

# Umwelt- und Gesundheitsrisiken nanotechnologischer Applikationen

**Student Paper**

**Author(s):**

Peter, Philippe

**Publication date:**

2005

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005044667>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

# **Umwelt- und Gesundheitsrisiken nanotechnologischer Applikationen**

Philippe Peter

Semesterarbeit

Betreuer: PD Dr. Michael Siegrist und Dr. Arnim Wiek

September 2005

Anschrift:

ETH-NSSI  
Universitätsstrasse 22  
ETH-Zentrum CHN  
8092 Zürich

# Vorwort

Ich bedanke mich ganz herzlich bei PD Dr. Michael Siegrist und Dr. Arnim Wiek vom Institut für Mensch-Umwelt-Systeme, welche die Semesterarbeit ermöglicht und betreut haben.

Mein Dank gilt weiter den Experten Dr. Annabelle Hett und Dr. Thomas Epprecht (Swiss Re) sowie Åsgeir Helland (EMPA). Ihre Unterstützung hat diese Arbeit substantiell bereichert.

Ferner danke ich Andreas Köhler (EMPA) und Timo Smieszek für ihre wertvollen Hinweise.

Nicht verschweigen möchte ich ein kleines Gefühl der Unbefriedigung, da viele Aspekte im Rahmen dieser Semesterarbeit lediglich angedeutet werden konnten. In diesem Sinne hoffe ich, dass die Lektüre auch beim Leser Lust auf mehr weckt!

P.P.



*„The lack of technical data on the topic  
provides fertile ground for both  
nanotechnology proponents and skeptics alike  
to make contradictory and sweeping conclusions  
about the safety of engineered nanoparticles.“*

Vicki L. Colvin, Rice University<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Colvin (2003), p. 1166.



# Inhaltsübersicht

|   |     |
|---|-----|
| Zusammenfassung .....   | VII |
| 1. Einleitung .....   | 1   |
| 1.1 Hintergrund .....   | 1   |
| 1.2 Fragestellung .....   | 2   |
| 1.3 Methodik .....  | 2   |
| 1.4 Übersicht .....   | 3   |
| 2. Grundlagen der Nanotechnologie.....                                | 5   |
| 2.1 Begriffsklärung.....  | 5   |
| 2.2 Charakteristische Effekte im Nanometer-Bereich.....               | 6   |
| 2.3 Herstellung von Nanostrukturen .....                              | 6   |
| 2.4 Interdisziplinarität .....  | 7   |
| 3. Allgemeine Risiken der Nanotechnologie.....                        | 9   |
| 3.1 Schwache Datengrundlage .....                                     | 9   |
| 3.2 Gesundheitsrisiken .....  | 10  |
| 3.3 Umweltrisiken .....   | 15  |
| 4. Gesundheits- und Umweltrisiken von Applikationen .....             | 19  |
| 4.1 Vorgehen .....  | 19  |
| 4.2 Gesundheits- und Umweltrisiken einzelner Applikationsfelder ..... | 23  |
| 5. Diskussion .....   | 43  |
| 5.1 Erkenntnisse .....  | 43  |
| 5.2 Kritische Würdigung der zitierten Literatur.....                  | 44  |
| 5.3 Grenzen der Untersuchungsmethode .....                            | 44  |
| 6. Konklusion und Ausblick.....                                       | 47  |
| Bibliographie.....  | 49  |
| Abkürzungen .....   | 59  |
| Glossar.....  | 60  |
| Appendix: Experteninterviews .....                                    | 65  |
| A.1 Dr. Annabelle Hett und Dr. Thomas Epprecht.....                   | 65  |
| A.2 Åsgeir Helland.....   | 70  |



# Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

## Abbildungen

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Struktur eines C <sub>60</sub> -Fullerens.....                     | 7  |
| Abbildung 2: Struktur einer Nanoröhre. ....                                     | 7  |
| Abbildung 3: Resorption von TiO <sub>2</sub> -Nanopartikeln über die Haut ..... | 12 |
| Abbildung 4: Applikationsfelder.....  | 19 |

## Tabellen

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Zusammenfassung der Aufnahmerouten.....                          | 13 |
| Tabelle 2: Mögliche Auswirkungen von Asbest und ultrafeinen Partikeln. .... | 14 |
| Tabelle 3: Kategorien des Entwicklungsstandes.....                          | 20 |
| Tabelle 4: Art der Referenz.....  | 21 |
| Tabelle 5: Klassifikation der Information. ....                             | 22 |
| Tabelle 6: Beschichtungen (Teil 1).....                                     | 23 |
| Tabelle 7: Beschichtungen (Teil 2).....                                     | 24 |
| Tabelle 8: Beschichtungen (Teil 3).....                                     | 25 |
| Tabelle 9: Katalyse (Teil 1).....   | 26 |
| Tabelle 10: Katalyse (Teil 2).....  | 27 |
| Tabelle 11: Energietechnik (Teil 1).....                                    | 28 |
| Tabelle 12: Energietechnik (Teil 2).....                                    | 29 |
| Tabelle 13: Energietechnik (Teil 3).....                                    | 30 |
| Tabelle 14: Konstruktionsbereich (Teil 1).....                              | 31 |
| Tabelle 15: Konstruktionsbereich (Teil 2).....                              | 32 |
| Tabelle 16: Sensoren und Aktuatoren.....                                    | 33 |
| Tabelle 17: Informationstechnologien (Teil 1).....                          | 34 |
| Tabelle 18: Informationstechnologien (Teil 2).....                          | 35 |
| Tabelle 19: Informationstechnologien (Teil 3).....                          | 36 |
| Tabelle 20: Medizinische Applikationen (Teil 1).....                        | 37 |
| Tabelle 21: Medizinische Applikationen (Teil 2).....                        | 38 |
| Tabelle 22: Kosmetik.....   | 39 |
| Tabelle 23: Lebensmittel.....   | 40 |
| Tabelle 24: Rüstungsindustrie (Teil 1).....                                 | 41 |
| Tabelle 25: Rüstungsindustrie (Teil 2).....                                 | 42 |

## Zusammenfassung

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Nanotechnologie thematisiert die Fallstudie 2005 des ETH-Departements Umweltwissenschaften deren Chancen und Risiken. Mit der vorliegenden Semesterarbeit soll vorbereitend untersucht werden, in welchen Applikationsfeldern der Nanotechnologie bereits eine vertiefte Auseinandersetzung mit möglichen Risiken für Mensch und Umwelt stattfindet.

Zu diesem Zweck wird einleitend der aktuelle Stand der Diskussion bezüglich *grundlegender* Gesundheits- und Umweltrisiken studiert. Anschliessend wird das breite Feld der Nanotechnologie in Applikationsbereiche gegliedert, für welche anhand eines Indikatorproduktes neben Nutzen und Entwicklungsstand das *spezifische* Gefährdungspotential aufgezeigt wird. Die Resultate der entsprechenden Literaturrecherche sind durch zwei Experteninterviews mit Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft gestützt und ergänzt.

Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass generelle Gesundheits- und Umweltfolgen wie Akkumulationseffekte, Allergien, Schadstoffmobilisierung oder Biokonzentration durchaus diskutiert werden. Es gibt gegenwärtig jedoch nur vereinzelt Untersuchungen, welche sich mit Gesundheits- und insbesondere Umweltrisiken im *unmittelbaren* Kontext einzelner Applikationen befassen. So stehen im Fokus der aufkommenden Risikoforschung primär Auswirkungen häufiger Strukturkomponenten. Diese werden derzeit jedoch kaum systematisch mit den entsprechenden Expositionen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes assoziiert. Spezifischere Studien sind lediglich im medizinischen und kosmetischen Bereich festzustellen.

Angesichts der zunehmenden Verbreitung nanotechnologischer Applikationen und deren Verschiedenartigkeit wird die Notwendigkeit eines strukturierten Forschungsansatzes skizziert, welcher ein differenziertes, sinnvoll priorisiertes Vorgehen in der Abklärung möglicher Risiken darstellen könnte.



# 1. Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Nicht erst jüngst erweisen „nanotechnologische Produkte“ ihren Dienst: Während bereits die alten Ägypter aus 20 nm grossen Russpartikeln Tinte anfertigten, wurde im Spätmittelalter Rubinglas aus pulverförmigem Goldpurpur hergestellt. In den 1920er-Jahren versetzten Autohersteller Reifen mit amorphem Kohlenstoff und konnten so infolge reduzierten Abriebs deren Lebensdauer signifikant erhöhen. In allen drei Fällen wusste man seinerzeit jedoch nicht, dass das veränderte Materialverhalten speziellen, nanoskaligen Partikeln zu verdanken war (Niederberger, 2004; Reller, 2005)<sup>2</sup>.

Seit Mitte der 90er-Jahre ist die bewusste Manipulation und Nutzbarmachung solcher Effekte möglich und sorgt seitdem für eine technische Revolution. Es ist die Rede von schier unbegrenzten Möglichkeiten, welche zahlreiche Probleme der Gegenwart lösen könnten: Individuell angepasste Arzneimittel, selbstreinigende Oberflächen, effizientere Nutzung erneuerbarer Energiequellen und verbesserte Katalysatoren sind lediglich einige Beispiele für ausgelöste - und teils bereits erfüllte - Erwartungen. Aufgrund ihres gewaltigen Potentials, tief greifende Veränderungen in diversen Industriezweigen auszulösen, wird die Nanotechnologie als neue Schlüsseltechnologie betrachtet: „Die Auswirkungen der Nanotechnologie auf Gesundheit, Wohlstand und Lebensqualität werden mindestens so gross sein wie die der Mikroelektronik, der medizinischen Imaging-Technologie, der computerunterstützten Bautechnik und künstlicher Polymere zusammengenommen.“ (Richard E. Smalley, Nobelpreis für Chemie 1996)<sup>3</sup>. Diese Einschätzung zeigt sich in der gegenwärtigen Forschungs- und Entwicklungswelle. Auch soll die Nanotechnologie bereits heute einen Weltmarkt von 100 Milliarden Euro beeinflussen (Luther *et al.*, 2005).

Während die Chancen der Nanotechnologie enthusiastisch diskutiert werden, steht der Dialog um denkbare Risiken erst am Anfang. Vergleichbar mit der Etablierung anderer neuer Technologien wie der Nuklear- und Gentechnik dominieren dabei derzeit polarisierende „Horror-szenarien“ der fernen Zukunft die zunehmende öffentliche Wahrnehmung (Paschen *et al.*, 2004). Bereits existierende oder kurz vor der Markteinführung stehende Applikationen geniessen in der Diskussion jedoch wenig Aufmerksamkeit. So werden farblose Sonnenschutzmittel und eine Reihe weiterer Nanoprodukte seit Jahren sorglos im Alltag angewandt.

Die Nanotechnologen scheinen aus dem Schicksal der Gentechnik zumindest teilweise gelernt zu haben: Man bemüht sich bereits in den ersten Stunden des Risikodiskurses um eine ausgewogene gesellschaftliche Debatte (Brumfield, 2003; Hett & Schraft, 2005; Hofmann, 2005). Auch die Fallstudie 2005 des ETH-Departements Umweltwissenschaften thematisiert in diesem Kontext Chancen und Risiken der Nanotechnologie. Die vorliegende, vorbereitende Semesterarbeit soll eine Gesamtsicht über mögliche Umwelt- und Gesundheitsrisiken einzelner Applikationen schaffen.

---

<sup>2</sup> Weitere „historische“ Anwendungen von Nanopartikeln sind dem Artikel „*Kleine Teilchen ganz gross*“ (2002) zu entnehmen.

<sup>3</sup> Aus: Credit Suisse (2005), p. 10.

## 1.2 Fragestellung

Wie einleitend dargelegt, stehen derzeit noch immer die nahezu unbegrenzten Möglichkeiten der neuartigen Technologie im Fokus von Politik und Wissenschaft. Die gegenwärtige Diskussion um mögliche Gefährdungen hingegen beschränkt sich mangels Daten auf allgemeine Risiken. Angesichts der nanotechnologischen Vielfalt<sup>4</sup> ist es jedoch nahe liegend, dass Risiken und Nutzen nicht gesamthaft beurteilt werden können: Jedes Anwendungsfeld zieht andere Konsequenzen für Mensch und Umwelt nach sich, sodass einzelne Technologiezweige gesondert evaluiert werden müssen. Diese Arbeit soll die derzeitige Diskussion um generell mögliche Auswirkungen durch eine Untersuchung spezifischer Umwelt- und Gesundheitsrisiken einzelner Applikationen erweitern. Zu diesem Zweck wurde folgende Fragestellung untersucht:

**In welchen Anwendungsfeldern der Nanotechnologie findet - über die Diskussion allgemeiner Gefährdungen hinaus - bereits eine vertiefte, spezifische Auseinandersetzung mit den Risiken für Mensch und Umwelt statt?**

Im Mittelpunkt der Analyse stehen bislang thematisierte Umwelt- und Gesundheitsaspekte über den gesamten Lebenszyklus einzelner nanotechnologischer Applikationen. Neben ökologischen und gesundheitlichen Gesichtspunkten gibt es jedoch auch gesellschaftliche Risiken: Einerseits ist gegenwärtig das tatsächliche wirtschaftliche Potential der neuen Technologien kaum abzuschätzen, auf der anderen Seite orte Kritiker erhebliche ethische Gefahren. So besteht die Befürchtung, der Graben zur Dritten Welt würde sich weiter öffnen. Ferner stellt sich im Vakuum mangelnder rechtlicher Bestimmungen auch die Frage nach Kontroll- und Sicherheitsaspekten.

Der Einbezug ökonomischer und ethischer Risiken einzelner Applikationen würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Für eine ausführliche Diskussion sei an dieser Stelle deshalb auf das Werk von Roco und Bainbridge „*Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*“ sowie von Dunkley „*Nanotechnology: Social Consequences and Future Implications*“ verwiesen (Dunkley, 2004; Roco & Bainbridge, 2001).

## 1.3 Methodik

Kernstück der Arbeit ist ein tabellarischer Überblick über den (potentiellen) Nutzen, Entwicklungsstand sowie die entsprechenden Risiken nanotechnologischer Applikationen. Zu diesem Zweck wird der weite Technologiebereich in Applikationsfelder eingeteilt, welche wiederum Übergruppen zugeordnet werden. Für jedes Applikationsfeld wird ein möglichst repräsentatives Indikatorprodukt definiert und der entsprechende Nutzen, der Entwicklungsstand sowie speziell die Gesundheits- und Umweltrisiken evaluiert.

### 1.3.1 Literaturstudie

Zur Untersuchung der genannten Aspekte wird eine ausführliche Literaturstudie mit webSPIRS (Fachzeitschriften), NEBIS (Bücher), LexisNexis (Tageszeitungen) und Google (Präsentationen, Konferenzberichte, Online-Presse, Produktbeschreibungen) durchgeführt. Die vielfältige Literatur unterschiedlicher Qualitäten wird nach festgelegtem Muster klassifiziert und kritisch zusammengefasst. Gesamthaft werden 162 Quellen ausgewertet; 60 Prozent der zitierten Literaturnachweise entfallen auf Artikel aus Fachzeitschriften<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Vgl. Abschnitt 2.1.1 „Nanotechnologie – ein Sammelbegriff“, p. 5.

<sup>5</sup> Für eine eingehende kritische Würdigung der Literatur sei an dieser Stelle auf den Abschnitt 5.2 verwiesen.

### **1.3.2 Expertenbefragung**

Zwecks Überprüfung und Erweiterung der Literaturstudie werden überdies ausgewählte Experten beigezogen. Das bei den Experteninterviews angewandte methodische Vorgehen orientiert sich dabei weitgehend an Mie $\ddot{g}$  & Brunner (2001): Im Hinblick auf die zentrale Forschungsfrage werden vier Hypothesen formuliert, welche durch ein leitfadengestütztes Interview überprüft und ausgewertet werden.

Literaturstudie und Experteneinschätzungen werden in einer abschliessenden Diskussion zusammengeführt und entsprechende Konklusionen abgeleitet.

## **1.4 Übersicht**

### **1. Einleitung**

Dieser Abschnitt dient der Einführung in die Thematik sowie der Festlegung und Begründung der Forschungsfrage. Weiter wird dargelegt, welche Schwerpunkte gesetzt werden und welche Methodik zur Anwendung kommt.

### **2. Grundlagen der Nanotechnologie**

In einem ersten Schritt wird der Begriff der Nanotechnologie definiert. Ferner werden charakteristische Phänomene im Nanometerbereich und mögliche Herstellungsstrategien aufgezeigt sowie die Interdisziplinarität des Technologiefeldes hervorgehoben.

### **3. Allgemeine Risiken der Nanotechnologie**

In Kapitel 3 wird einleitend die Problematik der Datengrundlage dargelegt. Weiter werden unspezifische Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanopartikeln aufgezeigt. Demzufolge stehen in diesem Abschnitt allgemeine Risiken im Vordergrund, welche alleine aus grundlegenden Eigenschaften wie der Grösse der Partikel resultieren.

### **4. Gesundheits- und Umweltrisiken von Applikationen**

Effekte, welche mit speziellen Anwendungen sowie charakteristischen Eigenschaften bestimmter Nanopartikel zusammenhängen, bilden den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit und werden applikationsbezogen gemeinsam mit Nutzen und Entwicklungsstand im vierten Kapitel erläutert.

### **5. Diskussion**

In diesem Abschnitt werden die Resultate der Literaturrecherche und Expertenbefragungen kritisch ausgewertet. Ferner wird die Arbeit selbst kritisch diskutiert.

### **6. Konklusion und Ausblick**

Schliesslich werden Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick auf den künftigen Umgang mit Gesundheits- und Umweltrisiken der Nanotechnologie gegeben.



## 2. Grundlagen der Nanotechnologie

Die kurze Einführung ins wissenschaftliche Umfeld der Nanotechnologie dient in erster Linie der Einbettung der Arbeit sowie dem besseren Verständnis der nachfolgenden Kapitel<sup>6</sup>.

### 2.1 Begriffsklärung

#### 2.1.1 Nanotechnologie – ein Sammelbegriff

Eine allgemeingültige Definition des Begriffes „Nanotechnologie“ (engl. *nanotechnology*) existiert gegenwärtig nicht. Den Begriffsverwendungen gemeinsam ist lediglich, dass damit jeweils Techniken umschrieben werden, die im Nanometer-Bereich operieren<sup>7</sup>. Folglich steht die Bezeichnung nicht für eine konkrete Technologie, sondern ist letztlich ein Sammelbegriff für ein heterogenes Feld unterschiedlichster Techniken und deren Applikationen. Die Weitläufigkeit des Begriffes „Nanotechnologie“ legt nahe, dass richtigerweise von diversen Nanotechnologien die Rede sein sollte, wie dies unter anderem von der Royal Society propagiert wird<sup>8</sup>.

Die Aufweitung des Begriffes wird durch eine Reihe aktueller Tendenzen weiter begünstigt: Einerseits ist der Begriff gegenwärtig zur Akquirierung von Forschungsgeldern geeignet. Andererseits besteht ein Bestreben seitens der Unternehmen, einen Bezug zur progressiven Technologie herzustellen. Beides hat zur Folge, dass auch längst Bekanntes unter neuem Begriff erscheint (Soentgen, 2005).

#### 2.1.2 Festlegung des Begriffes

Zur klaren Abgrenzung des weiten Gebietes findet in der vorliegenden Arbeit die Definition aus Paschen *et al.* Anwendung:

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

(Paschen *et al.*, 2004, p. 29)

Die Nanotechnologie befasst sich stets mit nanoskaligen Strukturen wie Nanopartikeln, -röhren, -schichten oder -poren. Die Grössenbegrenzung von 100 nm scheint dabei Konsens der gängigen Begriffsdefinitionen zu sein (1.). Die Festlegung der Dimension alleine reicht jedoch nicht aus; die Nanotechnologie beschäftigt sich insbesondere mit der bewussten Nutzung der grössenbedingt neu auftretenden Effekte (2.). Schliesslich soll eine klare Abgren-

---

<sup>6</sup> Für eine ausführliche Zusammenstellung der Grundlagen der Nanotechnologie sei an dieser Stelle auf umfassendere Untersuchungen wie beispielsweise „*Nanotechnology: Forschung, Entwicklung, Anwendung*“ (Paschen *et al.*, 2004) und „*Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*“ (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004) verwiesen.

<sup>7</sup> Ein Nanometer (altgr. *nannos*: „Zwerg“) entspricht  $10^{-9}$  Metern, was der Elektronenhülle einiger Atome gleichkommt.

<sup>8</sup> The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004), p. 5.



zung zwischen Nano- und Biotechnologie vorgenommen werden, indem die Nutzung natürlicher Vorgänge im Nanometer-Bereich<sup>9</sup> explizit ausgeschlossen wird (3.).

Auch wenn die dargelegte Definition dem etablierten Begriffsgebrauch entspricht, wird die Bezeichnung „Nanotechnologie“ in Literatur und Alltagssprache häufig auch in einem weiteren Sinne verwendet.

## **2.2 Charakteristische Effekte im Nanometer-Bereich**

Nanotechnologie wird, wie erwähnt, als neue Schlüsseltechnologie der kommenden Generationen gehandelt. Einige wenige Ausführungen zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen scheinen daher angezeigt, um dieses gewaltige Potential begreifbarer zu machen. Diese erlauben schliesslich auch, Erkenntnisse und Vermutungen über die in Kapitel 3 und 4 dargelegten negativen Effekte nachzuvollziehen.

### **2.2.1 Grenz- und Oberflächenphänomene**

Durch die fortschreitende Verkleinerung von Material nimmt die Bedeutung von Volumen gegenüber Oberflächeneigenschaften ab. Damit verliert die Grundmaterie zunehmend ihre charakteristischen Festkörpereigenheiten; die Bindungseigenschaften der entsprechenden Atome treten in den Vordergrund. Dementsprechend steigt die Reaktivität der Partikel, was neue Möglichkeiten erschliesst, aber auch neuartige Risiken birgt.

### **2.2.2 Quantenmechanische Effekte**

Beim Übergang in den nanoskaligen Bereich ändern die Eigenschaften der Materie unstetig; quantenmechanische Effekte, wie beispielsweise der prominente Tunneleffekt<sup>10</sup>, verdrängen die Gesetze der klassischen Physik. Es treten optische, magnetische und elektrische Phänomene auf, die bei makroskopischen Bruchstücken derselben Grundmaterie nicht vorkommen.

### **2.2.3 Resultierendes Potential**

Durch diese neuartigen Effekte können Eigenschaften nanotechnologischer Produkte gezielt gesteuert werden. So können nanostrukturierte Festkörper mit erhöhter Härte und Bruchfestigkeit fabriziert, magnetische Funktionalitäten spezifisch manipuliert oder aus klassischen Isolatormaterialien elektrische Leiter hergestellt werden. Das mit der Beeinflussung der Stoffeigenschaften verbundene Nutzenpotential scheint nahezu unerschöpflich. Es wird hierbei allerdings von sehr unterschiedlichen Zeithorizonten ausgegangen; für einen Grossteil viel versprechender Anwendungen sind noch zahlreiche technische Hürden zu überwinden.

## **2.3 Herstellung von Nanostrukturen**

### **2.3.1 Bedeutsame Instrumentenentwicklung**

Natürliche Partikel in der Grössenordnung weniger Nanometer existierten bereits lange bevor die nanotechnologische Entwicklung eingesetzt hatte. So entstehen bei Verbrennungsprozessen beispielsweise Fullerene. Solche Strukturen sind der direkten wissenschaftlichen Beschreibung jedoch erst seit der Erfindung der Rastertunnelmikroskopie (STM) 1981 und der Rasterkraftmikroskopie (AFM) 1986 zugänglich. Dabei nützt erstere den erwähnten quantenmechanischen Tunneleffekt mittels Rastersondenspitze aus. Durch Messung des abstandsabhängigen Tunnelstromes kann die (atomare) Topologie der analysierten Oberfläche wieder-

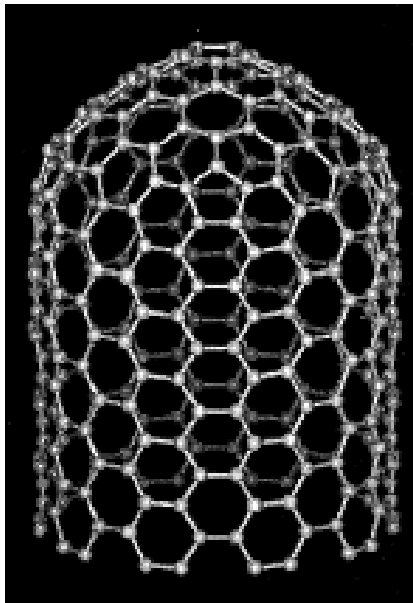
---

<sup>9</sup> Z.B. Enzymproduktion mittels Mikroorganismen.

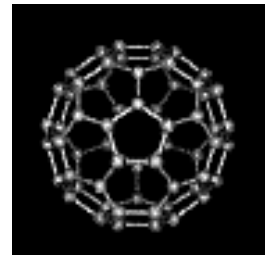
<sup>10</sup> Vgl. Glossar, p. 60.

gegeben werden. Die AFM hingegen misst die Ablenkung eines Biegebalkens infolge Wechselwirkungen mit der Oberfläche.

Eine Weiterentwicklung dieser Rastersondenverfahren und Verbesserungen im Bereich der Reinraumtechniken erlaubten schliesslich, in den frühen 90er-Jahren neben der unmittelbaren Beobachtung auch die direkte Konstruktion und Manipulation nanometrischer Strukturen vorzunehmen. Damit waren die Grundvoraussetzungen für die Entwicklung nanotechnologischer Verfahren gegeben.



**Abbildung 1: Struktur eines C<sub>60</sub>-Fullerens (aus: Service, 1998). Fullerene werden zum Beispiel im Zusammenhang mit Schmiermitteln diskutiert.**



**Abbildung 2: Struktur einer einwandigen Nanoröhre (aus: Service, 1998). Nanoröhren können unter anderem als Halbleiter fungieren, Werkstoffe stabilisieren oder der Wasserstoffspeicherung dienen.**

### 2.3.2 Grundsätzliche Herstellungsstrategien

Eine Nennung sämtlicher heute angewandter Verfahren würde den Rahmen der Arbeit sprengen. Es lassen sich jedoch verschiedene, prinzipielle Möglichkeiten zum Vordringen in den Nanometer-Bereich unterscheiden: Beim so genannten „Top-down-Ansatz“ werden grössere Strukturen physikalisch immer weiter verkleinert. Dieser Vorgang ist sehr energieaufwändig und ressourcenintensiv. Weiter sind heute der Minimalgrösse der Strukturen Grenzen gesetzt. Beim „Bottom-up-Ansatz“ hingegen werden Strukturen aus Atomen und Molekülen systematisch aufgebaut. Diese chemisch-biologische Strategie spart Energie und führt zu weniger Abfall. Die industrielle Einsetzbarkeit ist derzeit jedoch teilweise noch eingeschränkt. Ferner wird intensiv an der so genannten „Selbstorganisation“ (engl. *self assembly*), wie sie bei natürlichen Vorgängen beobachtet wird, geforscht. Schliesslich werden die unterschiedlichen Strategien inzwischen teils zu leistungsfähigen Methoden kombiniert (Hett, 2004; The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004).

## 2.4 Interdisziplinarität

Im Übergang von der mikroskopischen in die nanoskalige Welt zeichnet sich eine Konvergenz ab: Die Grenzen zwischen den klassischen naturwissenschaftlichen Disziplinen werden undeutlich. Damit erfordert die Nanotechnologie zwangsläufig eine engere Kooperation von Physikern, Chemikern, Molekularbiologen und Medizinern. So wird beispielsweise Fachwissen der Molekularbiologen verwendet, um mit Chemikern zusammen biozide Beschichtungen unter Anwendung physikalischer Verfahren herzustellen. Nicht zuletzt in dieser unerlässli-

chen Zusammenarbeit scheint ein Grossteil des Potentials der nanotechnologischen Entwicklung zu gründen.

## 3. Allgemeine Risiken der Nanotechnologie

Nachfolgend werden Probleme der Datengrundlage dargelegt sowie generelle gesundheitliche und ökologische Risikopotentiale unspezifischer Nanopartikel aufgezeigt. Damit wird der gegenwärtige Kenntnisstand wiedergegeben und eine Basis für die Diskussion konkreter Applikationen im vierten Kapitel geschaffen.

Es sei betont, dass der Vielzahl nachfolgend beschriebener Gefahren stets auch bedeutende wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Chancen gegenüberstehen<sup>11</sup>.

### 3.1 Schwache Datengrundlage

#### 3.1.1 Grundproblematik

Ein Grossteil potentieller Nanoprodukte ist, wie erwähnt, noch weit vom Entwicklungsstand entfernt, an dem eine Betrachtung der Risiken sinnvoll oder überhaupt möglich ist. So ist es zum Beispiel schwierig, die Freisetzung von Partikeln durch Abrieb einer nanotechnologisch modifizierten Oberfläche zu beurteilen, wenn diese erst als grundlegendes Konzept existiert. Auch bei bereits auf dem Markt rege nachgefragten Nanoprodukten sind derzeit die Risiken kaum genügend erforscht<sup>12</sup>. Dies liegt in erster Linie am Umstand, dass es sich um eine junge Technologie mit neuartigen Produkten handelt, deren denkbare Auswirkungen<sup>13</sup> tendenziell lange Latenzzeiten vermuten lassen. Akute Effekte hingegen scheinen kaum zu dominieren, andernfalls würden sich diese bereits heute manifestieren.

#### 3.1.2 Regulative Defizite

Auch wenn länderspezifische Unterschiede im Umgang mit Nanorisiken zwischen den Behörden bestehen<sup>14</sup>, sieht die gegenwärtige Praxis trotz Unsicherheiten keine strikte Umsetzung des Vorsorgegedankens vor. So wurden für nanotechnologische Produkte bis zum jetzigen Zeitpunkt (Juni 2005) keine ergänzenden Regelungen erlassen<sup>15</sup>. Dementsprechend werden spezielle Eigenschaften von Nanoprodukten bei Zulassungsverfahren nicht berücksichtigt, das heisst, die Partikelgrösse spielt bei Produktregistrierungen keine Rolle (Brüske-Hohlfeld *et al.*, 2005). So sind zum Beispiel UV-abweisende Nanopartikel für die Amerikanischen Zulassungsbehörden (*Food and Drug Administration*, FDA) keine eigene Substanzklasse, sondern nur Bruchstücke bereits zugelassener Ausgangsmaterialien<sup>16</sup>. Ähnlich wird auch in der Europäischen Union verfahren: Titandioxyd wird vom *Scientific Committee on Cosmetic Products and Non-Food Products Intended for Consumers* (SCCNFP) unabhängig von der Partikelgrösse als „sicher“ eingestuft (Hett, 2004).

Da unter dem Begriff „Nanotechnologie“ diverse Techniken und Produkte subsumiert werden, müssen regulative Vorkehrungen sehr differenziert getroffen werden. Es wird daher von behördlicher Seite teils argumentiert, dass gesetzliche Leitlinien erst dann festgesetzt werden könnten, wenn das hierzu notwendige Wissen generiert wurde (Divis, 2004)<sup>17</sup>. Solange jedoch keine Anpassung der Zulassungsbestimmungen vorgenommen wird, entfallen auch die damit

---

<sup>11</sup> Eine Übersicht ist beispielsweise Luther *et al.* (2005) zu entnehmen.

<sup>12</sup> Vgl. unter anderem Arnall (2003), Helland (2004) und Hett & Herold (2005).

<sup>13</sup> Z.B. Bioakkumulation (Vgl. hierzu Abschnitt 3.3.1.4).

<sup>14</sup> Die amerikanischen Umweltschutzbehörden (Environmental Protection Agency, EPA) scheinen derzeit zusammen mit der entsprechenden Europäischen Fachbehörde in dieser Hinsicht führend zu sein (Hett, 2004).

<sup>15</sup> Gemäss persönlicher Rücksprache mit Åsgeir Helland am 15. Juni 2005.

<sup>16</sup> Vgl. Arnall, (2003), Ausman (2004), ETC Group (2003), Hett (2004) und Langenbach (2004).

<sup>17</sup> Vgl. auch Helland (2004), p. iii: „*The regulators are waiting for more scientific evidence.*“

verbundenen Untersuchungsbestrebungen. Deshalb dürfte die Zahl verfügbarer Studien kurzfristig kaum wesentlich steigen<sup>18</sup>.

### 3.1.3 Versicherungstechnische Schwierigkeiten

Nicht nur der Gesetzgeber steht vor ungelösten Problemen, auch Assekuranzen sind betroffen: So sorgt die mangelnde Datengrundlage für unklare Schadensbilder und verhindert heute fundierte Prämienabschätzungen. Davon betroffen sind primär die industrielle Produkte-Haftpflicht zur Deckung von Schäden an Mensch und Gut sowie möglicherweise die Umwelt-Haftpflicht bei Schäden durch den Produktionsprozess (Reim, 2005).

Obwohl sich bereits eine Vielzahl von Nanoprodukten auf dem Markt befindet, werden angesichts der mangelnden Kenntnis zu Langzeiteffekten und der Unbestimmtheit des nanotechnologischen Begriffes derzeit keine Versicherungsausschlüsse aufgrund der Nanotechnologie vorgenommen (Hett & Herold, 2005). Da die momentane Situation für Versicherer unberechenbar ist, finden in Assekuranzkreisen intensivste Auseinandersetzungen mit der Thematik statt. Annabelle Hett, Nanotechnologie-Expertin der Swiss Re, unterstreicht in Anbetracht der unübersichtlichen Datenlage denn auch<sup>19</sup>: „Im Hinblick auf die gegenwärtige Situation des unkoordinierten Testens und Erforschens möglicher Risiken sollte die internationale Zusammenarbeit gefördert werden. So sollten normierte Materialien mittels standardisierter Testabläufe überprüft und die entsprechenden Resultate in einer allgemein zugänglichen Datenbank abgelegt werden.“

## 3.2 Gesundheitsrisiken

In einem ersten Schritt werden die unterschiedlichen Resorptionswege und die Verteilung von Nanopartikeln im Körper aufgezeigt. Anschliessend sollen mögliche Wirkungsmuster sowie Abbau und Ausscheidung der Partikel erläutert werden.

### 3.2.1 Resorptionswege

Nanopartikel können über den gesamten Produktzyklus von der Herstellung über die Nutzung<sup>20</sup> bis zur Entsorgung in die Umgebung freigesetzt werden. Während die Exposition von Mitarbeitern bei Herstellungs- und Entsorgungsprozessen, von Konsumenten und nicht direkt beteiligten Dritten sehr unterschiedlich ist, bleiben die prinzipiellen Aufnahmewege von Nanopartikeln im Körper hingegen dieselben.

#### 3.2.1.1 Inhalative Resorption

Kleinere Partikel sind nicht nur reaktiver, sondern gelangen als Aerosole auch tiefer in den respiratorischen Trakt. So stossen Partikel unter einer Grösse von 2.5 µm bis in die Alveolen vor (Hoet *et al.*, 2004a). Nanopartikel werden dort aufgrund ihrer Grösse nur ineffizient durch die dafür zuständigen alveolaren Makrophagen entfernt, lagern sich ab und interagieren mit Epithelzellen, was schliesslich zu starken Entzündungen des Lungengewebes führt (Brüske-Hohlfeld *et al.*, 2005; Renwick *et al.*, 2001). Da die Alveolen dem Gasaustausch dienen, ist die Barriere zum Blutkreislauf sehr dünn. Damit können auch unlösliche Nanopartikel ins Blut gelangen, wobei der tatsächlich resorbierte Anteil mit abnehmender Partikelgrösse zu korrelieren scheint (Kreyling *et al.*, 2002).

---

<sup>18</sup> Für einen möglichen Umgang mit dem dargestellten Dilemma sei auf Kapitel 6 verwiesen.

<sup>19</sup> Vgl. Experteninterview im Appendix Abschnitt A.1.3.

<sup>20</sup> Beispielsweise kann durch Abrieb nanotechnologisch modifizierter Oberflächen eine Freisetzung von Partikeln erfolgen. Bestimmte Expertenkreise gehen jedoch davon aus, dass die dadurch erzeugten Konzentrationen kaum Gesundheitsschäden verursachen (Paschen *et al.*, 2004).

Unlängst konnte an Ratten neben der Resorption über die Lunge auch die Aufnahme von der Nase über den Riechnerv direkt ins Riechzentrum des Gehirns nachgewiesen werden. Damit können Partikel ins Gehirn gelangen, ohne hierzu die äusserst selektive Blut-Hirn-Schranke zu passieren (G. Oberdörster *et al.*, 2004; Straumann, 2004).

Der inhalative Resorptionsweg wurde bereits mehrfach nachgewiesen und ist gemäss führenden Epidemiologen der wohl bedeutendste unfreiwillige Aufnahmeweg (Brüske-Hohlfeld *et al.*, 2005; Hoet *et al.*, 2004a; Nemmer *et al.*, 2002). Die Resorption über die Atemwege - verbunden mit einer Überforderung der alveolaren Macrophagen sowie die daraus resultierende Entzündung der Lunge - ist insbesondere bei hohen Nanopartikel-Konzentrationen in der Raumluft relevant. Auf der einen Seite sind solche kritische Expositionen im *Fertigungsprozess* und *Recycling* von Nanoprodukten zu erwarten und stellen damit eine grosse Herausforderung für die Arbeitshygiene dar. Einige Produzenten ergreifen bereits heute beschränkte, vorsorgliche Massnahmen (Helland, 2004). Eine Anpassung und Institutionalisierung adäquater Schutzvorkehrungen, welche den Eigenschaften von Nanostäuben Rechnung tragen, ist jedoch nicht zu beobachten: Sicherheitsdatenblätter (*Safety Data Sheets*, SDS) für Titandioxyd-Nanopartikel zum Beispiel sehen keine besonderen, zusätzlichen Massnahmen vor (Colvin, 2003; Hett, 2004). Im Kontext der Arbeitssicherheit ist weiter darauf hinzuweisen, dass trotz möglicher Dauerschweben von Nanopartikeln derzeit weder geeignete Masken verfügbar noch ausreichende Hochleistungs-Raumluft-Filterung praktikabel sind (Hett, 2004).

Andererseits ist neben Herstellung und Entsorgung aber auch bei *Applikation* bestimmter Nanoprodukte wie Farben, Lacken und Imprägniermitteln mit erhöhten Konzentrationen an Nanopartikeln zu rechnen. Ferner kann die *Verwendung* eines Nanoproduktes per se, wie beispielsweise Raumsprays zur Neutralisierung von Gerüchen, ebenfalls kritische Expositionen in geschlossenen Räumen generieren.

### 3.2.1.2 Ingestion

Der Gastrointestinaltrakt bildet eine weitere Schnittstelle zur Aussenwelt. Es konnte nachgewiesen werden, dass bestimmte, oral aufgenommene Nanopartikel bis zu einer Grösse von 150 µm resorbiert werden können (Volkheimer, 1974)<sup>21</sup>. Auch wenn die Resorption stark partikelabhängig ist und damit kein genereller Konsens bezüglich Grössenlimite bestehen kann, scheinen im Allgemeinen Nanopartikel unter einer Grösse von 1000 nm in den Blutkreislauf zu gelangen<sup>22</sup>.

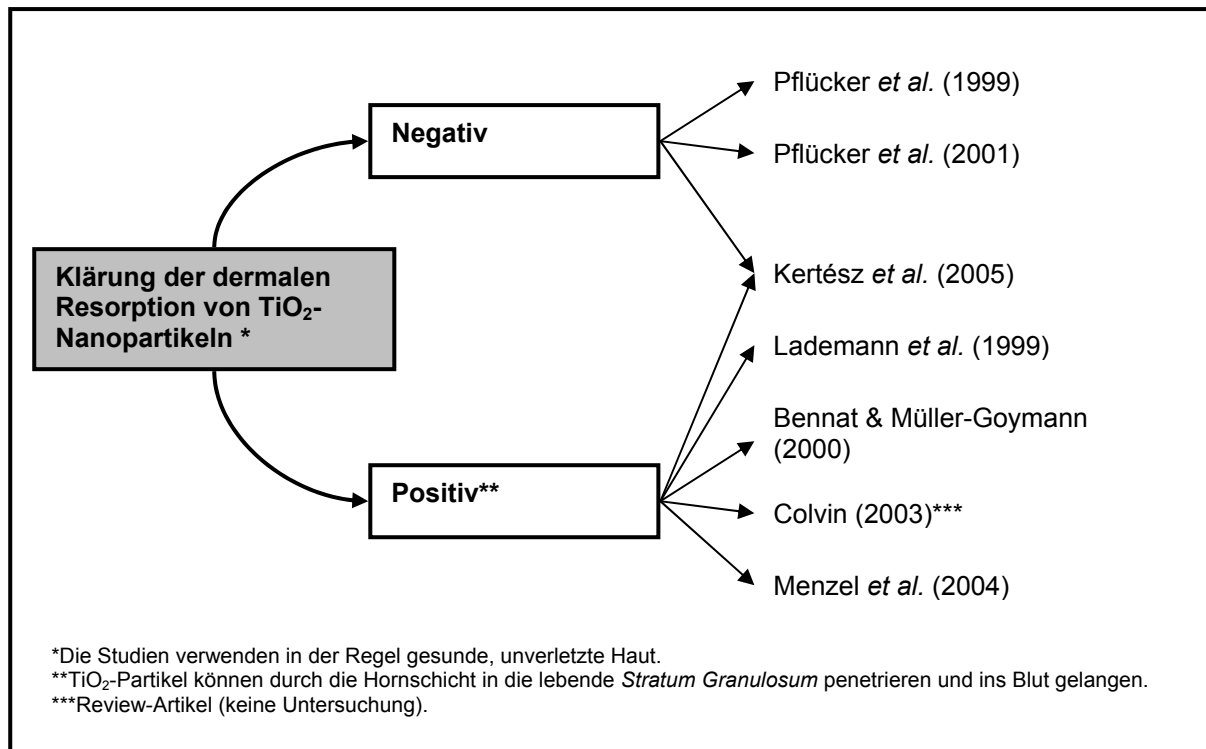
Die direkte orale Aufnahme von Nanopartikeln ist beispielsweise im Zusammenhang mit der Trinkwasserqualität oder bei Nahrungsmittelzusätzen relevant. Es ist darauf hinzuweisen, dass sämtliche inhalative Expositionen grundsätzlich auch eine Aufnahme über den Gastrointestinaltrakt ermöglichen.

---

<sup>21</sup> Dabei scheinen im Gegensatz zur Inhalation keine unmittelbaren Schäden an den Resorptionsorganen aufzutreten.

<sup>22</sup> Vgl. hierzu unter anderem Hett (2004), Jani *et al.* (1994) und Kreuter (1991).

### 3.2.1.3 Dermale Resorption



**Abbildung 3: Die Resorption von TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln über die Haut wird trotz intensivsten Forschungsbemühungen derzeit noch immer kontrovers diskutiert (Hett, 2004; The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004). Eine Klärung dieser Frage ist angesichts der weit verbreiteten Anwendung von Sonnenschutzmitteln mit TiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln als UV-Filter dringlich.**

Für die Aufnahme über die Haut gibt es grundsätzlich zwei denkbare Routen: Einerseits ist eine Resorption von Nanopartikeln über die Hornhaut direkt möglich<sup>23</sup>. Andererseits besteht die Möglichkeit der Aufnahme über die Haarwurzeln (Hett, 2004). Beide Wege werden seit längerem kontrovers diskutiert, ohne dass sich bereits definitive Aussagen formulieren lassen: Gewisse Studien widerlegen eine Aufnahme bis zu lebenden Zellschichten des Epithelgewebes; andere Untersuchungen wiederum geben Hinweise auf gegenteilige Befunde (Abbildung 3). Da derzeit bereits zahlreiche, äusserlich applizierte Pflege- und Kosmetikprodukte mit Nanopartikeln auf dem Markt sind, ist eine Klärung der Unsicherheiten wichtig. So wird derzeit intensiv an dieser Fragestellung geforscht (zum Beispiel im Rahmen des Projektes NANODERM<sup>24</sup>) und werden eigens zweckmässige Untersuchungsmethoden entwickelt<sup>25</sup>.

Im Gegensatz zur Ingestion scheinen analog der inhalativen Aufnahme auch beim dermalen Eintritt direkte Schäden am Resorptionsorgan aufzutreten: So wurden beispielsweise Zellschädigungen durch Radikale beobachtet. Ferner wird die Möglichkeit von Hautirritationen und -allergien diskutiert (Hoet *et al.*, 2004a; D. B. Warheit, 2004a).

<sup>23</sup> Die Hornhaut (*Stratum corneum*) weist Zwischenräume von circa 50 nm auf.

<sup>24</sup> Das NANODERM-Projekt ist Teil des 5. Rahmenprogramms der Europäischen Kommission (Nanoderm, 2005).

<sup>25</sup> Vgl. Fachzeitschrift „*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*“.

### 3.2.1.4 Zusammenfassung der Resorptionswege

Während Atemwege und Gastrointestinaltrakt der Aufnahme und dem Austausch von Gasen und Nährstoffen dienen, bildet die Haut grundsätzlich eine natürliche Barriere (Tabelle 1). Eine ungewollte Resorption ist demzufolge insbesondere über die Lungen und den Verdauungstrakt zu erwarten. Eine dermale Aufnahme von Nanopartikeln kann derzeit jedoch nicht ausgeschlossen werden.

| Resorptionsweg     | Größenordnung <sup>26</sup>            | Anmerkung             |
|--------------------|--|-----------------------|
| Inhalation         | < 100 nm (Nemmer <i>et al.</i> , 2002) | Wichtigkeit bestätigt |
| Ingestion          | < 150 µm (Volkheimer, 1974)            | Möglichkeit bestätigt |
| Dermale Resorption | < 150 nm (Menzel <i>et al.</i> , 2004) | Kontrovers diskutiert |

**Tabelle 1: Zusammenfassung der Aufnahmerouten.**

### 3.2.2 Verteilung im Körper

Wurden Nanopartikel resorbiert, können sie unter anderem über den Blutkreislauf in Organe wie Herz, Milz, Nieren, Leber oder Hirn sowie in die Muskulatur gelangen (Nemmar *et al.*, 2001; Nemmer *et al.*, 2002; Panyam & Labhasetwar, 2003). Da ein Übertritt durch die Blut-Hirn-Schranke, der selektivsten Barriere im menschlichen Körper, ebenfalls mehrfach nachgewiesen wurde, liegt der Schluss nahe, dass Nanopartikel unterhalb einer bestimmten Grösse in sämtliche Organe gelangen können (Kreuter *et al.*, 1995). Angesichts dieser Ubiquität wird auch ein Transfer von Nanopartikeln über die Plazentaschranke in den Fetus für möglich gehalten (Borm & Kreyling, 2004; Wootliff, 2004).

Die offenbar wenig eingeschränkte Verteilung der Partikel im menschlichen Körper eröffnet eine Reihe von neuartigen Therapiemöglichkeiten, sorgt aber im Gegenzug für eine Vielzahl denkbarer Schädigungsmechanismen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Präsenz von Nanopartikeln im menschlichen Körper alleine wohl eine mögliche Gefährdung darstellt, nicht aber zwangsläufig zu einem bedeutenden Risiko führt<sup>27</sup>.

### 3.2.3 Mögliche Auswirkungen

#### 3.2.3.1 Unspezifische Wirkungen im Körper: Analogieschlüsse?

Alleine aufgrund ihrer Grösse und der damit verbundenen Reaktivität sind bereits toxische Effekte von Nanopartikeln (so genannte *Nanotoxizität*) zu erwarten. So können Nanopartikel die Bildung von Radikalen fördern, welche in der Folge Gewebe schädigen oder die Entstehung von Tumoren begünstigen (Baumgartner *et al.*, 2003; Hett & Tanner, 2003). Während akute Effekte durch toxikologische Studien geklärt werden können, sind Langzeitwirkungen kaum bekannt. Aufgrund der dünnen Datenlage ist man versucht, Analogieschlüssen aus Erfahrungen mit Asbest und ultrafeinen Partikeln (UFP) zu ziehen (Tabelle 2).

Insbesondere Nanoröhren werden wegen der Lungengängigkeit und Form mit Asbestfasern, welche allerdings bedeutend grösser sind, verglichen (Paschen *et al.*, 2004; Service, 1998): Asbest wie Nanoröhren sind an sich harmlose, unlösliche, persistente, fasrige Partikel, die sich teilweise der „Kontrolle“ durch alveolare Makrophagen entziehen und so verzögert Entzündung und Zerstörung von Lungengewebe auslösen (Dagani, 2003; Dreher, 2004; Lam *et al.*, 2004; Maynard *et al.*, 2004; Service, 2003; D. B. Warheit *et al.*, 2004). Auch epidemiolo-

<sup>26</sup> Die Angaben sind je nach Partikeltyp und Zielsetzung der zitierten Studie sehr unterschiedlich. In der Tabelle werden jene Untersuchungen zitiert, in welchen die Resorption der grössten Partikel festgehalten wurde.

<sup>27</sup> Siehe Präzisierung im Abschnitt 4.1.5.



gische Studien zu ultrafeinen Partikeln unter 100 nm, welche natürlich in der Umwelt vorkommen oder als Nebenprodukt menschlicher Aktivitäten bereits länger erzeugt werden, scheinen für einen Vergleich prädestiniert. So ist inzwischen gesichert, dass die Lungentoxizität von Partikeln in der Regel mit abnehmender Grösse korreliert (Hoet *et al.*, 2004a).

| Analogie                  | Effekt  |
|---------------------------|---|
| Asbest                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Asbestose“ (Mossmann <i>et al.</i>, 1990)</li> <li>• Lungenkrebs (Brüske-Hohlfeld <i>et al.</i>, 2005; Mossmann <i>et al.</i>, 1990)</li> <li>• Pleuramesothelium (Mossmann <i>et al.</i>, 1990; Paschen <i>et al.</i>, 2004)</li> <li>• Bösartige Tumore des Bauchfells (Mossmann <i>et al.</i>, 1990; Paschen <i>et al.</i>, 2004)</li> </ul>   |
| Ultrafeine Partikel (UFP) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Genereller Zusammenhang zwischen UFP-Belastung und Mortalität (Wichmann <i>et al.</i>, 2000)</li> <li>• Ablagerungen im Lungengewebe mit Entzündungsreaktion (Brown <i>et al.</i>, 2001; G. Oberdörster, 2001) sowie chronische Erkrankungen und Lungenkrebs (Borm, 2002; Paschen <i>et al.</i>, 2004)</li> <li>• Verschlimmerung von Arteriosklerose und Herz-Kreislaufkrankungen (Brüske-Hohlfeld <i>et al.</i>, 2005; Nemmar <i>et al.</i>, 2004; Paschen <i>et al.</i>, 2004)</li> <li>• Auslösen von Immunreaktionen, Katalyse chemischer Reaktionen, Anlagerung und Transport von Proteinmolekülen sowie Öffnen von Kalziumkanälen (Paschen <i>et al.</i>, 2004)</li> <li>• Wechselwirkungen mit der Replikation und Reparatur von DNA möglich (Borm, 2002)</li> </ul> |

**Tabelle 2: Mögliche Auswirkungen von Asbest und ultrafeinen Partikeln.**

Bei der Übertragung des grossen Erfahrungsschatzes mit Asbest und ultrafeinen Partikeln auf künstlich produzierte Nanopartikel ist jedoch Vorsicht geboten: Es gibt inzwischen Studien, die eine Asbest-Analogie zumindest teilweise widerlegen (Hoet *et al.*, 2004b; A. Huczko *et al.*, 2001). Weiter räumen Experten aus der Versicherungsbranche ein, dass Asbest primär im versicherungstechnischen Sinne - aufgrund der grossen Latenzzeit - als potentielle Analogie gesehen wird (Hett & Schraft, 2005). Auch können aus ultrafeinen Partikeln, welche bereits länger Bestandteil des natürlichen Lebensraumes sind<sup>28</sup>, nicht direkt Rückschlüsse auf gezielt hergestellte Nanopartikel abgeleitet werden: Natürliche oder als Nebenprodukt entstehende Partikel sind meist wasserlöslich oder zumindest kurzlebig (Hett, 2004); künstliche Nanopartikel hingegen sind in der Regel kleiner, gezielt mit spezifischen Eigenschaften versehen und werden meist durch spezielle Derivatisierung vor Agglomeration geschützt. Letztere sind damit langlebiger, höchstmobil und reaktiver, sodass zwangsläufig zusätzliche Effekte zu erwarten sind (Colvin, 2003).

### 3.2.3.2 Partikelspezifische Auswirkungen auf den Körper

Neben der allgemeinen Nanotoxizität lassen die gezielt veränderten Eigenschaften vermuten, dass darüber hinaus weitere partikelspezifische Schädigungen zu erwarten sind. Diese können prinzipiell nicht alleine aufgrund der Grundsubstanz der Partikel geschätzt werden, da die Eigenschaften der Ausgangsstoffe (wie in Abschnitt 2.2 erläutert) wenig über die charakteristischen Effekte bewusst manipulierter Partikel aussagen.

<sup>28</sup> Beispiele hierzu sind Salz-Nanopartikel aus der Gischte oder Kohlenstoff-Nanopartikel wie Fullerene aus Verbrennungsprozessen (Dieselmotoren, Kerzen, Zigaretten etc.).

So wurden bereits Wechselwirkungen von Nanopartikeln mit Enzymen und Störungen der betroffenen biologischen Prozesse beschrieben sowie Interferenzen mit dem Immunsystem festgestellt (Hett, 2004; Paschen *et al.*, 2004; Granum *et al.*, 2001; Menzel *et al.*, 2004). Weitere spezifische Interaktionen sowie konkrete Beispiele werden in Kapitel 4 tabellarisch zusammengetragen. Es sei vorweggenommen, dass die meisten Erkenntnisse dabei auf toxikologischen Studien anhand von Modellen basieren. Wie bei Analogien ist auch die direkte Übertragung der Testresultate von Zell- oder Tierversuchen auf den Menschen nicht ohne weiteres möglich<sup>29</sup>.

### 3.2.3.3 Überlagerungseffekte

Neben unspezifischen und partikelabhängigen Wirkungen im Körper existieren ausserdem Hinweise auf mögliche Überlagerungseffekte: Durch unerwartete Wechselwirkungen von Nanopartikeln mit Metallen *in vivo* konnten potenzierte Auswirkungen nachgewiesen werden (Hett & Schraft, 2005; Stone *et al.*, 2004).

### 3.2.4 Ausscheidung

In der Regel werden körperfremde Partikel durch Antikörper markiert, welche ein Zusammenlagern gleichartiger Teilchen verursachen und schliesslich die Beseitigung durch Phagozyten ermöglichen. Bestimmte Nanopartikel sind jedoch mit einer Beschichtung versehen, welche den Erfolg des Immunsystems mangels Erkennung als körperfremd einschränkt. Andere Nanopartikel wiederum sind persistent und damit biologisch kaum abbaubar, wodurch eine Akkumulation und daraus resultierende Schädigung betroffener Organe nicht ausgeschlossen werden können. So werden heute Eisenoxid-Nanopartikel als Kontrastmittel angewandt, welche sich im Gehirn anreichern und so Alzheimer Krankheit oder Parkinson auslösen könnten (Hett, 2004). Es ist jedoch zu betonen, dass solche Effekte in hohem Masse von den betreffenden Partikeln abhängig sind: *“Irrespective of the uptake route, the body distribution of particles, [sic] is most dependent on the surface characteristics and the size of the particles. (...) In unintentional uptake of nanoparticles these characteristics can strongly influence the accumulation of a specific type of particle in the particular body site.”* (Hoet *et al.*, 2004a, p. 20).

## 3.3 Umweltrisiken

Die Erschliessung des Nanokosmos verspricht eine Reihe von Techniken zur Eindämmung aktueller Umweltprobleme (Masciangioli & Zhang, 2003; Stuart, 2003): Ein Blick auf die in Kapitel 4.2 aufgeführten Indikatorprodukte zeigt unter anderem, dass die Technologie enorme Energieeinsparungen dank tribologischen (reibungsvermindernden) Schutzschichten ermöglichen und die Trinkwasser-Aufbereitung revolutionieren könnte, neue Filtersysteme für verbesserte Abluftbehandlung verspricht oder effizientere Methoden der Bodenremediation und Grundwassersanierung in Aussicht stellt. Wie auch im Bereich der Gesundheit stehen den Potentialen der Technik jedoch neue ökologische Risikoprofile gegenüber, welche nachfolgend erläutert werden.

### 3.3.1 Kontamination von Umweltkompartimenten

Neuartige Nanopartikel weisen nicht nur eine beispiellose Dynamik im menschlichen Körper auf, auch eine veränderte Mobilität in den Umweltkompartimenten Boden, Wasser und Luft ist zu erwarten. Dabei gilt grundsätzlich: Für Partikel, welche immobilisiert zur Anwendung

---

<sup>29</sup> Es sei an dieser Stelle auf die entsprechende Diskussion in Kapitel 5.2 verwiesen.

kommen, sind kleinere Umweltbelastungen zu erwarten als bei mobilen Teilchen in offenen Applikationen (Reller, 2005).

Die Präsenz von nicht natürlich vorkommenden Nanopartikeln in der Umwelt stellt wiederum keine unmittelbare Bedrohung dar. Sollten sich jedoch befürchtete Schädigungsmechanismen bestätigen, so wären die entsprechenden Kontaminationen schwer zu lokalisieren und kaum zu entfernen<sup>30</sup>.

### **3.3.1.1 Atmosphäre**

Da Nanopartikel im Gegensatz zu ultrafeinen Partikeln bekanntlich oft gegen Agglomeration speziell beschichtet sind, haben sie eine kleinere Tendenz zur Verklumpung. Daraus resultieren signifikant höhere Aufenthaltszeiten in der Atmosphäre und somit länger anhaltende Einwirkungen auf die Umwelt. Infolgedessen ist es durchaus denkbar, dass Nanopartikel analog den POPs in entlegene Erdteile fernab von der eigentlichen Quelle gelangen<sup>31</sup>. Welche Auswirkungen auf die Klimaerwärmung zu erwarten sind, ist schwierig zu beurteilen. Fest steht einzig, dass Nanopartikel relativ zu Treibhausgasen in den nächsten Jahrzehnten kaum relevant sein dürften (Hett, 2004).

### **3.3.1.2 Boden**

Wie bei anderen Kolloiden auch, ist eine Mobilisierung von Schwermetallen und anderen Schadstoffen wie Dünger und Pestizide durch Nanopartikel möglich (Arnall, 2003). Da Nanopartikel eine sehr hohe spezifische Oberfläche und Mobilität aufweisen, sind grosse Transportkapazitäten plausibel. Ausserdem ist aufgrund der erhöhten Reaktivität nicht auszuschliessen, dass sich neue, toxische Verbindungen im Boden bilden (Hett, 2004). So könnten in unkontrollierter Umgebung Enzyme untoxische Beschichtungen in toxische umwandeln (Helland, 2004).

### **3.3.1.3 Wasser**

Nicht nur über den atmosphärischen Weg, sondern auch über aquatische Systeme können sich Partikel ausbreiten. Das Verteilungsverhalten ist dabei - je nach Grösse, Löslichkeit<sup>32</sup>, Reaktivität und Persistenz - sehr spezifisch (Bridges, 2004; Kalaugher, 2004). Auch im Grunde nicht schädliche Nanopartikel könnten wiederum die Mobilität von Schadstoffen erheblich erhöhen (ETC Group, 2002). So wird unter anderem befürchtet, dass Schwermetalle aus Abwässern von Bergwerken dank Nanopartikeln in Fliessgewässer und ins Grundwasser verschleppt werden (Paschen *et al.*, 2004). Die negativen Auswirkungen auf Aquifere scheint eine der zentralsten Besorgnisse im Kontext der Umweltauswirkungen von Nanopartikeln zu sein. Es ist allerdings auch denkbar, dass die Bindung bestimmter Schadstoffe an Nanopartikeln deren Toxizität herabsetzt (Kleiner & Hogan, 2003).

### **3.3.1.4 Nanopartikel in Flora und Fauna**

Da infolge viel versprechender Innovationen ein hoher Umsatz an nanotechnologischen Produkten prognostiziert wird, könnten die entsprechenden Partikel in Zukunft auch durch Pflanzen und tierische Organismen resorbiert werden (Colvin, 2002)<sup>33</sup>.

---

<sup>30</sup> Zur Beseitigung von Nanopartikeln aus flüssigen Medien sind Zentrifugations- oder Ultrafiltrationsverfahren notwendig, welche nur für kleine Wassermengen praktikabel sind. Für die Elimination von Nanopartikeln aus der Raumluft wiederum sind konventionelle Filtersysteme aufgrund der Porengrösse unzureichend (Hett, 2004).

<sup>31</sup> Für eine Übersicht zur entsprechenden Literatur vgl. Peter & Smieszek (2004).

<sup>32</sup> Auch nicht wasserlösliche Nanopartikel können stabile Kolloide in wässriger Umgebung bilden und so ins Grundwasser gelangen (Colvin, 2003; Helland, 2004).

<sup>33</sup> Auch wenn der Verbreitung von Nanopartikeln in Boden, Wasser und Luft kaum Grenzen gesetzt sind, gilt es darauf hinzuweisen, dass derzeit die Menge unbeabsichtigt generierter bei weitem jene gezielt hergestellter Nanopartikel übertrifft (Brüske-Hohlfeld *et al.*, 2005).

Bei gezielt hergestellten Partikeln kann aufgrund der neuen Eigenschaften eine erhöhte Persistenz nicht ausgeschlossen werden. Damit sind ähnliche Probleme wie bei bereits bekannten, persistenten Stoffen denkbar (Hett, 2004). Es wird in der Folge gegenwärtig auch eine potentielle Bioakkumulation bestimmter Nanopartikel in der Nahrungskette diskutiert (Colvin, 2002; ETC Group, 2002; Schuler, 2004). An der Nanotox Konferenz 2004 wurde aus diesem Grunde festgehalten, dass die Nanomedizin nur dann eine Alternative bildet, wenn die entsprechenden Nanopartikel biologisch abbaubar sind (Walgate, 2004). Angesichts der unbegrenzten Ausbreitung sowie der unbekanntenen Folgen wäre ein schneller Abbau (zum Beispiel auf biologischem oder photochemischem Weg) generell wünschenswert.

### **3.3.2 Weitere ökologische Bedenken**

Neben direkt von den Partikeln ausgehenden Umweltrisiken gibt es eine Reihe zusätzlicher ökologischer Bedenken. So ist der Herstellungsprozess derzeit mit einem hohen Energie- und Rohstoffbedarf verbunden (vgl. 2.3.2). Auch kommen Experten vom „Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag“ (TAB) zum Schluss, dass gegenwärtig kaum über die Entsorgung oder Wiederverwertung von Nano(wegwerf)produkten nachgedacht wird (Paschen *et al.*, 2004)<sup>34</sup>.

---

<sup>34</sup> Dieselbe Einschätzung teilt auch Dr. Annabelle Hett (vgl. Appendix Abschnitt A.1.3).



## 4. Gesundheits- und Umweltrisiken von Applikationen

### 4.1 Vorgehen

Prinzipiell wird das breite Feld der Nanotechnologie in Applikationsbereiche strukturiert, für welche anhand eines Indikatorproduktes neben möglichem Nutzen und gegenwärtigem Entwicklungsstand insbesondere spezifische Gefährdungen eruiert werden.

#### 4.1.1 Applikationsfelder

Die Nanotechnologie hat weit reichende Konsequenzen für fast sämtliche Branchen und Industriezweige. Während eine vollständige Auflistung sämtlicher Applikationen nicht möglich ist, lassen sich indessen Nanoprodukte bestimmten Applikationsfeldern und diese wiederum Übergruppen zuordnen (vgl. Abbildung 4).

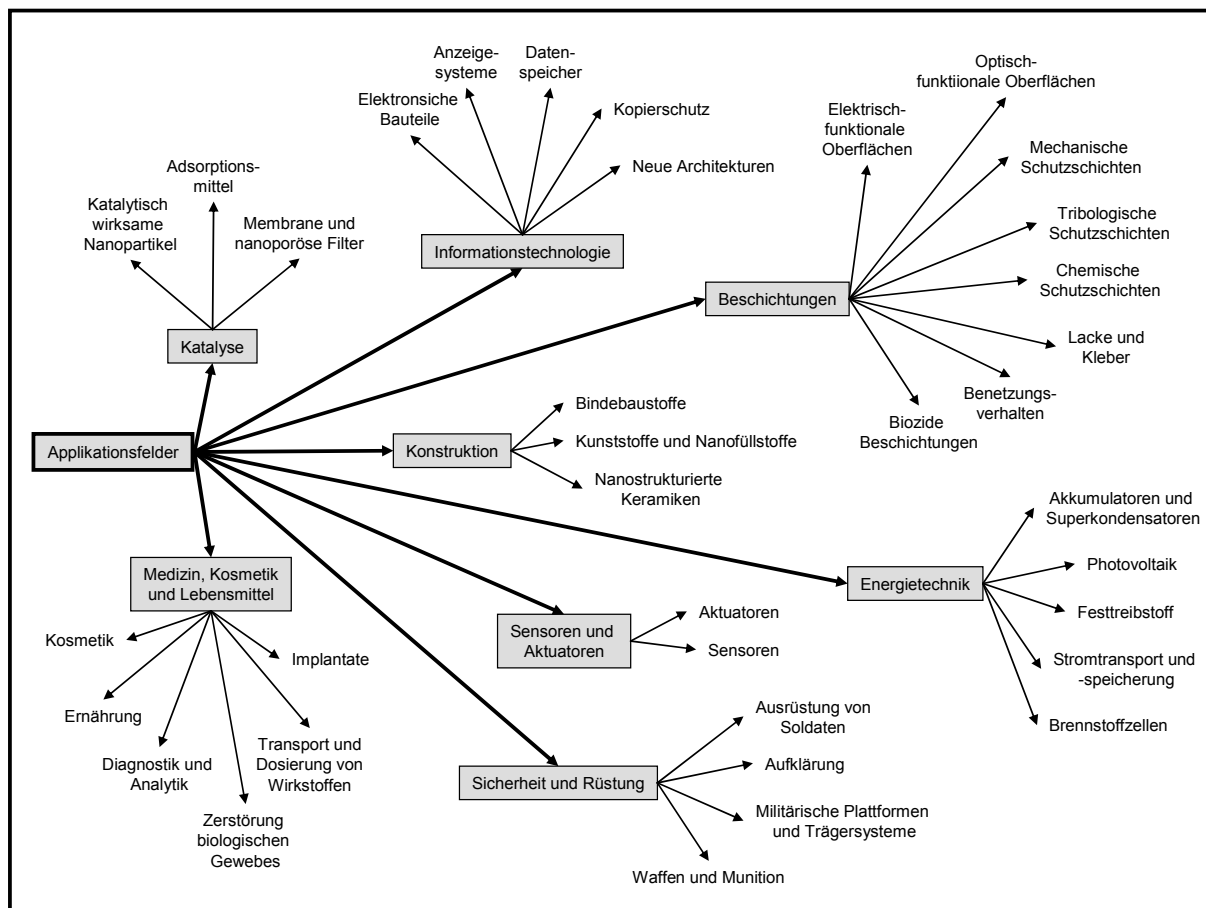


Abbildung 4: Applikationsfelder.

Die Übergruppen in Abbildung 4 wurden von Paschen *et al.* übernommen und aufgrund zusätzlicher Literatur teilweise modifiziert. Die weitere Gliederung in einzelne Applikationsfelder richtet sich dabei primär nach deren Funktionalität und entspricht damit nicht zwangsläufig der Unterscheidung nach Industriezweigen. So finden schmutzabweisende Beschichtungen beispielsweise sowohl in der Automobilindustrie als auch im Küchenausbau zunehmend Anwendung. Die Einteilung gemäss Funktionalität geschieht im Hinblick auf die

Diskussion der Gefährdungen, da sich diese aus Eigenschaften sowie Funktion der entsprechenden Nanomaterialien (und nicht aus der betreffenden Branche) ableiten lassen.

Da gewisse Anwendungen teilweise mehrere Funktionen erfüllen, stehen trotz klarem Einteilungskriterium unterschiedliche Möglichkeiten der Gliederung offen. So sind einzelne Kategorien umfangreicher, andere wiederum sind enger gefasst. Es wurde darauf geachtet, dass sich sämtliche Anwendungsbeispiele in eines der bezeichneten Felder einteilen lassen. Diskutierbare Fälle, wie zum Beispiel „*Lab-on-a-chip*“-Systeme, können mehreren Bereichen zugeordnet werden. Prinzipiell ist hierbei eine Kombination von Nutzen und Gefährdung beider Applikationsbereiche zu erwarten.

#### 4.1.2 Auswahl der Indikatorprodukte

Für die einzelnen Applikationsfelder werden Indikatorprodukte definiert, anhand welcher der typische Nutzen den charakteristischen Risikopotentialen gegenübergestellt werden kann. Auf diese Weise lässt sich die Breite der Analyse mit exemplarischer Tiefe bestmöglich verbinden. So können mittels Analogieschlüssen auch Erkenntnisse für nicht beschriebene Produkte gewonnen werden.

Die Auswahl der Indikatorprodukte folgt einem pragmatischen Ansatz: Es werden Applikationen gewählt, welche einerseits stellvertretend eine breite Bande an typischen Risiken aufzeigen lassen und andererseits in der Literatur möglichst eingehend diskutiert werden<sup>35</sup>.

#### 4.1.3 Beschreibung des Nutzens

Für jedes Indikatorprodukt wird der Nutzen beschrieben und auf die entsprechende, weiterführende Literatur verwiesen.

#### 4.1.4 Evaluation des Entwicklungsstandes

| Entwicklungsstand    | Zeithorizont bis zur Marktreife | Umschreibung der Kategorie  |
|----------------------|---------------------------------|---|
| Vision               | Ungewiss                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entdeckung eines Effektes</li> <li>• Konzeptidee</li> </ul>                                |
| Forschungsphase      | Langfristig                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erforschung der Anwendungsmöglichkeit</li> <li>• Abklärung der Realisierbarkeit</li> </ul> |
| Entwicklungsphase    | Mittelfristig                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konkrete technische Umsetzung</li> <li>• Erste Prototypen</li> </ul>                       |
| Anwendungsphase      | Marktreif                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erste Produkte auf dem Markt</li> <li>• Industrielle Herstellung</li> </ul>                |
| Verbreitung am Markt | Bereits seit längerem marktreif | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alltägliche Anwendung</li> <li>• Nennenswerter Marktanteil</li> </ul>                      |

**Tabelle 3: Kategorien des Entwicklungsstandes.**

Die gegenwärtige Marktreife lässt sich aufgrund der rasanten, internationalen Entwicklung und der Unübersichtlichkeit nur schwer einschätzen. Die Bewertung des Entwicklungsstandes der ausgewählten Indikatorprodukte stützt sich auf Angaben in der Literatur<sup>36</sup>. Es ist darauf hinzuweisen, dass vergleichende Einschätzungen in kürzester Zeit an Aktualität einbüßen.

<sup>35</sup> Anmerkung: Ein iteratives Vorgehen ist dabei nicht zu vermeiden.

<sup>36</sup> Vgl. Paschen *et al.* (2004), Anhang aus TAB (2004), Luther *et al.* (2005) und *The Institute of Nanotechnology* (2003).

Um der effektiven Genauigkeit der Beurteilung gerecht zu werden, wird daher lediglich eine grobe Klassifizierung gemäss Tabelle 3 vorgenommen.

Es sei vorweggenommen, dass die Kriterien zur Auswahl der Indikatorprodukte zwangsläufig zu einer Übervertretung weit entwickelter Applikationen führt. So ist von Nanoprodukten, deren Realisierbarkeit aufgrund zahlreicher technischer Hürden fraglich ist, generell weniger über spezifische Risiken zu erfahren.

#### 4.1.5 Identifikation der Gefährdungspotentiale

Die Unterscheidung zwischen Schadensmöglichkeit (= Gefährdung) und der Wahrscheinlichkeit, dass diese tatsächlich eintritt, ist fundamental. Wie in Kapitel 3 erwähnt, bildet die Gegenwart von Nanopartikeln in Mensch und Umwelt wohl eine mögliche *Gefährdung*, nicht aber zwangsläufig ein bedeutsames Risiko (= Gefährdung × Wahrscheinlichkeit). Letzteres ist erst dann der Fall, wenn die Partikel mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch effektiv eine negative Wirkung entfalten. Aus diesen Überlegungen ist nachfolgend grundsätzlich von möglichen Gefährdungen und nicht von Risiken die Rede.

Die Identifikation konkreter Gefährdungspotentiale einzelner Applikationen basiert auf Literaturrecherchen in wissenschaftlichen Zeitschriften, Zeitungen, Büchern und elektronischen Medien sowie auf zwei Experteneinschätzungen. Letztere erlauben gerade auch in jenen Bereichen, in denen noch kaum Anhaltspunkte für Gesundheits- und Umweltgefährdungen festgeschrieben sind, eine bessere Abstützung der Recherchenresultate.

Im Sinne eines *Lebenszyklus-Ansatzes* werden auch Hinweise aufgeführt, die nicht direkt im Kontext der betrachteten Applikation erfolgen, sich aber auf die verwendeten nanotechnologischen Materialien beziehen: Die inhalative Exposition gegenüber Nanopartikeln kann bei der effektiven Verwendung geschlossener Produkte unwesentlich, bei Herstellung und Entsorgung hingegen aber von grosser Bedeutung sein.

Für eine kritische Würdigung der aufgeführten Literatur sei auf die Diskussion in Kapitel 5 verwiesen.

#### 4.1.6 Klassifizierung der Literaturangaben

In dieser Arbeit soll auch die Untersuchungstiefe in den einzelnen Bereichen wiedergegeben werden. Daher ist es zwingend, die entsprechenden Quellenangaben hinreichend zu qualifizieren. Während Tabelle 4 die unterschiedlichen Kategorien der zitierten Literatur auflistet, zeigt Tabelle 5 die gewählte Klassifizierung der entsprechenden Information. Letztere ist nicht immerzu eindeutig. So ist teilweise nicht klar, auf welche Art von Information sich ein Journalist stützt. Deshalb kann erneut nur eine grobe Einteilung vorgenommen werden, welche der (Un)Genauigkeit der Beurteilung Rechnung trägt.

| Art der Publikation       | Abkürzung |
|---------------------------|-----------|
| Buch                      | [B]       |
| Fachzeitschrift           | [J]       |
| Elektronische Quelle      | [I]       |
| Präsentation              | [P]       |
| Bericht                   | [R]       |
| Diplomarbeit              | [T]       |
| Zeitungsartikel / Magazin | [Z]       |

Tabelle 4: Art der Referenz.



| Klassifikation des Aspektes | Beispiele   | Abkürzung |
|-----------------------------|---|-----------|
| Analogie                    | - Vergleich mit Asbest<br>- Vergleich zwischen SWCNT und (MW)CNT<br>- Vergleich mit ultrafeinen Partikeln | [A]       |
| Erwähnung                   | - Angabe einer (möglichen) Gefährdung<br>- Verweis auf Primärliteratur <sup>37</sup>                      | [M]       |
| Experteninterview           | - Hinweise aus den Expertenbefragungen <sup>38</sup>  | [E]       |
| Studie                      | - Toxikologische Tests<br>- Klinische Untersuchungen  | [S]       |
| Vermutung                   | - Nennung einer Möglichkeit <sup>39</sup>   | [V]       |

**Tabelle 5: Klassifikation der Information.**

<sup>37</sup> Nach Möglichkeit wird die entsprechende Primärliteratur ausfindig gemacht. Bleibt es bei der „Erwähnung“ einer bestimmten Gefährdung, so schliesst dies nicht aus, dass dem Hinweis dennoch eine Studie zugrunde liegt (z.B. bei Zeitungsartikeln).

<sup>38</sup> Vgl. Transskripte der Experteninterviews im Appendix Abschnitte A.1.3 (Dr. Annabelle Hett und Dr. Thomas Epprecht) und A.2.3 (Åsgeir Helland).

<sup>39</sup> Eine „Vermutung“ muss - im Gegensatz zu einer „Erwähnung“ - in der Literatur als solche deklariert sein.

## 4.2 Gesundheits- und Umweltrisiken einzelner Applikationsfelder<sup>40</sup>

### 4.2.1 Beschichtungen

| Applikationsbereich             | Indikatorprodukt  | Nutzen   | Literatur                                | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale  | Literatur   |
|---------------------------------|---|--|--|-------------------|--|---|
| Biozide Beschichtungen          | Holzbauklötze mit antibakterieller Beschichtung (Ag-NP, welche laufend Ag <sup>+</sup> -Ionen freisetzen) | -Verminderung der Krankheitsübertragung zwischen Kleinkindern<br>-Gute farbliche Eigenschaften<br>-Gute Haftung des Lackes | (Lahrtz, 2005) [Z]; (Holister, 2002) [R] | Anwendungsphase   | Bildung von Nanosilber-resistenten Bakterien (Gefährdung medizinischer Anwendung von Ag-NP z.B. bei Kathetern) [V] | (Lahrtz, 2005) [Z]  |
|                                 |   |  |  |                   | Systemische Resorption von Ag-NP über die Atemwege, [S] an Raten<br>→ Herstellung                                  | (Shinji Takenaka <i>et al.</i> , 2001) [J]; Abschnitt 3.2.1.1 |
|                                 |   |  |  |                   | Unbekannte Effekte bei Resorption und Akkumulation von Ag-NP im Körper <sup>41</sup> [M]                           | (Lahrtz, 2005) [Z]  |
| Optisch-funktionale Oberflächen | Beschichtung von Solarzellen mit Ag-NP  | -Selektion des nutzbaren Wellenlängenbereiches<br>-Vermeidung unnötiger Aufwärmung<br>-Erhöhter Wirkungsgrad               | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]       | Entwicklungsphase | UV-Licht kann die chemische Bindung von gewissen Beschichtungen brechen [E]  | Helland (vgl. Appendix)                                       |
|                                 |   |  |  |                   | Systemische Resorption von Ag-NP über die Atemwege möglich, [S] an Raten<br>→ Herstellung                          | (Shinji Takenaka <i>et al.</i> , 2001) [J]; Abschnitt 3.2.1.1 |
|                                 |   |  |  |                   | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]   | Hett und Helland (vgl. Appendix)                              |

Tabelle 6: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Beschichtungen (Teil 1).

<sup>40</sup> Für die Bedeutung benutzter Abkürzungen sei auf Seite 59, zur Erklärung von Fachbegriffen auf Seite 61ff und für Aussagen der Experten auf Seite 65ff verwiesen.

<sup>41</sup> Die Konzentration der Ag<sup>+</sup>-Ionen liegt allerdings unterhalb der toxischen Grenze (Lahrtz, 2005).

| Applikationsbereich                | Indikatorprodukt   | Nutzen  | Literatur   | Entwicklungsstand                   | Gefährdungspotentiale   | Literatur  |
|------------------------------------|--|---|---|-------------------------------------|---|--|
| Elektrisch-funktionale Oberflächen | Antistatische Gehäusematerialien aus einer Ormo-cermatrix (organisch modifizierte Keramiken) mit CNT | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrisch leitende Schicht</li> <li>- Transparent</li> <li>- Gut verarbeitbar</li> <li>- Hart</li> </ul>  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Hightech im Verborgenen, 2004) [Z] | Entwicklungsphase                   | Schädigung von Lungengewebe durch eingeatmete CNT ([S] an Mäusen); analoge Effekte wie bei Asbest [A,V]<br>→ Herstellung und Entsorgung | (Vonarburg, 2003) [Z]; Tabelle 2; Abschnitt 3.2.1.1                |
|                                    |  |   |   |                                     | Transport adsorbierter Schadstoffe im Grundwasser durch CNT [V]   | (Vonarburg, 2003) [Z]; (Kleiner & Hogan, 2003) [J]                 |
|                                    |  |   |   |                                     | DNA windet sich um CNT, [S, M] in vitro   | (Zheng <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Hoet <i>et al.</i> , 2004a) [J] |
|                                    |  |   |   |                                     | SWCNT-analoge Effekte [A]   | Abschnitt 4.2.4  |
|                                    |  |   |   |                                     | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)                                   |
| Lacke und Kleber                   | Holzschutzanstrich mit ZnO-NP in der GO von 25 nm  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-UV-Schutz</li> <li>-Transparent</li> <li>-ZnO-Partikel sind photostabil</li> <li>-Fungizide Wirkung</li> <li>-Radikalbildung gehemmt, sodass organische Komponenten nicht geschädigt werden (nicht der Fall bei TiO<sub>2</sub>)</li> </ul> | (Bühler AG, 2005) [I]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]               | Anwendungsphase                     | Inhalative Aufnahme bei Herstellung <sup>42</sup>   | (Bühler AG, 2005) [I]  |
|                                    |  |   |   |                                     | Inhalative Aufnahme von ZnO-NP bei Lackierungsarbeiten  | Abschnitt 3.2.1.1  |
|                                    |  |   |   |                                     | Allergien möglich [M]   | (Bühler AG, 2005) [I]  |
| Tribologische Schutzschichten      | Hartstoff-Nanokomposit-schichten aus Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> im Maschinen- und Fahrzeugbau    | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Weniger Reibungsverluste</li> <li>-Geringere Abnutzung</li> </ul>   | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (RTD info, 2003) [I]                | Entwicklungsphase / Anwendungsphase | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)                                   |

**Tabelle 7: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Beschichtungen (Teil 2).**
<sup>42</sup> Herstellung durch Trockenmahlung (Bühler AG, 2005).

| Applikationsbereich         | Indikatorprodukt   | Nutzen   | Literatur   | Entwicklungsstand             | Gefährdungspotentiale   | Literatur  |
|-----------------------------|--|--|---|-------------------------------|---|--|
| Mechanische Schutzschichten | Kratzschutzbeschichtungen mit einer Ormo-cermatrix (organisch modifizierte Keramiken)                            | -Kratzschutzbeschichtung für Polymer- und Metalloberflächen<br>-Geringe optische Streuverluste<br>-Hydrophobizität lässt sich einstellen | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (TAB, 2004) [R]; (Holister, 2002) [R]; (Beck, 2004) [Z] | Anwendungsphase <sup>43</sup> | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)   |
| Benetzungsverhalten         | Wasser- und schmutzabweisende Pkw-Scheiben und -Spiegel (fluoralkylhaltige Silane)                               | -Verschmutzungsschutz durch Ausnützung des Lotuseffektes<br>-Gleichzeitig (ultra)hydrophob und oleophob                                  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Hightech im Verborgenen, 2004) [Z]                     | Entwicklungsphase             | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)   |
| Chemische Schutzschichten   | Diffusionsschutzschichten bei PET-Flaschen und Lebensmittelverpackungen (SiO <sub>2</sub> und TiO <sub>2</sub> ) | -Verhindert Gasdiffusion (verlängert Haltbarkeit)<br>-Transparent<br>-Mechanisch flexibel<br>-Lebensmittelverträglich                    | (TAB, 2004) [R]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]   | Anwendungsphase               | Orale Resorption von TiO <sub>2</sub> - und SiO <sub>2</sub> -NP bei Zersetzung des Matrixmaterials möglich [S]   | Abschnitt 3.2.1.2  |
|                             |  |  |   |                               | TiO <sub>2</sub> -NP führen zu Hydroxyl-Radikal-Bildung <sup>44</sup> (DNA-Schädigung) und Zytotoxizität bei Bestrahlung mit UVA, [S, M] an Ratten, Hamstern und in vitro | (Dick <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Uchino <i>et al.</i> , 2002) [J]; (Luther, 2004) [R] |
|                             |  |  |   |                               | TiO <sub>2</sub> -NP adsorbieren Myeloperoxidase (MPO), [S] in vitro  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]   |
|                             |  |  |   |                               | Aktivierung des Immunsystems durch TiO <sub>2</sub> - und SiO <sub>2</sub> -NP, [S] an Mäusen   | (Granum <i>et al.</i> , 2001) [J]  |
|                             |  |  |   |                               | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)   |

**Tabelle 8: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Beschichtungen (Teil 3).**
<sup>43</sup> Z.B. kratzfeste Lackierung bei Mercedes-Benz (Credit Suisse, 2005).

<sup>44</sup> Gemäss Royal Society (2004) und SCCNFP (1999) senken *Coatings* gegen Agglomeration die Bildung von freien Radikalen.

## 4.2.2 Katalyse

| Applikationsbereich                             | Indikatorprodukt   | Nutzen   | Literatur  | Entwicklungsstand                   | Gefährdungspotentiale   | Literatur   |
|---|--|--|--|-------------------------------------|---|---|
| Katalytisch wirksame Nanopartikel <sup>45</sup> | Wasseraufbereitung mit TiO <sub>2</sub> -NP (Licht, Sauerstoff und Wasser führen zu Hydroxyl-Radikalen) oder Ag-NP (antibakterielle Wirkung) | -Zerstörung toxischer Stoffe<br>-Zerstörung von Mikroorganismen  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (TAB, 2004) [R]; (Vonarburg, 2003) [Z]   | Entwicklungsphase / Anwendungsphase | Filterung der NP ungenügend [M]   | (Hett, 2005) [I]  |
|   |  |  |  |                                     | Orale Resorption möglich [S]  | Abschnitt 3.2.1.2   |
|   |  |  |  |                                     | TiO <sub>2</sub> -NP adsorbieren Myeloperoxidase (MPO), [S] in vitro  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]                            |
|   |  |  |  |                                     | Aktivierung des Immunsystems durch TiO <sub>2</sub> -NP, [S] an Mäusen  | (Granum <i>et al.</i> , 2001) [J]                             |
|   |  |  |  |                                     | Katalyse ungewollter Reaktionen möglich [E]   | Helland (vgl. Appendix)                                       |
|   | <i>In situ</i> Remediation von Boden und Grundwasser durch katalytischen Fe-NP   | -Reduktion von Schadstoffen und Schwermetallen durch Fe-Oxidation<br>-Kostengünstiger als Bodenabtragungen<br>-Keine bleibenden Veränderungen (Fe-NP lösen sich innert Wochen auf)<br>-Beseitigung der Schadstoffe unabhängig von deren Bioverfügbarkeit | (W. Zhang, 2003) [J]; (National Science Foundation (NSF), 2003) [I]; (Masciangioli & Zhang, 2003) [I]; (Elliott & Zhang, 2001) [J]; (Wang & Zhang, 1997) [J]; (Holister, 2002) [I] | Entwicklungsphase                   | Transformation gewisser Schadstoffe in toxischere Verbindungen [M], Katalyse ungewollter Reaktionen möglich [E]           | (W. Zhang, 2003) [J]; Helland (vgl. Appendix)                 |
|   |  |  |  |                                     | Unbekannte ökologische Risiken <sup>46</sup> [V, E]   | (Dowling, 2004) [J]; (Helland, 2004) [T]; Hett und Helland    |
|   |  |  |  |                                     | Systemische Resorption von Fe-NP über die Atemwege [M] → Herstellung der Lösungen   | (Shinji Takenaka <i>et al.</i> , 2001) [J]; Abschnitt 3.2.1.1 |
|   |  |  |  |                                     | Mögliche Akkumulation von Fe im Gehirn könnte neurodegenerative Erkrankungen (z.B. Alzheimer oder Parkinson) auslösen [M] | (Hett, 2004) [R]; (Langenbach, 2004) [Z]                      |
|   |  |  |  |                                     | Poly-L-lysine modifizierte FeO <sub>x</sub> -NP können als nicht-viraler Gen-Carrier agieren, [S] in vitro                | (Xiang <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Helland, 2004) [T]         |

**Tabelle 9: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Katalyse (Teil 1).**

<sup>45</sup> Katalytische Nanopartikel bilden eines der wichtigsten Applikationsfelder der Nanotechnologie.

<sup>46</sup> Dowling plädiert gegen einen Einsatz von NP zur Remediation von Boden und Grundwasser solange Abklärungen zu den ökologischen Folgen ausstehen.

| Applikationsbereich            | Indikatorprodukt   | Nutzen  | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale   | Literatur     |
|--------------------------------|--|---|--|-------------------|---|---------------|
| Membrane und nanoporöse Filter | Nanoporöse Partikelfilter für Dieselmotorkonzepte                  | -Neue Dieselmotoren haben weniger Russpartikel total, aber dafür mehr nanoskalige, die mit neuen Filtern beseitigt werden können  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]                     | Entwicklungsphase | Keine Aussagen von Experten, keine Anhaltspunkte in der Literatur | keine Angaben |
| Adsorptionsmittel              | Chromatographische Säulen (z.B. Polymere hergestellt mittels MIPs) | -Erhöhte Selektivität (z.B. Unterscheidung der Chiralität)<br>-Maximierung der Grenzfläche zwischen stationärer und mobiler Phase | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B];<br>(TAB, 2004) [R] | Forschungsphase   | Keine Aussagen von Experten, keine Anhaltspunkte in der Literatur | keine Angaben |

**Tabelle 10: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Katalyse (Teil 2).**

### 4.2.3 Energietechnik

| Applikationsbereich | Indikatorprodukt   | Nutzen   | Literatur  | Entwicklungsstand                   | Gefährdungspotentiale  | Literatur   |
|---------------------|--|--|--|-------------------------------------|--|---|
| Photovoltaik        | Farbstoffsolarzellen (nanokristalline Elektroden aus TiO <sub>2</sub> kombiniert mit Farbstoffschichten) | -Erhöhte Lichtausbeute<br>-Besserer Elektronentransfer vom Lichtabsorber zur Elektrode<br>-Höherer Wirkungsgrad<br>-Kostengünstige Herstellung | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister, 2002) [R]; (Arnall, 2003) [R]                                       | Forschungsphase / Entwicklungsphase | Chronische und akute Lungenentzündungen sowie Lungenkrebs bei Inhalation von TiO <sub>2</sub> -NP, [S, M] an Ratten, Mäusen und Hamstern<br>→ Herstellung und Entsorgung | (Höhr <i>et al.</i> , 2002) [J]; Bermudaz <i>et al.</i> , 2004) [J]; (D.B. Warheit, 2004b) [J]; (Borm & Kreyling, 2004) [J]; Abs. 3.2.1.1 |
|                     |  |  |  |                                     | Störung der alveolaren Makrophagen, [S] in vitro   | (Renwick <i>et al.</i> , 2001) [J]  |
|                     |  |  |  |                                     | Aktivierung des Immunsystems durch TiO <sub>2</sub> -NP, [S] an Mäusen   | (Granum <i>et al.</i> , 2001) [J]   |
|                     |  |  |  |                                     | TiO <sub>2</sub> -NP adsorbieren Myeloperoxidase (MPO), [S] in vitro   | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]  |
|                     |  |  |  |                                     | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendungen) [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)  |
| Brennstoffzellen    | Wasserstoffspeicherung mittels CNT   | -Hohe Speicherdichte<br>-Keine Druckkessel (vs. Druckwasserstoffspeicher)<br>-Keine Verluste durch Abdampfen (vs. Flüssigwasserstoffspeicher)  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister <i>et al.</i> , 2003) [R]; (Holister, 2002) [R]; (Service, 1998) [J] | Forschungsphase                     | Schädigung von Lungengewebe durch eingeatmete CNT ([S] an Mäusen); analoge Effekte wie bei Asbest [A,V]<br>→ Herstellung und Entsorgung                                  | (Vonarburg, 2003) [Z]; Tabelle 2; Abschnitt 3.2.1.1   |
|                     |  |  |  |                                     | Transport adsorbierter Schadstoffe im Grundwasser durch CNT [V]  | (Vonarburg, 2003) [Z]; (Kleiner & Hogan, 2003) [J]  |
|                     |  |  |  |                                     | DNA windet sich um CNT, [S, M] in vitro  | (Zheng <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Hoet <i>et al.</i> , 2004a) [J]  |
|                     |  |  |  |                                     | SWCNT-analoge Effekte [A]  | Abschnitt 4.2.4   |
|                     |  |  |  |                                     | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendung) [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)  |

Tabelle 11: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Energietechnik (Teil 1).

| Applikationsbereich                  | Indikatorprodukt   | Nutzen   | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale   | Literatur  |
|--------------------------------------|--|--|--|-------------------|---|--|
| Akkumulatoren und Superkondensatoren | Multilagen-Keramik-kondensatoren (MLCC) aus NP (Fe, Ni, Nitride und Carbide) gesinterte Elektroden | -Erhöhte elektrische Leitfähigkeit und Leistung<br>-Erhöhte Lade- und Entladeraten (bis Faktor 100) sowie grössere Ladedichte                              | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Arnall, 2003) [R]; (Holister, 2002) [R] | Entwicklungsphase | Inhalative Exposition von Ni-NP führt zu starker Lungenentzündung und Zytotoxizität sowie oxidativem Stress, [S] an Ratten und in vitro<br>→ Herstellung und Entsorgung | (Q. Zhang <i>et al.</i> , 1998) [J]; (Dick <i>et al.</i> , 2003) [J] ; Abschnitt 3.2.1.1 |
|                                      |  |  |  |                   | Ni-NP kann freie Hydroxyl-Radikale bilden, welche DNA schädigen, [S] an Ratten und in vitro   | (Q. Zhang <i>et al.</i> , 1998) [J]; (Dick <i>et al.</i> , 2003) [J]                     |
|                                      |  |  |  |                   | Systemische Resorption von Fe-NP über die Atemwege [M]<br>→ Herstellung und Entsorgung  | (Shinji Takenaka <i>et al.</i> , 2001) [J] ; Abschnitt 3.2.1.1                           |
|                                      |  |  |  |                   | Mögliche Akkumulation von Fe im Gehirn könnte neurodegenerative Erkrankungen (z.B. Alzheimer oder Parkinson) auslösen [M]   | (Hett, 2004) [R]; (Langenbach, 2004) [Z]   |
|                                      |  |  |  |                   | Poly-L-lysine modifizierte FeO <sub>x</sub> -NP können als nicht-viraler Gen-Carrier agieren, [S] in vitro  | (Xiang <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Helland, 2004) [T]                                    |
|                                      |  |  |  |                   | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendung) [E]   | Hett und Helland (vgl. Appendix)   |
| Festtreibstoff                       | Al-NP als Komponenten in Festtreibstoff  | -Höhere Abbrandrate<br>-Verbesserte Durchmischung für schnelle chemische Umsetzung<br>-Verminderte Schadstoffemissionen bei Nutzung fossiler Energieträger | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister, 2002) [R]                     | Entwicklungsphase | Keine applikationsspezifische Diskussion [E]  | Hett und Helland (vgl. Appendix)   |

Tabelle 12: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Energietechnik (Teil 2).



| Applikationsbereich             | Indikatorprodukt  | Nutzen   | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale   | Literatur  |
|---------------------------------|---|--|--|-------------------|---|--|
| Stromtransport und -speicherung | Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) mit Supraleitern aus CNT | -Supraleitung bei Raumtemperatur möglich <sup>47</sup><br>-Laden und Entladen elektrischer Energie mit sehr geringen Verlusten | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B];<br>(TAB, 2004) [R] | Forschungsphase   | Schädigung von Lungengewebe durch eingeatmete CNT ([S] an Mäusen); analoge Effekte wie bei Asbest [A,V]<br>→ Herstellung und Entsorgung | (Vonarburg, 2003) [Z];<br>Tabelle 2; Abschnitt 3.2.1.1             |
|                                 |   |  |  |                   | Transport adsorbierter Schadstoffe im Grundwasser durch CNT [V]   | (Vonarburg, 2003) [Z];<br>(Kleiner & Hogan, 2003) [J]              |
|                                 |   |  |  |                   | DNA windet sich um CNT, [S, M] in vitro   | (Zheng <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Hoet <i>et al.</i> , 2004a) [J] |
|                                 |   |  |  |                   | SWCNT-analoge Effekte [A]   | Abschnitt 4.2.4  |
|                                 |   |  |  |                   | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendung) [E]   | Hett und Helland (vgl. Appendix)                                   |

Tabelle 13: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Energietechnik (Teil 3).

<sup>47</sup> Die Supraleitfähigkeit von Nanoröhren bei Raumtemperatur ist umstritten (TAB, 2004, p. 53).

### 4.2.4 Konstruktion

| Applikationsbereich            | Indikatorprodukt                         | Nutzen  | Literatur   | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale  | Literatur   |
|--------------------------------|--|---|---|-------------------|--|---|
| Kunststoffe und Nanofüllstoffe | Leichtbau (SWCNT-verstärkte Materialien) | -Geringere Dichte<br>-Verbesserte mechanische Eigenschaften<br>-Höhere Hitzebeständigkeit | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B];<br>(Holister, 2002) [R];<br>(Service, 1998) [J] | Forschungsphase   | Lungentoxizität: Granulome <sup>48</sup> , starke Entzündungen und Nekrose, [S, M, A] an Mäusen und Ratten<br>→ Herstellung <sup>49</sup> und Entsorgung | (Lam <i>et al.</i> , 2004) [J]; (D. B. Warheit <i>et al.</i> , 2004) [J]; (Dreher, 2004) [J]; (Service, 2003) [J]; (Dagani, 2003) [J]; (Maynard <i>et al.</i> , 2004) [J]; Tabelle 2; Abschnitt 3.2.1.1 |
|                                |  |   |   |                   | Zytotoxizität und oxidativer Stress durch CNT-induzierte Bildung freier Radikale, [S] in vitro   | (Shvedova <i>et al.</i> , 2003) [J]   |
|                                |  |   |   |                   | Dermale Toxizität von SWCNT, [S] in vitro  | (Shvedova <i>et al.</i> , 2003) [J]   |
|                                |  |   |   |                   | Analoge Effekte wie bei (MW)CNT [A]  | Abschnitt 4.2.3   |
|                                |  |   |   |                   | Keine applikationsspezifische Diskussion (gebundene Matrix) <sup>50</sup> [E]  | Helland (vgl. Appendix)   |

**Tabelle 14: Gesundheits- und Umweltrisiken im Konstruktionsbereich (Teil 1).**

<sup>48</sup> Die Resultate der entsprechenden Untersuchungen werden gegenwärtig kontrovers diskutiert, so könnten die Granulome auch von Metallen, die zur Katalyse des SWCNT-Wachstums verwendet werden und damit ebenfalls präsent waren, verursacht worden sein (Colvin, 2003; Dagani, 2003; Hoet et al. 2004b).

<sup>49</sup> An Arbeitsplätzen wurden SWCNT-Expositionen bereits nachgewiesen (Maynard et al. 2004).

<sup>50</sup> Ausschnitt aus dem Experteninterview mit Åsgeir Helland (Appendix A.2.3): “As long as they are stable, there are no direct risks assumed. However, if it comes to mechanical wear, the situation is different. For instance, in tires they use multi-walled carbon nanotubes. Mark Wiesner from the US has shown that the proportion of nanotubes in run-off water is coherent with the amount of gas consumption in the corresponding area. This illustrates the inherent problems of composite materials: These materials can deteriorate and create what is referred to as nano-pollution. This can involve a wide array of effects from the capability of nanoparticles carrying other toxins or being toxic themselves over to persistency and bioaccumulation in the food chain. Especially if nano-composites are manufactured in a way, that nature cannot degrade them, you are most likely to run into problems.”

| Applikationsbereich         | Indikatorprodukt  | Nutzen  | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale   | Literatur                                  |
|-----------------------------|---|---|--|-------------------|---|--|
| Nanostrukturierte Keramiken | Superplastische Keramiken mit nanoskaligem Gefüge                   | -Keramik kann durch Heiss-schmieden in gewünschte Form gebracht werden  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]                     | keine Angaben     | Keine applikationsspezifische Diskussion (gebundene Matrix) [E]             | Helland (vgl. Appendix)                    |
| Bindebaustoffe              | Nano-Silica (SiO <sub>2</sub> -NP von 15 nm) in Hochleistungsbetons | -Erhöhte Dichte des Betons<br>-Höhere Druckfestigkeit<br>-Weniger Verschleiss und Erosion<br>-Tiefere Permeabilität | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B];<br>(TAB, 2004) [R] | Anwendungsphase   | Inhalative Resorption bei Herstellung, Abnutzung und Entsorgung denkbar [E] | Abschnitt 3.2.1.1; Helland (vgl. Appendix) |
|                             |   |   |  |                   | Aktivierung des Immunsystems durch SiO <sub>2</sub> -NP, [S] an Mäusen      | (Granum <i>et al.</i> , 2001) [J]          |
|                             |   |   |  |                   | Keine applikationsspezifische Diskussion (NP in Matrix gebundene) [E]       | Helland (vgl. Appendix)                    |

Tabelle 15: Gesundheits- und Umweltrisiken im Konstruktionsbereich (Teil 2).

### 4.2.5 Nanosensoren und Aktuatoren

| Applikationsbereich    | Indikatorprodukt                   | Nutzen  | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale   | Literatur   |
|------------------------|------------------------------------|---|--|-------------------|---|---|
| Sensoren <sup>51</sup> | Konduktometrischer SWCNT-Gassensor | -Hochaufgelöste Konzentrationsbestimmung von Gasen<br>-Erhöhte Sensitivität<br>-Kürzere Messzeiten        | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (TAB, 2004) [R]; (Kong <i>et al.</i> , 2000) [J]; (Masciaglioli & Zhang, 2003) [J] | Forschungsphase   | Lungentoxizität: Granulome, starke Entzündungen und Nekrose, [S, M, A] an Mäusen und Ratten<br>→ Herstellung und Entsorgung | (Lam <i>et al.</i> , 2004) [J]; (D. B. Warheit <i>et al.</i> , 2004) [J]; (Dreher, 2004) [J]; (Service, 2003) [J]; (Dagani, 2003) [J]; (Maynard <i>et al.</i> , 2004) [J]; Tabelle 2; Abschnitt 3.2.1.1 |
|                        |                                    |   |  |                   | Zytotoxizität und oxidativer Stress durch CNT-induzierte Bildung freier Radikale, [S] in vitro                              | (Shvedova <i>et al.</i> , 2003) [J]   |
|                        |                                    |   |  |                   | Dermale Toxizität von SWCNT, [S] in vitro   | (Shvedova <i>et al.</i> , 2003) [J]   |
|                        |                                    |   |  |                   | Analoge Effekte wie bei (MW)CNT [A]   | Abschnitt 4.2.3   |
|                        |                                    |   |  |                   | „Verminderte Bedeutung des Präventionsgedankens“ infolge verbesserter Messtechniken [E]                                     | Helland (vgl. Appendix)   |
| Aktuatoren             | Biomolekulare Motoren              | Winzige Nanomaschinen, welche z.B. über Konzentrationsgradienten angetrieben werden (Beispiel: F1-ATPase) | (TAB, 2004) [R]; (Nanoword, 2000) [I]  | Vision            | Autonome Vermehrung, <i>grey goo</i> [M]  | (Vonarburg, 2003) [Z]   |

Tabelle 16: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich von Sensoren und Aktuatoren.

<sup>51</sup> Im Bereich der Sensorik gibt es beliebig viele weitere Applikationen. Dies ist teils dadurch bedingt, dass die Vermessung von Nanostrukturen Messmethoden mit entsprechender Genauigkeit erfordert.

## 4.2.6 Informationstechnologie

| Applikationsbereich       | Indikatorprodukt  | Nutzen  | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale  | Literatur  |
|---------------------------|---|---|--|-------------------|--|--|
| Elektronische Bauelemente | Quantum Cellular Automata (QCA): gekoppelte Quantenpunkte (QDs) | -Tieferer Energieverbrauch<br>-Höhere Rechengeschwindigkeit<br>-Geringerer Platzbedarf  | (TAB, 2004) [R]; (Bimberg, 1998) [I]; (Walus <i>et al.</i> , 2003) [I]   | Forschungsphase   | Systemische Resorption von Cd-NP über die Atemwege möglich, erhöhte Konzentrationen in Leber und Milz, [S] an Ratten<br>→ Herstellung und Entsorgung | (S. Takenaka <i>et al.</i> , 2004) [J]; Abschnitt 3.2.1.1          |
|                           |   |   |  |                   | QDs mit CdSe-Kern wirken zytotoxisch, [S] an Leberzellen in vitro  | (Derfus <i>et al.</i> , 2004) [J]                                  |
|                           |   |   |  |                   | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendung); eventuell Exposition während Herstellung und Entsorgung [E]                       | Helland (vgl. Appendix)  |
| Anzeigesysteme            | Feldemissionsdisplays (FED) mit CNT                             | -Geringere Leistungsaufnahme und bessere Umweltverträglichkeit<br>-Breitere Sichtwinkel<br>-Hohe Brillanz<br>-Platzeinsparung (flacher)<br>-Schnellere Schaltzeiten | (Gröning, 2004) [Z]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister <i>et al.</i> , 2003) [R]; (Vonarburg, 2003) [Z]; (Holister, 2002) [R]; (Service, 1998) [J] | Entwicklungsphase | Schädigung von Lungengewebe durch eingeatmete CNT ([S] an Mäusen); analoge Effekte wie bei Asbest [A,V]<br>→ Herstellung und Entsorgung              | (Vonarburg, 2003) [Z]; Tabelle 2; Abschnitt 3.2.1.1                |
|                           |   |   |  |                   | Transport adsorbierter Schadstoffe im Grundwasser durch CNT [V]  | (Vonarburg, 2003) [Z]; (Kleiner & Hogan, 2003) [J]                 |
|                           |   |   |  |                   | DNA windet sich um CNT, [S, M] in vitro  | (Zheng <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Hoet <i>et al.</i> , 2004a) [J] |
|                           |   |   |  |                   | SWCNT-analoge Effekte [A]  | Abschnitt 4.2.4  |
|                           |   |   |  |                   | Event. Exposition während der Herstellung und Entsorgung [E]   | Hett und Helland (vgl. Appendix)                                   |

Tabelle 17: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Informationstechnologien (Teil 1).

| Applikationsbereich | Indikatorprodukt   | Nutzen                    | Literatur       | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale   | Literatur   |
|---------------------|--|---------------------------|-----------------|-------------------|---|---|
| Kopierschutz        | Fotokopierschutz :Trommel mit Fullerenen zur Übertragung von UV-sichtbaren Wasserzeichen | verbesserter Kopierschutz | (TAB, 2004) [R] | Entwicklungsphase | Fullerene könnten Gehirn schädigen ([S] an Fischen und Wasserflöhen) und wirken zytotoxisch ([S] in vitro); möglicherweise persistent und somit Bioakkumulation [E] | (E. Oberdörster, 2004) [J]; (Weiss, 2004) [Z]; (Vonarburg, 2004) [Z]; (ETC Group, 2004b) [R]; Helland (vgl. Appendix) |
|                     |  |                           |                 |                   | Genetische Veränderung durch Fullerene in Leberzellen von Fischen [M]   | (Feder, 2004) [Z]   |
|                     |  |                           |                 |                   | Nierenschädigung bei tiefen Fulleren-Konzentrationen [M]  | (Colvin, 2003) [J]  |
|                     |  |                           |                 |                   | Langsame Ausscheidung ([S] an Ratten), chronische Toxizität von Fullerenen [V]  | (Yamago <i>et al.</i> , 1995) [J]   |
|                     |  |                           |                 |                   | Bestimmte Fullerene sind phototoxisch, [S, M] in vitro  | (Yang <i>et al.</i> , 2002) [J]; (Tokuyama <i>et al.</i> , 1993) [J]; (Colvin, 2003) [J]                              |
|                     |  |                           |                 |                   | Hemmung von Monooxygenase und Mitochondrienschädigung bei intravenöser Verabreichung, [S, M] an Mäusen und in vitro   | (Ueng <i>et al.</i> , 1997) [J]; (Colvin, 2003) [J]   |
|                     |  |                           |                 |                   | Toxizität von Fullerenen ([S] an Ratten) wobei diese in hohem Masse abhängig von der Oberflächenderivatisierung ist, [S] in vitro                                   | (Rajagopalan <i>et al.</i> , 1996) [J]; (Sayes <i>et al.</i> , 2004) [J]  |
|                     |  |                           |                 |                   | Embryotoxizität von Fullerenen, [S] in vitro und an Mäusen  | (Tsuchiya <i>et al.</i> , 1996) [J]   |

Tabelle 18: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Informationstechnologien (Teil 2).

| Applikationsbereich      | Indikatorprodukt    | Nutzen   | Literatur  | Entwicklungsstand        | Gefährdungspotentiale  | Literatur                                    |
|--------------------------|---------------------|--|--|--------------------------|--|--|
| Fortsetzung Kopierschutz |                     |  |  |                          | Fulleren-induzierte Bildung von Superoxid-Anionen, welche die Zellmembran zerstören, [S] in vitro                              | (Sayes <i>et al.</i> , 2004) [J]             |
|                          |                     |  |  |                          | Adsorption von extrazellulären Proteinen an Fullerenen (Funktionsstörung) [M]  | (Ausman, 2004) [I]                           |
|                          |                     |  |  |                          | Transformation untoxischer Fulleren-coatings in toxische unter unkontrollierten Umweltbedingungen [V]                          | Helland (vgl. Appendix); (Helland, 2004) [T] |
|                          |                     |  |  |                          | Mögliche Störung mikrobieller Gemeinschaften [E]   | Helland (vgl. Appendix)                      |
|                          |                     |  |  |                          | Exposition während der Herstellung und Entsorgung [E]  | Helland (vgl. Appendix)                      |
| Neue Architekturen       | DNA-Computing       | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Hohe Speicherdichte</li> <li>-Parallele Informationsverarbeitung (z.B. für Bildverarbeitung und Simulationen)</li> <li>-Geringer Energieverbrauch</li> <li>-Biomedizinische Anwendungen denkbar (z.B. Bildung von Medikamenten in Zellen)</li> </ul> | (Kari, 2001) [J]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Adleman, 1994) [J]; (Linial <i>et al.</i> , 1995) [J]; (Warren, 2004) [J] | Vision / Forschungsphase | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendung); eventuell Exposition während Herstellung und Entsorgung [E] | Helland (vgl. Appendix)                      |
| Datenspeicher            | Magnetic RAM (MRAM) | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Schneller Speicher</li> <li>-Dauerhafter Speicher</li> <li>-Niedriger Energieverbrauch</li> </ul>  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister, 2002) [R]; (Dambeck, 2005) [Z]  | Entwicklungsphase        | Keine applikationsspezifische Diskussion (geschlossene Anwendung); eventuell Exposition während Herstellung und Entsorgung [E] | Helland (vgl. Appendix)                      |

Tabelle 19: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Informationstechnologien (Teil 3).

### 4.2.7 Medizin, Kosmetik und Lebensmittel

| Applikationsbereich             | Indikatorprodukt   | Nutzen  | Literatur   | Entwicklungsstand    | Gefährdungspotentiale   | Literatur   |
|---------------------------------|--|---|---|----------------------|---|---|
| Diagnostik und Analytik         | Fe-NP (Magnetit/ $\gamma$ -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) als Kontrastmittel für Magnetresonanztomographie | Erhöhter Kontrast bei bildgebenden Verfahren                    | (Salata, 2004) [J]; (TAB, 2004) [R]; (Kaim <i>et al.</i> , 2002) [J]                        | Anwendungsphase      | Mögliche Akkumulation von Fe im Gehirn könnte neurodegenerative Erkrankungen (z.B. Alzheimer oder Parkinson) auslösen [M] | (Hett, 2004) [R]; (Langenbach, 2004) [Z]                      |
|                                 |  |   |   |                      | Poly-L-lysine modifizierte FeO <sub>x</sub> -NP können als nicht-viraler Gen-Carrier agieren, [S] in vitro                | (Xiang <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Holland, 2004) [T]         |
|                                 |  |   |   |                      | Systemische Resorption von Fe-NP über die Atemwege [M] → Herstellung  | (Shinji Takenaka <i>et al.</i> , 2001) [J]; Abschnitt 3.2.1.1 |
| Implantate                      | Beschichtung aus nanoskaligem Hydroxylapatit auf Titanimplantaten  | Verbesserte Biokompatibilität                                   | (Salata, 2004) [J]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister, 2002) [R]                | Verbreitung am Markt | Bildung zytotoxischer Partikel, die teils zu Entzündungen und Knochenverlust führen [M]                                   | (Colvin, 2003) [J]  |
|                                 |  |   |   |                      | Ti-NP (Abrieb <sup>52</sup> ) hemmen Zellfunktionen und Gen-Expression von Osteoblasten, [S] in vitro                     | (Kwon <i>et al.</i> , 2001) [J]                               |
|                                 |  |   |   |                      | Hydroxylapatit-NP hemmen Leberkrebszellen und lösen Apoptosis aus, [S] in vitro   | (Liu <i>et al.</i> , 2003) [J]                                |
| Zerstörung biologischen Gewebes | Anti-Tumor-Therapeutika mit magnetischen NP (Magnetit/ $\gamma$ -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )            | Selektive Tötung von Krebszellen durch magnetische Hyperthermie | (TAB, 2004) [R]; (Salata, 2004) [J]; (Berry <i>et al.</i> , 2004) [J]; (Holister, 2002) [R] | Entwicklungsphase    | Nicht vollständige Ausscheidung magnetischer Partikel, sodass erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern [V]         | (TAB, 2004) [R]   |
|                                 |  |   |   |                      | Mögliche Akkumulation von Fe im Gehirn könnte neurodegenerative Erkrankungen (Alzheimer oder Parkinson) auslösen [M]      | (Hett, 2004) [R]; (Langenbach, 2004) [Z]                      |
|                                 |  |   |   |                      | Poly-L-lysine modifizierte FeO <sub>x</sub> -NP können als nicht-viraler Gen-Carrier agieren, [S] in vitro                | (Xiang <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Holland, 2004) [T]         |

**Tabelle 20: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Medizin (Teil 1).**

<sup>52</sup> Keine direkte Folge aus nanotechnologischer Modifikation.



| Applikationsbereich  | Indikatorprodukt  | Nutzen   | Literatur   | Entwicklungsstand                               | Gefährdungspotentiale  | Literatur                              |
|--|---|--|---|---|--|--|
| Transport und Dosierung von Wirkstoffen  | Drug Targeting mit NP   | Allgemeines:<br>-Schutz vor vorzeitigem Abbau<br>-Erhöhte Löslichkeit und Absorption<br>-Feine Dosierung über längere Zeitabschnitte<br>-Reduzierte Nebenwirkungen<br>-Orale Verabreichung möglich<br>-Überwindung der Blut-Hirnschranke grundsätzlich möglich<br>-Gezielte Medikation (z.B. gegen Brustkrebszellen)<br>-Neuartige Therapiemöglichkeiten (z.B. Fullerenderivate gegen HIV, welche Immunreaktion des Körpers umgehen) | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B];<br>(Holister, 2002) [R];<br>(Kreuter, 2001) [J];<br>(Kreuter, 1991) [J];<br>(Tröster <i>et al.</i> , 1990) [J];<br>(Amiji & J.S., 2002) [J];<br>(Tomellini & Monk, 2005) [J];<br>(Rajagopalan <i>et al.</i> , 1996) [J] | Forschungsphase / Entwicklungsphase             | Allgemein:<br>NP können unerwünschte Transporte von Wirkstoffen über andere biologische Barrieren favorisieren [V] | (TAB, 2004) [R]                        |
|  |   |  |   |   | Allgemein:<br>Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) könnten an Immunabwehr vorbeigeschleust werden [V]                  | (Haas, 2003) [Z]                       |
|  |   |  |   |   | Allgemein:<br>Anlagerung von NP an Proteine, welche durch Strukturveränderungen Thrombosen auslösen könnten [V]    | (Baumgartner <i>et al.</i> , 2003) [R] |
|  |   |  |   |   | Allgemein:<br>Möglicherweise Probleme der Persistenz und Akkumulation [E]  | Helland (vgl. Appendix)                |
|  | Beispiel 1: PEGylated oder polysorbate 80-coated polybutylcyanoacrylate [S] | -Milz-targeting<br>-Überwindung der Blut-Hirnschranke  | (Peracchia <i>et al.</i> , 1998) [J];<br>(Schroeder <i>et al.</i> , 2000) [J];<br>(Kreuter <i>et al.</i> , 2002) [J];<br>(Kreuter <i>et al.</i> , 2003) [J]   | Forschungsphase                                 | Zytotoxizität des Carrier-NP PEGylated polycyanoacrylat, [S] an Mäusen   | (Peracchia <i>et al.</i> , 1998) [J];  |
|  |   |  |   |   | Toxizität und teilweise Mortalität des Carrier-NP polysorbate 80-coated polybutylcyanoacrylate, [S] an Mäusen      | (Olivier <i>et al.</i> , 1999) [J]     |
| Beispiel 2: Carrier poly(ethylene glycol) (PEG)-coated biodegradable nanospheres, (PLGA) | -Kontrollierte Dosierung<br>-Weniger Nebenwirkungen dank tieferen Dosen     | (Quellec <i>et al.</i> , 1999) [J];<br>(Panagi <i>et al.</i> , 2001) [J]   | Forschungsphase   | PLGA-NP können Gene transferieren, [S] in vitro | (Prabha <i>et al.</i> , 2002) [J]  |  |

Tabelle 21: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Medizin (Teil 2).

| Applikationsbereich    | Indikatorprodukt   | Nutzen   | Literatur  | Entwicklungsstand  | Gefährdungspotentiale   | Literatur  |
|------------------------|--|--|--|--|---|--|
| Kosmetik <sup>53</sup> | Sonnenschutzmittel mit TiO <sub>2</sub> -NP in der GO 25 nm (bestimmte Produkte enthalten auch ZnO-NP) | -Verbesserte und breitere Absorption der UV-Strahlung<br>-Transparent<br>-Hautverträglicher (hypoallergen): weniger Zusatz- und Konservierungsstoffe | (Hett, 2004) [R]; (Luther, 2004) [R]; (Langenbach, 2004) | Verbreitung am Markt (diverse Produkte von La Roche Posay, L'Oréal, BASF etc.) | Dermale Resorption und Akkumulation von TiO <sub>2</sub> -NP kontrovers diskutiert; Tests nur mit intakter Haut <sup>54</sup> → keine Daten für Sonnenbrand [S, E]                        | Diskussion und Abbildung 3 in Abschnitt 3.2.1.3; Helland (vgl. Appendix)               |
|                        |  |  |  |  | TiO <sub>2</sub> -NP führen zu Hydroxyl-Radikal-Bildung und Zytotoxizität bei Bestrahlung mit UVA, [S, M] an Ratten, Hamstern und in vitro  | (Dick <i>et al.</i> , 2003) [J]; (Uchino <i>et al.</i> , 2002) [J]; (Luther, 2004) [R] |
|                        |  |  |  |  | Aktivierung des Immunsystems durch TiO <sub>2</sub> -NP, [S] an Mäusen  | (Granum <i>et al.</i> , 2001) [J]  |
|                        |  |  |  |  | Akkumulation von TiO <sub>2</sub> -NP in der Haut könnte Schwelle für Allergien senken [V]  | (Menzel <i>et al.</i> , 2004) [J]  |
|                        |  |  |  |  | TiO <sub>2</sub> -NP adsorbieren Myeloperoxidase (MPO), [S] in vitro  | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]   |
|                        |  |  |  |  | Durch Abwaschen der Mittel gelangen grosse Mengen TiO <sub>2</sub> -NP in die Umwelt; Transformation untoxischer <i>coatings</i> in toxische unter unkontrollierten Umweltbedingungen [E] | Helland (vgl. Appendix); (Helland, 2004) [T]   |
|                        |  |  |  |  | Inhalation von TiO <sub>2</sub> -NP bei der Herstellung [S]   | Abschnitt 3.2.1.1  |

Tabelle 22: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Kosmetik.

<sup>54</sup> Die zunehmende Funktionalisierung verwässert die Grenzen zwischen Arzneimittel und Kosmetika, wobei für letztere die Zulassungsverfahren weniger restriktiv sind. Auch werden dermatologischen Tests an gesunder Haut durchgeführt und berücksichtigen somit nicht allfällige Verletzungen oder Ausschläge (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004).

| Applikationsbereich     | Indikatorprodukt                                  | Nutzen  | Literatur   | Entwicklungsstand               | Gefährdungspotentiale  | Literatur  |
|-------------------------|---|---|---|---------------------------------|--|--|
| Ernährung <sup>55</sup> | <i>Functional Food: Nutrient Delivery Systems</i> | Gezielte Abgabe und erhöhte Verfügbarkeit von bioaktiven Substanzen (z.B. Vitamin E, Karotin, etc.) | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; Köhler <sup>56</sup> ; (ETC Group, 2004a) [R] | Entwicklungsphase <sup>57</sup> | Kaum Angaben erhältlich [E]  | Helland (vgl. Appendix); Köhler  |
|                         |   |   |   |                                 | Resorption von Nanopartikeln bis 500 nm über Nahrungsmittel möglich [M, S] <sup>58</sup> | (G. Oberdörster <i>et al.</i> , 2002) [J]; (Jani <i>et al.</i> , 1994) [J] |

**Tabelle 23: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Lebensmittel.**

<sup>55</sup> Neben modifizierten Lebensmitteln werden in diesem Bereich auch dazugehörige Herstellungsprozesse und Verpackungen diskutiert (ETC Group, 2004a).

<sup>56</sup> Auf Empfehlung von Åsgeir Helland wurde für den Ernährungsbereich zusätzlich telefonische Rücksprache mit Herrn Andreas Köhler geführt. Er ist seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der EMPA in St. Gallen und nahm an der Konferenz „*Nano4Food*“ am 20/21. Juni 2005 in Wageningen (NL) teil. Andreas Köhler befasst sich derzeit intensiv mit dem Bereich Nanofood; Resultate der Studie werden auf [www.nanologue.net](http://www.nanologue.net) veröffentlicht.

<sup>57</sup> Gemäss Köhler sind Informationen kaum zugänglich. Die Gruppe ECT führt eine Liste mit möglicherweise involvierten Unternehmen an (ETC Group, 2004a).

<sup>58</sup> Ältere Studien haben je nach Partikeltyp eine Ingestion von Teilchen bis 150 µm Durchmesser nachgewiesen (vgl. Volkheimer 1974).

## 4.2.8 Sicherheit und Rüstung

| Applikationsbereich                        | Indikatorprodukt                                      | Nutzen  | Literatur  | Entwicklungsstand <sup>59</sup> | Gefährdungspotentiale <sup>60</sup> | Literatur                        |
|--|---|---|--|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Militärische Plattformen und Trägersysteme | Panzerung mittels nanoskaligen Strukturwerkstoffen    | -Erhöhter Schutz vor äusseren Einwirkungen (z.B. Hitzebeständigkeit, Beschuss etc.)<br>-Verbesserte Zuverlässigkeit (z.B. weniger Korrosion, bruchfester etc.)<br>-Leichteres Material erhöht Flexibilität und Einsatzmöglichkeiten | (Altmann, 2004) [J]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]  | Unbekannt                       | Unbekannt [E]                       | Hett und Helland (vgl. Appendix) |
| Aufklärung                                 | Lab-on-a-chip-Systeme für Detektion von Kampfstoffen  | -Detektion von unbekanntem Kampfstoffen (durch Messung von zellulärem Stress)<br>-Miniaturisierung und Beschleunigung von Analyseprozessen  | (Pancrazio <i>et al.</i> , 1998) [J]; (Murday, 1999) [J]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Arnall, 2003) [R] | Unbekannt <sup>61</sup>         | Unbekannt [E]                       | Hett und Helland (vgl. Appendix) |
| Waffen und Munition                        | Panzerbrechende Munition aus nanokristallinem Wolfram | Ersatz für umstrittene Uranmunition   | (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Gspöner, 2002) [I]  | Unbekannt                       | Unbekannt [E]                       | Hett und Helland (vgl. Appendix) |
|  |   |   |  |                                 | Neue Zerstörungsmechanismen [M]     | (Altmann, 2004) [J]              |
|  |   |   |  |                                 | Terrorismus [M]                     | (Altmann, 2004) [J]              |
|  |   |   |  |                                 | Massenvernichtung [M]               | (Howard, 2002) [I]               |

Tabelle 24: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Rüstungsindustrie (Teil 1).

<sup>59</sup> Gemäss Hett und Helland findet die Forschung im Rüstungsbereich unter Ausschluss der Öffentlichkeit statt, sodass über den Entwicklungsstand lediglich spekuliert werden kann (vgl. Appendix A.1.3 und A.2.3). Infolge Bereitstellung grosser Budgetbeträge ist tendenziell von einer langfristigen Perspektive auszugehen.

<sup>60</sup> Gesundheits- und Umweltrisiken stehen bei militärischen Auseinandersetzungen erfahrungsgemäss nicht im Vordergrund.

<sup>61</sup> Andere Lab-on-a-chip-Systeme befinden sich gemäss Luther *et al.* (2005) und TAB (2004) bereits in der frühen Anwendungsphase.

| Applikationsbereich     | Indikatorprodukt  | Nutzen  | Literatur  | Entwicklungsstand | Gefährdungspotentiale                    | Literatur  |
|-------------------------|-------------------|---|--|-------------------|--|--|
| Ausrüstung von Soldaten | Spezialbekleidung | -Sensoren für Gesundheitsstatus, Dosierung von Medikamenten<br>-Energieeinspeisung aus der Körperbewegungen<br>-Verbesserter Schutz, unsichtbare Tarnung und Spezialschuhe<br>-Molekulare Nanodolche gegen Mikroorganismen<br>-Leichtere und stabilere kugelsichere Kleidung (mit CNT)<br>-Generelle Steigerung der menschlichen Leistungsfähigkeit | (Altmann, 2004) [J]; (Army Research Office (ARO), 2001) [I]; (MIT News, 2002) [I]; (Paschen <i>et al.</i> , 2004) [B]; (Holister <i>et al.</i> , 2003) [R]; (Holister, 2002) [R]; (Altmann, 2004) [J]; (Roco & Bainbridge, 2002) [J] | Unbekannt         | Unbekannt [E]                            | Hett und Helland (vgl. Appendix)                             |
|                         |                   |   |  |                   | Dermatitis bei Kleidungsstücken [M]      | (Hoet <i>et al.</i> , 2004a) [J]; (D. B. Warheit, 2004a) [P] |
| Robotik                 | Nanoroboter       | Ausführung von militärischen Aufgaben   | (Petersen & Egan, 2002) [I]  | Vision            | Unbekannt [E]                            | Hett und Helland (vgl. Appendix)                             |
|                         |                   |   |  |                   | Autonome Vermehrung, <i>gray Goo</i> [M] | (Vonarburg, 2003) [Z]; (Langenbach, 2004) [Z]                |

Tabelle 25: Gesundheits- und Umweltrisiken im Bereich der Rüstungsindustrie (Teil 2).

## 5. Diskussion

### 5.1 Erkenntnisse

Die Zusammenstellung der Literatur zeichnet ein Bild, das sich mit der Einschätzung der Experten Hett, Epprecht und Helland deckt: Es gibt derzeit nur vereinzelt Untersuchungen, die sich mit den *spezifischen* Gesundheits- und Umweltrisiken einzelner Applikationen auseinandersetzen. Die gegenwärtige Diskussion wird angesichts der Weitläufigkeit der Nanotechnologie in unterschiedlichsten Medien und wissenschaftlichen *Peer-Groups* geführt; eine Konzentration auf bestimmte Institutionen oder Fachzeitschriften konnte nicht festgestellt werden. Nichtsdestotrotz lassen Befragung und Literaturstudie einige Muster erkennen, welche nachfolgend erörtert werden.

#### 5.1.1.1 Gezielte Untersuchungen im *Life-Science*-Bereich

Während in den meisten Bereichen kaum applikationsspezifische Untersuchungsbestrebungen auszumachen sind, werden Gesundheitsrisiken medizinischer und kosmetischer Anwendungen offenkundig genauer geprüft<sup>62</sup>. Diese gezieltere Abklärung im *Life-Science*-Bereich ist zum einen auf ohnehin bestehende, striktere Auflagen zurückzuführen. Andererseits trägt auch ein fortgeschrittener Entwicklungsstand - wie im *Life-Science*-Bereich gegeben - zu einer profunderen Klärung möglicher Risiken bei<sup>63</sup>. Weiter hängen die intensiveren Untersuchungsbemühungen gemäss Helland auch mit einer generell erhöhten Empfindlichkeit gegenüber direkt am Körper applizierter Produkte zusammen.

In der Tat scheint in der Medizin das nanotechnologisch bedingte Innovationspotential eng mit einer möglichen Schädigung einherzugehen: Die gezielte Medikation des Gehirns beispielsweise eröffnet zum einen vielfältige Behandlungsmöglichkeiten, verdeutlicht indessen auch, dass dieses empfindliche Organ vor Nanopartikeln prinzipiell nicht geschützt ist.

#### 5.1.1.2 Gefährdungspotential von Strukturkomponenten vs. Risiken von Applikationen

Ein Gesamtüberblick über die zitierte Literatur zeigt, dass sich die Mehrheit der Studien in 4.2 nicht unmittelbar auf die Applikation, sondern vielmehr auf die mit ihr zum Einsatz kommenden Strukturkomponenten bezieht. Mit *Strukturkomponente* sind hierbei Nanopartikel oder -strukturen (wie Fullerene, Kohlenstoff-Nanoröhren etc.) gemeint, welche aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften in unzähligen Materialien und Applikationen Anwendung finden.

Die beobachteten Auswirkungen solcher Strukturkomponenten wurden bislang kaum in den Kontext der betroffenen Nanoprodukte gebracht. Aus diesem Grunde öffnet sich ein Graben zwischen detaillierten toxikologischen Tierstudien und deren effektiven Bedeutung infolge Exposition auf Applikations-Stufe.

#### 5.1.1.3 Gesundheits- vs. Umweltauswirkungen

Die Diskussion möglicher *Gesundheitsschädigungen* wird zumindest teilweise auch in direktem Zusammenhang mit speziellen Applikationen geführt; die derzeitige Debatte um *Umweltgefahren* beschränkt sich indessen vollends auf generell denkbare Auswirkungen und Szenarien. Experten zufolge sind die Gründe hierfür in der diffusen Kausalkette zu suchen: Während gesundheitliche Nebenwirkungen unmittelbar auftreten, sind verzögerte Verän-

---

<sup>62</sup> Vgl. beispielsweise *Drug Targeting*, Implantate oder Sonnenschutzmittel.

<sup>63</sup> Hett betont allerdings, dass die Verbreitung eines Produktes am Markt keinesfalls Garant für intensivierete Abklärungsbemühungen darstellt. So wurden bei Beschichtungen trotz weiter Verbreitung keine Untersuchungen im Kontext konkreter Anwendung festgestellt (vgl. Abschnitt 4.2.1).

derungen in Ökosystemen kaum auf eine einzige entsprechende Ursache zurückzuführen<sup>64</sup>. Lediglich bei Boden- und Grundwassersanierungen (4.2.2), wo Nanopartikel direkt in die Umwelt gelangen, werden deren Auswirkungen im Kontext der Anwendung thematisiert.

## 5.2 Kritische Würdigung der zitierten Literatur

Die Klassifizierung einer Quelle als Erwähnung [M] oder Vermutung [V] weist auf den spekulativen Charakter eines genannten Aspektes hin. Die ebenfalls zahlreich aufgeführten Studien [S] hingegen implizieren möglicherweise eine übermässige Relevanz. Es handelt sich hierbei jedoch fast ausschliesslich *nicht* um klinische Studien, sondern meist um standardisierte, toxikologische Tests an Versuchstieren oder *in vitro*. Wie in Abschnitt 3.2.3.2 erwähnt, können Resultate von Zell- und Tierexperimenten lediglich mögliche Gefährdungen indizieren, aber keinesfalls dem direkten Nachweis bestimmter Risiken dienen. So wird die überwiegende Zahl der Versuche mit Ratten oder Mäusen durchgeführt, welche im Vergleich zum Menschen andere Empfindlichkeiten aufweisen. Ausserdem kommen bei Inhalationsstudien teils sehr hohe Dosen zur Anwendung. Die Frage, ob solche Expositionen (künftig) bei Herstellung, Nutzung oder Entsorgung der entsprechenden Nanoprodukte zustande kommen, scheint durchaus berechtigt. Ein Grossteil der zitierten Studien eignet sich deshalb lediglich zur Überprüfung allfälliger akuter Effekte; Aussagen zu Langzeitfolgen chronischer Expositionen können hingegen kaum getroffen werden. Auch steht die Bezeichnung „Zytotoxizität“ in Kapitel 4.2 für ein breites Spektrum von Effekten, welche von harmlosen Schädigungen bis hin zu Veränderungen der DNA-Strukturen reichen können.

Neben dem kritischen Umgang mit Toxizitäts-Hinweisen in den Tabellen ist ferner das Problem der unterschiedlichen Erscheinungsformen einer bestimmten Strukturkomponente zu unterstreichen: Je nach Geometrie und Beschichtung sind andere Wirkungsmechanismen massgebend und die Erkenntnisse deshalb kaum direkt übertragbar. So wurden beispielsweise zum Nachweis toxischer Wirkungen von Fullerenen in Fischen nicht-derivatisierte Partikel verwendet, wie sie in der Praxis kaum Anwendung finden<sup>65</sup>.

## 5.3 Grenzen der Untersuchungsmethode

Abschliessend sei auf einige methodische Schwächen hingewiesen. Zum einen ist die Strukturierung und Gewichtung der Applikationsfelder (4.1.1) diskutabel: Beschichtungen werden sehr breit diskutiert, katalytische Anwendungen oder das Gebiet der Sensoren hingegen lediglich gestreift. Weiter garantiert das Konzept des Indikatorproduktes eine gewisse Breite der Studie bezüglich der Gefährdungspotentiale. Das Spektrum des Nutzens (4.1.3) eines Applikationsfeldes lässt sich hingegen nicht adäquat aufzeigen. Auch bezüglich des Entwicklungsstandes (4.1.4) kann keine Repräsentativität für einen gesamten Applikationsbereich beansprucht werden<sup>66</sup>.

Weiter sind der korrekten Systematisierung der Quellenangaben (4.1.6) Grenzen gesetzt. So ist es möglich, dass sich hinter einer Vermutung [V] doch eine fundierte, wissenschaftliche Studie [S] verbirgt. Ferner ist die Abundanz von Hinweisen zu bestimmten Gefährdungspotentialen ein trügerischer Indikator für deren Relevanz. So löste die Entdeckung der Ökotoxi-

---

<sup>64</sup> Des Weiteren ist vermutlich – wie häufig in der Umweltanalytik – kaum ein distinktes Signal vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden (vgl. auch Appendix A.1.3).

<sup>65</sup> Vgl. E. Oberdörster (2004) und Anmerkungen in Feder (2004).

<sup>66</sup> Produkte aus ein und demselben Bereich können sich bezüglich des Entwicklungsstandes erheblich unterscheiden: Während selbstreinigende Lacke aus organisch modifizierten Keramiken noch im Forschungsstadium sind, finden Holzschutzanstriche mit Titandioxyd-Nanokristallen bereits breite Anwendung.

kologin Eva Oberdörster trotz ausstehender Bestätigung der entsprechenden Forschungsergebnisse eine grosse Resonanz von der New York Times bis zum Tages-Anzeiger aus<sup>67</sup>.

Schliesslich ist zu betonen, dass lediglich Literatur zitiert wird, aus welcher sich eine denkbare Gefährdung ableiten lässt. Studien, die eine Entwarnung bezüglich eines spezifischen Risikos signalisieren, sind nicht aufgeführt. So wiesen Shvedova *et al.* eine dermale Toxizität von *Single-Wall Nanotubes* (SWCNTs) nach, doch konnte auch gezeigt werden, dass SWCNTs weder Hautirritationen noch -allergien auslösen (A. Huczko & Lange, 2001). Während die Fachzeitschrift „*Toxicological Sciences*“ Artikel über die Lungentoxizität von SWCNT publizierte (4.2.4), können „*Fullerene Science and Technology*“ gegenteilige Befunde entnommen werden (A. Huczko et al., 2001).

---

<sup>67</sup> Vgl. ETC Group (2004b), Feder (2004), E. Oberdörster (2004), Vonarburg (2004) und Weiss (2004).





## 6. Konklusion und Ausblick

Literaturstudie und Expertenbefragungen zu Gesundheits- und Umweltrisiken einzelner Applikationen zeigen zweierlei: Einerseits findet bereits eine allgemeine Auseinandersetzung mit grundlegenden Gefährdungsaspekten statt (Kapitel 3). Andererseits werden durch eine Reihe toxikologischer Studien mit bedeutenden Strukturkomponenten Gesundheitsfolgen bestimmter Partikel auf den Organismus getestet (Kapitel 4). Die dabei bestätigten Gefährdungsszenarien wie Inhalation, Akkumulation oder Radikalbildung werden allerdings *nicht* direkt in den Zusammenhang mit einzelnen Anwendungen gebracht: Eine systematische Verknüpfung der nachgewiesenen Gefährdungspotentiale mit den tatsächlichen, über den gesamten Lebenszyklus der entsprechenden Applikationen auftretenden Expositionen fehlt gegenwärtig (Kapitel 5). Letzteres führt bei der Risikobewertung von Nanoprodukten zu einer unzureichenden Beurteilungsgrundlage.

Vor diesem Hintergrund gilt es vorsorgend einen geeigneten Forschungsstrukturansatz zu finden. Dieser soll auf der einen Seite ausreichend differenziert sein, um der illustrierten Breite des Technologiefeldes gerecht zu werden. Auf der anderen Seite sollten zugleich Muster identifiziert werden, welche angesichts der begrenzten Ressourcen eine vernünftige Prioritätensetzung ermöglichen.

Ansätze aus der aktuellen Chemikalienpolitik können dabei geeignete Anhaltspunkte bieten: Im Rahmen der europäischen Chemikalienpolitik befindet sich gegenwärtig ein Testprogramm (REACH<sup>68</sup>) in der Schlussberatung. Dieses sieht vor, die erforderliche Gründlichkeit der Untersuchungen anhand der Produktionsmenge und Verwendung festzulegen. Gemäss Verursacherprinzip liegt die Verantwortung für Abklärungen beim Inverkehrbringer (Hersteller oder Importeur). Die hierbei generierten Forschungsdaten werden in einer zentralisierten Datenbank registriert.

Ein ähnliches Vorgehen könnte auch im Bereich der Nanotechnologie zur erforderlichen Systematisierung der Datenerhebung unter Mitberücksichtigung der tatsächlichen Expositionen beitragen. Da Herstellungsmenge und Verwendung eines Produktes indes als Kriterien für das inhärente Gefährdungspotential alleine nicht ausreichen, wäre es zweckdienlich, diese Strukturierung - entsprechend dem existierenden Vorschlag der Europäischen Kommission (European Commission, 2004, p. 36) - zu ergänzen<sup>69</sup>: Mit der Festlegung der Untersuchungsdringlichkeit je nach Eigenschaften wie Löslichkeit, Abbaubarkeit, Beschichtung oder Immobilisierung (engl. *containment*) der zu prüfenden Nanomaterialien liessen sich zusätzliche, applikationsspezifische Unterschiede der einzelnen Anwendungen adäquat berücksichtigen.

In Anbetracht der zunehmenden Bedeutung nanotechnologischer Errungenschaften ist eine koordinierte Klärung negativer Effekte auf Mensch und Umwelt unumgänglich. Die skizzierte Vorgehensweise stellt eine Möglichkeit dar, Umwelt- und Gesundheitsrisiken nanotechnologischer Applikationen mit der nötigen Differenzierung anzugehen.

---

<sup>68</sup> REACH: **R**egistration, **E**valuation and **A**uthorisation of **C**hemicals (European Commission, 2003). Vergleiche weitere Erläuterungen zu REACH in Peter & Smieszek (2004).

<sup>69</sup> Siehe ähnliche Vorschläge zur Chemikalienbewertung in Müller-Herold *et al.* (2005).



# Bibliographie

- Adleman, L. M. (1994). Molecular computation of solutions to combinatorial problems. *Science*, 266(5187), 1021-1024.
- Altmann, J. (2004). Military uses of nanotechnology: Perspectives and concerns. *Security Dialogue*, 35(1), 61-79.
- Amiji, M. M., & J.S., C. (2002). Biodegradable poly(epsilon-caprolactone) nanoparticles for tumor-targeted delivery of tamoxifen. *International Journal of Pharmaceutics*, 249(1-2), 127-138.
- Army Research Office (ARO). (2001). Proceedings from the Workshop on Nanoscience for the Soldier (Army Research Office, 8-9 February): Soldier Status Monitoring. Retrieved June 4, 2005, from [www.aro.army.mil/phys/Nanoscience/sec4soldier.htm](http://www.aro.army.mil/phys/Nanoscience/sec4soldier.htm)
- Arnall, A. H. (2003). *Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies*. London: Greenpeace Environmental Trust.
- Ausman, K. D. (2004). Assessing the Environmental Impact of Titania and Carbon Nanostructures (Presentation). Retrieved 10. September, 2004, from [www.dechema.de/data/dechmaneu/\\_AK%20Praesentationen/Praesentation%20Ausman.pdf](http://www.dechema.de/data/dechmaneu/_AK%20Praesentationen/Praesentation%20Ausman.pdf) (not available anymore).
- Baumgartner, W., Jäckli, B., Schmithüsen, B., & Weber, F. (2003). *Studie des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung: Nanotechnologie in der Medizin*. Bern: TA-Swiss.
- Beck, T. (2004, 9. Juli). Die Giftigkeit von Nanoteilchen ist schwer abzuschätzen. *Stuttgarter Zeitung*, p. 35.
- Bennat, C., & Müller-Goymann, C. (2000). Skin penetration and stabilisation of formulations containing microfine titanium dioxide as physical UV filter. *International Journal of Cosmetic Science*, 22(4), 271-284.
- Bermudez, E., J. B. Mangum, B. A. Wong, B. Asgharian, P. M. Hext, D. B. Warheit & Everitt, J. I. (2004). Pulmonary responses of mice, rats, and hamsters to subchronic inhalation of ultrafine titanium dioxide particles. *Toxicological Sciences*, 77(2), 347-357.
- Berry, C. C., Charles, S., Wells, S., Dalby, M. J., & Curtis, A. S. G. (2004). The influence of transferrin stabilised magnetic nanoparticles on human dermal fibroblasts in culture. *International Journal of Pharmaceutics*, 269(1), 211-225.
- Bimberg, D. (1998). Definition: Quantum-dot Cellular Automata. Retrieved June 20, 2005, from [www.dict.die.net/quantum-dot%20cellular%20automata/](http://www.dict.die.net/quantum-dot%20cellular%20automata/)
- Borm, P. J. A. (2002). Munich workshop on evaluation of fiber and particle toxicity: An introduction. *Inhalation Toxicology*, 14, 1-3.
- Borm, P. J. A., & Kreyling, W. G. (2004). Toxicological hazards of inhaled nanoparticles - Potential implications for drug delivery. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 4(5), 521-531.
- Bridges, A. (2004). Scientists encounter nano-problems: Nanomaterials don't move predictably in water. Retrieved June 14, 2005, from [www.msnbc.msn.com/id/4649014](http://www.msnbc.msn.com/id/4649014)
- Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V., & Donaldson, K. (2001). Size-dependant proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 175(3), 191-199.
- Brumfield, G. (2003). A little knowledge. *Nature*, 424(6946), 246-248.
- Brüske-Hohlfeld, I., Peters, A., & Wichmann, H.-E. (2005). Do nanoparticles interfere with human health? *GAI A*, 14(1), 21-23.

- Bühler AG. (2005). nanoZ™ - The transparent all-in-one UV shield. Retrieved June 13, 2005, from [www.buhlergroup.com/Docs/25184DE.pdf](http://www.buhlergroup.com/Docs/25184DE.pdf)
- Colvin, V. (2002). Nanotechnology: Environmental Impact (presentation). Retrieved June 18, 2005, from [www.environmentalfutures.org/Images/Nanoenvi.ppt](http://www.environmentalfutures.org/Images/Nanoenvi.ppt)
- Colvin, V. (2003). The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nature Biotechnology*, 21(10), 1166-1170.
- Credit Suisse. (2005). Nanotechnologie: Grosse Zukunft für kleine Dinge. *Bulletin Spezial, Juni 2005*, 8-15.
- Dagani, R. (2003). Nanomaterials: Safe or unsafe? *Chemical & Engineering News*, 81(17), 30-33.
- Dambeck, H. (2005, 28. April). Forscher melden Durchbruch bei Super-Rechnern. *Spiegel Online*.
- Derfus, A. M., Chan, W. C. W., & Bhatia, S. N. (2004). Probing the cytotoxicity of semiconductor quantum dots. *Nano Letters*, 4(1), 11-18.
- Dick, C. A. J., Brown, D. M., Donaldson, K., & Stone, V. (2003). The role of free radicals in the toxic and inflammatory effects of four different ultrafine particel types. *Inhalation Toxicology*, 15(1), 39-52.
- Divis, D. A. (2004, 10. Dezember). Analysis: Nano needs research before rules. *The Washington Times Online*.
- Dowling, A. P. (2004). Development of nanotechnologies. *Materials Today*, 7(12, Suppl 1), 30-35.
- Dreher, K. L. (2004). Toxicological highlight: Health and environmental impact of nanotechnology: Toxicological assessment of manufactured nanoparticles. *Toxicological Sciences*, 77(1), 3-5.
- Dunkley, R. W. S. (2004). Nanotechnology: Social consequences and future implications. *Futures*, 36(10), 1129-1132.
- Elliott, D. W., & Zhang, W. (2001). Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment. *Environmental Science and Technology*, 35(24), 4922-4926.
- ETC Group. (2002). *No Small Matter! Nanotech Particles Penetrate Living Cells and Accumulate in Animal Organs*. Ottawa (Canada): ETC Group.
- ETC Group. (2003). *No Small Matter II: The Case for a Global Moratorium, Size Matters!* Ottawa (Canada): ETC Group.
- ETC Group. (2004a). *Down on the farm: The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture*. Ottawa (Canada): ETC Group.
- ETC Group. (2004b). *The Little Big Down: A Small Introduction to Nano-scale Technologies*. Ottawa (Canada): ETC Group.
- European Commission. (2003). *Consultation Document concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), Volumes 1 bis 6*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (2004). *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop Organized in Brussels on 1-2 March 2004 by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission*. Brussels: European Commission.
- Feder, B. J. (2004, 29. März). Health Concerns in Nanotechnology. *New York Times online*.
- Granum, B., Gaarder, P. I., Groeng, E.-C., Leikvold, R.-B., Namork, E.-. & Lovik, M. (2001). Fine particles of widely different composition have an adjuvant effect on the production of allergen-specific antibodies. *Toxicology Letters*, 118(3), 171-181.
- Gröning, P. (2004, 17. November). Mit Nanotechnologie zum Flachbildschirm. *Neue Zürcher Zeitung*, p. 61.

- Gsponer, A. (2002). From the Lab to the Battlefield? Nanotechnology and Fourth-Generation Nuclear Weapons. *Disarmament Diplomacy Issue No. 67* Retrieved June 4, 2005, from [www.acronym.org.uk/dd/dd67/67op1.htm](http://www.acronym.org.uk/dd/dd67/67op1.htm)
- Haas, L. (2003, 09. Dezember). Nanopartikel als Risiko; Skeptische Beobachter. *Frankfurter Rundschau*, p. 28.
- Helland, A. (2004). *Nanoparticles: A Closer Look at the Risks to Human Health and the Environment: Perceptions and Precautionary Measures of Industry and Regulatory Bodies in Europe (unpublished)*. Lund University, Lund.
- Hett, A. (2004). *Nanotechnology – Small matter, many unknowns*. Zürich: Swiss Re.
- Hett, A. (2005). Die nächste industrielle Revolution? *Argus Medienbeobachtung* Retrieved June 4, 2005, from [www.nccr-nano.org/nccr/media/press\\_coverage\\_data/press\\_coverage\\_items/press\\_item\\_062/press\\_item\\_062.pdf](http://www.nccr-nano.org/nccr/media/press_coverage_data/press_coverage_items/press_item_062/press_item_062.pdf)
- Hett, A., & Herold, D. (2005). Die Nanotechnologie im Blick der Versicherungswirtschaft. *GAIA*, 14(1), 24-27.
- Hett, A., & Schraft, A. (2005). *Nanotechnologie: Der Umgang mit versteckten Risiken (Vortrag 11.05.05)*, Eidgenössische Technische Hochschule: Zürich.
- Hett, A., & Tanner, R. (2003, 30. September). Kleine Dinge - grosse Wirkung? *Neue Zürcher Zeitung*, p. 15.
- Hightech im Verborgenen. (2004, 12. Mai). *Automobil Industrie*, 64.
- Hoet, P. H. M., Brüske-Hohlfeld, I., & Salata, O. (2004a). Nanoparticles – known and unknown health risks. *Journal of Nanobiotechnology*, 2(1), 12-26.
- Hoet, P. H. M., Nemmar, A., & Nemerya, B. (2004b). Health impacts of nanomaterials? *Nature Biotechnology*, 22(1), 19.
- Hofmann, M. (2005, 21. Mai). Die Zukunft klar im Blick - die Gegenwart im Nebel verborgen; Nanotechnologen üben den Dialog zwischen Hype und Furcht. *Neue Zürcher Zeitung*, p. 81.
- Höhr, D., Steinfartz, Y., Schins, R. P. F., Knaapen, M., Martra, G., Fubini, B., et al. (2002). The surface area rather than the surface coating determines the acute inflammatory response after instillation of fine and ultrafine TiO<sub>2</sub> in the rat. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 205, 239-244.
- Holister, P. (2002). Nanotech, the tiny revolution, CMP Cientifica. Retrieved June 15, 2005, from [www.nanotech-now.com/CMP-reports/NOR\\_White\\_Paper-July2002.pdf](http://www.nanotech-now.com/CMP-reports/NOR_White_Paper-July2002.pdf)
- Holister, P., Harper, T. E., & Vas, C. R. (2003). NANOTUBES, White Paper, CMP Cientifica. Retrieved June 15, 2005, from [www.nanotrends.de/downloads/nanotubes.pdf](http://www.nanotrends.de/downloads/nanotubes.pdf)
- Howard, S. (2002). Nanotechnology and Mass Destruction: The Need for an Inner Space Treaty. *Disarmament Diplomacy Issue No. 65* Retrieved June 4, 2005, from [www.acronym.org.uk/dd/dd65/65op1.htm](http://www.acronym.org.uk/dd/dd65/65op1.htm)
- Huczko, A., & Lange, H. (2001). Carbon nanotubes: Experimental evidence for null risk of skin irritation and allergy. *Fullerene Science and Technology*, 9(2), 247-250.
- Huczko, A., Lange, H., Calko, E., Grubek-Jaworska, H., & Droszcz, P. (2001). Physiological testing of carbon nanotubes: Are they asbestos-like? *Fullerene Science and Technology*, 9(2), 251-254.
- Jani, P. U., McCarthy, D. E., & Florence, A. T. (1994). Titanium dioxide (rutile) particle uptake from the rat GI tract and translocation to systemic organs after oral administration. *International Journal of Pharmaceutics*, 105(2), 157-168.
- Kaim, A. H., Wischer, T., O'Reilly, T., Jundt, G., Fröhlich, J., Schulthess, G. K. v., et al. (2002). MR imaging with ultrasmall superparamagnetic iron oxide particles in experimental soft-tissue infections in rats. *Radiology*, 225, 808-814.
- Kalaugher, L. (2004). Motion of nanomaterials in water depends on type. Retrieved June 11, 2005, from [www.nanotechweb.org/articles/news/3/4/1/1](http://www.nanotechweb.org/articles/news/3/4/1/1)

- Kari, L. (2001). DNA computing in vitro and in vivo. *Future generation computing systems*, 17(7), 823-834.
- Kertész, Z., Szikszai, Z., Gontier, E., Moretto, P., Surlève-Bazeille, J.-E., Kiss, B., et al. (2005). Nuclear microprobe study of TiO<sub>2</sub>-penetration in the epidermis of human skin xenografts. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interaction with Materials and Atoms*(Article in Press).
- Kleine Teilchen ganz gross. (2002, 3. Dezember). *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, p. 9.
- Kleiner, K., & Hogan, J. (2003). How safe is nanotech? *NewScientist* (29. März 2003), 14-15.
- Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C., Chapline, M. G., Peng, S., Cho, K., et al. (2000). Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 287(5453), 622-625.
- Kreuter, J. (1991). Peroral administration of nanoparticles. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 7(1), 71-83.
- Kreuter, J. (2001). Nanoparticulate systems for brain delivery of drugs. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 47(1), 65-81.
- Kreuter, J., Alyautdin, R. N., Kharkevich, D. A., & Ivanov, A. A. (1995). Passage of peptides through the blood-brain barrier with colloidal polymer particles (nanoparticles). *Brain Research*, 674(1), 171-174.
- Kreuter, J., Ränge, P., Petrov, V., Hamm, S., Gelperina, S. E., Engelhardt, B., et al. (2003). Direct evidence that polysorbate-80-coated poly(butylcyanoacrylate) nanoparticles deliver drugs to the CNS via specific mechanisms requiring prior binding of drugs to the nanoparticles. *Pharmaceutical Research*, 20(3), 409-416.
- Kreuter, J., Shamenkov, D., Petrov, V., Ränge, P., Cychutek, K., Koch-Brandt, C., et al. (2002). Apolipoprotein-mediated transport of nanoparticle-bound drugs across the blood-brain barrier. *Journal of Drug Targeting*, 10(4), 317-325.
- Kreyling, W. G., Semmler, M., Erbe, F., Mayer, P., Takenaka, S., Schulz, H., et al. (2002). Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 65(20), 1523-1530.
- Kwon, S. Y., Lin, T., Takei, H., Maa, Q., Wood, D. G., O'Connor, D., et al. (2001). Alterations in the adhesion behavior of osteoblasts by titanium particle loading: inhibition of cell function and gene expression. *Biorheology*, 38(2-3), 161-183.
- Lademann, J., Weigmann, H.-J., Rickmeyer, C., Barthelmes, H., Schaefer, H., Mueller, G., et al. (1999). Penetration of titanium dioxide microparticles in a sunscreen formulation into the horny layer and the follicular orifice. *Skin Pharmacology and Applied Skin Physiology*, 12(5), 247-256.
- Lahrtz, S. (2005, 31. März). Bauklötze mit antibakterieller Beschichtung. *Neue Zürcher Zeitung*, p. 17.
- Lam, C.-W., James, J. T., McCluskey, R., & Hunter, R. L. (2004). Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicological Sciences*, 77(1), 126-134.
- Langenbach, J. (2004, 13. Juli). Nanotechnologie; Teufel im ganz Kleinen. *Die Presse*.
- Linial, M., Linial, N., Lo, Y.-M. D., Yiu, K. F. C., Wong, S. L., Bunow, B., et al. (1995). On the potential of molecular computing. *Science*, 268(5210), 481-484.
- Liu, Z.-S., Tang, S.-L., & Ai, Z.-L. (2003). Effects of hydroxyapatite nanoparticles on proliferation and apoptosis of human hepatoma BEL-7402 cells. *World Journal of Gastroenterology*, 9(9), 1968-1971.
- Luther, W. (2004). *Technology analysis: Industrial application nanomaterial - chances and risks*. Düsseldorf: VDI Technologiezentrum.
- Luther, W., Malnowski, N., & Zweck, A. (2005). Potentiale der Nanotechnologie für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft. *GAI A*, 14(1), 18-20.

- Masciangioli, T., & Zhang, W. (2003). Environmental technologies at the nanoscale. *Environmental Science and Technology*, 37, 102A-108A.
- Maynard, A., Baron, P., Foley, M., Shvedova, A. A., Kisin, E. R., & Castranova, V. (2004). Exposure to carbon nanotube material: Aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 67(1), 87-107.
- Menzel, F., Reinert, T., Vogt, J., & Butz, T. (2004). Investigations of percutaneous uptake of ultrafine TiO<sub>2</sub> particles at the high energy ion nanoprobe LIPSION. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interaction with Materials and Atoms*, 219-220, 82-86.
- Mieg, H. A., & Brunner, B. (2001). Experteninterviews: Eine Einführung und Anleitung. *Working Paper*(6), 1-21.
- MIT News. (2002). Army Selects MIT for \$50 Million Institute To Use Nanomaterials To Clothe, Equip Soldiers (13-14 March news release). Retrieved June 4, 2005, from <http://web.mit.edu/newsoffice/nr/2002/isn.html>
- Mossmann, B. T., Bignon, J., Corn, M., & Gee, J. B. (1990). Asbestos: scientific developments and implications for public policy. *Science*, 247(4940), 294-301.
- Müller-Herold, U., Morosini, M., & Schucht, O. (2005). Choosing chemicals for precautionary regulation: A filter series approach. *Environmental Science and Technology*, 39(683-691).
- Murday, J. S. (1999). Science and technology of nanostructures in the Department of Defense. *Journal of Nanoparticle Research*, 1(4), 501-505.
- Nanoderm. (2005). Quality of Skin as a barrier to ultra-fine particles. Retrieved May 7, 2005, from <http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/index.html>
- Nanoword. (2000). Nanomachines. Retrieved June 1, 2005, from [www.nanoword.net/pdf/NanoMach.pdf](http://www.nanoword.net/pdf/NanoMach.pdf)
- National Science Foundation (NSF). (2003). Nanoscale Iron Could Help Cleanse the Environment: The ultrafine particles will flow underground and destroy toxic compounds in place. Retrieved June 15, 2005, from [www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm](http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm)
- Nemmar, A., Hoylaerts, M. F., Hoet, P. H. M., & Nemerya, B. (2004). Possible mechanisms of the cardiovascular effects of inhaled particles: systemic translocation and prothrombotic effects. *Toxicology Letters*, 149(1-3), 243-253.
- Nemmar, A., Vanilloen, H., Hoylaerts, M. F., Hoet, P. H., Verbruggen, A., & Nemery, B. (2001). Passage of intratracheally instilled ultrafine particles from the lung into the systemic circulation in hamster. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 164(9), 1665-1668.
- Nemmer, A., Hoet, P. H., Vanquickenborne, B., Dinsdale, D., Thomeer, M., Hoylaerts, M. F., et al. (2002). Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*, 105(4), 411-414.
- Niederberger, M. (2004, 16. August). Metalloxide - Nanopartikel mit besonderen Eigenschaften. *Labor Praxis, Nanotechnologie Special*, 24.
- Oberdörster, E. (2004). Manufactured nanomaterials (fullerenes, C<sub>60</sub>) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. *Environmental Health Perspectives*, 112(10), 1058-1062.
- Oberdörster, G. (2001). Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 74(1), 1-8.
- Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W., et al. (2004). Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology*, 16(6-7), 437-445.



- Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Lunts, A., et al. (2002). Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 65(20), 1531-1543.
- Olivier, J. C., Fenart, L., Chauvet, R., Pariat, C., Cecchelli, R., & Couet, W. (1999). Indirect evidence that drug brain targeting using polysorbate 80-coated polybutylcyanoacrylate nanoparticles is related to toxicity. *Pharmaceutical Research*, 16(12), 1836-1842.
- Panagi, Z., Beletsi, A., Evangelatos, G., Livaniou, E., Ithakissios, D. S., & Avgoustakis, K. (2001). Effect of dose on the biodistribution and pharmacokinetics of PLGA an PLGA-mPEG nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 221(1-2), 143-152.
- Pancrazio, J. J., Bey Jr, P. P., Cuttino, D. S., Kusel, J. K., Borkholder, D. A., Shaffer, K. M., et al. (1998). Portable cell-based biosensor system for toxin detection. *Sensors and Actuators B Chemical*, 53(3), 179-185.
- Panyam, J., & Labhasetwar, V. (2003). Dynamics of endocytosis and exocytosis of poly(D,L-lactide-co-glycolide) nanoparticles in vascular smooth muscle cells. *Pharmaceutical Research*, 20(2), 212-220.
- Paschen, H., Coenen, C., Fleischer, T., Grünwald, R., Oertel, D., & Revermann, C. (2004). *Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung*. Berlin: Springer.
- Peracchia, M. T., Fattal, E., Desmaele, D., Besnard, M., Noel, J. P., Gomis, J. M., et al. (1998). Stealth (R) PEGylated polycyanoacrylate nanoparticles for intravenous administration and splenic targeting. *Journal of Controlled Release*, 60(1), 121-128.
- Peter, P., & Smieszek, T. (2004). *Erstellung eines cold condensation Filters für organische Chemikalien (unpublished)*. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Petersen, J. L., & Egan, D. M. (2002). Small security: Nanotechnology and future defense. Retrieved June 4, 2005, from [www.ndu.edu/inss/DefHor/DH8/DH08.pdf](http://www.ndu.edu/inss/DefHor/DH8/DH08.pdf)
- Pflücker, F., Hohenberg, H., Hölzlet, E., Will, T., Pfeiffer, S., Wepf, R., et al. (1999). The outermost stratum corneum layer is an effective barrier against dermal uptake of topically applied micronized titanium dioxide. *International Journal of Cosmetic Science*, 21(6), 399-411.
- Pflücker, F., Wendel, V., Hohenberg, H., Gärtner, E., Will, T., Pfeiffer, S., et al. (2001). The human stratum corneum layer: An effective barrier against dermal uptake of different forms of topically applied micronised titanium dioxide. *Skin Pharmacology and Applied Skin Physiology*, 14(Suppl. 1), 92-97.
- Prabha, S., Zhou, W.-Z., Panyam, J., & Labhasetwar, V. (2002). Size-dependency of nanoparticle-mediated gene transfection: studies with fractionated nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 244(1), 105-115.
- Quelleg, P., Gref, R., Dellacherie, E., Sommer, F., Tran, M. D., & Alonso, M. J. (1999). Protein encapsulation within poly(ethylene glycol)-coated nanospheres. II. Controlled release properties. *Journal of Biomedical Materials Research*, 47(3), 388-395.
- Rajagopalan, P., Wudl, F., Schinanzi, R. F., & Boudinot, F. D. (1996). Pharmacokinetics of a water-soluble fullerene in rats. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 40(10), 2262-2265.
- Reim, M. (2005, 7. Januar). Kleine Partikel, grosse Gefahr; Rückversicherer bewerten die Nano-Technik als riskant. *Süddeutsche Zeitung*, p. 18.
- Reller, A. (2005). Es scheint, als hätt' das Kleinste die grosse Welt verzückt. *GAI A*, 14(1), 12-13.
- Renwick, L. C., Donaldson, K., & Clouter, A. (2001). Impairment of alveolar macrophage phagocytosis by ultrafine particles. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 172(2), 119-127.

- Roco, M. C., & Bainbridge, W. S. (2001). *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Dordrecht (NL): Kulwer Academic Publishers.
- Roco, M. C., & Bainbridge, W. S. (2002). Converging technologies for improving human performance: Integrating from the nanoscale. *Journal of Nanoparticle Research*, 4(4), 281-295.
- RTD info. (2003). Industrial Technologies - Tribology in the 'nano' age. Retrieved June 15, 2005, from [www.europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/39/print\\_article\\_290\\_en.html](http://www.europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/39/print_article_290_en.html)
- Salata, O. V. (2004). Applications of nanoparticles in biology and medicine. *Journal of Nanobiotechnology*, 2, 3.
- Sayes, C. M., Fortner, J. D., Guo, W., Lyon, D., Boyd, A. M., Ausman, K. D., et al. (2004). The differential cytotoxicity of water-soluble fullerenes. *Nano Letters*, 4(10), 1881-1887.
- Schroeder, U., Schroeder, H., & Sabel, B. A. (2000). Body distribution of <sup>3</sup>H-labelled dalargin bound to poly(butylcyanoacrylate) nanoparticles after i.v. injections to mice. *Life sciences*, 66(6), 495-502.
- Schuler, E. (2004). Perception of risks and nanotechnology. Retrieved June 15, 2005, from [www.cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/phil/nano/schuler.pdf](http://www.cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/phil/nano/schuler.pdf)
- Service, R. F. (1998). Superstrong nanotubes show they are smart, too. *Science*, 281(5379), 950-952.
- Service, R. F. (2003). Nanomaterials show signs of toxicity. *Science*, 300(5617), 243.
- Shvedova, A. A., Castranova, V., Kisin, E. R., Schwegler-Berry, D., Murray, A. R., Gandelman, V. Z., et al. (2003). Exposure to carbon nanotube material: Assessment of nanotube cytotoxicity using human kertinocyte cells. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 66(20), 1909-1926.
- Soentgen, J. (2005). Vom Sportplatzbelag zum Nanopartikel: Die Kulturgeschichte des Staubes. *GAI*, 14(1), 14-17.
- Stone, V., Hutchison, G., Barlow, P., Donaldson, K., & Brown, D. (2004). The effects of nanoparticles on macrophages and epithelial cells. Retrieved May 24, 2005, from [www.nottingham.ac.uk/biomaterial/Faraday/Meetings/Meeting\\_24/Presentations/Stone\\_pres\\_6.pdf](http://www.nottingham.ac.uk/biomaterial/Faraday/Meetings/Meeting_24/Presentations/Stone_pres_6.pdf)
- Straumann, F. (2004, 22. Januar). Nanopartikel bergen mögliches Gesundheitsrisiko. *Tages-Anzeiger*, p. 38.
- Stuart, C. (2003). Environmental applications help in cleanup efforts, manufacturing. Retrieved June 18, 2005, from [www.smalltimes.com/document\\_display.cfm?document\\_id=6486&keyword=Stuart&summary=0&startsum=81](http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?document_id=6486&keyword=Stuart&summary=0&startsum=81)
- Swiss Re schärft den Blick für Nano-Risiken. (2004, 15. Mai). *Neue Zürcher Zeitung*, p. 25.
- TAB. (2004). *TA-Projekt Nanotechnologie*. Berlin: Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).
- Takenaka, S., Karg, E., Kreyling, W. G., Lentner, B., Schulz, H., Ziesenis, A., et al. (2004). Fate and toxic effects of inhaled ultrafine cadmium oxide particles in the rat lung. *Inhalation Toxicology*, 16(Suppl 1), 83-92.
- Takenaka, S., Karg, E., Roth, C., Schulz, H., Ziesenis, A., Heinzmann, U., et al. (2001). Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats. *Environmental Health Perspectives*, 109(Suppl 4), 547-551.
- The Institute of Nanotechnology. (2003). Nanotechnology in Switzerland. Retrieved May 23, 2005, from <http://www.nano.org.uk/Switz%20030903%20SAMPLE.pdf>
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering. (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. London: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering.
- Tokuyama, H., Yamago, S., & Nakamura, E. (1993). Photoinduced biochemical activity of fullerene carboxylic acid. *Journal of the American Chemical Society*, 115, 7918-7919.

- Tomellini, R., & Monk, R. (2005). A European Approach to Nanotechnologies. *GAIA*, 14(1), 28-29.
- Tröster, S. D., Müller, U., & Kreuter, J. (1990). Modification of the body distribution of poly(methyl methacrylate) nanoparticles in rats by coating with surfactants. *International Journal of Pharmaceutics*, 61(1-2), 85-100.
- Tsuchiya, T., Oguri, I., Nakajima, Y., Yamakoshi, N., & Miyata, N. (1996). Novel harmful effects of [60]fullerene on mouse embryos in vitro and in vivo. *FEBS Letters*, 393(1), 139-145.
- Uchino, T., Tokunaga, H., Andoa, M., & Utsumib, H. (2002). Quantitative determination of OH radical generation and its cytotoxicity induced by TiO<sub>2</sub>-UVA treatment. *Toxicology in Vitro*, 16(5), 629-635.
- Ueng, T.-H., Kang, J.-J., Wang, H.-W., Cheng, Y.-W., & Chiang, L. Y. (1997). Suppression of microsomal cytochrome P450-dependent monooxygenases and mitochondrial oxidative phosphorylation by fulleranol, a polyhydroxylated fullerene C<sub>60</sub>. *Toxicology Letters*, 93(1), 29-37.
- Volkheimer, G. (1974). Passage of particles through the wall of the gastrointestinal tract. *Environmental Health Perspectives*, 9, 215-225.
- Vonarburg, B. (2003, 24. Juni). Schrecklich schöne neue Welt. *Tages-Anzeiger*, p. 68.
- Vonarburg, B. (2004, 01. April). Nanopartikel schädigen Fische. *Tages-Anzeiger*, p. 42.
- Walgate, R. (2004). Degrading nanoparticles: Nanotox 2004 conference highlights solutions to toxicity of emerging technology. Retrieved June 15, 2005, from [www.the-scientist.com/news/20040119/02](http://www.the-scientist.com/news/20040119/02)
- Walus, K., Jullien, G. A., & Dimitrov, V. S. (2003). Computer Arithmetic Structures for Quantum Cellular Automata. Retrieved June 15, 2005, from [www.qcadesigner.ca/papers/Asilomar2003.pdf](http://www.qcadesigner.ca/papers/Asilomar2003.pdf)
- Wang, C.-B., & Zhang, W. (1997). Synthesizing nanoscale iron particles for rapid and complete dechlorination of TCE and PCBs. *Environmental Science and Technology*, 31(7), 2154-2156.
- Warheit, D. B. (2004a). Human Health Impacts of Nanomaterials (abbreviated presentation). Retrieved June 18, 2005, from [www.environmentalfutures.org/Images/warheit.pdf](http://www.environmentalfutures.org/Images/warheit.pdf)
- Warheit, D. B. (2004b). Nanoparticles: health impacts? *Materials today*, 7(2), 32-35.
- Warheit, D. B., Laurence, B. R., Reed, K. L., Roach, D. H., Reynolds, G. A. M., & Webb, T. R. (2004). Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicological Sciences*, 77(1), 117-125.
- Warren, P. (2004). The future of computing - new architectures and new technologies. *IEE Proceedings - Nanobiotechnology*, 151(1), 1-9.
- Weiss, R. (2004, 29. März). Nanoparticles Toxic in Aquatic Habitat, Study Finds. *Washington Post*, p. A02.
- Wichmann, H.-E., Spix, C., Tuch, T., Wölke, G., Peters, A., Heinrich, J., et al. (2000). *Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part I: role of particle number and particle mass* (No. 98). Cambridge: Health Effects Institute.
- Wootliff, B. (2004). British Scientist: Nanoparticles Might Move from Mom to Fetus. Retrieved June 11, 2005, from [http://www.smalltimes.com/document\\_display.cfm?document\\_id=7223](http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?document_id=7223)
- Xiang, J.-J., Tang, J.-Q., Zhu, S.-H., Nie, X.-M., Lu, H.-B., Shen, S.-R., et al. (2003). IONP-PLL: a novel non-viral vector for efficient gene delivery. *Journal of Gene Medicine*, 5(9), 803-815.
- Yamago, S., Tokuyama, H., Nakamura, E., Kikuchi, K., Kananishi, S., Sueki, K., et al. (1995). In vivo biological behavior of a water-miscible fullerene: <sup>14</sup>C labeling, absorption, distribution, excretion and acute toxicity. *Chemistry & Biology*, 2(6), 385-389.

- Yang, X. L., Fan, C. H., & Zhu, H. S. (2002). Photo-induced cytotoxicity of malonic acid [C60]fullerene derivatives and its mechanism. *Toxicology in Vitro*, 16(1), 41-46.
- Zhang, Q., Kusaka, Y., Sato, K., Nakakuki, K., Kohyama, N., & Donaldson, K. (1998). Differences in the extent of inflammation caused by intratracheal exposure to three ultrafine metals: Role of free radicals. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 53(6), 423-438.
- Zhang, W. (2003). Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(3-4), 323-332.
- Zheng, M., Jagota, A., Strano, M. S., Santos, A. P., Barone, P., Chou, G., et al. (2003). Structure-based carbon nanotube sorting by sequence-dependent DNA assembly. *Science*, 302(5650), 1543-1548.



# Abkürzungen

|        |  |
|--------|--|
| [A]    | Analogie (vgl. Tabelle 5)  |
| AFM    | Atomic Force Microscopy  |
| [B]    | Buch (vgl. Tabelle 4)  |
| CNT    | Carbon Nanotube  |
| [E]    | Experteninterview (vgl. Tabelle 5)   |
| EC     | European Commission  |
| EMPA   | Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt                                 |
| EPA    | Environmental Protection Agency  |
| FDA    | Food and Drug Administration   |
| FED    | Field Emission Display   |
| GO     | Größenordnung  |
| [I]    | Elektronische Quelle bzw. Internet (vgl. Tabelle 4)                                    |
| [J]    | Fachzeitschrift (vgl. Tabelle 4)   |
| [M]    | Erwähnung (vgl. Tabelle 5)   |
| MIP    | Molecularly Imprinted Polymer  |
| MLCC   | Multiple Layer Ceramic Condensator   |
| MPO    | Myeloperoxidase  |
| MRAM   | Magnetic Random Access Memory  |
| MWCNT  | Multi-Wall Carbon Nanotube   |
| NP     | Nanopartikel   |
| [P]    | Präsentation (vgl. Tabelle 4)  |
| POPs   | Persistent Organic Pollutants (Stockholm Convention)                                   |
| QCA    | Quantum Cellular Automata  |
| QD     | Quantum Dot  |
| [R]    | Bericht (vgl. Tabelle 4)   |
| REACH  | Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals                                |
| RTM    | Rastertunnelmikroskop  |
| [S]    | Studie (vgl. Tabelle 5)  |
| SCCNFP | Scientific Committee on Cosmetic Products and Non-Food Products Intended for Consumers |
| SDS    | Safety Data Sheet (Sicherheitsdatenblatt)  |
| SMES   | Supraconducting Magnetic Energy Storage  |
| STM    | Scanning Tunnelling Microscopy   |
| SWCNT  | Single-Wall Carbon Nanotube  |
| [T]    | Diplomarbeit (vgl. Tabelle 4)  |
| TAB    | Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag                            |
| UFP    | Ultrafeine Partikel  |
| [V]    | Vermutung (vgl. Tabelle 5)   |
| [Z]    | Zeitungsartikel / Magazin (vgl. Tabelle 4)   |



# Glossar

## **Akkumulator**

Wiederaufladbarer Energiespeicher auf der Grundlage eines elektrochemischen Systems.

## **Aktuator**

Gegenstück zum Sensor in der Steuer- und Regelungstechnik, welches Impulse einer Regelung in mechanische Arbeit umwandelt.

## **Apoptosis**

Programmierter Zelltod.

## **Asbestose**

Sammelbegriff für Krankheitsbilder, die in der Folge von Tätigkeiten mit oder in der Umgebung von asbesthaltigen Materialien auftreten.

## **Bottom-up-Ansatz**

Strategie, bei welcher Nanostrukturen gezielt aus Atomen und Molekülen (chemisch oder biologisch) aufgebaut werden.

## **Dermatitis**

Hautentzündung.

## **DNA-Computing**

Informationsspeicherung und -verarbeitung mittels DNA.

## **Drug Targeting**

Strategie, gezielt Wirkstoffkonzentrationen in spezifischen Körpergeweben zu erhöhen.

## **Experte**

Person, die aufgrund langjähriger Erfahrung über bereichsspezifisches Wissen und Können verfügt.

## **Exposition**

Bezeichnung für „Ausgesetztsein“ gegenüber einem schädigenden Einfluss.

## **Fulleren (engl. *buckyball*)**

Ausschliesslich aus Kohlenstoff bestehendes, kugelförmiges Makromolekül, dessen Innenraum hohl ist. Der Hohlraum kann zum Beispiel mit Kontrastmittel gefüllt und die Aussenfläche beschichtet werden. Das bekannteste Fulleren ist das C<sub>60</sub>, welches analog dem Fussball aus Fünf- und Sechsecken aufgebaut ist.

## **Gefahr**

Bezeichnung für einen Umstand, aus dem Schaden für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter resultieren kann.

## **Gefährdung**

Bezeichnung für eine genauer spezifizierte Gefahr.

## **Granulom (engl. *granuloma*)**

Entzündungsbedingte, knotenartige Gewebeneubildung als Reaktion auf chronische, allergische oder infektiöse Prozesse, die im menschlichen Körper ablaufen.

## **Gray Goo**

Bezeichnung für eine Fiktion, in der Nanoroboter sich autonom vermehren und dabei die Biosphäre der Erde zerstören.

## **Hydrophobizität**

Fähigkeit, Kontakt mit Wasser zu meiden.

## **Hydroxylapatit**

Grundsubstanz von Zähnen und Knochen.

## **Hypoallergen**

Substanz, welche nachweislich weniger Allergien auslöst.

## **Indikatorprodukt**

Hier: Leitprodukt, das den typischen Nutzen und die einhergehenden Risiken eines bestimmten Anwendungsfeldes stellvertretend widerspiegelt.

## **Kolloid**

Natürliches oder künstliches Partikel, das in flüssigen Phasen nicht aggregieren und somit mobil bleiben.

## **Kondensator**

Elektrisches Bauelement zur Speicherung elektrischer Ladung.

## **Lotuseffekt**

Phänomen, das die Unbenetzbarkeit biologischer Oberflächen beschreibt, welche bei der Lotus-pflanze entdeckt wurde: Feine Wackskristalle auf der Blattoberfläche resultieren in einer minimalen Kontaktfläche für Wasser, welches in der Folge abperlt und Staubteilchen wegspült. Heute wird der Begriff allgemein für den Selbstreinigungseffekt aufgrund rauer Oberfläche verwendet.

## **Magnetresonanztomographie**

Bildgebendes Verfahren zur Darstellung von Strukturen im Innern des Körpers.

## **Molekular geprägte Polymere (engl. *molecularly imprinted polymers, MIPs*)**

Methode zur Herstellung von Polymeren mit hoher Selektivität zur Erkennung bestimmter Moleküle.



### **Myeloperoxidase (MPO)**

Peroxidase-Enzym, welches vor allem in neutrophilen Granulocyten (Untergruppe der weissen Blutkörper) vorkommt.

### **Nano**

Bezeichnung für den Milliardensten Teil einer Masseinheit (altgr. *nannos*: „Zwerg“).

### **Nanokomposit**

Nanokristallite und Nanopartikel in amorpher Matrix.

### **Nanopartikel**

Partikel oder Teilchen in der Grössenordnung von einigen Nanometern, welche im Gegensatz zu ultrafeinen Partikeln (siehe unten) gezielt hergestellt und mit spezifischen Eigenschaften versehen werden.

### **Nanoröhren (engl. *nanotubes*)**

Hohlzylindrische Nanopartikel mit einer Länge von einigen Mikrometern und einem Durchmesser von wenigen Nanometern, welche aus Kohlenstoff (und teilweise zusätzlichen Elementen) bestehen. Nanoröhren können ein- (SWCNT) oder mehrwandig (MWCNT) sein und je nach Ausgestaltung sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

### **Nanotechnologie**

„1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind. 2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten. 3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.“ (Paschen et al., 2004, p. 29).

### **Nanotoxizität**

Toxizität, die alleine aufgrund der Grösse von Nanopartikeln ausgeht (Baumgartner et al., 2003).

### **Nanowissenschaften (engl. *nanoscience*)**

Wissenschaftliche Disziplin, welche Phänomene im Nanometerbereich erforscht (Credit Suisse, 2005).

### **Nekrose**

Absterben von Körpergewebe, wobei der Organismus am Leben bleibt (griech.: *nékrossi* = „das Absterben“).

### **Organisch modifizierte Keramiken**

Organisch vernetzte anorganische Hybridpolymere, welche einen nanoskaligen molekularen Verbundwerkstoff bilden (Beispiel: Ormocer®).

### **Osteoblasten**

Knochenbildungszellen (griech.: *osteo* = „Knochen“).

### **Oxidativer Stress**

Alterung durch freie Radikale. Der Körper versucht diesem Prozess mit Antioxidantien entgegenzuwirken.

### **Phagozyte**

Fresszelle, welche Gewebeteile oder körperfremde Partikel aufnehmen und verdauen kann.

### **Pleuramesothelium**

Maligner Tumor des Brustfells, welcher häufig durch Asbest ausgelöst wird.

### **Quantenmechanik**

Experimentell exakt bestätigte Theorien zur Beschreibung der Eigenschaften von Materie im Quantenbereich, welche in der klassischen Physik nicht berücksichtigt werden.

### **Quantum Cellular Automata (QCA)**

Grundlegende Struktureinheit, welche aus mehreren QDs besteht und durch Interaktion von Einzellaadungen generelles Computing ermöglicht.

### **Quantum Dot (CD)**

Partikel, die sich gemäss den Gesetzen der Quantenmechanik verhalten und nicht mit der klassischen Physik beschreiben werden können.

### **Radikal**

Teile von Molekülen mit einem ungepaarten Elektron.

### **Rasterkraftmikroskop, RKM (engl. *atomic force microscope, AFM*)**

Mikroskop zur mechanischen Abtastung von Oberflächen im Nanometerbereich.

### **Rastertunnel(elektronen)mikroskop, RTM (engl. *scanning tunnelling microscope, STM*)**

Mikroskop, das unter Verwendung des quantenmechanischen Tunneleffektes ein Objekt systematisch in einem Raster durch „Abtasten“ abbildet.

### **REACH**

*Regulation, Evaluation and Authorisation of Chemicals* (REACH) ist ein Testprogramm der Europäischen Kommission für die Bewertung von Chemikalien. REACH sieht eine Priorisierung gemäss Produktionsmenge und Verwendung vor. Die dabei generierten Daten sollen in einer öffentlich zugänglichen Datenbank abgelegt werden. Im Gegensatz zur entsprechenden Regelung der USA sind im Rahmen von REACH auch bereits auf dem Markt vorhandene Produkte nach neuem Muster zu bewerten.

### **Risiko**

Berücksichtigt im Gegensatz zur Gefährdung neben dem Schadensausmass auch dessen Wahrscheinlichkeit.

**Selbstorganisation (engl. *self assembly*)**

Spontane Anordnung von Komponenten bis zur Erreichung des tiefsten Energie-Niveaus. Diese Strategie stellt einen äusserst leistungsfähigen Bottom-up-Ansatz (siehe oben) dar.

**Single-Wall Carbon Nanotubes (SWCNTs)**

Einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem Durchmesser von circa 1 nm und mehreren Mikrometern Länge.

**Sinterung (engl. *sintering*)**

Methode zur direkten Fertigung von Objekten aus Pulver, indem die Adhäsion zwischen den Partikeln durch Erhitzung erhöht wird.

***Stratum Granulosum***

Körnerschicht der Epidermis, welche unter der Hornschicht (*Stratum Corneum*) und Glanzschicht (*Stratum Lucidum*) sowie über der Stachelzellschicht (*Stratum Spinosum*) und Basalschicht (*Stratum Basale*) liegt.

**Strukturkomponenten**

Partikel (wie Titandioxyd-Nanopartikel oder Fullerene) sowie Nanostrukturen (wie Kohlenstoff-Nanoröhren), welche aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften in unzähligen Materialien und Applikationen Anwendung finden.

**Supraleitender magnetischer Energiespeicher (engl. *supraconducting magnetic energy storage, SMES*)**

Energiespeicher, welcher elektrische Energie in einer supraleitenden Spule (kein Widerstandsverlust) als Kreisstrom speichert.

**Top-down-Ansatz**

Strategie, bei welcher grössere Strukturen immer weiter bis in den Nanometerbereich (physikalisch) verkleinert werden.

**Tribologie**

Wissenschaft, die sich mit Reibung, Verschleiss und Schmierung sowie der Entwicklung von Technologien zur Optimierung von Reibungsvorgängen befasst (griech.: „Reibungslehre“).

**Tunneleffekt**

Quantenmechanischer Effekt, der den Teilchen die Überwindung einer endlichen räumlichen und energetischen Barriere erlaubt, welche gemäss klassischer Physik für die Teilchen nicht überwindbar wäre. Der Tunneleffekt spielt nur bei sehr kurzen Abständen und Zeitabschnitten eine Rolle.

**Ultrafeine Partikel (UFP)**

Bezeichnung für Partikel kleiner als 100 Nanometer, welche im Gegensatz zu Nanopartikel (siehe oben) unbeabsichtigt (zum Beispiel bei Verbrennungsprozessen) freigesetzt werden.

**Zytotoxizität**

Fähigkeit von Agenzien, Zellen zu schädigen.



## Appendix: Experteninterviews

Zur Bestätigung und Erweiterung der Literaturrecherche wurden zusätzlich externe Experteneinschätzungen eingeholt. Das methodische Vorgehen orientierte sich an Miege & Brunner, 2001.

### A.1 Dr. Annabelle Hett und Dr. Thomas Epprecht

#### A.1.1 Fragestellung und Hypothesen

##### A.1.1.1 Leitende Forschungsfrage

Die Thematik der Befragung folgt direkt aus der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit:

*Identifikation derjenigen Applikationsfelder der Nanotechnologie, in denen bereits eine vertiefte, spezifische Auseinandersetzung mit Gesundheits- und Umweltrisiken stattfindet*

Daraus lassen sich drei zentrale Fragestellungen ableiten:

- In welchen Applikationsfeldern werden Gesundheits- und Umweltrisiken über die Diskussion genereller Risiken hinaus bereits anwendungsspezifisch eruiert?
- In welchen Bereichen wird eine solche Diskussion kaum geführt? Welches sind die Ursachen für die unterschiedlichen Untersuchungstiefen?
- Welche Indikatorprodukte eignen sich als repräsentative Beispiele für das entsprechende Expertenurteil?

##### A.1.1.2 Hypothesen

Im Vorfeld des Experteninterviews wurden drei Hypothesen ausgearbeitet, welche durch die Befragung getestet werden sollen.

#### Diskussionsgrundlage

**H1:** Die Risikobetrachtung ist gegenwärtig gezwungenermaßen allgemein gehalten und befasst sich nach wie vor mit generell möglichen Auswirkungen von Nanopartikeln. Für eine applikationsspezifische Erörterung der Risiken fehlt derzeit in der Regel das Wissen.

Der Grossteil potentieller Nanoprodukte scheint für eine Risikobetrachtung noch nicht ausreichend weit entwickelt zu sein. Bereits bestehende Anwendungen hingegen werden trotz Prädikat „nano“ nicht von neuem untersucht und bewertet, da die Zulassungsverfahren bisher nicht angepasst worden sind (vgl. Abschnitt 3.1.2, p. 9). Weiter ist aufgrund der Neuartigkeit des Technologiefeldes derzeit kaum etwas zu Langzeitwirkungen bekannt. Folglich scheint man sich auf Analogien zu stützen (zum Beispiel ultrafeine Partikel oder Asbest), anhand welcher eine anwendungsgenaue Diskussion jedoch nicht möglich ist.

#### Einfluss des Anwendungsbereichs

**H2:** Die Untersuchungstiefe der Risiken ist stark vom Applikationsbereich abhängig.

Im *Life Science* Bereich (Arzneimittel, Diagnostik, Kosmetik und Lebensmittel) scheint die Produktentwicklung zwangsläufig enger mit der Frage nach den Gesundheitsrisiken verknüpft zu sein, da ein unmittelbarer Kontakt mit den Produkten besteht und bereits existierende Regulierungen eine rigorose Untersuchung vorsehen. Daher scheinen in diesem Bereich bereits

applikationsspezifische Studien durchgeführt zu werden. Da *Beschichtungen* bereits derart verbreitet sind, sind auch in diesem Applikationsfeld genauere Untersuchungen zu erwarten. Im *Energiebereich* wiederum stehen vor allem ökologische Chancen im Vordergrund. Damit sollten auch potentielle Umweltrisiken zwangsläufig mehr Aufmerksamkeit erhalten. Nano-Applikationen in der Rüstungsindustrie sind einem erhöhten öffentlichen Druck ausgesetzt, sodass *Risikountersuchungen* ebenfalls wahrscheinlicher scheinen.

In allen *übrigen Bereichen* wird erwartet, dass nach wie vor der neuartige Nutzen im Fokus des wissenschaftlichen Interesses steht, welcher kaum durch eine intensive Diskussion von Umwelt- und Gesundheitsgefahren überschattet wird.

### Untersuchungstiefe und Marktreife

**H3:** Es besteht eine direkte Korrelation zwischen Untersuchungstiefe und Marktreife der entsprechenden Produkte.

Bevor die Chancen und die Machbarkeit einer Anwendung nicht evident sind, stehen die Risiken erwartungsgemäss im Hintergrund. Die genauere Analyse von Risiken auf Produktstufe wird vermutlich erst dann möglich, wenn ein konkretes Bild der definitiven Ausgestaltung (inklusive Schutz-Vorkehrungen etc.) besteht.

#### A.1.2 Wahl des Experten

Angesichts des noch jungen Technologiefeldes kann die Daumenregel von 10 Jahren (Mieg & Brunner (2001), p.6) kaum eingehalten werden. Weiter kommen „Querschnittsexperten“ zu nanotechnologischen Risiken, wie sie für die Fragestellung notwendig sind, in der Regel aus dem sozialwissenschaftlichen Umfeld und setzen sich daher erster Linie mit den gesellschaftlichen Aspekten und weniger mit Gesundheits- und Umweltrisiken auseinander. Naturwissenschaftler dagegen sind meist auf die entsprechenden Gesundheits- und Umweltrisiken eines bestimmten Bereichs spezialisiert. Da sich jedoch eine Assekuranz und insbesondere eine Rückversicherung zwangsläufig in der gesamten Breite mit Gesundheits- und Umweltrisiken befassen muss, verfügen Experten aus Versicherungskreisen notwendigerweise über einen breiteren naturwissenschaftlichen Hintergrund.

Aus diesem Grunde wurde Dr. Annabelle Hett von der Swiss Re kontaktiert, welche sich freundlicherweise zu einem Interview bereit erklärte. Hett ist unter anderem Autorin der viel beachteten Publikation „Nanotechnology - Small matter, many unknowns“ (Hett, 2004) sowie diverser Artikel<sup>70</sup> und ist Organisatorin sowie Teilnehmerin von Konferenzen zur Thematik. Da ein Kollege von Hett, Dr. Thomas Epprecht, in Zukunft den Nano-Bereich der Swiss Re mitgestalten und auch an der Fallstudie teilhaben wird, war er am Gespräch ebenfalls beteiligt.

Im Vorfeld des Treffens wurde eine ausführliche Information mit Rahmen, Inhalt und Ziel der Befragung gestellt.

#### A.1.3 Vorbereitung und Durchführung des Interviews

Zur Vorbereitung des Interviews wurde ein Leitfaden mit einem ausgearbeiteten Fragenkatalog verfasst. Grundsätzlich konnten sämtliche Schlüsselfragen gestellt werden, wenn auch nicht in der durch den Leitfaden vorgesehen Reihenfolge.

Nachfolgend ist eine nachträgliche Aufzeichnung des halbstündigen Gespräches vom 8. Juni am Hauptsitz der Swiss Re in Zürich aufgeführt<sup>71</sup>:

<sup>70</sup> Vgl. hierzu die Bibliographie.

<sup>71</sup> Bedauerlicherweise durften aus Vertraulichkeitsgründen keine Aufnahmen des Gesprächs gemacht und lediglich ein handschriftliches Protokoll geführt werden. Dieses wurde freundlicherweise durch Dr. Annabelle Hett und Dr. Thomas Epprecht genehmigt (23. Juni 2005).

**Frau Hett, Sie wurden Mitte Mai 2004 in der NZZ mit den Worten zitiert, dass Erfahrungen aus der Vergangenheit sich wegen der veränderten Materialeigenschaften nicht einfach auf die Nanotechnologie übertragen liessen. Langzeitstudien über chemische Reaktionsweisen gäbe es ebenso wenige wie verlässliche Beurteilungen über die Giftigkeit<sup>72</sup>.**

**Abgesehen von der Grundproblematik der fehlenden Datengrundlage, die auch heute noch besteht: In welchen Bereichen setzt man sich am konsequentesten bereits heute mit spezifischen Umwelt- und Gesundheitsrisiken auseinander?**

A. Hett: *Dies lässt sich angesichts fehlender internationaler Koordination in der Erforschung von Umwelt- und Gesundheitsrisiken kaum beurteilen. Einerseits testen Hersteller ihre eigenen Produkte, wobei die Resultate der Untersuchungen jedoch häufig nicht publiziert werden<sup>73</sup>. Andererseits prüfen Universitäten nanotechnologische Materialien, sofern diese bereits in notwendigen Quantitäten erschwinglich sind<sup>74</sup>. Letzteres ist zum Beispiel bei Kohlenstoffnanotubes oder Buckyballs der Fall. Allerdings gibt es für solche Testzwecke gegenwärtig keine standardisierten Materialien, sodass je nach Zulieferer beispielsweise verschiedene Nanotubes mit möglicherweise unterschiedlichen Reaktionsverhalten beurteilt werden.*

*Im Hinblick auf die gegenwärtige Situation des unkoordinierten Testens und Erforschens möglicher Risiken sollte die internationale Zusammenarbeit gefördert werden. So sollten normierte Materialien mittels standardisierter Testabläufe überprüft und die entsprechenden Resultate in einer allgemein zugänglichen Datenbank abgelegt werden. Kennt man das Schädigungspotential der untersuchten Materie, kann schliesslich eine Betrachtung der Exposition bei einer bestimmten Applikation vorgenommen werden.*

*Es ist klar, dass für dieses Vorgehen eine Prioritätensetzung unabdingbar ist, wie dies kürzlich in der Europäischen Kommission in Form eines Entscheidungsbaumes vorgeschlagen wurde<sup>75</sup>. Damit würden in einem ersten Schritt unter anderem bekanntermassen toxische und in bedeutenden Mengen produzierte Materialien systematisch evaluiert.*

T. Epprecht: *Häufig prüft ein Hersteller seine marktreifen Endprodukte im Rahmen eines herkömmlichen Zulassungsverfahrens. Dabei stehen jedoch die Auswirkungen auf den Konsumenten im Zentrum. Betrachtet man den gesamten Produktzyklus, so ist es offensichtlich, dass damit nur ein Teil der gesamthaft notwendigen Abklärungen für Gesundheit und Umwelt getroffen werden.*

**Wie ich Ihnen in der Vorinformation von letzter Woche geschildert habe, ist es innerhalb weniger Monate kaum möglich, gesicherte Aussagen bezüglich der Nichtexistenz von Risikoüberlegungen in bestimmten Applikationsfeldern zu treffen. Aus diesem Grunde suche ich gerade für jene Bereiche, in denen noch kaum anwendungsspezifischen Gesundheits- und Umweltrisiken nachgegangen wird, eine Absicherung mittels Expertenurteil. In welchen Bereichen (vgl. Abbildung 4) können Sie spontan sagen, dass ein applikations-bezogener Diskurs noch nicht im Gange ist?**

A. Hett: *Im Sicherheits- und Rüstungsbereich finden Entwicklung und Forschung prinzipiell im Geheimen statt. Auch wenn starke Gegenbewegungen in der Öffentlichkeit bestehen, eine vertiefte Diskussion von Umwelt- und Gesundheitsrisiken ist in diesem Bereich nicht zu erwarten.*

---

<sup>72</sup> Swiss Re schärft den Blick für Nano-Risiken (2004), p. 25.

<sup>73</sup> Vgl. auch Feder (2004).

<sup>74</sup> Im Jahre 2003 kostete ein Gramm SWCNT circa 750 USD, was etwa dem 70fachen Goldpreis entspricht (Kleiner & Hogan 2003, p. 15).

<sup>75</sup> European Commission (2004), p. 36.

**Während Gesundheitsrisiken in einigen Bereichen, wie zum Beispiel beim *Drug Targeting*, bereits applikationspezifisch diskutiert werden, stehen Umweltrisiken weniger im Fokus. Gibt es Anwendungen, bei denen man sich konsequent bereits mit möglichen Auswirkungen in der Umwelt auseinandersetzt?**

T. Epprecht: *Das Problem im Bereich der Umweltrisiken liegt offensichtlich in der unklaren Kausalkette: Es geht dabei vermutlich mehr um eine Art Hintergrundrauschen, welches durch eine einzelne Applikation kaum messbar verändert wird. Die gegenwärtige Diskussion rund um die Umweltrisiken muss sich daher auf allgemein denkbare Auswirkungen von Nanopartikeln in der Umwelt beschränken.*

A. Hett: *Umweltrisiken sind in der Tat noch kein zentrales Thema beim Design von Nanoprodukten. Man denke beispielsweise an den Recyclingbereich, wo nach wie vor kaum Abklärungen laufen. Eine Ausnahme stellt jedoch der Anwendungsbereich der Bodenremediation dar: Da es sich dabei offensichtlich um direkte Eingriff in ein Ökosystem handelt, werden gezwungenermassen auch mögliche Schädigungen der Umwelt thematisiert.*

**Im Energiebereich verspricht man sich unter anderem wesentliche Verbesserungen bezüglich der Umweltperformance. Werden in diesen Applikationsfeldern nicht zwangsläufig auch Umweltrisiken thematisiert?**

A. Hett: *Es ist klar, dass im Gegensatz zur Produktentwicklung die Erforschung von Risiken prinzipiell weniger attraktiv ist. Das gilt auch für den Energiebereich, wo nach wie vor die Chancen im Vordergrund stehen. Risiken werden auf der Applikations-Stufe kaum speziell diskutiert, sondern eher im Rahmen allgemeiner Untersuchungen, zum Beispiel über Kohlenstoffnanotubes<sup>76</sup>, erörtert.*

**Nano-Beschichtungen werden heute bereits in grossem Masse angewandt, wird in diesem Bereich trotzdem kaum spezifischen Gesundheits- und Umweltrisiken nachgegangen?**

A. Hett: *Auch im Bereich der Beschichtungen zeichnet sich das gleiche Bild ab: Es wird, mit Ausnahme vereinzelter schwerpunktmässiger Untersuchungen, allgemein wenig zu Risiken geforscht.*

**Welche Faktoren sind generell für die Diskussionstiefe der applikationspezifischen Risiken in den einzelnen Bereichen ausschlaggebend?**

A. Hett: *Wirkliche Untersuchungs-Schwerpunkte findet man bei Materialien beziehungsweise Produkten, welche bereits in grösseren Mengen produziert und bekanntermassen zu höheren Expositionen führen. Auch werden mögliche Produkte im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium nahe der Marktreife tendenziell genauer untersucht. Die effektive Anwendung eines Produktes bildet jedoch keinen Garant, dass dessen Gesundheits- und Umweltrisiken tatsächlich ausführlich abgeklärt wurden. Man denke hierbei beispielsweise an nanotechnologisch modifizierte Gewebe von T-Shirts.*

**Gern möchte ich das Gespräch mit einer Beobachtung beziehungsweise Behauptung schliessen: Offensichtlich ist die momentane Diskussion von Gesundheits- und Umweltrisiken auf die allgemein möglichen Auswirkungen von Nanopartikeln generell fokussiert. So befassen sich Spezialisten gegenwärtig insbesondere mit der möglichen Verteilung und Akkumulation in Körper und Umwelt. Damit wird in erster Linie dem ein-**

---

<sup>76</sup> Kohlenstoffnanoröhren sollen zum Beispiel in der Wasserstoffspeicherung für Brennstoffzellen Anwendung finden.

**zigen gemeinsamen Charakteristikum der Partikel, der Grösse bzw. Geometrie, Rechnung getragen. Daneben stellt sich allerdings auch die Frage, was diese Partikel an diesen Stellen schliesslich bewirken können. Da dies nicht alleine eine Frage der Geometrie ist sondern vielmehr auch der spezifischen Reaktivitäten, muss die Risikodiskussion zwangsläufig auch auf der Stufe der spezifischen Nanoprodukte verstärkt geführt werden.**

*A. Hett: Beides kann nicht voneinander losgelöst betrachtet werden: So ist neben der Bestimmung der inhärenten Toxizität des Materials, dem so genannten Risk Factor, nach wie vor auch die mögliche Exposition von Mensch und Umwelt entscheidend. Dabei hängt die effektive Exposition gegenüber bestimmten Nanopartikeln massgeblich davon ab, in welcher Weise diese zur Anwendung kommen. So ist beispielsweise entscheidend, ob Nanopartikel offen appliziert werden oder in einer Matrix eingebunden sind. Dabei muss, wie erwähnt, stets der gesamte Produktzyklus vom Design über die Herstellung zum Konsum bis zur Entsorgung betrachtet werden. Ein Beispiel zur Illustration: Kohlenstoffnanoröhren in Feldemissionsdisplays spielen während der eigentlichen Benutzung des Bildschirms kaum eine Rolle. Beim Recycling der Monitore hingegen könnten erhöhte Expositionen gegenüber Kohlenstoffnanotubes auftreten.*

**Dr. Annabelle Hett**

Dr. Annabelle Hett schloss ihr Studium in Veterinärmedizin mit einer Dissertation in Radiologie und Nuklearmedizin ab. Sie ist seit 2002 in der Abteilung Risk Engineering Services der Swiss Re tätig und leitet das Netzwerk „SONAR“, das der Früherkennung von Risikoindikatoren dient.

**Dr. Thomas Epprecht**

Dr. Thomas Epprecht ist promovierter Biochemiker. Er hat bei Swiss Re die Federführung im Gentechnologie-Bereich inne und wird den Nano-Bereich der Swiss Re künftig mitgestalten.

## **A.1.4 Auswertung**

Das Hauptergebnis des Gespräches liegt in der Erkenntnis, dass eine Identifikation von Applikationsbereichen mit einer vertieften Diskussion von Umwelt- und Gesundheitsrisiken grundsätzlich nicht beantwortet werden kann: Das Technologiefeld und die einhergehenden Risiken können ohne übergreifende Kooperation nicht überblickt werden. Vor diesem Hintergrund kann die vorliegende Arbeit lediglich einen Versuch darstellen, exemplarische Einblicke in applikationsspezifische Risiken zu gewähren.

Im Hinblick auf die Hypothesen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

**H1:** Die ungenügende Datengrundlage zur Einschätzung von Gesundheits- und Umweltrisiken ist nur ein Teil des zentralen Problems. Vielmehr liegt es, mangels internationaler Koordination, auch an der gegenwärtig fehlenden *Übersicht*: Einerseits testen Hersteller im Rahmen allgemeiner Zulassungsverfahren ihre Nanoprodukte, andererseits prüfen Universitäten Nanomaterialien, sofern sie diese preisgünstig beschaffen können.

**H2:** Entgegen der Erwartung sind die Bestrebungen zur Untersuchung der Risiken im *Beschichtungsbereich* nicht intensiver als anderswo. Im *Rüstungsbereich* wiederum geschieht die Entwicklung im Geheimen, sodass kein offener Dialog zu möglichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken stattfindet. Angesichts der diffusen Kausalkette werden Umweltrisiken (mit



Ausnahme der Boden- und Grundwassersanierung) im Allgemeinen kaum applikationsspezifisch diskutiert<sup>77</sup>; dies gilt auch für den *Energiebereich*.

Demzufolge scheint man grundsätzlich in sämtlichen Applikationsfeldern kaum vertieft Gesundheits- und Umweltrisiken nachzugehen. Einzige Ausnahme bildet der *Life Science* Bereich.

**H3:** Innerhalb des Produktzyklus stehen vor allem die Auswirkungen auf den Konsumenten im Vordergrund, wobei diese kurz vor der Markteinführung - wenn überhaupt - thematisiert werden.

## A.2 Åsgeir Helland

### A.2.1 Fragestellung und Hypothesen

Zentrale Fragestellung und Hypothesen sind dem vorangehenden Experteninterview zu entnehmen. Ergänzend wird den Umweltrisiken mit einer vierten Hypothese mehr Nachdruck verliehen:

#### Applikationsspezifische Umweltrisiken

|   |
|---|
| <p><b>H4:</b> Die applikationsspezifische Risikobetrachtung bezüglich gesundheitlicher Folgen ist weiter fortgeschritten als die entsprechende Diskussion im Umweltbereich.</p> |
|---|

### A.2.2 Wahl des Experten

Im Laufe der Expertensuche machte mich Dr. Hans Kastenholz (EMPA) freundlicherweise auf Åsgeir Helland aufmerksam. Er stammt aus Schweden und wird im Rahmen der besagten Fallstudie eine Arbeitsgruppe übernehmen. Da Åsgeir Helland kürzlich seine Masterarbeit<sup>78</sup> im Bereich Gesundheits- und Umweltrisiken der Nanotechnologie verfasst hat und gegenwärtig in diesem Gebiet seine Dissertation absolviert, verfügt er über ein äusserst breit gefächertes Wissen und ist mit dem aktuellen Stand der Forschung bestens vertraut.

### A.2.3 Vorbereitung und Durchführung des Interviews

Im Vorfeld des Interviews wurde wiederum ein Leitfaden mit ausgearbeiteten Fragen vorbereitet. Des Weiteren wurde ebenfalls eine Vorinformation mit Hintergrund und Fragestellung des Interviews zugestellt.

Das Gespräch von einer Stunde fand am 15. Juni am ETH-Institut für Mensch-Umwelt-Systeme in Zürich statt. Sämtliche entscheidende Punkte kamen zur Diskussion, wenn auch erneut nicht in der durch den Leitfaden vorgesehen Reihenfolge.

Åsgeir Helland war mit der Aufzeichnung des Interviews einverstanden. Im Folgenden wird das Experteninterview, das auf Englisch gehalten wurde, wiedergegeben<sup>79</sup>:

---

<sup>77</sup> Vgl. auch Abschnitt A.2.4.

<sup>78</sup> Vgl. Helland (2004).

<sup>79</sup> Mit freundlicher Genehmigung durch Åsgeir Helland (16. Juni 2005).

**Independent of the general lack of data, in which application-fields did the discussion about application-specific human health and environmental risks prosper the most?**

Å. Helland: *First, it needs to be emphasised that this discussion is not really established yet. On the level of specific applications the debate is, as I see it, too superficial as to be called a 'discussion'. Up to now, it is the step before the application, the actual production of the nanomaterials, which is considered. As a result, they are mostly dealing with concerns about the safety of workers in production sites.*

*Besides occupational health, investigations are related to nanoparticulated materials in general rather than to specific applications. Especially free-floating materials represent a concern, as in contrast to nanoparticles fixed in a matrix, direct exposure of individuals is possible. However, it is believed that in the long-term risks to humans will come from indirect environmental sources such as e.g. water and thus the exposure route will be through the skin or the intestinal tract and not e.g. inhalation.*

*To come back on applications: In the medical field, you have currently a lot of debating, since direct exposure is occurring here as well. For instance, some fullerenes can be used in tumour treatments. However, if fullerenes are released in nature, you could find them in aquatic organisms<sup>80</sup>. This illustrates a main problem in the medical field, and the keywords for risks here are persistence and the resulting potential of accumulation. Additionally, there is a study out now, showing that fullerenes may inhibit bacterial growth. This antibacterial effect could be good for some applications, but it might be critical for microbial communities.*

**Risks of nano-applications in medicine and cosmetics seem to be examined quite intensively. Is this an outcome of existing regulations or is it rather a consequence of increased sensibility since these products are directly applied on humans?**

Å. Helland: *I think it is both. Because of direct exposure, the cause-effect relationship is obvious. Consequently, liability is a major driving force for investigating adverse effects in life sciences.*

**Is this a reason, why sunscreen lotions have been and are still discussed quite extensively<sup>81</sup>?**

Å. Helland: *The sunscreen studies really hit the surface. In terms of regulations, the authorities have determined that titaniumdioxid nanoparticles have to be considered in the same way as the corresponding bulk material although there are two application-specific risks, which should be considered: On one hand, there is the environmental problem of washing-off the particles while you are swimming or taking a shower. On the other hand, the direct uptake of nanoparticles through skin is discussed. Unfortunately, the concrete tests for the latter have mostly used healthy skin-samples. Subsequently, you do not really know what is happening with damaged skin after you got a sunburn. I actually asked someone lately at a conference who is doing such tests. He replied that if he had a sunburn, he would not go out in the sun anyway... In this context, there is another issue you need to be aware of: The industry might have carried out examinations, but often they are not published.*

---

<sup>80</sup> Vgl. Untersuchung von Eva Oberdörster (2004) an juvenilen Fischen.

<sup>81</sup> Vgl. beispielsweise EC-Project NANODERM (2005).

**Another area in the life science sector is the topic of functional nano-food. Is there any application-specific debate about potential hazards?**

Å. Helland: *There is little information about risks of nano-food. There are only one or two expensive consultant-surveys, which concentrate on the nano-market and food*<sup>82</sup>.

**As I stated in the pre-information, it is quite difficult to conclude within a few weeks that in some fields no application-specific discussion about health and environmental risks is ongoing. Especially for these areas, we seek a confirmation through experts' judgements. For this purpose, I have structured the wide field of nanotechnology by using different important surveys in order to provide a sort of checklist**<sup>83</sup>.

**In which application fields can you exclude any debate about human health and environmental risks?**

Å. Helland: *This is a difficult question as it also depends on what you really mean by nanotechnology. Therefore, I find this overview helpful; it makes it much easier to structure the discussion...*

**For instance, coatings are already used widely throughout the society nowadays. Nevertheless, my preliminary literature review revealed no specific surveys about health and environmental risks in these fields.**

Å. Helland: *This is actually the problem; there are no specific studies. While the media discusses a few applications, the science is still discussing the materials' properties.*

*Eva Oberdörster brought up a point to me when we discussed coatings: There is the concern that non-toxic coatings can be turned into toxic ones by enzymes. When you put these coatings in a non-controlled environment, there is generally the potential problem of enzymes modifying these particles. Furthermore, there is a study, which demonstrates, that UV light breaks down the bondages of coatings. However, it is important, that such findings are not generalised in an inappropriate manner.*

**How would you judge the corresponding risk-debate in the field of composite materials?**

Å. Helland: *You have the same kind of situation as in coatings: As long as they are stable, there are no direct risks assumed. However, if it comes to mechanical wear, the situation is different. For instance, in tires they use multi-walled carbon nanotubes. Mark Wiesner from the US has shown that the proportion of nanotubes in run-off water is coherent with the amount of gas consumption in the corresponding area. This illustrates the inherent problems of composite materials: These materials can deteriorate and create what is referred to as nano-pollution. This can involve a wide array of effects from the capability of nanoparticles carrying other toxins or being toxic themselves over to persistency and bioaccumulation in the food chain. Especially if nano-composites are manufactured in a way, that nature cannot degrade them, you are most likely to run into problems.*

**Is there any difference in the application field of catalysis and synthesis?**

Å. Helland: *What you certainly can say in terms of catalytic nanoparticles: As they are designed to be catalytic, there is an inherent risk present too: The particles could activate reactions also somewhere else. Additionally, they have an enormous surface, therefore, such reactions could be triggered very fast.*

---

<sup>82</sup> Åsgeir Helland verwies in diesem Zusammenhang auf seinen Kollegen Andreas Köhler (EMPA).

<sup>83</sup> Es wurde hierzu eine übersetzte Version der Abbildung 4 erstellt.

**Another area are the applications in information technologies.**

Å. Helland: *As nanomaterials are most likely to be used in a contained way, you will not have any troubles during the application period. The problems are rather expected in the production phase. However, as materials in the information technology need to be particularly pure, they are handled in an enclosed manner. A remaining issue of occupational safety in the Silicon Valley are the extremely hazardous waste products.*

**There are some applications of nanotechnology in the military as well. Is there any dialogue about human health and environmental risks going on or is it all done secretly?**

Å. Helland: *There is a web page from the U.S., where a future soldier is visualised. It is quite scary, because you transform a human being in fighting machine by putting in extra implants and all sorts of technological gadgets. Especially robots are being developed which can be sent for reconnaissance for instance. It has to be emphasized that not everything is about 'nano'. However, as you said, it is all done sealed.*

**Furthermore, actuators and sensors represent a very wide field of different applications. What implication do you expect for human health and the environment?**

Å. Helland: *Sensors can be a solution to determine toxic levels. Consequently, there are methods, which can tell the producer that he has to readjust a process or clean up a particular site. The environmental risk as such is not really about the sensor itself, but it is the way, it will be used in terms of the mental model: If you can measure everything, you do not have to do anything beforehand. Therefore, the prevention aspect becomes less important. Nevertheless, mostly the concerns about sensors are not linked to health or environmental risks but rather to the discussion about privacy.*

**While there is some concerns about application-specific health risks, cause-effect relationships of environmental matters seem to be less clear. Are there particular areas, where environmental risks are discussed in an application-specific way?**

Å. Helland: *There seems not to be many application fields with a specific debate about environmental impacts. The time gap between cause and effect leads to a lack of empirical data and increased uncertainties. Nevertheless, environmental remediation has been discussed to some extent as there is a direct exposure; it is believed that this application will be increasingly used in the future and will most likely stand for most of the direct exposure to the environment in the near future. Furthermore, it seems to be the case that those applications, where direct exposure takes place, are the one most often debated, despite the fact that they probably stand for a limited share of the total number of application areas of nanotechnology.*

**In the area of energy technologies, I would expect environmental drawbacks to be discussed more deeply, as in these fields there is the tendency to think in life cycle assessments; environmental benefits and risks are obviously central.**

Å. Helland: *In energy applications, most nanoparticles, again, are used in a contained way. This might be one of the reasons, why there is no real risk-discussion yet. Additionally, not only the risks are not evaluated, the benefits are often not proved either. For example, it seems that carbon nanotubes are not the perfect structure to store hydrogen for fuel cells.*

**For example, photovoltaic cells have special coatings, which might be subject to deterioration. Is such abrasion not discussed at all?**

Å. Helland: *This turns the question away from the application into the life cycle perspective: What happens if it comes to mechanical wear? The question is also, what happens in the end of life. There are some projects going on in the European Union. Nevertheless, they progress slowly as an extremely limited amount of the budget goes to these kinds of surveys. There is a significant amount of money, which is used to investigate environmental benefits, but the other side is not really researched. I find this problematic, as in an economic perspective it makes no sense: You could run into problems, which could be very costly. For instance, cleaning up sites might be expensive or even not possible at all.*

**Finally, a last question: Which are the influencing factors determining the progress of the discussion about application-specific risks?**

Å. Helland: *It is mainly the industries' and funding agencies' fear of putting a lot of money into something that might be hazardous. To be cynical, it is an economic driven discussion. This is also the reason why the debate always refers to the GM-discussion since this is what they do not want. Therefore, they try to create this risk-discussion before the products are really put into the market. This discussion will probably not really influence the actual product launching, it rather determines if the prefix 'nano' is use for marketing purposes or not. If you read about the European Commission's statement, where it explains the funding of nanotechnology, it clearly declares: Economic growth needs research and this is why we research nanotechnology. Hence, first priority seems not to be efficient renewable energy-technologies, their major objective is rather the involving economic growth.*

**Åsgeir Helland**

Åsgeir Helland schloss 2004 mit dem *Master of Science in Environmental Management and Policy* sein Studium an der *University of Lund* ab und arbeitet gegenwärtig an seiner Dissertation zum Thema *Risk Management of Nanotechnology in a Life Cycle Perspective* an der EMPA in St. Gallen.

## A.2.4 Auswertung

Die Befragung von Helland bestätigte die Beurteilung, dass aufgrund der fehlenden Datengrundlage Applikationsbereiche mit einer intensiveren Diskussion von Umwelt- und Gesundheitsrisiken kaum zu erkennen sind. Helland betont, dass derzeit auf Applikations-Stufe noch nicht von einer Diskussion die Rede sein könne.

In Bezug auf die formulierten Hypothesen lassen sich nachstehende Schlussfolgerungen ziehen:

**H1:** Helland bestätigte, dass gegenwärtig generell mehr die verwendeten Materialklassen<sup>84</sup> als die entsprechenden Applikationen im Fokus der Untersuchungen stehen. Diese Forschung lässt zwar gewisse Schlüsse über potentiell zu erwartende Effekte zu. Man kann aber damit die effektiven Expositionen über den Lebenszyklus eines Produktes jedoch nicht abschliessend einschätzen, sodass das Problem mangelnder Daten auf der applikationsspezifischen Ebene bestehen bleibt. Helland bestätigte im Kontext kosmetischer Anwendungen weiter, dass Testresultate der Industrie oft nicht publiziert würden und dass nach wie vor keine nanospezifischen gesetzlichen Regelungen bestünden<sup>85</sup>.

---

<sup>84</sup> In der vorliegenden Arbeit auch als Strukturkomponenten bezeichnet.

<sup>85</sup> Vgl. Abschnitt 3.1.2, p. 9.

**H2 und H3:** Die grundsätzliche Einschätzung, dass nach wie vor die Chancen und weniger die Risiken der einzelnen Applikationsfelder im Vordergrund stehen, wurde im Laufe des Gesprächs mehrfach bestätigt: In vielen Applikationsbereichen (wie *Informationstechnologie*, *Konstruktionsbereich* und *Energietechnik*) kommen Nanopartikel in einer gebundenen oder von der Umgebung abgeschlossenen Form zur Anwendung<sup>86</sup>, sodass Gefährdungen weniger akut sind. In Anwendungsfeldern, wo hingegen eine direkte Exposition von Mensch und Umwelt zu erwarten ist, ist die Untersuchungstiefe von Gesundheits- und Umweltrisiken tendenziell grösser. Zur letzteren Gruppe zählt insbesondere der *Life Science* Bereich.

In der Perspektive der Lebenszyklen unterscheiden sich die Einschätzungen von Epprecht und Helland: Während der Versicherungsspezialist einen Untersuchungsschwerpunkt im Hinblick auf die Auswirkungen auf Konsumenten vermutet, betont Helland, dass intensive Diskussionen bezüglich Arbeitshygiene in der Produktionsphase im Gange sind. Epprecht bezieht sich in seiner Aussage allerdings auf die Bestrebungen der Nano-Unternehmen, während Åsgeir Helland von der Prioritätensetzung der Wissenschaft sprach.

**H4:** Da Helland die Angst vor Haftungsrisiken und damit ökonomische Interessen als treibende Kraft zur Intensivierung der Untersuchungsbestrebungen identifiziert, ist gerade in jenen Bereichen, wo aufgrund unmittelbarer Expositionen klare Ursache-Folgen-Ketten rekonstruiert werden können, eine verstärkte Auseinandersetzung mit Risiken festzustellen. Daraus resultiert für den Umweltbereich mit unklaren Kausalketten andererseits auch, dass die Diskussion weniger intensiv geführt wird.

In beiden Befragungen wurde unabhängig die Remediation von kontaminierten Geländen als eine der wenigen Ausnahmen bezeichnet, bei denen applikationsspezifischen Umweltrisiken nachgegangen wird.

---

<sup>86</sup> Engl. *contained*.







