungen ersetzen könnten (vgl. Swiss Re 2004:34).

Diese Formulierung bedarf der Erläuterung und Präzisierung. Zuvor müssen wir uns indes der ethischen Grundlagen bzw. des ethischen Kerns des Vorsorgeprinzips vergewissern und uns in diesem Zusammenhang auch Gedanken zu einigen Grundfragen der Risikoethik machen. Vor diesem Hintergrund wird es sodann um die allgemeinen Anwendungsbedingungen des Vorsorgeprinzips sowie die zwei wesentlichen Lesarten dieses Prinzips gehen (4). Erst wenn diese „Vorarbeiten“ erledigt sind, kann man die Frage beantworten, was dies für den Umgang mit synthetischen Nanopartikeln konkret bedeutet (5).

4. Die ethischen Grundlagen und die Anwendungsbedingungen des Vorsorgeprinzips

Die Risikoethik befasst sich mit der Frage, unter welchen Bedingungen eine Person sich selbst und andere einem Risiko aussetzen darf (zum folgenden vgl. Bachmann et al. 2006, Hansson 2007, Rippe 2002, Rippe 2006). Risiken sind durch zwei Variablen gekennzeichnet: Wahrscheinlichkeit und Schaden bzw. Schadensausmass. Um sie zu bestimmen, sind stets beide Variablen zu berücksichtigen und miteinander zu verknüpfen. Das Risiko beispielsweise getötet zu werden, bezieht sich auf einen grossen Schaden. Wir können es nur dann als klein bezeichnen, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Ereignisses äusserst klein ist.

Andere durch Handeln einem Risiko auszusetzen, ist grundsätzlich rechtfertigungsbedürftig, weil ihnen hierdurch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Schaden entsteht. Dies gilt unabhängig davon, ob es zu einer Schädigung kommt (und auch unabhängig vom Schadensausmass). Fährt jemand beispielsweise mit überhöhter Geschwindigkeit durch ein Wohnquartier, ist dies moralisch falsch, da er die in diesem Quartier lebenden Kinder einem zu hohen Risiko aussetzt. Dieses Verhalten ist auch dann falsch, wenn keinem der Kinder etwas passiert. Die Formulierung „zu hohes Risiko“ deutet indes schon an, dass es nicht immer moralisch schlecht ist, andere einem Risiko auszusetzen. Unter bestimmten Bedingungen ist dies vielmehr zulässig und insofern ethisch gerechtfertigt.

Es liegt im Interesse eines jeden, gewisse Risiken zu akzeptieren, sofern bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Dies aus zwei Gründen. Erstens: Wäre nur Handeln zulässig, das andere keinem Risiko aussetzt, führte das zu einer allgemeinen Handlungsblockade, die ein gesellschaftliches Zusammenleben verunmöglichen würde – und das kann nicht im Interesse des einzelnen sein. Das erklärt auch, warum einige der einschlägigen risikoethischen Kriterien als allgemeine Kriterien für Risikoexposition unplausibel sind. Dies betrifft beispielsweise das Maximin-Kriterium und das Zustimmungskriterium. Beide Kriterien sind unter dem Gesichtspunkt, dass ethische Kriterien soziales Zusammenleben ermöglichen und gestalten sollten, zu restriktiv. Maximin hiesse, stets so zu handeln, dass der grösstmögliche Schaden vermieden wird. Das würde aber alltägliches Handeln praktisch verunmöglichen. Das gilt auch für das Kriterium der Zustimmung. Müsste man für jede andere einem Risiko aussetzende Handlung deren Zustimmung einholen, würde uns dies in der Praxis vollkommen lähmen.

Nur, und damit kommen wir zum zweiten Grund, Risiko aussetzen und Risiko ausgesetzt sein ist oftmals eine asymmetrische Situation. Deshalb stellt sich die Frage, warum derjenige, der einem Risiko ausgesetzt ist, ohne davon zu profitieren – der Risikoexponierte – dies hinnehmen sollte, wenn der Risikoexponent dem Risiko selbst nicht ausgesetzt ist. Er hat nur dann einen Grund, dies zu tun, wenn der Risikoexponent sich auf bestimmte Weise verhält. Dann bleibt zwar die Situation immer noch asymmetrisch, dennoch liegt es – in der Regel – in seinem Interesse, das Risiko zu akzeptieren, da er davon ausgehen muss, dass auch er in vielen Situationen andere einem Risiko aussetzt und es dann in seinem Interesse ist, wenn sie dies akzeptieren.

Die entscheidende Voraussetzung ist, dass vom Risikoexponenten angemessene Sorgfalts- bzw. Vorsichtsmassnahmen ergriffen werden. Angemessen heisst, dass diese Massnahmen das Risiko des Exponierten so weit wie praktisch möglich verringern. „Praktisch möglich“ bedeutet, dass sie nicht so aufwändig und umfassend sein dürfen, dass sie unseren Handlungsspielraum auf Null reduzieren. Sie müssen sich in das alltägliche Leben integrieren lassen. Sind diese Massnahmen ergriffen worden, kann der Risikoexponent moralisch nicht getadelt werden, wenn doch einmal ein Schaden eintreten sollte. Darin besteht das ethisch akzeptable „Restrisiko“: der Schaden kann eintreten, auch wenn von Seiten des Risikoexponenten angemessene Vorsichtsmassnahmen ergriffen worden sind. Kommt es zum Schadensereignis, weil sich der Risikoexponierte unvorsichtig verhält, ist dies dem Risikoexponenten nicht anzulasten. Der Risikoexponierte allein trägt dann die Verantwortung und ist insofern ‚selber schuld‘. Freilich darf man das nicht so verstehen, dass er moralisch verpflichtet ist, vorsichtig bzw. sorgfältig zu agieren. Vielmehr liegt das einfach in seinem Eigeninteresse. Verhält er sich nicht entsprechend, handelt er diesem Interesse zuwider. Das ist unklug, aber nicht moralisch falsch oder tadelnswert.

Dieses Risikorechtfertigungs-Modell funktioniert indes nur, wenn sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden eintritt, sowie die Art des Schadens bzw. das Schadensausmass, zuverlässig bestimmen lässt – kurz, wenn es sich um vertraute Risiken handelt, auf die man sich einstellen kann. Denn nur wenn man hinsichtlich der Risikosituation über hinreichend – wissenschaftlich oder alltagsgestützte – Erfahrungen verfügt, können die Risikoexponierten Vorkehrungen treffen, um das Risiko zu verringern, und zudem auch kontrollieren, ob der Risikoexponent tatsächlich die erforderlichen Sorgfaltsmassnahmen ergriffen hat.

Diese Bedingung ist hinsichtlich des Umgangs mit synthetischen Nanopartikeln nicht – oder nur teilweise – erfüllt. Bei den mit ihnen verbundenen Risiken handelt es sich nicht um vertraute, sondern um neuartige Risiken. Weder ist klar, was Risikoexponierte (vor allem ausserhalb der Forschungslaboratorien) tun können, um sich auf diese Risiken einzustellen; noch ist klar, welche Sorgfaltsmassnahmen die Risikoexponenten ergreifen sollten, um einen Schadenseintritt zu vermeiden. Zugleich befinden wir uns aber nicht in einer Situation vollkommenen Unwissens. Vielmehr ist die Situation als eine der Unsicherheit zu charakterisieren. Es liegen empirische Hinweise vor, dass zumindest bestimmte synthetische Nanopartikel gefährlich sind; und es liegen auch Hinweise vor, dass der potenzielle Schaden schwerwiegend sein kann. Aber es ist nicht klar, unter welchen Bedingungen welche Schäden mit welcher Wahrscheinlichkeit eintreten; und warum sie dies tun. Genau für solche neuartigen Risiken, die mit potenziell schwerwiegenden Schäden verbunden sind, ist das Vorsorgeprinzip vorgesehen.

Versuchen wir zu präzisieren, was damit gemeint ist. Es ist zweifellos vernünftig und auch moralisch richtig, im Strassenverkehr Sorgfalt walten zu lassen: man sollte sich anschnallen, um das Gesundheitsrisiko für einen selbst zu verringern, selbst wenn die Unfallgefahr gering ist; man sollte die Geschwindigkeit den Umständen anpassen, um das Risiko für andere (Fussgänger, Fahrradfahrer) möglichst klein zu halten. In diesem Sinn sollten wir Schritte vermeiden, die einen möglichen Schaden nach sich ziehen bzw. die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts erhöhen. Hierbei handelt es sich um Vorsichtsmassnahmen, die auf breit abgestützter Erfahrung oder auf statistisch gestütztem Wissen beruhen. Werden sie ergriffen, ist das ihnen korrespondierende Risiko, andere zu schädigen, zulässig, sofern mit der Handlung (etwa dem Autofahren) Chancen verbunden sind, die das verkleinerte, aber immer noch bestehende Risiko aufwiegen. Allerdings sind diese Massnahmen nicht für Situationen der Unsicherheit vorgesehen, sondern für Situationen, in denen klar bestimmt werden kann, was zu tun ist, um (sich selbst und) andere vor unnötigen Risiken zu schützen.

Dabei geht es nicht um vollständige Sicherheit und damit eine Reduktion des Risikos auf Null. Wörtlich verstanden, ist so etwas unerreichbar – und deshalb macht es auch keinen Sinn, die Forderung, Vorsicht walten zu lassen, daran zu binden. Auch das Vorsorgeprinzip (in

seiner starken Version) verlangt nicht, dass die Befürworter einer riskanten Technologie deren absolute Sicherheit nachweisen müssen, damit sie als zulässig erachtet wird. Wäre das tatsächlich eine Forderung, würde das bedeuten, dass das Vorsorgeprinzip die von ihm erfassten Technologien, Produkte und Verhaltensweisen grundsätzlich verbietet, eben weil absolute Sicherheit und damit Nullrisiko prinzipiell nie gegeben ist. Arzneimittel und Lebensmittelzusätze zum Beispiel dürften dann nicht mehr zugelassen werden. Das aber würde das Vorsorgeprinzip vollkommen unplausibel machen.

Betrachtet man die Geschichte des Vorsorgeprinzips (vgl. Rippe 2002, Sandin 2007, Sunstein 2007), wird klarer, welchen Zweck dieses Prinzip hat. Die Kernidee besteht darin, dass, wenn insbesondere langfristig schwerwiegende und irreversible Schäden für Mensch und Umwelt drohen, das Fehlen gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse für den Staat kein Grund sein kann, geeignete regulative Massnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der entsprechenden Risiken aufzuschieben. Positiv formuliert: Der Staat ist in diesen Fällen legitimiert, ja unter Umständen verpflichtet, angemessene Vorsorgemassnahmen zu ergreifen. Das kann bedeuten, dass er die Freiheit von Forschenden oder Unternehmen entsprechend einschränkt. Ursprünglich vor allem für den Bereich des Umweltschutzes gedacht, ist das Vorsorgeprinzip inzwischen auf viele gesellschaftlich relevante Handlungsfelder ausgedehnt worden.

Einigkeit herrscht dabei in einem Punkt: staatliche Massnahmen im Fall von drohenden Schäden sind gerechtfertigt – sofern dadurch keine Risiken entstehen, die grösser sind als das mit den Massnahmen anvisierte Risiko –, auch wenn (noch) kein schlüssiger wissenschaftlicher Risikonachweis vorliegt. Das Vorsorgeprinzip bezieht sich mithin auf Situationen der Unsicherheit. Unsicherheit ist ein bestimmter Risikotypus. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass das Schadensausmass und die Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts zwar nicht vollständig kalkulierbar sind, aber doch ungefähr abgeschätzt werden können. Genauer betrachtet gibt es drei Arten von Unsicherheit: 1) Das Schadensausmass ist objektiv bekannt, die Wahrscheinlichkeit aber nur subjektiv abschätzbar. 2) Die Wahrscheinlichkeit ist objektiv bekannt, das Schadensausmass aber nur subjektiv abschätzbar. 3) Sowohl die Wahrscheinlichkeit wie das Schadensausmass sind nur subjektiv abschätzbar.

Wo man die Risiken synthetischer Nanopartikel beim gegenwärtigen Wissensstand einordnet, hängt davon ab, was man in diesem Zusammenhang unter ‚subjektiv‘ und ‚objektiv‘ versteht. Am sinnvollsten ist es, von einem Kontinuum auszugehen, das von rein subjektiv bis zu rein objektiv reicht. Rein subjektiv sind vollkommen willkürliche Wahrscheinlichkeits- und Schadenseinschätzungen; rein objektiv dagegen Wahrscheinlichkeits- und Schadenseinschätzungen, die von einem Archimedischen Punkt (einem „Gottesstandpunkt“) aus vorgenommen werden. So verstanden, sind Risikokalkulationen kaum je rein objektiv oder rein subjektiv. Am nächsten zum rein objektiven Pol kommt man in Situationen, in denen Schaden oder Nutzen gegeben sind und die Wahrscheinlichkeit mathematisch berechnet werden kann. Zu betonen ist, dass diese starke Form von Objektivität nicht identisch ist mit dem, was in den Naturwissenschaften als ‚objektives Risiko‘ bezeichnet wird. Naturwissenschaftliche Risikoeinschätzungen beruhen auf Erfahrungswerten und statistischen Wahrscheinlichkeiten. Dabei handelt es sich bestenfalls um eine Annäherung an das, was hier mit ‚reiner Objektivität‘ gemeint ist. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die Risiken synthetischer Nanopartikel, so ist klar, dass sie gegenwärtig der dritten Art von Unsicherheit zuzuordnen sind. Das bedeutet nicht, dass die Einschätzung der mit ihnen verbundenen Risiken subjektiv im Sinne von willkürlich ist. Wir befinden uns nicht in einer Situation totalen Unwissens, in der Risikoszenarien rein hypothetisch sind. Gleichzeitig verfügen wir aber auch noch nicht über hinreichendes Wissen, um die Risiken mit wissenschaftlicher ‚Objektivität‘ beurteilen zu können. Vielmehr ist die Lage dadurch gekennzeichnet, dass empirische Belege und Indizien vorhanden sind, die darauf hindeuten, dass synthetische Nanopartikel für die menschliche Gesundheit und die Umwelt gefährlich

sein können. Diese Belege sind aber so lückenhaft, dass wir die Risiken noch nicht mit der erforderlichen Zuverlässigkeit kalkulieren können (wie das etwa bei der Zulassung neuer Medikamente der Fall ist, wobei dieses Beispiel zugleich zeigt, dass mit Zuverlässigkeit nicht Unfehlbarkeit oder absolute Sicherheit gemeint ist).

Das Vorsorgeprinzip, so weit besteht mithin Einigkeit, ist nur dann anzuwenden, wenn eine Situation der Unsicherheit vorliegt. Strittig ist dagegen, ob dieses Prinzip für alle potenziellen Schäden oder nur bestimmte, nämlich solche schwerwiegender und irreversibler Art gelten soll. Im Folgenden gehe ich von letzterem aus. Das heisst, das Vorsorgeprinzip verlangt keine allgemeine Haltung der Risikoaversion. Es ist bloss für bestimmte Fälle, für bestimmte Arten von unvertrauten Risiken gedacht: solche wissenschaftlicher Unsicherheit, in denen erhebliche bzw. schwerwiegende Schäden drohen. In solchen und nur in solchen Situationen ist der Staat gemäss Vorsorgeprinzip gefordert, angemessene Vorsorgemassnahmen zu ergreifen, um das Eintreten dieser Schäden zu verhindern.

Nachdem geklärt ist, was mit Unsicherheit gemeint ist, stellt sich als nächstes die Frage, was man unter schweren bzw. schwerwiegenden und irreversiblen Schäden zu verstehen hat. Darauf kann ich hier keine abschliessende Antwort geben. Nur soviel: das Wort Schaden hat einen deskriptive und eine evaluative bzw. normative Bedeutungskomponente. Deskriptiv betrachtet kann man einen Schaden beschreiben; und das heisst auch: man kann feststellen, ob ein Schaden eingetreten ist oder nicht. Evaluativ gesehen bezieht sich Schaden auf einen positiven Bezugspunkt, einen wünschens- und insofern schützenswerten Zustand einer Person, Sache oder eines Systems (zum Beispiel eines Unternehmens oder eines Ökosystems), der im Schadensfall negativ verändert wird. Schaden wäre so gesehen eine negative und damit zu vermeidende Abweichung von einem wünschens- bzw. schützenswerten Zustand. Die zentrale Frage ist dann: Was sind wünschens- bzw. schützenswerte Zustände (oder ‚Güter‘, wie man auch häufig sagt)? Und wie kann man die Höhe bzw. das Ausmass eines Schadens bestimmen? Diese Fragen benötigten eine eingehende Auseinandersetzung mit der Frage, ob ein Schaden objektiv, das heisst hier: unabhängig von Wünschen und Überzeugungen oder bloss subjektiv, also nur mit Bezug auf Wünsche und Überzeugungen bestimmbar ist; und insofern mit der Frage, ob es objektive Werte gibt, die den Massstab bilden, anhand dessen man einen Schaden und dessen Ausmass bestimmen kann. Dies soll hier offen bleiben. Soviel ist aber doch unumstritten: In relativ vielen Fällen sind wir uns einig, was ein Schaden wäre, und wir sind uns oftmals auch über dessen Ausmass einig. Wir sind uns einig: negative Auswirkungen eines technologischen Produkts auf die (menschliche) Gesundheit – was immer Gesundheit ist –, ist ein Schaden. Und je nach Auswirkung handelt es sich um einen kleinen, grösseren oder schwerwiegenden Gesundheitsschaden, wobei der schwerwiegendste Schaden der Tod einer Person ist. Bezüglich Umweltschädigungen sind die Kriterien vielleicht weniger klar, aber auch da gibt es relativ weitgehende Übereinstimmung, was ein Schaden ist, und wie gross ein Schaden ist. Mehr ist in unserem Zusammenhang nicht nötig. Es lässt sich dann nämlich guten Gewissens die Aussage machen, dass der potenzielle Schaden von synthetischen Nanopartikeln für die Gesundheit und die Umwelt zumindest im schlimmsten Fall schwerwiegend – wenn wohl auch nicht katastrophal – ist.

Zusammenfassend sei noch einmal betont, dass das Vorsorgeprinzip nicht bloss auf der Annahme beruht, dass schwerwiegende und irreversible Schäden drohen. Ebenso wichtig ist, dass die Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts weder wissenschaftlich (statistisch) noch aufgrund unseres Alltagswissens genau berechnet werden kann, obwohl erste Hinweise und Belege vorhanden sind, die relativ unspezifische Angaben von Wahrscheinlichkeiten ermöglichen. Nur wenn diese zwei Bedingungen erfüllt sind, kommt das Vorsorgeprinzip zur Anwendung. Seine Kernthese ist dann: Unter diesen Umständen – wenn es empirische Hinweise auf potenziell schwerwiegende Schäden gibt und gewisse vorsichtige und vorläufige Annahmen hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit plausibel zu sein scheinen –

ist ein risikoaverses Verhalten nicht nur vernünftig, sondern ethisch gefordert. Allein, was bedeutet „risikoaverses Verhalten“?

In der Literatur scheinen viele der Meinung zu sein, dies laufe auf eine Art Maximin hinaus (vgl. Sandin 2007:102f.). Unter dem Gesichtspunkt des Vorrangs der schlechten Prognose ginge es dann stets darum, in Situationen der Unsicherheit so zu entscheiden, dass der grösstmögliche Schaden vermieden wird – und dies unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit und auch unabhängig vom potenziellen Nutzen. Dieses Absehen von Wahrscheinlichkeit und Nutzen mag für Katastrophenszenarien, insbesondere wenn viele Menschen betroffen sind wie etwa im Fall eines Super-GAUs in einem Atomkraftwerk, vertretbar sein. Wie sich am Beispiel der synthetischen Nanopartikel jedoch zeigen lässt, greift die Gleichsetzung des Vorsorgeprinzips mit dem Maximin-Kriterium zu kurz, wenn man von potenziell zwar schwerwiegenden, aber nicht katastrophalen Schäden ausgeht und zudem, je nach Exponiertheit, auch von unterschiedlichen (vermutlichen) Eintrittswahrscheinlichkeiten.

5. Vorsorge im Umgang mit synthetischen Nanopartikeln

Es hat sich eingebürgert, zwischen einer schwachen und einer starken Lesart des Vorsorgeprinzips zu unterscheiden (vgl. Rippe 2002). Beide beziehen sich auf potenziell schwerwiegende Schäden, deren Eintrittswahrscheinlichkeit noch nicht wissenschaftlich zuverlässig ermittelt werden kann (auch wenn es sowohl für die Schäden wie auch für die Wahrscheinlichkeit, dass sie eintreten, empirische Indizien gibt). Sie schlagen aber unterschiedlich weit gehende Vorsorgemassnahmen vor.

Die starke Lesart betont drei Punkte:

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

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

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

Ob hinsichtlich eines ethisch verantwortungsvollen Umgangs mit den Risiken synthetischer Nanopartikel das starke oder das schwache Vorsorgeprinzip anzuwenden ist, hängt wesentlich von der Art der Exponiertheit der Betroffenen ab. Hierbei sind vier Gruppen zu unterscheiden: 1) Forschende; 2) Mitarbeitende in Produktionsstätten, in denen synthetische Nanopartikel in grossen Mengen hergestellt und verwendet werden; 3) Unbeteiligte Dritte, insbesondere Konsumenten – bzw. im medizinischen Fall Patienten – von Produkten, die

ungebundene synthetische Nanopartikel enthalten. 4) die Umwelt (Wasser, Luft, Erdreich, Grundwasser etc.).

Ad 1

Da man über die Toxizität von synthetischen Nanopartikeln kaum allgemeine Aussagen machen kann, ist es sinnvoll, von einem Beispiel auszugehen, für dessen Risikopotenzial bereits Belege vorliegen. Nehmen wir an – wofür einiges spricht –, dass freie und unbeschichtete Nanoröhren vor allem in aggregierter Form eine erhebliche Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen können. Und gehen wir zudem zunächst davon aus, dass unbeteiligte Dritte nicht tangiert sind, sondern nur die an der Forschung direkt Beteiligten. Dies bedeutet, dass es vernünftig bzw. klug und damit in ihrem Interesse ist, die nötigen Vorsichtsmassnahmen zu treffen. Die Forschenden dazu zu zwingen, wäre allerdings zumindest dann nicht gerechtfertigt, wenn sie sich autonom, mithin freiwillig und informiert dem entsprechenden Risiko aussetzen. Denn unter dem Gesichtspunkt der Autonomie betrachtet darf man sich selbst, sofern dies informiert geschieht und sofern unbeteiligten Dritten keine Gefahr droht, jeglicher Art von Risiko aussetzen. Gleichzeitig ist nicht davon auszugehen, dass sich die Forschenden als Versuchskaninchen betrachten. Deshalb sollten sie selbst dafür besorgt sein, sich vor möglichen Gefahren so gut wie möglich zu schützen, etwa durch hermetisch abgeschlossene Systeme. Das sind zwar vorsorgliche Massnahmen, die aber mit dem Vorsorgeprinzip nichts zu tun haben, geht es hierbei doch vor allem darum, Eigenrisiken zu minimieren.

Allerdings müssen diese Massnahmen so sein, dass unbeteiligte Dritte (ausserhalb der Forschungslaboratorien) mit den zu Forschungszwecken verwendeten synthetischen Nanopartikeln möglichst nicht in Kontakt kommen und damit dem Risiko einer gesundheitlichen Schädigung ausgesetzt werden. Hier kommt das Vorsorgeprinzip ins Spiel. Solange auch im schlimmsten Fall nur kleine Mengen austreten können und man demzufolge annehmen kann, dass die Wahrscheinlichkeit eines schwerwiegenden Schadens äusserst gering ist, ist das schwache Vorsorgeprinzip angemessen: Es darf und soll geforscht und entwickelt werden, aber es sind Massnahmen zu ergreifen, die sicherstellen, dass das Risiko für unbeteiligte Dritte minimal ist.

Ad 2

Wie ist die Situation von Mitarbeitenden in Firmen, in denen synthetische Nanopartikel in grossen Mengen produziert oder für die Herstellung von Produkten verwendet werden,¹⁶ aus ethischer Sicht zu beurteilen? Hier kann man nicht ohne weiteres von Freiwilligkeit und Informiertheit ausgehen.¹⁷ Zudem sind Grenzwerte beim gegenwärtigen Stand des

¹⁶ „Thousands of tons of silica, alumina and ceria, in the form of ultrafine abrasive particle mixtures that include Nanoparticles, are used each year in slurries for precision polishing of silicon wafers. (...) The manufacture of Fullerenes could soon match the engineered metal oxide Nanoparticles in production quantities, with the Kitakyushu plant (Mitsubishi, Japan) estimating an annual production of 1500 tons of C₆₀ by 2007. Other manufacturing facilities also anticipate increased production of fullerenes, and therefore the sum production could be several thousands of tons of fullerenes by 2007. (...) The worldwide production capacity for single-wall and multi-wall carbon nanotubes is estimated to be about 100 tons in 2004, increasing to about 500 tons in 2008 (...) Although current production of engineered nanomaterials is small, it is evident that production rates will accelerate exponentially in the next few years” (Borm et al. 2006).

¹⁷ Dagegen könnte man einwenden, dass die Arbeiter von der Firma, sofern diese nicht völlig verantwortungslos handelt, über die möglichen Risiken ihrer Tätigkeit aufgeklärt werden. Ausserdem werde niemand gezwungen, in einer Fabrik zu arbeiten, in der synthetische Nanopartikel hergestellt werden. Damit seien auch in diesem Fall Freiwilligkeit und Informiertheit gegeben. Dieser Einwand trifft zu, sofern 1) jeder Arbeiter die praktische (nicht bloss theoretische) Option hat, den Arbeitsplatz zu wechseln, wenn er die Risiken für zu hoch hält; und sofern 2) er tatsächlich unvoreingenommen und umfassend über die Risiken informiert wird. Dass diese Bedingungen stets erfüllt sind, scheint mir allerdings eine nicht besonders realistische Annahme zu sein. Darum können Freiwilligkeit und Informiertheit nicht einfach als etwas Gegebenes unterstellt werden.

arbeitsmedizinisch-toxikologischen Wissens nicht begründbar, zumal auch keine standardisierten Messverfahren zur Verfügung stehen. Deshalb ist eine Massenproduktion oder Massenverwendung nur zulässig, wenn die Arbeitnehmenden keinem oder nur einem sehr kleinen Gesundheitsrisiko ausgesetzt sind. Ob dies zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Fall ist, ist mit einem Fragezeichen zu versehen. Fraglich ist vor allem, ob die Standardverfahren zur Expositionsbeschränkung – dazu gehören technische Schutzmassnahmen wie die Verwendung von geschlossenen Apparaturen, organisatorische Massnahmen wie eine Minimierung der Expositionszeit und personenbezogene Schutzmassnahmen wie Schutzbekleidung und Atemschutzfilter (vgl. Suva 2006) – ausreichen, um schwerwiegende Schädigungen der Gesundheit ausschliessen zu können. Zudem gibt es Bedenken, ob Filter beim gegenwärtigen Stand der Filtertechnik überhaupt hinreichenden Schutz gewährleisten können.¹⁸ Sollten diese Bedenken berechtigt sein, spricht vieles dafür, das starke Vorsorgeprinzip, insbesondere Punkt C, zur Anwendung zu bringen: Ausgehend vom Vorrang der schlechten Prognose wäre die Massenproduktion und Massenverwendung von synthetischen Nanopartikeln wie Nanotubes vorläufig zu unterlassen, da sie die Arbeitnehmenden schwerwiegend schädigen könnte; und dies auch dann, wenn es Hinweise gibt, dass die Wahrscheinlichkeit einer solchen Schädigung eher gering ist und dass die mit synthetischen Nanopartikeln verbundenen Chancen gross sind. Vorläufig heisst: Dass das Verbot aufgehoben werden kann, sollte a) die Risikoforschung herausfinden, dass das Schadenspotenzial dieser Nanopartikel geringer ist als vermutet; oder sollte b) wirklich gewährleistet werden können, dass die Arbeitnehmenden keinem oder einem nur sehr kleinen Gesundheitsrisiko ausgesetzt sind. Ausserdem muss dafür gesorgt sein, dass solche Nanopartikel unter normalen Umständen nicht in grossen Mengen in die Umwelt, das heisst in Wasser, Luft, Erdreich und Grundwasser gelangen können.¹⁹

Ad 3

Die industrielle Herstellung synthetischer Nanopartikel ist das eine. Das andere ist, ob solche Partikel in Produkten verwendet werden dürfen, und wenn ja in welcher Form. Problematisch, darauf habe ich schon hingewiesen, ist vor allem die Verwendung von ungebundenen synthetischen Nanopartikeln. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie die Beweislast verteilt werden sollte. Soll sie im Sinne von Punkt A des schwachen Vorsorgeprinzips beibehalten werden? Oder ist nicht eher eine Umkehr der Beweislast angezeigt, wie es Punkt A des starken Vorsorgeprinzips vorsieht? Angesichts des Risikopotenzials zumindest bestimmter synthetischer Nanopartikel und der dafür bereits vorhandenen wissenschaftlichen Indizien scheint die vom starken Vorsorgeprinzip geforderte

¹⁸ „Gesichtsmasken bieten hier nur einen geringen Schutz. Lediglich eine umfassende Luftfilterung in der Anlage könnte die Partikel entfernen. Letzteres ist jedoch äusserst aufwändig und zumindest nach dem heutigen Stand der Technik für die Luftreinhaltung von grösseren Gebäudeteilen kaum möglich. (...) Mit Nanopartikeln muss vermutlich ähnlich umgegangen werden wie mit gewissen Bio-Organismen oder radioaktiv strahlenden Substanzen. Adäquate Schutzmassnahmen wie eine nanotaugliche „glovebox“ müssen der möglichen Gefährdung entsprechend voraussichtlich noch entwickelt werden (Swiss Re 2004:33f.).

¹⁹ Gemäss Oberdörster gibt es folgende Möglichkeiten, wie ungebundene Nanopartikel in die Umwelt gelangen könnten: 1) „Some [manufactured nanomaterials] are and others will be produced by the ton, and some of any material produced in such mass quantities is likely to reach the environment from manufacturing effluent or from spillage during shipping and handling“. 2) “They are being used in personal-care products such as cosmetics and sunscreens and can therefore enter the environment on a continual basis from washing off of consumer products“. 3) “They are being used in electronics, tires, fuel cells, and many other products, and it is unknown whether some of these materials may leak out or be worn off over the period of use“. 4) “They are also being used in disposable materials such as filters and electronics and may therefore reach the environment through landfills and other methods of disposal“. [Zu diesen Materialien gehörten auch Lebensmittelverpackungen, die Nanopartikel enthalten.] 5) “Scientists have also found ways of using nanomaterials in remediation. Although many of these are still in testing stages (...) dozens of sites have already been injected with various nanomaterials, including nano-iron” (Oberdörster et al. 2005:825).

Beweislastumkehr gerechtfertigt zu sein. Das gilt mindestens für Produkte, die ungebundene synthetische Nanopartikel enthalten, also zum Beispiel alle Produkte, in denen die Delivery-Technik und damit entsprechende synthetische Nanopartikel wie Fullerene, Dendrimere oder Goldnanopartikel zum Einsatz kommt. Solche Produkte – insbesondere in den Bereichen Nanomedizin, Nanopestizide und Nanofood – bedürfen aus ethischer Sicht einer Zulassung. Sie sollten einem bestimmten, von den zuständigen Behörden kontrollierten Testverfahren unterzogen werden, in dem der Produzent ihre Unbedenklichkeit nachzuweisen hat. Entsprechende Nanoprodukte sind insofern wie Arzneimittel zu behandeln.

Das bedeutet nicht, um es noch einmal zu sagen, dass ein absoluter Sicherheitsnachweis erforderlich ist. Welche Kriterien zu erfüllen sind, damit der Nachweis als erbracht gelten kann, müsste für Nanoprodukte eigens bestimmt werden. Dabei sind strengere oder weniger strenge Vorgaben denkbar. Zudem bräuchte es auch nach Zulassung ein Monitoring, das die Langzeitwirkungen zu überwachen erlaubt. Es ist klar, dass dieser Ansatz zum einen einen funktionierenden Patentschutz voraussetzt; und zum anderen die entsprechenden Produkte voraussichtlich relativ teuer machen würde. Allerdings müssen solche ökonomischen Überlegungen hinter den oben gemachten ethischen Überlegungen zurückstehen.

Die in schon bestehenden Produkten verwendeten synthetischen Nanopartikel sind zumeist in eine Trägersubstanz eingebunden – etwa Nanotubes in Tennisschlägern –, damit von der Umwelt isoliert und insofern nicht mit den gleichen Risiken behaftet wie in ungebundener Form. Dies ist freilich nur solange der Fall, als sie wirklich in einer Matrix verankert sind. Hier stellen sich folgende Fragen: „Was passiert mit den Nanokomponenten, wenn die Geräte und Materialien entsorgt werden? Konzepte für Recycling oder Wiederverwendung gibt es noch nicht. Sollte es möglich sein, dass sich diese Nanoanwendungen am Ende ihres Lebenszyklus zersetzen“ (Boeing 2005:36), würden die gebundenen synthetischen Nanopartikel freigesetzt und damit zu einem Risiko für Mensch und Umwelt. Das ist ein wichtiger Grund, warum die Erforschung der Lebenszyklen entsprechender Produkte voranzutreiben ist.

Bereits erhältliche Produkte mit gebundenen synthetischen Nanopartikeln sollten zwar nicht vom Markt genommen werden, da die Menge der Partikel wohl zu klein ist, um im Fall ihrer Freisetzung grossen Schaden anrichten zu können. (Anders formuliert: Das Risiko, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines solchen Schadens, ist so gering, dass es akzeptiert werden kann.) Aber dennoch sollten diese Artikel meldepflichtig sein. Und es sollte von den Produzenten ein klares Entsorgungskonzept verlangt werden, aus dem hervorgeht, wie die Produkte rezykliert werden und was dabei mit den synthetischen Nanopartikeln geschieht.²⁰ In diesem Bereich kommt also das schwache Vorsorgeprinzip zur Anwendung. Bestehende Nanoprodukte dürfen zwar weiter hergestellt und vertrieben werden, sofern die erforderlichen Mengen an Nanopartikeln vorhanden sind, dies aber nur unter bestimmten Bedingungen: Sie unterliegen einer Meldepflicht, und es müssen vor allem mit Blick auf ihre Entsorgung sorgfältige Risiko- und Life-Cycle-Analysen durchgeführt werden mit dem Ziel, sicherzustellen, dass möglichst geringe Mengen an ungebundenen Nanopartikeln freigesetzt werden. Zudem sollte für alle (kommerziellen) Produkte, die synthetische Nanopartikel enthalten, eine Deklarationspflicht gelten. Für eine solche Pflicht sprechen zwei Gründe. Zum einen besteht in diesem Fall eine Informationspflicht gegenüber den Konsumentinnen und Konsumenten; zum anderen ist die Deklaration eine vertrauensbildende Massnahme.

²⁰ Mindestens sollten sie sich an der hierfür nötigen Forschung beteiligen. Dies ist aus folgendem Grund wichtig und gerechtfertigt: „Effluent from nanomanufacturing processes, use of nanoparticle-containing substances such as sunscreens, and disposal of nanomaterial-containing products, will inevitably lead to increasing quantities of engineered nanomaterials in water systems. If we cannot track these materials, it will be almost impossible to determine how benign or harmful their presence is. The (...) challenge therefore is to develop instruments that can track the release, concentration and transformation of engineered nanomaterials in water systems (including liquid-based nanotechnology consumer products), within the next five years“ (Maynard et al. 2006).

Ad 4

Die Freisetzung von synthetischen Nanopartikeln in die Umwelt zum Zweck der Entgiftung von kontaminierten Böden und verschmutztem Grundwasser sollte bis auf weiteres verboten werden. Hierbei sind Punkt C und A des starken Vorsorgeprinzips ausschlaggebend: Eine solche Freisetzung, vor allem wenn es sich um grosse Mengen handelt, könnte Tieren, Pflanzen und ganzen Ökosystemen einen schweren Schaden zufügen. Deshalb gilt hier das Gebot, sich im Zweifel²¹ zu enthalten. Dies würde sich erst dann ändern, wenn der wissenschaftliche Nachweis erbracht werden kann, dass keine schwerwiegenden Schäden drohen²² bzw. dass sich diese verhindern lassen und dass sich das mit der Freisetzung angestrebte Ziel überhaupt erreichen lässt.²³

Synthetische Nanopartikel könnten auch in die Umwelt gelangen, indem sie beispielsweise aus Kosmetika oder aus Kleidern ausgewaschen werden; oder indem sie in bestimmten Produkten wie etwa Waschmaschinen direkt als ungebundene Nanopartikel eingesetzt werden. Ein Beispiel, das in Amerika eine heftige Kontroverse ausgelöst hat, ist das Nanosilber (vgl. Weiss 2006). Die amerikanische Umweltbehörde EPA hat gegen Ende 2006 den Beschluss gefasst, dass Hersteller von Produkten, die (ungebundene) Nanosilberpartikel enthalten, den wissenschaftlichen Nachweis erbringen müssen, dass diese Partikel weder für den Menschen noch, vor allem, für die Umwelt ein Risiko darstellen. Diese Regelung betrifft eine ganze Reihe von Produkten, die von Lufterfrischern über Plastikbehälter zur Lagerung von Lebensmitteln bis zu speziellen Schuheinlagen reichen. Insbesondere im Auge hat die EPA aber eine Waschmaschine von Samsung, in der ungebundene Silbernanopartikel dazu verwendet werden, die Wäsche ohne Verwendung von heissem Wasser und ohne Bleichmittel keimfrei(er) zu machen. Die in diesen Produkten verwendeten Nanosilberpartikel haben eine antimikrobielle Wirkung.²⁴ Sie sind in der Lage, Bakterien und Keime zu vernichten. Gelangen sie – als ungebundene Partikel – in die Umwelt, besteht die Gefahr, dass sie nützliche Bakterien und Wasserorganismen vernichten. Produkte, die mit dem Anspruch auftreten, Keime abtöten zu können und ihn durch die Anwendung von Nanosilber begründen, werden von der EPA als Pestizide, als Produkte mit schädlingsbekämpfenden Komponenten und daher als zulassungspflichtig betrachtet.

Dies ist, so weit ersichtlich, das erste Mal, dass eine Behörde das starke Vorsorgeprinzip, insbesondere Punkt A, nämlich die Beweislastumkehr, auf ein synthetisches Nanopartikel angewendet hat. Ist die Umkehr der Beweislast in diesem Fall wirklich gerechtfertigt? Die Antwort lautet ja. Sollten grosse Mengen an freien Nanosilberpartikeln in die Umwelt gelangen, droht die Gefahr, dass diese Partikel nützliche Bakterien und Wasserlebewesen töten und damit einen erheblichen Schaden anrichten. Wohlverstanden: Hierbei handelt es sich um eine Vermutung, keine wissenschaftlich begründete Gewissheit. Aber diese Vermutung ist nicht rein hypothetisch. Vielmehr hat sie eine empirische Basis: das Wissen

²¹ „Im Zweifel“ ist wichtig, weil wir nicht wissen, ob dieser schwere Schaden tatsächlich eintreten würde. Es gibt nur einige Indizien, dass dies geschehen könnte, wobei die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit in diesem Fall besonders schwierig, weil unsicher ist. Die These ist, dass diese Indizien ausreichen, um ein vorläufiges Verbot zu rechtfertigen

²² Das heisst, dass die Wahrscheinlichkeit eines solchen Schadens so klein ist, dass das Risiko – das Produkt aus Wahrscheinlichkeit und Schaden bzw. Schadensausmass – als akzeptabel betrachtet werden kann.

²³ In der ganzen Diskussion spielt Punkt B des starken Vorsorgeprinzips keine Rolle. Alle sind sich einig, dass Schadensausmass und Eintrittswahrscheinlichkeit auch mit Blick auf die Auswirkung von Nanopartikeln auf Ökosysteme wissenschaftlich bestimmt werden können, selbst wenn dies gegenwärtig noch nicht möglich ist.

²⁴ Dass Silber eine antiseptische Wirkung hat, ist schon seit Tausenden von Jahren bekannt. Diese Wirkung wird durch das Nanosilber noch verstärkt. Nanoskaliges Silber spielt aufgrund seiner antibakteriellen Eigenschaften vor allem zum Zweck der Verhinderung von Infektionen eine immer grössere Rolle, etwa im Bereich der Wundbehandlung, aber auch im Bereich Spitalhygiene (nanosilberbeschichtete chirurgische Instrumente und Katheter).

um die antibakterielle Wirkung von Silber. Daher ist hier die Forderung nach einer Beweislastumkehr gerechtfertigt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich aus ethischer Sicht eine international möglichst einheitliche Regulierung des Umgangs mit synthetischen Nanopartikeln aufdrängt. Diese sollte sich am Vorsorgeprinzip orientieren. Das würde zweierlei zur Folge haben: Erstens eine Intensivierung vor allem der Risiko-Forschung unter Berücksichtigung der erforderlichen Sicherheitsmassnahmen. Zweitens aber wohl auch eine Verlangsamung der Entwicklung und Vermarktung von neuen kommerziellen Produkten, die synthetische Nanopartikel in ungebundener Form enthalten. Das bedeutet nicht, dass die Nanotechnologie gegenüber anderen Technologien auf unzulässige Weise benachteiligt wird. Vielmehr geht es darum, auf die Risiken dieser Technologie angemessen zu reagieren. Dabei ist entscheidend: Wenn es vernünftige Gründe gibt anzunehmen, dass synthetische Nanopartikel unter bestimmten Bedingungen Mensch und Umwelt schwerwiegend schädigen können, dann ist es gerechtfertigt, die Beweislast umzukehren und von den Herstellern den Nachweis zu verlangen, dass die in ihren Produkten verwendeten (freien) Nanopartikel ungefährlich sind.

Literatur

- Bachmann Andreas, David Badri, Esther Brunner, Reto Cueni, Alessandro Danieli, Patrick P. Eberhard, Gerald Hess, Laurent Lerf, Benjamin Rath, Klaus Peter Rippe, Bernhard Rom, Tamara Rügger, Nora Schmid, Thomas Schmidt, Annette Schulz-Baldes, Dominik Tasnady, Ariane Willemsen (2006), „Elemente der Risikoethik“, http://www.ethikdiskurs.ch/umweltethik/Elemente_Risikoethikpdf.pdf.
- Boeing, Niels (2005), „Unsichtbare Gefahr“, in: *Technology Review* 11, November 2005, S. 32-42.
- Borm, Paul JA, David Robbins, Stephan Haubold, Thomas Kuhlbusch, Heinz Fissan, Ken Donaldson, Roel Schins, Vicki Stone, Wolfgang Kreyling, Jürgen Lademann, Jean Krutmann, David Wahrheit, Eva Oberdörster (2006), The Potential Risks of Nanomaterials: a Review carried out for ECETOC, <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/3/1/11>.
- Bottini, Massimo, Shane Bruckner, Konstantina Nika, Nunzio Bottini, Stefano Bellucci, Andrea Magrini, Antonio Bergamaschi, Tomas Mustelin (2006), „Multi-walled carbon nanotubes induce T lymphocyte apoptosis“, in: *Toxicology Letters* 160, S. 121-126.
- Brune, H., H. Ernst, A. Grunwald, W. Grünwald, H. Hofmann, H. Krug, P. Janich, M. Mayor, W. Rathgeber, G. Schmid, U. Simon, V. Vogel, D. Wyrwa (2006), *Nanotechnology. Assessment and Perspectives*, Berlin/Heidelberg.
- Brunner, Tobias J., Peter Wick, Pius Manser, Philipp Spohn, Robert N. Grass, Ludwig K. Limbach, Arie Bruinink, Wendelin J. Stark (2006), „In Vitro Cytotoxicity of Oxide Nanoparticles: Comparison to Asbestos, Silica, and the Effect of Particle Solubility“, in: *Environmental Science & Technology* 40/14, S. 4374-4381.
- Chen, Zhen, Huan Meng, Genmei Xing, Chunying Chen, Yuliang Zhao, Guang Jia, Tiancheng Wang, Hui Yuan, Chang Ye, Feng Zhao, Zhifang Chai, Chuanfeng Zhu, Xiaohong Fang, Baocheng Ma, LijunWan (2006), „Acute toxicological effects of copper nanoparticles in vivo“, in: *Toxicology Letters* 163, S. 109-120.
- EMPA-News 2/2006, <http://www.empa.ch/plugin/template/empa/1030/48763/---/l=1>.
- Hansson, Sven Ove (2007), „Risk“, in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/risk/>.
- Limbach, Ludwig K., Peter Wick, Pius Manser, Robert N. Grass, Arie Bruinink, Wendelin J. Stark (2007), „Exposure of Engineered Nanoparticles to Human Lung Epithelial Cells:

- Influence of Chemical Composition and Catalytic Activity on Oxidative Stress”, in: *Environmental Science & Technology* 41/11, S. 4158-4163.
- Locatelli, Sandrine, Carole Nicollet, Jean Charles Guibert, Manuela Denis (2005), „Potential Risks of Nanotechnologies“, Part 3 of the 4th Nanoforum Report, www.nanoforum.org.
- Long, Thomas C., Navid Saleh, Robert T. Tilton, Gregory V. Lowry, Bellina Veronesi (2006) “Titanium Dioxide (P25) Produces Reactive Oxygen Species in Immortalized Brain Microglia (BV2): Implications for Nanoparticle Neurotoxicity”, in: *Environmental Science & Technology* 40/14, S. 4346-4352.
- Maynard, Andrew D., Robert J. Aitken, Tilman Butz, Vicki Colvin, Ken Donaldson, Günter Oberdörster, Martin A. Philbert, John Ryan, Anthony Seaton, Vicki Stone, Sally S. Tinkle, Lang Tran, Nigel J. Walker, David B. Wahrheit (2006), “Safe handling of nanotechnology”, in: *Nature* 444, S. 267-269.
- Oberdörster, Günter, Eva Oberdörster, Jan Oberdörster (2005), “Nanotechnology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles”, in: *Environmental Health Perspectives* 113/7, S.823-839.
- Oberdörster, Eva (2004), “Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass”, in: *Environ. Health Perspect.* 102, S.1058-1062.
- Renn, Ortwin, Mike Roco (2006), White Paper on Nanotechnology Risk Governance, http://www.irgc.org/irgc/_b/contentFiles/IRGC_white_paper_2_PDF_final_version.pdf.
- Rippe, Klaus Peter (2002), „Vorsorge als umweltethisches Leitprinzip“, <http://www.ethikdiskurs.ch/umweltethik/Vorsorgeprinzip.pdf>.
- Rippe, Klaus Peter (2006) “Ein Vorrang der schlechten Prognose? Zu den ethischen Grundlagen des Vorsorgeprinzips“, in: *Neue Zürcher Zeitung*, 30. Dezember 2006.
- Sandin, Per (2007), „Common-Sense Precaution and Varieties of the Precautionary Principle“, in: Tim Lewens (ed.), *Risk. Philosophical Perspectives*, London/New York, S. 99-112.
- Schulte, Paul A., Fabio Salamanca-Buentello (2007), “Ethical and Scientific Issues of Nanotechnology in the Workplace”, in: *Environmental Health Perspectives* 115/1, S. 5-12 (zugänglich auf dem Internet unter <http://www.ehponline.org/members/2006/9456/9456.pdf>).
- Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks SCENIHR (2007), „Opinion on the Appropriateness of the Risk Assessment Methodology in accordance with the technical Guidance Documents for new and existing Substances for assessing the Risks of Nanomaterials“, http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_004c.pdf.
- Shelley, Toby (2006), *Nanotechnology. New promises, new dangers*, London, New York.
- Sunstein, Cass R. (2007), *Gesetze der Angst. Jenseits des Vorsorgeprinzips*, FfM.
- Suva (2006), “Nanopartikel an Arbeitsplätzen”, http://www.suva.ch/nanopartikel_an_arbeitsplaetzen.pdf.
- Swiss Re (2004), *Nanotechnologie. Kleine Teile – grosse Zukunft?* <http://www.swissre.com>
- Tiefenauer, Louis (2007), “Magnetic Nanoparticles as Contrast Agents for Medical Diagnosis”, in: Tuan Vo-Dinh (ed.), *Nanotechnology in biology and medicine: methods, devices, and applications*, Boca Raton, FL.
- Weiss, Rick (2006), „EPA to regulate Nanoproducts sold as germ-killing“, in: *The Washington Post*, 23. November 2006.
- Yang, Ling, Daniel J. Watts (2005), “Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles“, in: *Toxicology Letters* 158, S. 122-132.