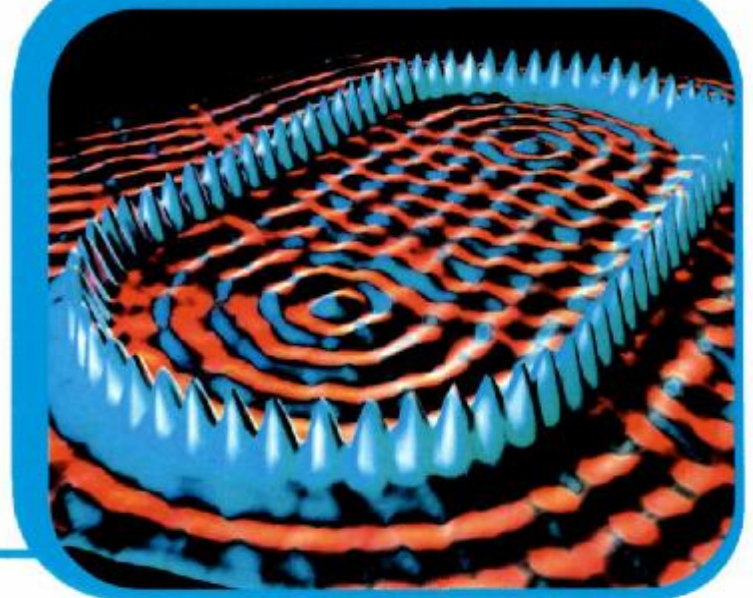


# Innovations- und Technikanalyse

Vorstudie

Nano-  
technologie



Gefördert vom



**bmb+f**

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Vorstudie für eine  
Innovations- und Technikanalyse (ITA)  
zur Nanotechnologie**

Dr. Norbert Malanowski

Herausgeber

**VDI-Technologiezentrum  
Abteilung Zukünftige Technologien**

im Auftrag und mit Unterstützung des

**Bundesministeriums für Bildung und Forschung  
(BMBF)**

Diese ITA-Vorstudie entstand im Rahmen des Vorhabens „Aktivitäten zu innovationsunterstützenden Maßnahmen zur Forschungs-, Technologie- und Bildungspolitik“ (Förderkennzeichen 16 I 1459), gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat Z 22.

Ein besonderer Dank gilt den Experten, die im Rahmen von Expertengesprächen wertvolle Beiträge und Anregungen für diese Studie geliefert haben.

Durchführung: VDI-Technologiezentrum  
Abteilung: Zukünftige Technologien  
Dr. Norbert Malanowski

Zukünftige Technologien Nr. 35

Düsseldorf, im Februar 2001

ISSN 1436-5928

1. Auflage, Februar 2001

2. leicht verändert Auflage, August 2001

Für den Inhalt zeichnen die Autoren verantwortlich. Die geäußerten Auffassungen stimmen nicht unbedingt mit der Meinung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung überein.

Außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte sind alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung.



**VDI-Technologiezentrum**  
Abteilung Zukünftige Technologien  
Graf-Recke-Straße 84  
40239 Düsseldorf

Das VDI-Technologiezentrum ist als Einrichtung des **Vereins Deutscher Ingenieure (VDI)** im Auftrag und mit Unterstützung des **Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)** tätig.

Titelbild:

Darstellung einer visualisierten Quantenmechanik (mit freundlicher Genehmigung der IBM Deutschland GmbH).

## **Vorwort**

Zur Sicherung des Standortes Deutschland ist es notwendig, zukunftsrelevante Technologieansätze frühzeitig aufzugreifen, zu analysieren und in Politik, Öffentlichkeit und auch in angrenzenden Gebieten der Wissenschaft bekannt zu machen und durch definierende und übersichtsorientierte Informationen zur Anerkennung zu verhelfen.

Im Rahmen unserer Arbeiten zur Technologiefrüherkennung haben wir dies für die Nanotechnologie bereits zu Beginn der neunziger Jahre getan. Anfang 1994 erschien in dieser Buchreihe der Band ‚Technologieanalyse Nanotechnologie‘. Zur verbesserten Übersicht über die künftigen Anwendungsfelder folgte dann, neben Publikationen zu Einzelfeldern wie Rastersondentechniken oder Nanoröhren, 1998 der Band ‚Innovationsschub aus dem Nanokosmos‘. Ziel dieser Arbeiten war das Schaffen einer soliden Informationsbasis für fördernde und innovationsunterstützende Maßnahmen des BMBF.

Neben dem frühzeitigen Aufgreifen eines Themas spielen für das erfolgreiche Durchsetzen von Innovationen jedoch auch vorsorgende Aspekte eine zentrale Rolle. Zwar konnten im Rahmen der Technologiefrüherkennung erste Hinweise darauf gefunden werden, dass es Teilaspekte der Nanotechnologie gibt, die neben den ausführlich dargestellten Chancenpotenzialen, risikenbehaftete Unsicherheiten enthielten. Einer vertieften Betrachtung aber, konnte bei der Technologiefrüherkennung nicht nachgegangen werden.

Die nun vorgelegte Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie sucht diese Aufgabenstellung aufzugreifen. Ihr Ziel ist es, das Thema Nanotechnologie vor dem Hintergrund der VDI-Richtlinie 3780 zur Technikbewertung in verschiedenen Wirkungsdimensionen wirtschaftlichen wie gesellschaftlichen Lebens zu analysieren. Es soll die Frage beantwortet werden, wo vertiefter Bedarf an Vorsorge orientierten Maßnahmen oder technikfolgenabschätzenden Bewertungen besteht. Ziel der vorgelegten Studie war also nicht das Durchführen einer umfassenden Innovations- und Technikanalyse zum Thema Nanotechnologie, sondern das Aufbereiten von verfügbaren Informationen sowie die Einschätzung von Experten bezüglich erwarteter Nebeneffekte bei der Realisierung nanotechnologischer Produkte oder Verfahren. Im

Rahmen der Tätigkeiten der Abteilung Zukünftige Technologien des VDI-Technologiezentrums werden üblicherweise als Einzelaktivitäten betrachtete technikbegleitende Maßnahmen im Sinne eines Integrierten Technologiemanagements als miteinander verzahnt gesehen. Die vorliegende Vorstudie stellt dementsprechend einen weiteren Baustein unserer - im Sinne des Integrierten Technologiemanagements umfassenden - Auseinandersetzung mit dem wichtigen Zukunftsfeld Nanotechnologie dar.

Dr. Dr. Axel Zweck

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Projektinformation .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einführende Bemerkungen.....</b>	<b>3</b>
	<i>2.1 Ausgangslage und Ziel der Vorstudie.....</i>	<i>3</i>
	<i>2.2 Die Vorstudie im Kontext aktueller Diskussion .....</i>	<i>4</i>
	<i>2.3 Struktur der Vorstudie.....</i>	<i>9</i>
	<i>2.4 Vorgehensweise .....</i>	<i>9</i>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse der Expertengespräche .....</b>	<b>12</b>
	<i>3.1 Technische Dimension.....</i>	<i>12</i>
	<i>3.2 Ökonomische Dimension.....</i>	<i>18</i>
	<i>3.3 Ökologische Dimension .....</i>	<i>24</i>
	<i>3.4 Gesundheitliche Dimension.....</i>	<i>30</i>
	<i>3.5 Individuelle und soziale Dimension.....</i>	<i>34</i>
	<i>3.6 Politische Dimension .....</i>	<i>40</i>
<b>4</b>	<b>Abschließende Betrachtung zentraler Ergebnisse und offene Fragen.....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>Gesprächsleitfaden für die Experteninterviews.....</b>	<b>51</b>



## 1 Projektinformation

Im Rahmen dieser Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse (ITA)<sup>1</sup> zur Nanotechnologie sollten einleitend - nach ausgewählten Branchen gegliedert - derzeitige und zukünftige nanotechnologische Entwicklungen und Anwendungen prägnant dargestellt werden. Da nicht jede technische Entwicklung behandelt werden konnte, erfolgte eine Beschränkung auf jene Anwendungen, bei denen die stärksten Implikationen zu erwarten waren. Für den Hauptteil war anvisiert, neben Fragen zur technischen und wirtschaftlichen Dimension der Nanotechnologie Fragen zu ökologischen, gesundheitlichen, individuellen und sozialen sowie zu politischen Aspekten zu erörtern. Damit war zum einen das Ziel verbunden, das vielfältige Innovationspotenzial in Verbindung mit diesen Aspekten zu ermitteln. Zum anderen ging es darum, weitere Technikfolgen zu erkennen, um auf mögliche Risiken rechtzeitig angemessen reagieren zu können und sie zu minimieren. In einem abschließenden Teil ging es darum, offene ITA-relevante Fragestellungen in Bezug auf Chancen und Risiken für zukünftige Arbeiten darzulegen.

---

<sup>1</sup> In dieser Studie wird erstmals mit dem neuen - vom BMBF eingeführten - Begriff Innovations- und Technikanalyse (ITA) anstelle von Technikfolgenabschätzung (TA) gearbeitet. „Das BMBF betont mit der neuen Bezeichnung Innovations- und Technikanalyse ITA, die den alten, negativ in Richtung Technikverhinderung besetzten Begriff Technikfolgenabschätzung TA ersetzt, die innovative Ausrichtung dieses Politikbereichs. Der konstruktive Ansatz der Innovations- und Technikanalyse ITA kann folgendermaßen definiert werden: Die ITA erforscht positive und negative Sekundär- und Tertiäreffekte der unter anderem vom BMBF geförderten Bildungs- und Forschungsinnovationen und erarbeitet möglichst frühzeitig alternative Handlungsempfehlungen. Das BMBF erwartet von der ITA, dass sie auf noch nicht genutzte Potenziale aufmerksam macht sowie innovative Lösungen im Umgang mit möglichen Risiken vorschlägt und nicht lediglich ‚Verbotsschilder aufstellt‘. Dazu arbeitet die ITA interdisziplinär. Sie bezieht technisch-wissenschaftliche, ethische, soziale, rechtliche, ökonomische, ökologische und politische Aspekte in ihre Analysen mit ein“ (Innovations- und Technikanalyse, Strategiepapier für das BMBF, Bonn, 2000).

Folgende Maßnahmen waren mit der ITA-Vorstudie verbunden:

1. Sichten, Strukturieren und Aufbereiten relevanten Materials für die Vorstudie zur Innovations- und Technikanalyse im Bereich Nanotechnologie
2. Ausgehend von dieser Basis wurde mit einschlägigen Experten aus der Nanotechnologie eine Festlegung der Prioritäten innerhalb und zwischen den verschiedenen Wirkungsbereichen vorgenommen
3. Auswerten der Expertengespräche und weiterer schriftlicher Quellen, Ausarbeitung einer Dokumentation, Formulieren und Strukturieren offener ITA-relevanter Fragestellungen
4. Konzeption weiterer möglicher Maßnahmen

## **2 Einführende Bemerkungen**

### ***2.1 Ausgangslage und Ziel der Vorstudie***

Schon kurz nach dem Wechsel vom 20. in das 21. Jahrhundert ist abzusehen, dass es sich bei der Nanotechnologie um eine Schlüsseltechnologie des neuen Jahrhunderts handelt. Einer der zentralen Gründe dafür liegt in der Selbstorganisation elementarer Bausteine, sich daraus ergebender Gestaltungsmöglichkeiten auf atomarer und molekularer Ebene und in der Umsetzung von entstehenden Paradigmenwechseln für die Herstellung nanotechnologischer Systeme. Diese vereinen nach bestehenden Vorstellungen sowohl physikalische Gesetzmäßigkeiten als auch chemische Stoffeigenschaften und biologische Bauprinzipien. Auf diese Weise eröffnet sich die Herstellung völlig neuartiger Materialien und Produkte in diversen Technik- und Wirtschaftsbereichen.<sup>2</sup> Insofern wundert es nicht, dass der internationale technologische Wettlauf um erfolgversprechende Märkte längst begonnen hat. In diesem technologischen Wettbewerb wiederum kommt es auch in Deutschland immer mehr darauf an, Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in einem frühzeitigen Stadium zu unternehmen. In diesem Kontext ist es ebenso sinnvoll, bereits frühzeitig auch der Fragestellung nachzugehen, welche Wirkungen diese neue Technologie auf die verschiedenen Bereiche des Standortes Deutschland haben kann.

Das BMBF hat eine Vorstudie zur Innovations- und Technikanalyse<sup>3</sup> im Bereich Nanotechnologie in Auftrag gegeben. Neben Fragen zur techni-

---

<sup>2</sup> In Abgrenzung zur Mikrosystemtechnik ist die Nanotechnologie interdisziplinär. Es wird gemeinhin erwartet, dass von den Erkenntnissen der Nanotechnologie diverse Fächer wie die Physik, die Chemie, die Biologie u. a. gleichzeitig profitieren, da auf atomarer bzw. Nano-Ebene die wissenschaftlichen Disziplinen nicht mehr auflösbar sind.

<sup>3</sup> Wie in Fußnote 1 der Projektinformation bereits dargestellt, wird in dieser Studie erstmals mit dem neuen - vom BMBF eingeführten - Begriff Innovations- und Technikanalyse (ITA) anstelle von Technikfolgenabschätzung (TA) gearbeitet. „Das BMBF betont mit der neuen Bezeichnung Innovations- und Technikanalyse ITA, die den alten, negativ in Richtung Technikverhinderung besetzten Begriff Technikfolgenabschätzung TA ersetzt, die innovative Ausrichtung dieses Politikbereichs. Der konstruktive Ansatz der Innovations- und Technikanalyse ITA kann folgendermaßen definiert werden: Die ITA erforscht positive und negative

schen und wirtschaftlichen Dimension der Nanotechnologie werden darin Fragen zu ökologischen, gesundheitlichen, individuellen und sozialen sowie zu politischen Aspekten berücksichtigt. Damit ist zum einen das Ziel verbunden, das vielfältige Innovationspotenzial in Verbindung mit diesen Aspekten zu ermitteln. Zum anderen geht es darum, Technikfolgen zu erkennen, um auf mögliche Risiken rechtzeitig angemessen reagieren zu können und sie zu minimieren (z. B. können sogenannte *Show Stopper* im Sinne von Innovationshemmnissen und Gefahren ermittelt werden).<sup>4</sup>

## **2.2 Die Vorstudie im Kontext aktueller Diskussion**

Die Nanotechnologie wird in Deutschland ebenso wie in anderen Ländern, wie USA, Großbritannien, Schweiz und Japan in der öffentlichen Diskussion weitgehend positiv aufgenommen.<sup>5</sup> So findet sich beispielsweise selbst im Heft 2/2000 des *Greenpeace* Magazins, das als ein Medium durchaus kritischer Beobachter in Bezug auf mögliche Gefahren für Umwelt und Gesellschaft betrachtet werden kann, ein Beitrag über die Nano-Chemie, „die einmal völlig neue Materialien möglich machen könnte - ohne Umweltverschmutzung“. Darüber hinaus wird viel von neuen Nano-

---

Sekundär- und Tertiäreffekte der unter anderem vom BMBF geförderten Bildungs- und Forschungsinnovationen und erarbeitet möglichst frühzeitig alternative Handlungsempfehlungen. Das BMBF erwartet von der ITA, dass sie auf noch nicht genutzte Potenziale aufmerksam macht sowie innovative Lösungen im Umgang mit möglichen Risiken vorschlägt und nicht lediglich ‚Verbotsschilder aufstellt‘. Dazu arbeitet die ITA interdisziplinär. Sie bezieht technisch-wissenschaftliche, ethische, soziale, rechtliche, ökonomische, ökologische und politische Aspekte in ihre Analysen mit ein“ (Innovations- und Technikanalyse, Strategiepapier für das BMBF, Bonn, 2000).

<sup>4</sup> Die vorliegende ITA-Vorstudie hatte nicht zum Ziel, die technische Dimension der Nanotechnologie besonders eingehend im Sinne einer reinen Technologiestudie zu beleuchten. Vielmehr bilden die technischen Aspekte einen eher breit angelegten Block unter insgesamt sechs Themenkomplexen. Für umfangreiche technische Details zur Nanotechnologie siehe Bachmann 1998: Innovationsschub aus dem Nanokosmos und unter [www.nanonet.de](http://www.nanonet.de).

<sup>5</sup> Siehe z. B. die überwiegende Berichterstattung über Nanotechnologie in überregionalen Zeitungen wie der Frankfurter Allgemeinen Zeitung, der Süddeutschen Zeitung und der Wochenzeitung Die Zeit, im Zeitraum von Februar 2000 bis Januar 2001, auch wenn mit den einsetzenden Debatten über die Thesen von Bill Joy mögliche kritische Aspekte behandelt werden.

Entwicklungen in der Messtechnik erwartet. Mit neuen Geräten soll eine Sofort-Analyse von Schadstoffen - ob im Boden, im Wasser oder in der Luft - in Zukunft erheblich erleichtert werden. Auch auf dem Technologiekongress der bayrischen Grünen im Oktober 2000 ging es darum, eine exemplarische Debatte über die Nanotechnologie zu führen, die irrationalen Ängsten vorbeugen, auf rationale Weise die Chancen dieser neuen Technologie deutlich machen und mögliche Gefahren abwehren helfen soll.

Mit möglichen Risiken der Nanotechnologie hatte sich das Verwaltungsgericht Freiburg im März 2000 zu beschäftigen, bei dem eine Klage eines Anwohners gegen die immissionsschutzrechtliche Genehmigung einer Nanopulverproduktion eingegangen war. Die Klage wurde abgewiesen, doch hat der Kläger, der gesundheitsgefährdende Risiken befürchtet, beim Verwaltungsgerichtshof in Mannheim den Antrag auf Zulassung der Berufung gestellt.

Eine erste größer angelegte Diskussion über Risiken der Nanotechnologie wurde in Deutschland - allerdings von einem Wissenschaftler aus den USA - im Juni 2000 angestoßen. Mit seinem Artikel „Why the future does not need us“ hat der Mitgründer des amerikanischen Unternehmens *Sun Microsystems*, Bill Joy, eine Debatte über die Risiken gegenwärtiger Schlüsseltechnologien vor allem zwischen Visionären, Fachwissenschaftlern und z.T. Vertretern aus Wirtschaft und Politik angestoßen. Vor der ausführlichen Darstellung der Thesen Joys im Feuilleton der *Frankfurter Allgemeinen Zeitung* im Juni 2000, war schon eine erste Diskussion in den USA angestoßen worden durch einen zweiseitigen Beitrag in der elektronischen US-Zeitschrift *Wired* (April 2000). In beiden Artikeln warnt er u. a. vor den Risiken künstlicher Nanomaschinen, deren Entwicklung er für die nächsten 20 Jahre prognostiziert. Diese Nanomaschinen könnten sich wahrscheinlich selbst replizieren und die Menschheit und die Biosphäre in absehbarer Zukunft in ihrer Existenz bedrohen. Außerdem ließe sich - so Joys These - die Nanotechnologie grundsätzlich leichter für zerstörerische als für konstruktive Zwecke nutzen (z. B. durch das Militär oder Terrorgruppen).

In einem anschließenden Interview (FAZ vom 13.6.2000) äußert er sich differenzierter und plädiert für einen Stopp der Forschung und einen freiwilligen Verzicht bei der Entwicklung in besonders gefährlichen Be-

reichen der Nanotechnologie. Ferner spricht er sich dafür aus, dass ein internationales Gremium die Risiken neuer Technologien abschätzen und daraus Richtlinien ableiten sollte. Ein solches Gremium solle - ähnlich wie das ehemalige amerikanische *Office of Technology Assessment* - mit Fachleuten besetzt sein, die selbst an kritischen Fragen forschen und im Konsens Richtlinien für den Forschungsbereich Nanotechnologie entwickelten. Darüber hinaus müssten sich aber auch Unternehmen mit möglichen Risiken beschäftigen (z. B. durch kontrollierte Bedingungen für Unternehmen und durch Abschluss von Versicherungspolice, um eventuelle Schäden beheben zu können). Für sinnvoll hält er ferner Sicherheitslaboratorien unter internationaler Kontrolle. Warum sich die Nanotechnologie leichter für zerstörerische als für konstruktive Zwecke nutzen lässt, ist wie in vorherigen Beiträgen nicht weiter begründet.

Die Aussagen von Joy sind mit Quellen unterlegt, die von Visionären wie Ray Kurzweil und Eric Drexler stammen.<sup>6</sup> Diese gehen in ihren Büchern von dem Postulat aus, dass in naher Zukunft sich selbst replizierende Nanomaschinen entwickelt werden können. Kurzweil fühlt sich jedoch von Joy grundsätzlich missverstanden und verweist auf seine optimistische Vision, in der mögliche Gefahren von Nanomaschinen nicht ausgeklammert sind (Kurzweil 2000). Tabula-rasa-Lösungen im Sinne eines völligen Verzichts hält er für unrealistisch. Statt dessen seien ethische Richtlinien sinnvoll wie die des von Eric Drexler geleiteten Foresight Instituts. Diesen sehr allgemeinen Richtlinien zufolge sollen Wissenschaftler u. a. vollständig auf die Entwicklung solcher spezieller Nanomaschinen (Entitäten) verzichten, die sich in einer natürlichen Umwelt selbst reproduzieren können. Zudem wäre ein Verbot aller physischen Nanomaschinen notwendig, die einen eigenen Code zur Selbstproduktion enthalten.<sup>7</sup>

Physiker wie Michio Kaku weisen darauf hin, dass die Nanotechnologie von der Entwicklung der hier kurz beschriebenen Nanomaschinen noch weit entfernt ist. Aus seiner Sicht lassen sich diese frühestens in 50 Jahren realisieren. Ein zentrales Realisierungshemmnis sieht er in der

---

<sup>6</sup> Ray Kurzweil, 2000: *Homo S@piens. Leben im 21. Jahrhundert – was vom Menschen bleibt*, 3. Auflage, Köln und Eric Drexler, 1991: *Unbounding the future - The nanotechnology revolution*, New York

<sup>7</sup> Foresight Guidelines on Molecular Nanotechnology, Revised Draft, 4. Juni 2000, abrufbar [www.foresight.org/guidelines/current.html](http://www.foresight.org/guidelines/current.html).

Übermittlung der notwendigen enormen Informationsmenge, die notwendig ist, um den Bauplan eines Gegenstandes für jedes Molekül zu beschreiben. Dieses Problem würde von Visionären wie Kurzweil und Drexler nicht klar erkannt, da sie in ihren Überlegungen physikalische Gesetze nicht hinreichend berücksichtigten. Joys Warnungen hält er für richtig, seine Zeitvorstellungen allerdings für überzogen, so dass der Menschheit noch ausreichend Zeit bliebe darüber nachzudenken, wie ein Einsetzen eines solchen Negativ-Szenarios verhindert werden könnte (Der Spiegel 15/2000). Weitere gewichtige Stimmen, die sich zwar ebenfalls (sehr) kritisch mit den Thesen von Joy auseinandersetzen, plädieren dennoch dafür, sich mit den Risiken neuer Schlüsseltechnologien ernsthaft zu beschäftigen (siehe z. B. FAZ vom 11.7.2000, Interview mit Rustom Roy in: Die Zeit 32/2000). Das Erstaunliche an dieser Debatte ist allerdings, dass sie ausschließlich über einen Teilbereich der Nanotechnologie geführt wird, der noch gar nicht existiert, jedoch andere Teilbereiche gänzlich ausklammert, in denen bereits nanotechnologische Entwicklungen und Produkte existieren.

Bei einer Veranstaltung des Wissenschaftszentrums NRW im November 2000 zum Thema „Mensch oder Roboter – Wem gehört die Zukunft?“ brachte Hubert Markl, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, den Ertrag der Debatte über die Thesen von Joy wie folgt auf den Punkt:

„ ... die von Kurzweil, Joy und ... vielen anderen Kundigen aufgeworfenen Fragen sind von Wichtigkeit; sie öffentlich in großer Breite – also nicht nur unter Naturwissenschaftlern und Technikern, sondern unter möglichst vielen Interessierten – zur Diskussion zu stellen, war und ist verdienstvoll; und wenn dies mit etwas medientypischer Begleitmusik geschieht, so sollten wir Wissenschaftler, die doch immer die Aufmerksamkeit der breiten Öffentlichkeit wünschen und suchen, darüber eher erfreut als pikiert sein. Das heißt freilich noch lange nicht, dass man jedem, der dabei als Prophet - wenn nicht gar als Messias – einer neuen Epoche hingestellt wird, auch alles aufs Wort glauben muss. Dazu sind Diskussionen schließlich da, dass Urteilskraft im Widerspruch geschärft wird“ (Markl 2000).

Mit der Debatte über die Thesen von Joy ist zumindest in Ansätzen eine fruchtbare Diskussion über Technikfolgen angestoßen worden, die sich

vor allem auf ethische Fragen in Wissenschaft und Forschung bezieht. Selbst in den eher fortschrittsgläubigen USA wird - nachdem viele Aktivitäten im Bereich *Technology Assessment*<sup>8</sup> in jüngerer Vergangenheit eingestellt worden waren (u. a. der Betrieb des *Office of Technology Assessment*) - wieder häufiger die Frage nach den Folgen neuer Technologien gestellt. Hier haben sich sozialwissenschaftliche Akteure frühzeitig an der Joy-Debatte beteiligt. Sie plädieren dafür, mit der Entwicklung der Nanotechnologie, die im Rahmen der *National Nanotechnology Initiative* mit ca. 422 Millionen Dollar öffentlich gefördert wird,<sup>9</sup> ein frühzeitiges *Technology Assessment* zu verbinden und eine systematische Analyse der geplanten und ungeplanten Folgen dieser neuen Technologie einzuleiten (u. a. Coates 2000; Turning Point Project in New York Times vom 24.8.2000). Auch wenn bisher der Schritt zu einem umfassenden *Technology Assessment* noch nicht erreicht worden ist, wird zumindest seit kurzem über Nanotechnologie in Verbindung mit sozialen Fragen diskutiert. Dies zeigt ein nicht-öffentlicher Workshop der amerikanischen *National Science Foundation* im September 2000:

„Much of the two-day workshop focused on the promise of nanotechnology to help solve such intractable social problems as poverty and hunger and to bring forth medical advances to fight disease and to improve overall human health. But the workshop also dealt with some of the fear surrounding nanotechnology“ (Nanotechnology. Chemical & Engineering News, 16.10.2000).

Eine praxisrelevante Innovations- und Technikanalyse für den Bereich Nanotechnologie beinhaltet allerdings sehr viel mehr. Die vorliegende ITA-Vorstudie geht über solche Diskussionen, die eher auf einer Meta-Ebene geführt werden, hinaus und liefert erstes empirisches Material für eine detailliertere und zeitnahe ITA für den Bereich Nanotechnologie. Dabei bezieht sie sich auf technisch-wissenschaftliche, ethische, soziale, rechtliche, ökonomische, ökologische und politische Aspekte. Damit wird

---

<sup>8</sup> Im angelsächsischen Sprachraum wird meist noch mit dem Begriff *Technology Assessment* und der Abkürzung TA gearbeitet.

<sup>9</sup> Gemäß den Angaben von Mihail Rocco (2001), *Senior Advisor* der amerikanischen *National Science Foundation*, ist die im US-Kongress beschlossene öffentliche Förderung für das Jahr 2001 im Vergleich zum Vorjahr um 56 Prozent gesteigert worden.



eine empirische Basis für eine ITA Nanotechnologie in Deutschland erarbeitet, mit Hilfe derer eine differenzierte Diskussion sowohl über Chancen als auch über Risiken einzelner Bereiche der Nanotechnologie und über Alternativen sowie weitere ITA-Aktivitäten geführt werden kann.

### **2.3 Struktur der Vorstudie**

In dieser Vorstudie erfolgt eine Konzentration auf folgende Wirkungsdimensionen<sup>10</sup> der ITA in Deutschland:

- Technische Dimension
- Ökonomische Dimension
- Ökologische Dimension
- Gesundheitliche Dimension
- Individuelle und soziale Dimension
- Politische Dimension

Diese Wirkungsbereiche wurden wiederum unterteilt in die vier zeitlichen Entwicklungsdimensionen kurz- mittelfristig (bis 5 Jahre), langfristig (bis 10 Jahre), visionär (bis 30 Jahre) und Science Fiction (mehr als 30 Jahre bzw. nicht absehbare Realisierbarkeit). In einem abschließenden Teil wurden zudem noch nicht berücksichtigte Perspektiven und offene Fragen thematisiert.

### **2.4 Vorgehensweise**

Zur weiteren Eingrenzung und besseren Bearbeitung des Themas erfolgte - neben der Problemorientierung<sup>11</sup> - eine Konzentration auf folgende ausgewählte Bereiche der Nanotechnologie:

---

<sup>10</sup> Bei diesem Vorgehen haben wir uns an der VDI-Richtlinie 3780 zur Technikbewertung orientiert.

<sup>11</sup> Eine andere Einteilung findet sich bei den Nano-Kompetenzzentren, die eine technische Ausrichtung haben. Siehe dazu [www.nanonet.de](http://www.nanonet.de).

- Chemie/Materialwirtschaft
- Elektronik
- Feinmechanik/Optik
- Medizin/Pharmazie
- Analytik

Bei dieser Vorstudie konnte nicht, wie meist in größer angelegten ITA Studien, auf eine umfangreiche Sekundärliteratur für die Auswertung zurückgegriffen werden. Insofern dienten die leitfaden-gestützten Expertengespräche vor allem der Primärerhebung, um ITA-relevante Aspekte im Bereich der Nanotechnologie frühzeitig zu erkennen. Die ausgewählten Experten waren Wissenschaftler der Nanotechnologie aus Universitäten sowie Abteilungsleiter und Laborleiter aus Unternehmen (siehe Übersicht 1). Die Gespräche mit ihnen dauerten zwischen 1,5 und 3 Stunden.<sup>12</sup>

### Übersicht 1: Gesprächspartner

Prof. Dr. Heuken Aixtron AG Aachen (Chemie/Materialwirtschaft)	Dr. König DaimlerChrysler AG Ulm (Elektronik)
Dr. Beckstette/Dr. Koch Carl Zeiss Oberkochen (Feinmechanik/Optik)	Prof. Dr. Hartmann Universität des Saarlandes Saarbrücken (Medizin/Pharmazie, Analytik)
Fr. Prof. Dr. Ziegler Universität Kaiserslautern (Chemie/Materialwirtschaft)	Dr. Grünwald Robert Bosch GmbH Stuttgart (Chemie/Materialwirtschaft)
Dr. Leson Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (Feinmechanik/Optik)	Prof. Dr. Fuchs/Dr. Röthig Universität Münster (Medizin/Pharmazie, Analytik)
Dr. Jordan	Prof. Dr. Bigl/Dr. Schindler

<sup>12</sup> Zusätzlich wurden ein ausführliches Gespräch speziell über Nanopartikel mit Prof. Dr. Fissan, Dr. Kruis und Dr. Kuhlbusch von der Universität Duisburg und ein ausführliches Gespräch über die europäische Dimension einer ITA im Bereich Nanotechnologie mit Dr. Compañó von der Europäischen Kommission, Directorate General Information Society, Information Society Technology, geführt.

Universitätsklinik Charité Berlin (Medizin/Pharmazie)	Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig (Feinmechanik/Optik)
---	---

Zur Vorbereitung auf das Expertengespräch über ITA-Aspekte im Bereich Nanotechnologie erhielten die Gesprächspartner eine kurze Projektinformation und weitere Informationen im Rahmen persönlicher Telefonate. Es wurde davon ausgegangen, dass die Gesprächspartner ein umfangreiches Know-How zu den Fragen bezüglich der technischen Dimension einbringen. Hinsichtlich der anderen Aspekte (z. B. soziale, ökologische, politische) bot sich vor allem ein Sensibilisieren für Fragen solcher Art an, da die Beschäftigung mit diesen in der Regel nicht zum Hauptarbeitsfeld der ausgewählten Gesprächspartner gehörte.

### **3 Ergebnisse der Expertengespräche**

In Bezug auf die Ergebnisse der Expertengespräche ist voranzustellen, dass die Antworten bzw. Anmerkungen zu den Fragen der Dimensionen Technik und Ökonomie und mit Abstrichen zur ökologischen Dimension aus dem oben genannten Grund ausführlicher waren als zu den anderen Aspekten der ITA.

#### **3.1 Technische Dimension**

Während die technische Realisierung einiger nanotechnologischer Produktideen nur eine Frage kurz- bzw. mittelfristiger Zeithorizonte ist - z. B. eine ausgedehnte und wirtschaftliche (Massen-)Produktion besonders kratzfester, schmutz- oder wasserabweisender großer Oberflächen - bestehen an der technischen Umsetzung spektakulärer nanotechnologischer Ideen, wie z. B. schadstoff-beseitigende Nanomaschinen,<sup>13</sup> bei den befragten Wissenschaftlern und Industrievertretern aus dem Bereich der Nanotechnologie zum gegenwärtigen Zeitpunkt deutliche Zweifel. Aufgrund des noch "jungen" Entwicklungsstadiums in vielen Bereichen der Nanotechnologie und fehlender empirischer Daten haben Einschätzungen von Realisierungshorizonten "visionärer" Produkte alles in allem einen schemenhaften Charakter. Gleichwohl kann es im Rahmen von Innovationsprozessen aus der Sicht der überwiegenden Mehrheit der Befragten kreativitätsfördernd und orientierend wirken, wenn die Entwicklung einer Schlüsseltechnologie mit technologischen - und gesellschaftlichen<sup>14</sup> - Visionen verbunden ist, auch wenn einige Bestandteile solcher Visionen möglicherweise lange Zeit visionär bzw. immer Science Fiction bleiben. Noch zu entwickelnde Visionen sollten jedoch als solche kenntlich gemacht werden, um überhohe und unrealistische Erwartungen hinsichtlich gegenwärtig und kurz-/mittelfristig zu erreichender technischer Entwicklungen zu vermeiden, wie teilweise in den USA zu beobachten ist, wenn Eric Drexlers Visionen bezüglich der Nanotechnologie nicht eindeutig als solche kenntlich gemacht bzw. eingestuft werden.

---

<sup>13</sup> So eine der Visionen von amerikanischen Wissenschaftlern aus dem Bereich Nanotechnologie wie z. B. Eric Drexler und Ralph Merkle.

<sup>14</sup> Ausführlich dazu siehe Abschnitt 3.6.

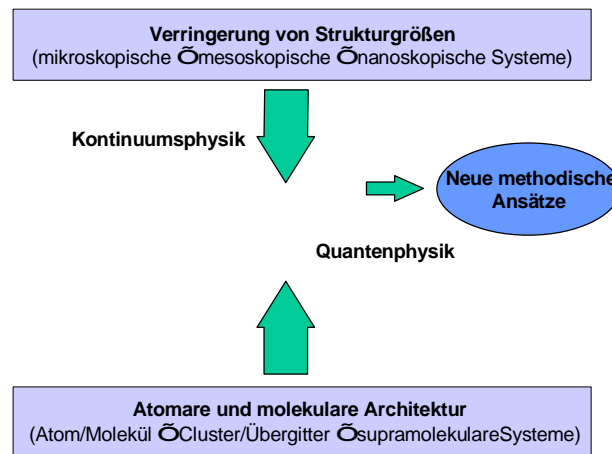
Forschung zur Nanotechnologie wird - neben der vor allem anvisierten umfassenden Nutzung der Selbstorganisation elementarer Bausteine - nicht selten die konsequente Fortführung entsprechender Forschung aus dem Bereich Mikrosystemtechnik sein. Die Fortschritte der letzten Jahre in der Mikrosystemtechnik haben aus der Sicht sämtlicher Gesprächspartner eindrucksvoll gezeigt, welche funktionellen Strukturen bereits heute realisierbar sind: Fliegende Hubschrauber mit einer Länge von nur 24 mm und einem Gewicht von 400 mg oder Glasfaserdosimeter zur Behandlung von Krebspatienten, die mittels Katheter in die unmittelbare Nähe eines Tumors geschoben werden können. Bereits Bestandteile unseres täglichen Lebens sind mikrotechnische Produkte wie Tintenstrahldruckköpfe, Airbagsensoren, Schreib-Leseköpfe für magnetische Festplatten zur Speicherung von Daten und Lasersysteme für Compact-Disks. Offen in diesem kontinuierlichen Verkleinerungsprozess einerseits und in den neuen Gestaltungsprozessen auf atomarer und molekularer Ebene andererseits sind die physikalischen Grenzen,<sup>15</sup> an die nanotechnologische Entwicklungen stoßen können. Damit ist auch noch offen, wie das erwartete vielfältige Innovationspotenzial der Nanotechnologie hinreichend genutzt werden kann.

Eine mögliche Grenze der Nanotechnologie kann aus Expertensicht der Übergang in diejenige Dimension sein, in der Quanteneffekte zunehmend zum Tragen kommen, also am Übergang von der Kontinuumsphysik zur Quantenphysik (siehe Übersicht 2). Die Quantenphysik ist keine „neue Wissenschaft“ mehr, dennoch sind viele Fragen über die Nutzung von Quantensystemen offen. So könnten Funktionsstörungen von elektronischen Bauteilen auf der Basis von Einzelelektronen-Übertragungen bereits durch geringe Temperaturschwankungen oder durch minimale Erschütterungen hervorgerufen werden. Ob derartige Probleme tatsächlich auftreten bzw. ob auch für diese technische Lösungen gefunden werden, kann aufgrund der fehlenden empirischen Daten heute noch nicht beantwortet werden.

---

<sup>15</sup> Gegenwärtig findet sich beispielsweise in der optischen Lithographie eine physikalische Grenze bei Strukturen zwischen 50 und 100 nm.

## Übersicht 2: Übergang Kontinuumsphysik zur Quantenphysik



Grundsätzliche technische Realisierungshemmnisse liegen nach Meinung der Experten bei den "visionären" selbstreplizierenden Nanomaschinen. In den oftmals dargestellten Visionen von Eric Drexler sind solche Nanomaschinen mit winzigen Roboterarmen ausgestattet, die einzelne Atome greifen und sie quasi nach Belieben auf andere Moleküle übertragen können. Es ist zwar nach Expertenmeinung vorstellbar, dass einzelne Atome, die in der Regel sehr reaktiv und bindungsfreudig sind, auf diese Art und Weise aufgegriffen werden können, fraglich ist aber, ob diese Nanomaschinen über genug Energie verfügen, einzelne Atome anschließend wieder abzulösen. Aussichtsreicher erscheint vor diesem Hintergrund das Übertragen von kleineren Atomgruppen zu sein.

Teilweise ebenfalls visionären oder zumindest einen langfristigen Charakter haben die in Übersicht 3 aufgeführten Beispiele nanotechnologischer Entwicklungen, bei denen nicht immer der direkte Bezug zur Nanotechnologie (z. B. Genomanalyse und Neuronale Kommunikation) in den Expertengesprächen hergestellt wurde. Inwieweit sich Produktideen wie molekulare Lager oder optische Computer realisieren lassen und wie diese Produktideen sinnvoll angegangen werden können, ist zur Zeit noch eine völlig offene und sehr interessante Frage.

### Übersicht 3: Beispiele nanotechnologischer Entwicklungen (langfristig/visionär)

- Molekulare Lager
- Optische Computer (z. T. Nano)
- Genomanalyse (z. T. Nano)
- Keine Medikamente (Selbstheilung)
- Neuronale Kommunikation (z. T. Nano)

Näher und konkreter sind die in Übersicht 4 genannten Beispiele nanotechnologischer Entwicklungen mit einem kurz-/mittelfristigen Realisierungshorizont, die zum Teil schon auf dem Markt eingeführt sind. Diese Anwendungen finden sich derzeit vor allem in den Feldern Ultrapräzisionstechnik und Schichttechnologie, beides Bereiche, in denen sich bestehende Produkte/Anwendungen bei großem industriellen Interesse weiterentwickeln lassen.

### Übersicht 4: Beispiele nanotechnologischer Entwicklungen (kurz-/mittelfristig)

- Katalysatoren
- Schnelle elektrochrome Systeme
- Neue dielektrische Werkstoffe
- Verschleißschutz\* und Schmierschichten
- Brennstoffzelle
- Optoelektronische Systeme (LED)\*
- Neue Kleber, neue Lacke
- Membranen
- Solarzellen\*
- Optische Vergütung\*
- Röntgenoptiken
- Funktionale Beschichtungen (Prothetik, Biokompatibilität)
- Energiespeicher (Brennstoffzelle, Li-Ionen-Batterie)
- Lithographiewerkzeuge
- Neue Speicherkonzepte
- Nano-Sintermaterialien\*
- Pharmascreeing
- Intelligente Medikamente (Drug Carrier)

\* Auf bzw. teilweise auf dem Markt

Bei der Realisierung der in Übersicht 4 dargestellten nanotechnologischen Entwicklungen könnten insbesondere aus der Sicht der befragten Experten aus der Industrie einige sogenannte *Show Stopper* bereits laufende Innovationsprozesse erheblich behindern.<sup>16</sup> Als mögliche *Show Stopper* könnten sich eine unzureichend koordinierte Forschung oder Ausbildung an den Universitäten, eine mangelnde Grundlagenforschung in den Unternehmen, strukturelle Veränderungen im Unternehmen, hohe Entwicklungs- bzw. Herstellungskosten, fehlende Zulieferunternehmen sowie Alternativentwicklungen aber auch Verstöße gegen Gesundheits- oder Umweltauflagen erweisen. Da wo möglich, sollten entsprechende Handlungsweisen erörtert werden.

Für eine mögliche Suche nach Alternativen zu nanotechnologischen Entwicklungen sprechen zunächst die derzeit noch anfallenden hohen Kosten, die für nanotechnologische Entwicklungen entstehen. Diese Ausgaben resultieren u. a. aus der umfangreichen Grundlagenforschung, die gegenwärtig vielfach notwendig ist, um z. B. Prototypen zu realisieren. Ferner werden in der "Nanowissenschaft" Hochtechnologieprodukte benötigt, wie etwa Hochleistungscomputer, die in kurzer Zeit überholt sein können. Darüber hinaus ist so manche Umsetzung von nanotechnologischen Entwicklungen in die Massenproduktion gegenwärtig noch mit vielen technischen Problemen verbunden (z. B. Quantenelektronik, verschleißfreie Lager). Technische Probleme für die großtechnische Herstellung von Produkten basierend auf Nanotechnologie scheinen allerdings zur Zeit noch in der Natur der Sache zu liegen. Um Strukturen von der atomaren Dimension ausgehend aufzubauen, sind viele Wiederholungsschritte und ein enormer Zeitaufwand notwendig, bis verwendungsfähige Makrostrukturen, wie etwa Nanomaterialien entstehen.

Es könnte - aus der Sicht einiger Gesprächspartner - auch eingewendet werden, dass für bestimmte Anwendungen mikrotechnologische Produkte ausreichen und fortgeführte öffentliche Unterstützungsleistungen nicht sinnvoll sind. Rein funktionell sind jedoch kleinere Systeme größeren mit identischen Eigenschaften aufgrund größerer Leistungsfähigkeit, geringerem Material- und Energieverbrauch und flexibleren Einsatzmög-

---

<sup>16</sup> Show Stopper sind Hindernisse, die (z.T. unerwartet) auftreten und im Extremfall zur Unverkäuflichkeit einer Entwicklung bzw. eines Produktes führen können.



lichkeiten überlegen. Des Weiteren wird es immer spezifische Anwendungen geben, die eine weitere Miniaturisierung erfordern, und wenn die Technik erst einmal entwickelt ist, wird sie aufgrund ihres Querschnittcharakters diffundieren (z. B. neuartige Lithographietechniken). Es wird daher erwartet, dass die hohen Kosten, die für nanotechnologische Entwicklungen anfallen, den Aufwand mittelfristig bzw. langfristig ausgleichen, zumal sehr viele "Nebenprodukte" im Sinne weiterer innovativer Produkte entstehen. So hat die Forschung über Eigenschaften von Nanomaterialien zu Nebenprodukten wie umweltverträglichen Holzschutzmitteln oder neuen Biochiptechnologien geführt.

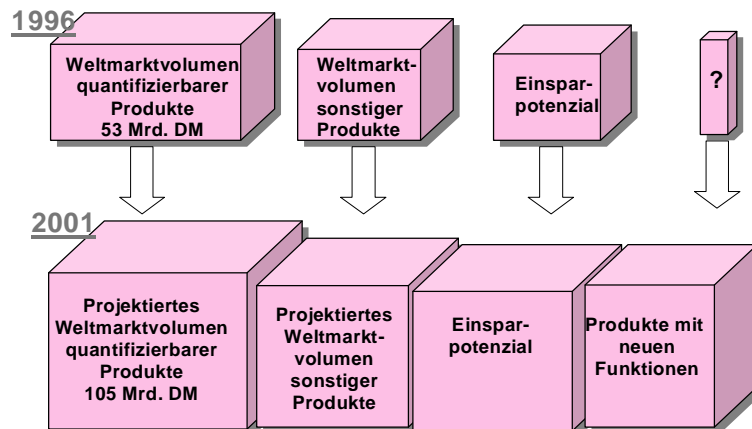
### **Zusammenfassung**

- Bei der Darstellung der technischen Realisierung nanotechnologischer Produktideen sollte deutlich unterschieden werden zwischen kurz-/mittelfristigen und langfristigen/visionären Zeithorizonten.
- In den Innovationsprozessen der Nanotechnologie können Visionen kreativitätsfördernd und orientierend wirken, auch wenn manche ihrer Bestandteile möglicherweise lange Zeit visionär oder immer Science Fiction bleiben.
- In den Gestaltungsprozessen auf atomarer und molekularer Ebene spielen physikalische Grenzen eine entscheidende Rolle. Wo diese Grenzen bzw. Größenskalen langfristig liegen, bleibt eine offene Frage.
- Damit das Innovationspotenzial der Nanotechnologie hinreichend genutzt werden kann, sollten Handlungsweisen zum Vermeiden sogenannter *Show Stopper* möglichst frühzeitig erörtert werden,
- Die Exklusivität der Nanotechnologie besteht vor allem darin, dass auf atomarer und molekularer Ebene gestaltet werden kann. Der Weg hin zu solchen neuen Gestaltungsprozessen ist jedoch zunächst ein beschwerlicher und mit hohen Kosten verbundener, der allerdings mittel- oder langfristig völlig neue Möglichkeiten in Aussicht stellt.

### 3.2 Ökonomische Dimension

Die Nanotechnologie wird nach Einschätzung aller befragten Experten als bedeutende Querschnitts- und Schlüsseltechnologie in den nächsten Jahrzehnten erhebliche Auswirkungen auf viele industrielle Bereiche haben. Für die Industrie werden insgesamt enorme Umsatzpotenziale erwartet. Es wird von den Experten exemplarisch hingewiesen auf universell einsetzbare elektronische Bauteile (sehr klein mit minimalem Energieverbrauch), neue Werkstoffe (leicht, verschleißfest, korrosionsgeschützt etc.), kommerziell nutzbare hochdichte Datenspeicher und neuartige Batterien. Beim Beziffern des Marktpotenzials der Nanotechnologie stützen sich die meisten der Befragten in ihren Aussagen auf die Marktprognosen von Bachmann (1998),<sup>17</sup> der für das Jahr 2001 von einem projektierten Weltmarktvolumen quantifizierbarer Projekte von ca. 105 Milliarden DM als Untergrenze ausgeht (siehe Übersicht 5).

#### Übersicht 5: Wirtschaftliches Potenzial der Nanotechnologie



<sup>17</sup> Z.T. auch Bezug auf die nach einzelnen Bereichen der Nanotechnologie differenzierten Zahlen, welche sich unter [www.nanonet.de](http://www.nanonet.de) finden. Seit kurzem sind neue - deutlich höhere - Prognosen im Internet unter [www.kompetenznetze.de](http://www.kompetenznetze.de) zu finden, die jedoch zum Zeitpunkt der durchgeführten Expertengespräche noch nicht zur Verfügung standen. Sie stammen aus einer Marktrecherche vom VDI-TZ, die sich auf von Nanotechnologie beeinflusste Produkte bezieht und differenziert ist nach folgenden Bereichen: Elektronik, Optoelektronik, Displays, Speichertechnologie, Sensoren, Medizinische Diagnostik, Therapie und Gerätetechnik, Keramik/Materialien, Analysesysteme, Katalysatoren, Pharmazie, Instrumente für die Biotechnologie und Membrane.

Den größten Einzelposten bei dieser Prognose stellt der Bereich Herstellung und Anwendung ultradünner Schichten mit einem prognostizierten weltweiten Marktvolumen in Höhe von ca. 42 Milliarden DM (2001) dar, gefolgt von der Ultrapräzisionstechnik mit ca. 26 Mrd. DM und den Nanomaterialien mit ca. 25 Mrd. DM (siehe [www.nanonet.de](http://www.nanonet.de)). Hinsichtlich eigener Prognosen über das Jahr 2001 hinaus fällt den befragten Experten ein Beziffern eher schwer, u. a. auch weil sich häufig eine eindeutige Abgrenzung der Produkte (Was ist ein nanotechnologisches Produkt? Wie hoch ist der nanotechnologische Anteil an einem bestimmten Produkt? Wie bedeutsam ist die Nanotechnologie für ein bestimmtes Produkt) als Problem erweist. Angeregt wird von einigen Experten ein regelmäßiges und ausführliches Monitoring des gesamten ökonomischen Potenzials und differenziert nach ausgewählten Bereichen der Nanotechnologie, wie es z. B. in den USA geschieht.<sup>18</sup> Dabei sollten auch Einsparungspotenziale durch nanotechnologische Entwicklungen bzw. Produkte vor allem im Gesundheitswesen (siehe Kapitel 3.4), in der Produktion und beim Energieverbrauch berücksichtigt werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Markteinführung nanotechnologischer Entwicklungen bzw. Produkte stellen, insbesondere aus Sicht der befragten Industrieexperten, Verkaufspreise dar, die nicht erheblich über denen bereits vorhandener Produkte liegen und vom Abnehmer oder Verbraucher relativ schnell akzeptiert werden. Im Vergleich zur Herstellung konventioneller Produkte müssen sich zumindest mittelfristig Wettbewerbsvorteile ergeben, wie z. B. durch eine höhere Qualität des Produkts, einen geringeren Materialverbrauch, energiesparende Fertigungsanlagen oder verschleißfestere Maschinenteile ("billiger", "besser", "neue Funktionalität"). Von besonderem Gewicht sind zur Zeit die noch hohen Entwicklungskosten für Massenprodukte, die beispielsweise von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) allein nur selten oder gar nicht aufgebracht werden können. Die KMU sind aber als Zulieferer für Produktionsanlagen oder Materialien oder im Bereich der Geräteherstellung tätig. Aus Sicht der befragten Industrievertreter ist

---

<sup>18</sup> Mihail Rocco (2001), *Senior Advisor* der amerikanischen *National Science Foundation* und dort zuständig für den Bereich Nanotechnologie, prognostiziert - sehr allgemein - ein langfristiges (10-15 Jahre) Wirtschaftspotenzial der Nanotechnologie von ca. 700 bis 800 Milliarden US-Dollar (Halbleiter-Industrie, integrierte Schaltkreise, pharmazeutische Produkte, Katalysatoren und eingesparte Energie durch die Anwendung von Nanotechnologie).

insgesamt ein langer Vorlauf für Forschung und Entwicklung bis zum *Return of Investment*<sup>19</sup> notwendig, ein zeitlicher und finanzieller Aufwand, für den sich im Unternehmen nicht immer Zustimmung finden lässt.

Die Vorteile für Großunternehmen liegen nach den Expertenaussagen eindeutig bei der Marktdurchsetzung. Sie haben häufiger die Möglichkeit als KMU, Produkte am Markt zu platzieren, auch wenn ein langer Vorlauf notwendig ist. Als Vorteil "junger" KMU wird demgegenüber hervorgehoben, dass diese mit erheblich geringeren Ressourcen, aber mit der vielfach vorzufindenden Gründerstimmung, mehr Innovationen und kreative Ideen erreichen. Nach Ansicht der befragten Experten erfüllen beide Seiten wichtige Aufgaben für die Fortentwicklung kommerzieller Nanotechnologie. Damit etablierte KMU und Neugründungen allerdings zu einem beständigen Innovationsmotor werden können, bedarf es einer gezielten vorübergehenden Unterstützung.

Kooperationen funktionieren nach Einschätzung der meisten Experten am besten dort, wo Unternehmen aus verschiedenen Branchen miteinander kooperieren. Die Grenzen kooperationsfördernder Strukturen werden meist schnell erreicht, wenn Mitwettbewerber beteiligt sind. Mehrere Experten weisen darauf hin, dass bisher insgesamt wenige KMU und Neugründungen in Kooperationsprojekten und -netzwerken mitwirken. Von dieser Seite wird angeregt, Firmengründungen im Bereich Nanotechnologie über einen mittelfristigen Zeitraum öffentlich zu fördern.

Alle befragten Experten halten flexible Kooperationsstrukturen zwischen KMU, Forschungseinrichtungen und der Großindustrie für notwendig. Eine intensive Zusammenarbeit dieser Akteure wird auch für die Unterstützung des Technologietransfers als notwendig erachtet. Die rasche und gezielte Verbreitung neuer Erkenntnisse, die intensive Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen Forschungs- und Technologie-Strategen, Anwendern, Herstellern sowie Analytikern stellt eine wichtige Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen dar. Eine solche Bündelung der Kräfte ist durch die Arbeit der Kompetenzzentren Nanotechnologie anvisiert.<sup>20</sup> Damit sollen die vielfältigen

---

<sup>19</sup> Verhältnis des gesamten investierten Kapitals und des Umsatzes zum Gewinn.

<sup>20</sup> Die sechs vom BMBF geförderten Kompetenzzentren konzentrieren sich auf unterschiedliche Schwerpunkte der Nanotechnologie: Berlin auf Nanostrukturen in der Optoelektronik, Aachen auf Laterale Nanostrukturen, Braunschweig auf die

Chancen, welche die Nanotechnologie bietet, im internationalen Wettbewerb genutzt werden. Insbesondere gegenüber Japan und den USA gilt es, Anteile auf dem globalen Markt zu sichern, in dem sich Deutschland bisher gut positioniert hat.

Die befragten Experten sehen es volkswirtschaftlich von großer Bedeutung, dass diverse Industriezweige nicht den Anschluss an neue nanotechnologische Entwicklungen in den zunehmend verstärkten internationalen Wettbewerbskämpfen verlieren. Etablierte Verfahren und Produkte könnten durch neue technologische Entwicklungen sehr schnell ihre Marktfähigkeit verlieren. Folglich sehen die meisten Experten kurz-/mittelfristig eher Mehrkosten für den Standort Deutschland durch die Entwicklung der Nanotechnologie, da das Voranbringen dieser Technologie noch mit einem sehr hohen Forschungsaufwand und hohen öffentlichen Fördermitteln, z. B. für Universitäten, verbunden ist. Damit unterscheidet sich die Nanotechnologie allerdings nicht von der Förderung anderer Spitzentechnologien. Deutliche Einsparungspotenziale werden langfristig durch den Einsatz von nanotechnologischen Produkten in der Medizin für das Gesundheitswesen<sup>21</sup> (beispielsweise durch kürzere Krankenhausaufenthalte von Patienten im Rahmen neuer Krebstherapien), im Bereich Energie und bei der Beseitigung von Umweltschäden erwartet.<sup>22</sup>

---

Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung, Dresden auf Ultradünne Schichten, Kaiserslautern und Saarbrücken auf Funktionalität durch Chemie sowie Hamburg, München und Münster auf Nanoanalytik. "Das BMBF hat die Kompetenzzentren eingerichtet, um die Forschungslandschaft auf dem Gebiet der Nanotechnologie bei ihrer Selbstorganisation zu unterstützen und die industrielle Anwendung der Nanotechnologie voranzubringen. Aufgaben der Kompetenzzentren liegen im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit, der Aus- und Weiterbildung, der Schaffung eines wirtschaftlich attraktiven Umfeldes und der Beratung vor allem industrieller Interessenten auf dem jeweiligen Gebiet der Nanotechnologie" ([www.nanonet.de](http://www.nanonet.de)).

<sup>21</sup> Ausführlich dazu Kapitel 3.4.

<sup>22</sup> Ausführlich zu ökologischen Aspekten Kapitel 3.3.

Die Einschätzungen der befragten Experten zur Beschäftigungsentwicklung in der Nanotechnologie gehen in der Regel auseinander. Manche Experten rechnen langfristig mit einem großen Zuwachs an Arbeitsplätzen, vergleichbar mit dem in der Biotechnologie, ohne ihn genau zu beziffern,<sup>23</sup> andere gehen von einem Nullwachstum aus, wiederum andere prognostizieren einen moderaten Zuwachs an Arbeitsplätzen. Bei ihren Prognosen können die befragten Experten aus dem Bereich Nanotechnologie allerdings noch nicht auf diesbezügliche wissenschaftliche Ergebnisse aus der Arbeitsmarktforschung zurückgreifen. Die Bearbeitung einer solchen soliden Basis steht noch aus. Die Mehrheit der Befragten geht davon aus, dass einige Arbeitsplätze in traditionellen Fertigungsbereichen abgebaut werden, jedoch bei den höherwertigen Arbeitsplätzen ein erheblicher Zuwachs erreicht wird, der wiederum direkt und indirekt verbundene Bereiche der Beschäftigung sichern hilft. Für sämtliche Experten sind Standortsicherung und Standortstärkung zwei sehr wichtige Punkte, die es in zukünftigen Untersuchungen zum Innovationspotenzial der Nanotechnologie stärker zu berücksichtigen gilt, da bislang diese Thematik wegen des noch "jungen" Entwicklungsstadiums der Nanotechnologie deutlich unterbelichtet geblieben ist.

Ein weiteres umfangreiches Feld mit einem großen Wirtschaftspotenzial, aber auch mit diversen offenen Fragen, ergibt sich zusätzlich durch das Thema "Nachhaltige Entwicklung" (u. a. Standort- und Wettbewerbsvorteile durch Umweltschutz). Dieses wird im Rahmen der vorliegenden ITA-Vorstudie aus pragmatischen Gründen in Verbindung mit ökologischen Aspekten behandelt.

---

<sup>23</sup> In einer Publikation des BMBF (2000, S. 45) geht man davon aus, dass ca. 100 000 Arbeitsplätze bei Kern-Biotechnologieunternehmen, speziellen Zulieferern und Dienstleistern existieren. Insgesamt, so eine Schätzung, hängen ca. 300 000 industrielle Arbeitsplätze direkt oder indirekt von der Branche Biotechnologie ab.

**Zusammenfassung**

- Es werden enorme wirtschaftliche Potenziale resultierend aus der Nanotechnologie erwartet. Um diese Chancen für den Standort Deutschland gezielter nutzen zu können, wird ein regelmäßiges und differenziertes Monitoring des ökonomischen Potenzials angeregt.
- Bisher wirken insgesamt wenige KMU in Kooperationsprojekten und Netzwerken mit. Sollen KMU zu einem stetigen Innovationsmotor bei der Fortentwicklung der Nanotechnologie werden, bedarf es einer noch gezielteren öffentlichen Förderung über einen mittelfristigen Zeitraum.
- Kurzfristig sind für den Standort Deutschland Mehrkosten für die Fortentwicklung der Nanotechnologie zu erwarten. Langfristig können Kosten im Gesundheitswesen, im Energiebereich und bei der Beseitigung von Umweltschäden eingespart werden.
- In bisherigen Innovationsanalysen ist die Betrachtung der Wirkungen der Nanotechnologie auf Arbeitsmärkte in ersten Ansätzen berücksichtigt worden. Aufgrund der Weiterentwicklung dieser Thematik gilt es, zukünftig diese arbeitsmarkt-relevanten Fragen zu vertiefen und auf eine solide empirische Basis zu stellen.

### 3.3 Ökologische Dimension

**Vorbemerkung:** Das Konzept der "nachhaltigen Entwicklung" oder verkürzt "Nachhaltigkeit" erhielt 1987 zum ersten Mal ein breites politisches und internationales Gewicht. Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung entschloss sich, den ursprünglich aus der Forstwirtschaft stammenden Begriff Nachhaltigkeit zum Leitmotiv für ihren Bericht "Our Common Future" zu machen. Darin wird eine nachhaltige Entwicklung definiert als eine "Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können".<sup>24</sup>

In Folge entwickelte sich der Begriff der Nachhaltigkeit zu einem Schlagwort für mögliche Lösungsansätze globaler Umwelt- und Entwicklungsprobleme. Beim sogenannten Erdgipfel 1992 in Rio de Janeiro stand "nachhaltige Entwicklung" (*sustainable development*) im Mittelpunkt vieler Diskussionen und prägt seither zahlreiche Aktivitäten in diesem Bereich. Viele Nationen, Regionen und Kommunen auf der ganzen Welt haben "nachhaltige Entwicklung" als ein gesellschaftliches und politisches Leitbild erkannt und entsprechende Handlungsstrategien, -pläne oder -agenden entworfen.

Nachhaltigkeit ist ein normatives Leitbild, das direkt von Wertedefinitionen der Gesellschaft abhängt. Es muss - wie andere gesellschaftliche Leitbilder - ständig neu überdacht und praktiziert werden. Obwohl viele verschiedene Definitionen existieren, kann nachhaltige Entwicklung im Wesentlichen als ein Wandlungsprozess verstanden werden, in dem die Nutzung natürlicher Ressourcen und die Richtung technologischer und sozialer Entwicklung miteinander harmonisieren und das derzeitige und künftige Potenzial vergrößern, menschliche Bedürfnisse und Wünsche zu erfüllen. Zur praktischen Umsetzung des Leitbildes der nachhaltigen Entwicklung wurden sogenannte Managementregeln entworfen. Diese Regeln konkretisieren das Leitbild und geben den groben Rahmen vor, in dem sich wirtschaftliche, politische und gesellschaftliche Aktivitäten bewegen müssen, wenn sie mit Nachhaltigkeit vereinbar sein sollen.<sup>25</sup>

---

<sup>24</sup> Siehe u. a. Hauff 1987.

<sup>25</sup> Ausführlich dazu Radke 1999, Rennings u. a. 1996, Knaus/Renn 1998.



Um eine neue Technologie wie die Nanotechnologie in Bezug auf Nachhaltigkeit zu bewerten, wäre zu prüfen, ob ihre Auswirkungen im Einklang mit den Regeln für eine nachhaltige Entwicklung stehen. Zwar sollen ökologische, ökonomische und soziale Chancen und Risiken in der Regel gleichermaßen im Bewertungsraster erfasst werden, doch bietet sich für eine erste Einschätzung des Nachhaltigkeitspotenzials der Nanotechnologie im Rahmen dieser ITA-Vorstudie die ökologische Dimension an, da hier gegenwärtig die meisten der insgesamt noch wenigen Daten vorliegen. Damit wird auch deutlich, dass zu diesem Thema ein überaus großer Forschungsbedarf besteht.

**Ergebnisse:**<sup>26</sup> Der ökologische Nutzen nanotechnologischer Verfahren und Produkte könnte aus der Sicht der befragten Experten durch Ressourcenschonung (Material- und Energieeinsparungen), dem Ersatz umweltgefährdender Stoffe und einer flächendeckenden Umweltüberwachung sehr groß werden. Eine Ressourcenschonung wird von einigen Experten grundsätzlich bei der Herstellung miniaturisierter Produkte erwartet, da diese bei geringerem Materialaufwand dieselbe Funktion wie konventionelle Erzeugnisse erfüllen. Energieeinsparungen könnten beim Transport durch Gewicht- und Volumenreduktion der Produkte und durch die geringeren Verbrauchskosten von energiesparenden elektronischen Produktionsanlagen langfristig erreicht werden. Der Einsatz von verschleißfesteren Maschinenteilen, korrosionsgeschützten Werkstoffen, Nanoschmiermitteln bzw. nanotechnologischen Verfahren zur Oberflächenglättung von sich bewegenden Verbindungen verspricht kurz-/mittelfristig zur Standzeitverlängerung von Maschinen beizutragen. Neue Werkstoffe werden bei vergleichsweise geringem spezifischen Gewicht eine größere Stabilität als herkömmliche Materialien aufweisen und dadurch ebenfalls zur Ressourcenschonung beitragen. Eine Folgeanwendung mit großem Effekt kann nach Einschätzung der befragten Industrievertreter ein reduzierter Treibstoffverbrauch bei PKWs sein.

Umweltfreundlichere und leistungsfähigere Solarzellen können kurz-/mittelfristig bzw. auch langfristig eine verbesserte dezentrale Energieversorgung ermöglichen. In Verbindung mit leichteren

---

<sup>26</sup> Die befragten Experten haben in der Regel ihre Antworten nicht explizit vom Nachhaltigkeitspotenzial der Nanotechnologie abgeleitet, sondern sind eher fragmentarisch auf einzelne Aspekte der Nachhaltigkeit eingegangen.

Akkumulatoren höherer Kapazität könnte das Elektroauto größere Reichweiten erzielen und damit zukünftig größere Bedeutung erlangen. Solartechnik wird - so die Einschätzung einiger Experten - insgesamt dazu beitragen den Verbrauch fossiler Energieträger wie z. B. Kohle und Erdöl zu senken und dadurch dem Treibhauseffekt entgegenwirken. Wärmestrahlungsreflektoren an Kraftfahrzeugen, die variabel nur Licht bestimmter Wellenlänge durchlassen, könnten Klimaanlage weitgehend überflüssig machen und so dazu beitragen, erhebliche Treibstoffmengen einzusparen.

Durch selektive Katalysatoren aus Nanomaterialien ließen sich kurz-/mittelfristig eine noch effizientere Wirkungsweise und höhere Umsatzungsrate erreichen. Damit käme es zu einer Senkung des Stoffbedarfs der Ausgangsprodukte. Weiterhin können durch neue funktionelle Eigenschaften von Nanomaterialien seltene Elemente bzw. Rohstoffe langfristig ersetzt werden. Als ein Beispiel wird der Ersatz von Metallen bei der Katalyse chemischer Reaktionen genannt.

Toxische Stoffe können kurz-/mittelfristig bzw. langfristig durch Nanomaterialien ersetzt werden und so zu einer Verringerung der Umweltbelastung beitragen. Beispielsweise würde durch den Ersatz von Schwermetallen in Katalysatoren von Kraftfahrzeugen die Belastung der Umwelt durch Platinausscheidungen gesenkt werden. Langfristig vorstellbar ist für einige der befragten Experten auch der Austausch von Hydraulikölen durch Ferrofluide oder der Verzicht von Schwermetallen in neuartigen Batteriesystemen.

Chemiefabriken im Nanometermaßstab könnten langfristig chemische Verbindungen dezentral dort produzieren, wo sie benötigt werden, so dass zentrale großtechnische Chemieanlagen mit ihren potenziellen Unfallrisiken teilweise überflüssig würden. Bei einem Störfall würden dann nur geringe Mengen an Chemikalien freigesetzt.

Da breit genutzte nanotechnologische Erzeugnisse noch nicht besonders häufig auf dem Markt sind, können bis dato keine Einschätzungen über deren Langlebigkeit und Robustheit gemacht werden. Aufgrund der Vielfalt zu erwartender Produkte werden allgemeingültige Aussagen diesbezüglich als nur schwer möglich eingeschätzt. Durch die (molekularen) Kontrollmöglichkeiten bei der Produktion ist eine gute Materialver-

arbeitung und in Verbindung mit eingebauten Selbststroutinen eine hohe Zuverlässigkeit der Produkte und lange Produktzyklen zu erwarten. Über die Umweltverträglichkeit der Herstellungsverfahren nanotechnologischer Produkte (Energieverbrauch, toxische Nebenprodukte etc.) können noch keine definitiven Aussagen gemacht werden, da entsprechende Großproduktionen noch nicht existieren (siehe auch Übersicht 6). Ausgehend vom heutigen Stand der Technik, sind zu ihrer Produktion zum Teil noch gesundheitsgefährdende Stoffe notwendig. Im Zuge des zunehmenden industriellen ökologischen Interesses (Öko-Audit etc.) hat jedoch aus Expertensicht die gezielte Suche nach geeigneten Ersatzstoffen begonnen.

Ein vermeintlich kritischer Punkt scheint die Recyclefähigkeit nanotechnologischer Produkte zu sein. Eine Demontage und Sortierung wiederverwertbarer Bestandteile wird durch ihre sehr geringe Größe erheblich erschwert und wäre, wenn überhaupt, nur mit aufwändigen technischen Hilfsmitteln möglich. Ob unter diesen Bedingungen eine Wiederverwertung ökonomisch und ökologisch sinnvoll sein kann, erscheint eher fraglich.

Die meisten befragten Experten gehen davon aus, dass durch nanotechnologische Sensoren zukünftig eine große Anzahl verschiedener (Schad-)Stoffe auffindbar sein wird. Da derartige Sensoren sehr klein und durch die Produktion von großen Stückzahlen auch kostengünstig sein werden, hält man eine flächendeckende, kontinuierliche Überwachung der Umwelt und damit ein besseres Verständnis für Wirkungszusammenhänge kurz-/mittelfristig bzw. langfristig realisierbar. Freigesetzte Schadstoffe könnten auf diesem Weg schnell identifiziert und zwecks Verhinderung weitreichender Folgewirkungen rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Durch die Empfindlichkeit derartiger Messsysteme ließen sich leichter Schadensverursacher ermitteln, da bereits geringste Spuren ausreichen, den Weg zu der Schadstoffquelle zurückzuverfolgen. Eine Inspizierung von großtechnischen Fabrikationsanlagen durch geeignete Sensoren könnte - nach Einschätzung einiger Befragter - deren Betriebssicherheit erhöhen. Darüber hinaus ergäben sich Möglichkeiten zu einer einfachen behördlichen On-line Kontrolle von Industrieanlagen und darauf beruhend eine Berechnung von Umweltsteuern nach dem tatsächlichem Ausstoß. Die Experten erwarten, dass durch preiswerte und leicht zu bedienende

Sensorsysteme Umwelt- und Verbraucherorganisationen eine verbesserte Kontrollfunktion ausüben werden. Auch Privatpersonen wären in der Lage, z. B. Schadstoffe im häuslichen Bereich schnell und einfach nachzuweisen.

### Übersicht 6: Mögliche Anwendungen im Bereich Umwelt und offene Fragen

Anwendungen	Offene Fragen
<ul style="list-style-type: none"> <li>o verschleißfestere Maschinenteile</li> <li>o selektive Chemie</li> <li>o korrosionsgeschützte Werkstoffe</li> <li>o bessere Schmiermittel</li> <li>o leistungsfähigere Solarzellen</li> <li>o selektive Katalysatoren</li> </ul> <p>➡ (alle kurz-/mittelfristig)</p>	<p>Recyclebarkeit (?)  Umweltverträglichkeit (?)  mögliche Toxizität (?)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>o Nanomaschinen zur Schadstoffbeseitigung</li> </ul> <p>➡ (visionär oder gar Science Fiction)</p>	<p>ungebremste (?)  unvorhergesehene (?)  selbständige (?)  Vermehrung</p>

Visionär ist für einige Experten die Konstruktion von Ölcontainern aus intelligenten Werkstoffen, die sich nach einem Leck von selbst wieder verschließen und so größere Folgeschäden verhindern würden. Die Folgen einer Fehlfunktion intelligenter Werkstoffe, beispielsweise plötzlicher Materialzerfall, könnten jedoch ebenso zur Unfallverursachung führen.

In anderen Visionen wird ausgetretenes Öl durch spezielle Nanomaschinen in nicht toxische Substanzen zerlegt. Dies hält man denkbar für grundsätzlich alle Schadstoffe bzw. sogar für radioaktive Elemente, die aus der Umwelt entfernt werden sollen. Diese Umwandlungsreaktionen auf atomarem Niveau sind effektiv nur durch eine große Anzahl von Nanomaschinen zu bewerkstelligen.<sup>27</sup> Um diese herzustellen, müssten Nanomaschinen wahrscheinlich in die Lage versetzt werden, sich selber zu vervielfältigen. Die Erwartungen bezüglich einer solchen Entwicklung schwanken zwischen 20 und 50 Jahren oder werden völlig in Zweifel gezogen. Derartige Vorstellungen rufen bei einigen der befragten Experten

<sup>27</sup> Es gibt heute bereits - ohne Nanotechnologie - biologische Klärstufen mit optimierten Bakterien für Öl beim Betrieb von herkömmlichen Kläranlagen, die weiterentwickelt werden können.

vereinzelt Bedenken hervor, dass Parallelen zu freigesetzten gentechnisch veränderten Organismen auftreten könnten. Was würde passieren, wenn Nanomaschinen, die zur Zeit als visionär bzw. Science Fiction betrachtet werden, sich unvorhergesehen selbständig verändern und begannen, beispielsweise ungebremst in der Natur vorkommende Substanzen abzubauen? Die Wahrscheinlichkeit dafür, schätzen Experten, könnte sich bei Nanomaschinen verschärfen, wenn eine selbständige Vermehrung vorgesehen ist und sie sich unaufhaltsam ausbreiten. Eine vorläufige Lösung – auch wenn derartige Ideen noch weit entfernt oder als Science Fiction erscheinen – wäre eine aufmerksame Beobachtung dieser Problematik schon zum gegenwärtigen Zeitpunkt.

### **Zusammenfassung**

- Nanotechnologische Verfahren und Produkte versprechen, durch die anvisierten Anwendungen einen großen ökologischen Nutzen zu bringen (u. a. Energieeinsparung, Materialeinsparung, Ressourcenschonung, Ersetzen toxischer Stoffe, bessere Messgeräte zur Erkennung von Verschmutzungen in der Umwelt).
- Das vielfältige Potenzial der Nanotechnologie für eine nachhaltige Entwicklung im ökologischen Sinne wird gegenwärtig eher in einzelnen Facetten als im Gesamtkontext erörtert.
- Die Recyclebarkeit von Produkten, basierend auf Nanotechnologie, die Umweltverträglichkeit der Herstellungsverfahren und eine mögliche Toxizität einzelner Nanopartikel<sup>28</sup> sind zur Zeit noch offene Fragen, die in zukünftigen Arbeitsschritten frühzeitig angegangen werden können.

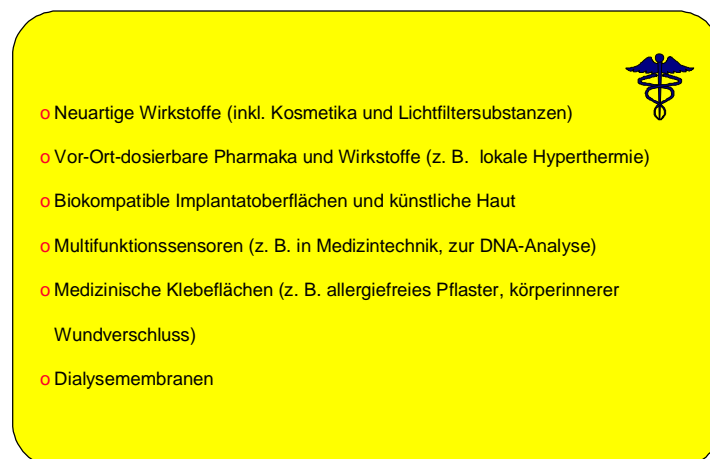
Spezielle Nanomaschinen, die z. B. Schadstoffe in nicht toxische Substanzen zerlegen, sind gegenwärtig visionär, wenn nicht sogar Science Fiction. Dennoch sollte eine aufmerksame Beobachtung der Problematik hinsichtlich unvorhergesehener/ungebremster/selbstständiger Vermehrung von Nanomaschinen frühzeitig geleistet werden.

<sup>28</sup> Die Frage nach einer möglichen Toxizität einzelner Nanopartikel wird ausführlich im folgenden Kapitel 3.4 (Gesundheitliche Dimension) behandelt.

### 3.4 Gesundheitliche Dimension

Für die Medizin erwarten alle befragten Experten durch nanotechnologische Entwicklungen<sup>29</sup> viele neue Diagnose- und Therapieverfahren. Krankheiten könnten z. B. durch Biosensoren frühzeitiger als bisher diagnostiziert und noch vor dem Ausbruch therapiert werden. Konkrete Anwendungen oder zumindest Modellaufbauten gibt es bereits in den Bereichen Prothetik, biokompatible Oberflächen und Multifunktionssonden. Ferner gehen einige Experten u. a. von einer kurz-/mittelfristigen Entwicklung von Herz-Unterstützungssystemen aus, in denen ein Magneto-fluid aus Nanoteilchen als verschleißfreier Antrieb genutzt wird. Ein weiteres Beispiel ist ein neues Verfahren zur Krebstherapie (Hyperthermie), in dem man Vor-Ort-dosierbare Wirkstoffe einsetzt.<sup>30</sup> Über eine selektive Aufnahme von magnetischen Nanopartikeln in Tumorzellen und eine gezielte lokale Erwärmung der Tumorzellen, soll es gelingen, diese absterben zu lassen, ohne dass das gesunde Gewebe zu stark belastet wird (weitere Beispiele siehe Übersicht 7).

#### Übersicht 7: Beispiele nanotechnologischer Entwicklungen in der Medizin/Pharmazie (kurz-/mittelfristig)



Eher langfristig hingegen ist für manche Experten die Identifikation einer Erkrankung allein durch das Aufspüren charakteristischer Moleküle in der Atemluft. Die Vorstellungen zur Entwicklung eines medizinischen

<sup>29</sup> Die bereits seit geraumer Zeit eingesetzten Kontrastmittel für eine Kernspintomographie wurden lange Zeit nicht als Nanotechnologie eingestuft, da der Begriff noch gar nicht existierte.

<sup>30</sup> Dieses Verfahren soll erstmals ab Winter 2001 in klinischen Versuchen getestet werden.

Nanoroboters, wie sie sich in den Visionen von Eric Drexler finden, halten die meisten befragten Experten für etwas naiv. Ihrer Meinung nach ist die langfristige bzw. visionäre Entwicklung eines Nanoroboters, der selbständig im menschlichen Körper beispielsweise verkalkte Herzkranzgefäße reinigt, nicht das, was in der Medizin dringend benötigt wird, zumal mit einem Ballonkatheter dies heute schon möglich ist. Vielmehr - so diese Experten - geht es darum, ein besseres Verständnis über molekulare Zusammenhänge von Krankheiten im menschlichen Körper zu bekommen. Dabei und in Verbindung mit der Entwicklung neuer Wirkstoffe, medizinischer Klebeflächen etc. kann aus ihrer Sicht die Nanotechnologie eine große Hilfestellung leisten.

Gemeinsamkeit dieser anvisierten therapeutischen Neuerungen ist eine für den Menschen möglichst schonende und wirksamere medizinische Behandlung. So können z. B. aus Expertensicht mit hochspezifischen Wirkstoffen Nebenwirkungen verringert werden. Multifunktionelle Sonden erleichtern chirurgische Operationen; mit einem Sensor gekoppelte Dossiereinrichtungen sorgen für den notwendigen Insulin-Wert bei Diabetikern. Die Qualität der medizinischen Grundversorgung wird - so die Erwartung der Befragten - durch derartige Produkte und Verfahren erheblich steigen. Vor allem neue effektive Therapiekonzepte für die Behandlung von Krebs versprechen einen erheblichen Beitrag zur Gesundheit des Menschen zu leisten. Zusätzliche Anregungen in Bezug auf neue medizinische Behandlungsmöglichkeiten und Präventivmedizin versprechen sich mehrere Experten davon, intensiver das breite Spektrum medizinischer Möglichkeiten - resultierend aus nanotechnologischen Entwicklungen - aus internationaler Perspektive stärker zu beleuchten.

Neue Therapie- und Diagnoseverfahren im medizinischen Bereich (z. B. Krebstherapie) könnten, unter der Voraussetzung, dass prophylaktische Maßnahmen nicht drastisch ansteigen, enorme volkswirtschaftliche Einsparungen zur Folge haben. Beispielsweise auch durch eine zunehmende Etablierung nanotechnologisch basierter chirurgischer Operationsmethoden wären aus Expertensicht zukünftig viel mehr Eingriffe als bisher ambulant durchführbar und Liegezeiten in Krankenhäusern beachtlich kürzer. Die Folge wäre eine erhebliche Kostenreduktion im Gesundheitswesen oder aber eine Freisetzung gebundener Mittel für neue Aufgaben im Gesundheitswesen. Sollte durch solche Innovationen im medizinischen Sektor die Lebenserwartung des Menschen steigen,

könnten eventuell neue Anforderungen an das etablierte Rentensystem gestellt werden. Aus der Sicht einiger Experten bietet es sich an, das Optimierungspotenzial resultierend aus dem Einsatz nanotechnologischer Entwicklungen für das Gesundheitswesen in Deutschland näher zu spezifizieren.

Ein mögliches Gefahrenpotenzial kann aus der Sicht einiger befragter Experten in einer möglichen Toxizität vereinzelter Nanopartikel liegen. Das Verhalten der von Nanopartikeln in der natürlichen Umgebung und die Auswirkungen auf biologische Organismen sind nach dieser Expertenmeinung meist noch unbekannt und sollten frühzeitig durch die Auswertung vorliegender Studien angegangen werden. Darüber hinaus sollte dies von Toxikologen möglichst in enger Zusammenarbeit mit den entsprechenden Technologen, die Nanopartikel entwickeln, im Labor untersucht werden.<sup>31</sup> Eine orale Aufnahme scheint nach bisherigem Stand der Forschung ungefährlich. Es kann nach Expertenmeinung nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass bestimmte Arten<sup>32</sup> von Nanopartikeln über die Lunge oder Schleimhäute aufgenommen werden, in Gewebe bzw. Körperzellen eindringen und gesundheitsschädigende Wirkungen hervorrufen. Aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen Partikeln wesentlich geringeren Größe, wären auch zwei Effekte von aufgenommenen Nanopartikeln vorstellbar. Möglich wäre, dass sie vom Körper besser abgebaut werden als andere Partikel, die der Mensch in der heutigen Zeit mehr oder weniger regelmäßig einatmet (z. B. Dieselruß an Ampelkreuzungen im Straßenverkehr) und dadurch erst gar keinen

---

<sup>31</sup> In den USA sind nach Auskunft einiger Experten solche Prüfungen bereits in ersten Ansätzen (z. B. *Carbon Black*) durch die *Environmental Protection Agency* (vergleichbar mit dem Deutschen Umweltamt) unter der Bezeichnung *Risk Assessment* in Auftrag gegeben worden. Darüber hinaus hat in den USA die NASA entsprechende Untersuchungsschritte eingeleitet und spezielle Studien in Auftrag gegeben (z. B. *Toxicological Safety Study of Nanotubes in Mice* und *Assessment of Biologic Effects of Nanotube Compounds Using Human Cells*). Eine erste Präsentation von Ergebnissen war im Rahmen der NASA-Veranstaltung "NanoSpace 2001 - Exploring Interdisciplinary Frontiers" im März 2001 in Houston anvisiert. In Deutschland läuft seit Kurzem ein von der DFG finanziertes Projekt bei DEGUSSA, das zwar keine toxikologischen Tests im Labor vorsieht, Fragen über eine mögliche Toxizität von Nanopartikeln jedoch in der Forschungsarbeit berücksichtigt.

<sup>32</sup> Einige Experten vermuten ein erhöhtes Gefahrenpotenzial, wenn Nanopartikel aus Schwermetallen (z. B. Kobaltlegierungen, Palladium) oder manchen Edelmetallen, wie Platin, hergestellt würden.



Schaden anrichten. Möglich wäre aber auch, dass das Eindringungspotenzial einzelner Partikel und damit die toxische Wirkung um einiges größer sein könnte als bei gegenwärtig zu findenden Partikeln. Offen ist auch, so einige Experten, was durch Nanopartikel noch zusätzlich zu den bereits in der Umwelt vorkommenden Partikeln (u. a. Dieselruß, Hausstaub) hinzukommt (*add on* Effekt).

Sollte eine Toxizität von einzelnen Nanopartikeln nachgewiesen werden, müssten aus der Sicht der befragten Experten beispielsweise bei der Produktion mit geschlossenen Systemen und eventuell vollständiger Automatisierung des Produktionsprozesses gearbeitet werden. Darüber hinaus wäre es dann sinnvoll, frühzeitig mögliche Alternativen anzugehen. Eine frühzeitige Einbindung der Öffentlichkeit in diese Thematik wäre aus der Sicht der befragten Experten besonders wichtig.<sup>33</sup>

### **Zusammenfassung**

- Für die Medizin wird ein beträchtliches Chancenpotenzial durch nanotechnologische Entwicklungen u. a. in Bezug auf neue Diagnose- und Therapieverfahren erwartet.
- Um dieses Potenzial hinreichend nutzen zu können, sind neue und zusätzliche Anregungen hilfreich. Solche Anregungen lassen sich u. a. durch eine gezielte Analyse eines breiten Spektrums neuer medizinischer Möglichkeiten durch nanotechnologische Entwicklungen aus internationaler Perspektive bereitstellen.
- Angesichts des möglichen Einsparungspotenzials durch die Anwendung nanotechnologischer Entwicklungen in der Medizin bietet es sich an, das Optimierungspotenzial für das Gesundheitssystem in Deutschland näher zu spezifizieren.
- Ein mögliches Gefahrenpotenzial könnte in einer möglichen Toxizität vereinzelter Nanopartikel liegen. Um diesem möglichen Gefahrenpotenzial frühzeitig begegnen zu können, sollten hier gebührende Untersuchungsschritte in frühen Innovationsprozessen eingeleitet werden.

---

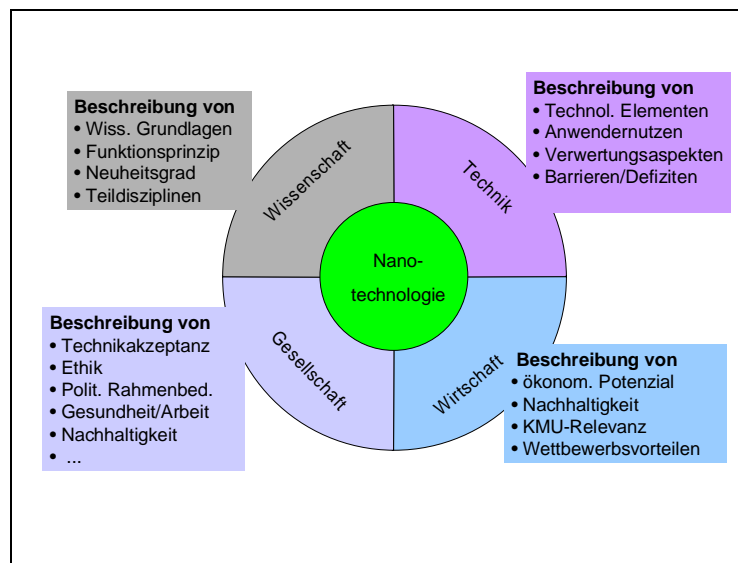
<sup>33</sup> Auf Fehlfunktionen visionärer Anwendungen im Bereich Gesundheit, z. B. spezielle Nanomaschinen, wurde in den Expertengesprächen nicht weiter eingegangen, da die Realisierbarkeit derartiger Produkte sehr umstritten ist und möglicherweise für lange Zeit visionär oder gar immer Science Fiction bleiben wird.

### **3.5 Individuelle und soziale Dimension**

Die befragten Experten aus dem Bereich Nanotechnologie gehen grundsätzlich davon aus, dass nanotechnologische Entwicklungen und Produkte neben einer Erhöhung der technischen Effizienz mit einer erheblichen Verbesserung des Leistungskomforts und der Lebensqualität verbunden sein werden. Einige der Befragten rechnen aufgrund des enormen Chancenpotenzials dieser Technologie im Wesentlichen nicht mit Akzeptanzschwierigkeiten in der Gesellschaft. Aus ihrer Sicht ist für den Anwender bzw. Verbraucher in den meisten Fällen keine unvermittelte Gewöhnung an ein gänzlich neues Erzeugnis notwendig, sondern vielmehr werden Produkte sukzessive verbessert und neue funktionelle Eigenschaften hinzugefügt (z. B. bei wasser- oder schmutzabweisenden Beschichtungen), d.h. die Nanotechnologie wird nicht unmittelbar als neue Komponente eines Produktes wahrgenommen.

Nanotechnologie kann aber auch - wie es andere Experten einschätzen - als ein Ensemble von Innovationen betrachtet werden, das insbesondere langfristig nicht nur tiefgreifende Veränderungen in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft sondern auch in der Gesellschaft hervorbringen wird. Gerade weil die Nanotechnologie fundamentale Neuerungen und überraschende Anwendungsmöglichkeiten verspricht, ist es nach dieser Expertenmeinung von hoher Bedeutung, dass neben der Wirtschaft ebenso die Gesellschaft auf Veränderungen - resultierend aus oder gefördert durch die Nanotechnologie - vorbereitet ist. Insofern bieten sich besondere Anstrengungen an, gesellschaftliche Bedarfe und Vorbehalte auszuloten, indem man beispielsweise nanotechnologische Entwicklungen und Produkte im Kontext gesellschaftlicher Visionen und Fragestellungen (u. a. Technikakzeptanz, Ethik, politische Randbedingungen, Gesundheit und Arbeit, aber auch Nachhaltigkeit) erörtert (siehe Übersicht 8).

## Übersicht 8: Nanotechnologie als Teil von Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft



Ein massiver Abbau von Arbeitsplätzen ohne strukturellen (neue Arbeitsplätze in anderen Branchen, Möglichkeiten zur Anpassung der Qualifikation etc.) oder sozialen Ausgleich könnte beispielsweise aus Expertensicht zu erheblichen sozialen Spannungen und zu einer merklich sinkenden Technikakzeptanz in der Gesellschaft führen, wenn in den betroffenen Bevölkerungsgruppen die Nanotechnologie als Hauptursache dafür wahrgenommen wird, obwohl möglicherweise ganz andere Faktoren entscheidend waren. Eine frühzeitige Anpassung der Berufsbilder in Bezug auf Nanotechnologie könnte aus der Sicht aller Experten die Beschäftigungsmöglichkeiten in diesem Bereich ausbauen helfen.

Wie die konkrete Qualifizierung für Tätigkeiten im Bereich Nanotechnologie aussehen soll, wird von den befragten Experten unterschiedlich beschrieben. Einige halten es für notwendig, dass im Rahmen des Hauptstudiums der Universitätsausbildung ein interdisziplinärer Schwerpunkt Nanotechnologie angeboten wird. Andere wiederum sehen den Bereich gerade wegen seiner Interdisziplinarität am ehesten in der etwas grundsätzlicher orientierten Physik angesiedelt. Einzelne Experten wünschen eine stärkere Verankerung der Nanotechnologie in der Ausbildung von Ingenieuren insbesondere an den Fachhochschulen. Übereinstimmung besteht darin, dass im Rahmen der Ausbildung frühzeitig mit den Unternehmen zusammengearbeitet wird. Die Mehrheit der Befragten ist

sich einig darin, dass zunächst ein Grundstudium in einer der klassischen Disziplinen (z. B. Physik oder Chemie) abzuschließen ist, bevor sich Studenten auf den Schwerpunkt Nanotechnologie konzentrieren.

Die Einrichtung zusätzlicher spezieller Studiengänge wie "Nanostrukturtechnik" mit Abschluss zum Diplom-Ingenieur an der Universität Würzburg wird von den meisten befragten Experten für sinnvoll gehalten. Sämtliche Experten halten es ebenfalls für sinnvoll, dass das Interesse für die Naturwissenschaften in den Grundschulen bereits gefördert wird. Hinsichtlich anderer Berufsgruppen, wie z. B. Laboranten, sehen die meisten Befragten zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine dringende Notwendigkeit für eine Spezialausbildung. Vielmehr geht es darum, bei diesen Beschäftigten eine solide Berufsausbildung durchzuführen. Grundsätzlich geht man davon aus, dass im Rahmen der Arbeit der Kompetenzzentren Nanotechnologie und der dortigen Kooperationen zusätzliche Konzepte in Bezug auf Qualifizierungsfragen entwickelt werden.

Die erhöhte technische Effizienz als Resultat vermehrt eingesetzter Nanotechnologie kann nach Meinung einiger Experten den Trend zu noch größerer medialer Mobilität verstärken. Durch die Integration von Komponenten aus der Datenverarbeitung und der Unterhaltungselektronik in immer kleinere multifunktionale Systeme bekommt der Mensch zusätzliche Möglichkeiten zur elektronischen Kommunikation. Die Gefahr einer solchen medialen Mobilität sieht man weniger in den erweiterten individuellen Kommunikationsmöglichkeiten, als vielmehr in dem damit verbundenen enormen Unterhaltungsangebot und einer kaum zu bewältigenden Informationsflut. Allerdings würde dies aus Expertensicht keine besondere, durch die Nanotechnologie hervorgerufene Problematik sein, da der Trend in diese Richtung bereits vor einigen Jahren - ohne nanotechnologische Entwicklungen - eingeleitet worden ist. Diese Frage wäre demnach für einige der Befragten in dem viel breiteren thematischen Kontext von menschlicher Kommunikation in der Informationsgesellschaft zu erörtern.<sup>34</sup>

---

<sup>34</sup> Ein möglicher Lösungsansatz läge z. B. nach einer Expertenmeinung in einer deutlich verbesserten Medienkompetenz. Als pädagogisches Leitziel formuliert und umgesetzt könnte sie einen Beitrag zum verantwortungsbewussten selektiven Umgang mit der sprunghaft wachsenden Informations- und Reizflut leisten. Im Kontext der Entwicklung einer solchen Medienkompetenz ist u. a. danach zu fragen,

Welches Freizeitverhalten in Verbindung mit einer ausgedehnten Verbreitung nanotechnologischer Entwicklungen und Produkte erwartet werden kann, ist für sämtliche Experten aus dem Bereich der Nanotechnologie eine offene Frage. Nanotechnologische Weiterentwicklungen in der Informationstechnik bieten dem Menschen erheblich verbesserte Möglichkeiten der Kommunikation und der Beschäftigung mit immer realitätsnäheren virtuellen Welten. Ob darunter die Qualität der Sozialkontakte leiden wird, kann gegenwärtig nicht beantwortet werden. Einige der befragten Experten verweisen darauf, dass mit der Erfindung des Telefons der Beginn der Vereinsamung des Menschen prognostiziert wurde. Die heutige Realität zeigt hingegen vor allem, dass der Mensch das Telefon - neben dem ständigen Gebrauch für berufliche Zwecke - nutzt, um sich u. a. zu verabreden und über (große) räumliche Distanzen hinweg mit Familie, Freunden und Bekannten zu kommunizieren.

Preiswerte visuelle und auditive Überwachungssysteme mit Nanotechnologie könnten aus der Sicht einzelner Experten z. B. in Kinderzimmern für die Eltern ein größeres Maß an Sicherheit und Flexibilität ermöglichen. Auch im Bereich der Gebäudetechnik wäre ein höherer Sicherheitsstandard erreichbar. Auf der anderen Seite könnten aus der Sicht einiger Experten solche Systeme auch dazu missbraucht werden, u. a. unbemerkt Belegschaften am Arbeitsplatz ständig zu überwachen. Allerdings wäre - so einige der Befragten - eine solche Überwachung bereits mit existierenden Entwicklungen aus der Mikrotechnik möglich,<sup>35</sup> so dass man dafür nicht die entsprechende Variante basierend auf Nanotechnologie benötigt. Langfristig könnten auch durch neue, einfach zu handhabende und schnelle DNA-Testsysteme, in denen sich Nanotechnologie befindet, unbemerkt genetische Einstellungsuntersuchungen durch den Arbeitgeber durchgeführt werden. Das genetische Material im Fingerabweis würde für eine Genomanalyse ausreichen, so dass mögliche Krankheiten bzw. charakterliche Veranlagungen z. B. im Rahmen eines Bewerbungsverfahrens eines Bewerbungskandidaten kurzfristig "abge-

---

ob durch den immensen möglichen Input die Kreativität des Einzelnen leidet. Das permanente Sortieren und Verarbeiten von Informationen könnte den gedanklichen Freiraum einschränken, der vielfach eine zentrale Voraussetzung für Kreativität darstellt.

<sup>35</sup> Einige Befragte wiesen darauf hin, dass bei einer solchen Form der Überwachung am Arbeitsplatz eine moderne Unternehmenskultur, die viele kooperative Elemente enthält, gar nicht zu praktizieren wäre.

checkt“ werden könnten. Wie einem solchen Missbrauch frühzeitig vorgebeugt werden kann, ist für die meisten befragten Experten aus dem Bereich Nanotechnologie eine offene Frage, die im erweiterten Kontext des Datenschutzes und der Grundrechte des Individuums zu behandeln wäre.<sup>36</sup>

Nanotechnologie könnte auch - so einige der Befragten - Anwendung im militärischen Bereich finden. In den USA, der einzig verbliebenen "Supermacht" mit einem im internationalen Vergleich sehr hohen Verteidigungsbudget, wird die Erforschung und Entwicklung der Nanotechnologie mit erheblichen Finanzmitteln des Verteidigungsministerium gefördert. Das entsprechende Ministerium ist sehr interessiert an den neuen Möglichkeiten, welche die Nanotechnologie bieten könnte. Dazu gehören z. B. neue Materialeigenschaften, die das Gewicht von Kampfflugzeugen erleichtern und zu einer verbesserten Wendigkeit führen sollen. Entsprechende Aktivitäten in Deutschland sind den befragten Experten nicht bekannt. Eine Diskussion über diese Thematik in Kreisen, die sich mit Sicherheitspolitik beschäftigen, scheint sich eher im Anfangsstadium zu befinden.<sup>37</sup> Einige Experten halten eine frühzeitige Offenheit bei der Diskussion sicherheitspolitischer Fragen der Nanotechnologie gegenüber der Öffentlichkeit für notwendig.

---

<sup>36</sup> Die Erkennung von Charaktereigenschaften auf der Basis von Gentests geht bereits in den Bereich Science Fiction, da diese Eigenschaften in der Regel nicht nur genetisch, sondern auch durch diverse Lebensumwelten bedingt sind. Die Bundesregierung erwägt zur Zeit gesetzliche Regelungen, einen möglichen Missbrauch von Gentests frühzeitig zu verhindern. Diese Information stand jedoch zum Zeitpunkt der durchgeführten Expertengespräche noch nicht zur Verfügung.

<sup>37</sup> Im Februar 2001 führte die Bundesakademie für Sicherheitspolitik, eine Einrichtung, die ein zentrales Diskussionsforum zu Fragen der Sicherheitspolitik in Deutschland bildet, eine öffentliche Veranstaltung durch, bei der u. a. die Bedeutung der Nanotechnologie für die Sicherheitspolitik diskutiert werden sollte. Zielgruppen der Bundesakademie sind gemäß der Selbstdarstellung Führungskräfte in Politik, Regierung, Wirtschaft, Wissenschaft, den Medien und wichtigen gesellschaftlichen Gruppen wie Kirchen und Gewerkschaften. Als ein zentrales Ergebnis der Veranstaltung wurde festgehalten, dass sich die Bundesakademie weiterhin mit sicherheitspolitischen Aspekten der Nanotechnologie und dem Potenzial dieser Technologie beschäftigen soll.

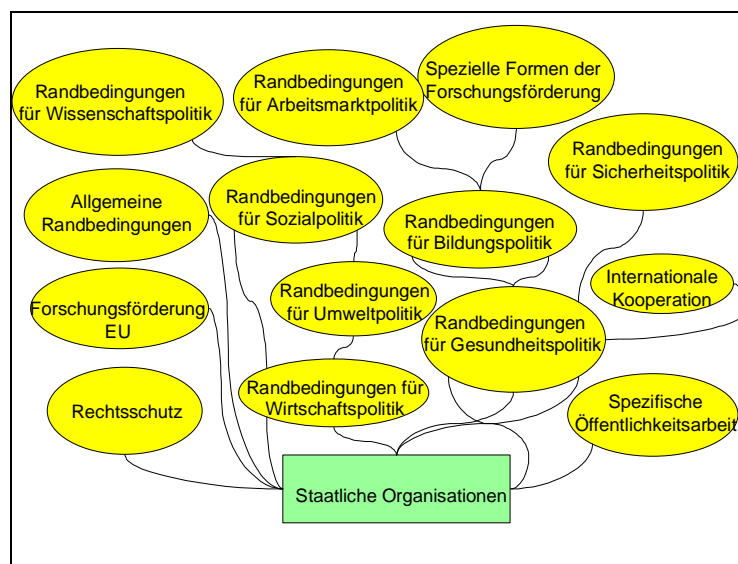
**Zusammenfassung**

- Da, wo die Nanotechnologie fundamentale Neuerungen und überraschende Anwendungsmöglichkeiten verspricht, ist es von hoher Bedeutung, gesellschaftliche Bedarfe und Vorbehalte auszuloten.
- Eine fruchtbare Möglichkeit, gesellschaftliche Bedarfe und Vorbehalte auszuloten, bietet sich mit der Erörterung nanotechnologischer Entwicklungen und Produkte im Kontext gesellschaftlicher Visionen an.
- Hinsichtlich der Wege zu beruflicher Qualifizierung im Bereich Nanotechnologie gehen die Meinungen der Experten teilweise auseinander. Grundsätzlich geht man davon aus, dass sich in naher Zukunft u. a. im Rahmen der Arbeit der Kompetenzzentren Nanotechnologie zusätzliche Konzepte entwickeln lassen (z. B. Nanotechnologie als Schwerpunkt im Hauptstudium, Förderung des Interesses für die Naturwissenschaften).
- Welches Freizeitverhalten sich in Verbindung mit der Anwendung von Nanotechnologie entwickeln wird, ist eine offene Frage, die in dem erweiterten thematischen Kontext von Technik und Freizeit erörtert werden kann.
- Wie einem Missbrauch von nanotechnologischen Entwicklungen und Produkten vorgebeugt werden kann, bleibt offen. Eine weitere Behandlung dieser Frage bietet sich im erweiterten Kontext des Datenschutzes, der Grundrechte des Individuums und der Transparenz geplanter Entwicklungen an.
- Eine Diskussion über Möglichkeiten und Risiken der Nanotechnologie in Bezug auf sicherheitspolitische Aspekte scheint bisher in Deutschland ein Thema von geringer Bedeutung gewesen zu sein.

### 3.6 Politische Dimension

Technologischer Fortschritt sollte nach Meinung der meisten befragten Experten aus dem Bereich der Nanotechnologie von Zeit zu Zeit mit einer Überprüfung staatlicher Randbedingungen (Gesetze, Verordnungen, Normen etc.) verbunden sein, damit gegebenenfalls Überarbeitungen oder gänzliche Neuerungen in Bezug auf wesentliche Entwicklungen in der gängigen Praxis frühzeitig vorgenommen werden können. Aufgrund des multidisziplinären und tiefgreifenden Charakters einer Spitzentechnologie, wie die Nanotechnologie es ist, steht ihre nutzbringende Fortentwicklung - neben den entscheidenden Schritten in Wissenschaft und Technik - in enger Verbindung zu den vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten staatlicher Organisationen (siehe Übersicht 9 für Beispiele von Gestaltungsmöglichkeiten der Nanotechnologie durch staatliche Organisationen).

Übersicht 9: Beispielhafte Gestaltungsmöglichkeiten staatlicher Organisationen für die Nanotechnologie



Im allgemeinen schätzen die befragten Experten die meisten am Standort Deutschland gesetzten Randbedingungen und bisher durchgeführten Gestaltungsmaßnahmen als gut ein. Von einigen Experten wird ein verbesserter Rechtsschutz für die Sicherung von Know-how angeregt. Andere sprechen sich für vereinfachte Regelungen bei der öffentlichen



Forschungsförderung aus.<sup>38</sup> Wiederum andere Experten plädieren für eine Verbesserung des Bereiches Risikokapital in Deutschland. Bei den Fragen zu speziellen Politikbereichen und Nanotechnologie (z. B. Umweltpolitik, Gesundheitspolitik, Sozialpolitik) verweisen die befragten Experten aus dem Bereich der Nanotechnologie in der Regel darauf, dass sie sich mit solchen Aspekten noch nicht beschäftigt haben, diese Fragen jedoch sehr interessant sind und zukünftig berücksichtigt werden sollten.

Einige Experten gehen davon aus, dass die Nanotechnologie beispielsweise der Gentechnik kurz-/mittelfristig oder spätestens langfristig neue Methoden zur Verfügung stellen wird. Dieses neue Anwendungspotenzial wäre sinnvollerweise auch unter ethischen Gesichtspunkten schrittweise zu reflektieren. Für einige Experten ist es lediglich eine Frage der Zeit, bis partielle Genomanalysen schnell und ohne großen experimentellen Aufwand durchgeführt werden können. Wenn es dann z. B. - wie in Kapitel 3.5 erörtert - Arbeitgebern (oder Versicherungen) technisch möglich wäre, mittels Genomanalyse bestimmte Merkmale (charakterliche oder gesundheitliche) zu ermitteln, würde auf den Gesetzgeber vermutlich die Klärung der Frage auf Zulässigkeit bzw. Missbrauch der Anwendung zukommen.

Das Thema Missbrauch von Nanotechnologie könnte ebenfalls in Form klar definierter Kooperationen, insbesondere zwischen Nordamerika, Westeuropa und Südostasien, behandelt werden, da die meisten der Experten eine internationale Zusammenarbeit auf einigen Gebieten für sinnvoll halten. Als ein weiteres Thema, das sich besonders dafür anbietet, wird der Bereich Normung und Standardisierung genannt, da eine Zusammenarbeit Vorteile für alle Beteiligten verspricht und eindeutig außerhalb von Wettbewerbsüberlegungen liegt. Darüber hinaus bietet sich für einige der Befragten das Thema Innovations- und Technikanalyse (ITA) im Sinne eines *Technology Assessment* ausgewählter Aspekte an.

Sobald jedoch Marktanteile, Marktpositionen oder Wettbewerbsvorteile berührt werden, so die Experten, sind Kooperationen auf internationaler - aber auch häufig auf nationaler Ebene - kaum mehr zu realisieren. Aus Expertensicht funktionieren solche Kooperationen gegenwärtig besten-

---

<sup>38</sup> Die Expertenmeinungen zum Thema Bildung/Bildungspolitik finden sich in Abschnitt 3.4 und werden hier nicht wiederholt.

falls im Rahmen bilateraler Zusammenarbeit bei der Grundlagenforschung. Bezüglich der EU-Förderung der Nanotechnologie halten es die meisten Experten für sinnvoll, innereuropäische Kooperationen (z. B. den Austausch von Wissenschaftlern) gezielt zu unterstützen. Darüber hinaus sollte die Förderung insgesamt unter dem Oberbegriff Nanotechnologie stärker zusammengefasst und besser in der Öffentlichkeit dargestellt werden sowie die entsprechende Förderung für die Antragsteller übersichtlicher und einfacher gestaltet sein.

Kooperationen auf nationaler Ebene fördern sollen die in Deutschland auf Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung 1998 eingerichteten Kompetenzzentren Nanotechnologie.<sup>39</sup> Im Rahmen der virtuellen Netzwerke ist es aus der Sicht der meisten Befragten gelungen, eine verbesserte Zusammenarbeit vor allem zwischen Wissenschaft, Transferstellen und Unternehmen, aber auch zum Teil zwischen Unternehmen herzustellen. Aus der Sicht der meisten Experten wird zudem eine gute Öffentlichkeitsarbeit mit insgesamt geringen Ressourcen von den Kompetenzzentren betrieben. Einige Experten befürchten jedoch, dass mit der Einrichtung dieser Zentren überproportional Fördermittel in Infrastruktur investiert werden könnten, die an anderer Stelle für die inhaltliche Projektförderung möglicherweise fehlen.<sup>40</sup>

Laut Auskunft aller befragten Experten aus dem Bereich Nanotechnologie werden Fragen der Innovations- und Technikanalyse im Sinne von *Technology Assessment* bisher nicht gezielt in die Kompetenzzentren eingebracht bzw. dort bearbeitet (mit Ausnahme technologischer und wirtschaftlicher Aspekte).

---

<sup>39</sup> Zur Struktur und Ausrichtung der Kompetenzzentren siehe Abschnitt 3.2.

<sup>40</sup> Im Rahmen dieser ITA-Vorstudie wurde keine Evaluierung der Kompetenzzentren Nanotechnologie vorgenommen. Die dargestellten Einschätzungen sind insofern im Kontext der Fragen zur ITA der Nanotechnologie zu betrachten.

**Zusammenfassung**

- Die nutzbringende Fortentwicklung der Nanotechnologie steht in enger Verbindung zu den vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten staatlicher Organisationen.
- Internationale Kooperationen im Bereich Nanotechnologie werden bei den Themen Normung und Standardisierung, möglicher Missbrauch und Innovations- und Technikanalyse (ITA) im Sinne eines *Technology Assessment* ausgewählter Aspekte für sinnvoll erachtet.
- Diverse Aspekte der ITA werden bisher nicht gezielt in die Arbeit der Kompetenzzentren Nanotechnologie eingebracht und bearbeitet.
- In Bezug auf die politische Dimension einer ITA zur Nanotechnologie gibt es viele offene Fragen, die zukünftig berücksichtigt werden sollten (z. B. spezielle Politikbereiche, wie Umweltpolitik oder Ethik).

#### **4 Abschließende Betrachtung zentraler Ergebnisse und offene Fragen**

Die Nanotechnologie wird nach Expertenmeinung zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gehören, da sie ein vielfältiges Innovationspotenzial für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft beinhaltet. Dessen Ausschöpfung steht jedoch gegenwärtig noch am Anfang, da sich diese Technologie beispielsweise im Vergleich zur Biotechnologie in einem frühen Stadium der Entwicklung befindet. Die technische Realisierung intelligenter selbstreplizierender Nanomaschinen wird nach Ansicht der im Rahmen dieser ITA-Vorstudie befragten Experten aus dem Bereich Nanotechnologie noch lange visionär oder gar Science Fiction bleiben. Bestehende physikalische Grenzen spielen immer noch eine umsetzungshemmende Rolle in der Entwicklung und z.Z. existieren wenig konkrete Vorstellungen, wie diese Barrieren überwunden werden können.

Schlagworte wie "Sanfte Chemie", "Nano-Umweltdetektive", "Mehr Sicherheit in der Produktion" und "Nano in der Medizin" weisen viel eher auf kurz-/mittelfristige oder langfristige Innovationspotenziale hin, die wirtschaftliche Vorteile für den Standort Deutschland auch unter Berücksichtigung einer nachhaltigen Entwicklung erwarten lassen.

- ✓ Um das Innovationspotenzial am Standort Deutschland, der gegenwärtig im internationalen Wettbewerb eine gute Position besetzt, hinreichend nutzen zu können, sind zum einen Handlungsweisen zur Vermeidung sogenannter *Show Stopper* frühzeitig zu erörtern.
- ✓ Zum anderen dürfte ein regelmäßiges und differenziertes Monitoring des ökonomischen Potenzials Trends und Möglichkeiten aufzeigen, die Investitions- und Förderentscheidungen erleichtern.
- ✓ Ferner bietet es sich an, neben dem prognostizierten Wirtschaftspotenzial Wirkungen der Nanotechnologie auf Arbeitsmärkte zu analysieren.
- ✓ Darüber hinaus können KMU eher zu einem stetigen Innovationsmotor für das Vorantreiben der Nanotechnologie werden, wenn die öffentliche

Förderung noch gezielter und über einen mittelfristigen Zeitraum erfolgte.

- ✓ Außerdem verspricht die Nanotechnologie in Verbindung mit Aspekten der Nachhaltigkeit Nutzen mit sich zu bringen. Diese sind allerdings weitgehend noch nicht untersucht. Des Weiteren sind Fragen z. B. nach der Recyclebarkeit von Produkten basierend auf Nanotechnologie und Umweltverträglichkeit von Herstellungsverfahren noch offen.

Die Medizin der Zukunft kann sich durch den Einsatz nanotechnologischer Entwicklungen und Produkte deutlich wahrnehmbar verändern. Neue Diagnose- und Therapieverfahren bieten vielfältige Chancen für den Patienten ebenso wie für das Gesundheitssystem in Deutschland.

- ✓ Die vielfältige Nutzung des Chancenpotenzials in der Medizin ließe sich durch eine gezielte Analyse des breiten Spektrums neuer medizinischer Anwendungsmöglichkeiten und der Präventivmedizin in anderen Ländern anregen.
- ✓ Die Frage nach einem näher spezifizierten Optimierungspotenzial für das Gesundheitswesen durch nanotechnologische Entwicklungen und Produkte ist noch offen.
- ✓ Ein mögliches Gefahrenpotenzial könnte in einer möglichen Toxizität einzelner Nanopartikel liegen. Dieser möglichen Gefahr kann frühzeitig begegnet werden, indem frühzeitig gebührende Untersuchungsschritte (z. B. Screening) in einem frühen Stadium des Innovationsprozesses unternommen werden.

Man kann einerseits von einer hohen Akzeptanz in der Gesellschaft in Bezug auf die Nanotechnologie ausgehen, da es bereits Produkte gibt, die auf Zustimmung und Nachfrage in der Gesellschaft treffen. Andererseits kann man die Nanotechnologie als ein Ensemble von Innovationen betrachten, das fundamentale Neuerungen und überraschende Anwendungsmöglichkeiten verspricht. Damit ist zunächst grundsätzlich offen, wie bzw. mit welchen wissenschaftlichen Methoden der gesellschaftliche Bedarf in Bezug auf Nanotechnologie ermittelt werden kann.

- ✓ Eine Möglichkeit, gesellschaftliche Bedarfe und Vorbehalte auszuloten, bietet sich mit der Erörterung nanotechnologischer Entwicklungen und Produkte im Kontext zu entwickelnder gesellschaftlicher Szenarien zur Nanotechnologie an.
- ✓ Damit verbunden wären u. a. Überlegungen zu den möglichen Konsequenzen für die Produktwelt.
- ✓ Auch wäre zu erörtern, wie Informationen zur Nanotechnologie für Laien aufzubereiten sind und wie sich Experten aus dem Bereich der Nanotechnologie daran beteiligen können. Ferner wäre zu fragen, in welcher Weise besonders fruchtbare Brückenschläge zwischen Experten und der Bevölkerung gelingen können.
- ✓ Zur Förderung des Nutzens der Nanotechnologie für die Gesellschaft können staatliche Organe auf vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten zurückgreifen.
- ✓ Viele Fragen nach den Wirkungen der Nanotechnologie auf spezielle Politikbereiche (z. B. Umweltpolitik, Sicherheitspolitik oder Sozialpolitik) oder Fragen der Ethik sind offen.
- ✓ Offen sind zur Zeit insbesondere langfristige Auswirkungen im sozialen Bereich, wobei zu berücksichtigen sein wird, dass die Nanotechnologie hier im Konzert mit anderen Technologien (u. a. Informationstechnik und Biotechnologie) eine Rolle spielen wird und nicht isoliert als einzelne Technologie.

Internationale Abkommen gegen einen möglichen Technologiemißbrauch und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen können ein Teil internationaler Kooperationen im Bereich der Innovations- und Technikanalyse (ITA) zur Nanotechnologie sein. Ein absoluter Schutz vor Mißbrauch oder falscher Anwendung einer bestimmten Technologie bzw. eines technischen Hilfsmittels wird selbst in modernen Gesellschaften kaum zu erreichen sein. Damit stellt sich immer wieder in Verbindung mit der Entwicklung neuer Technologien, zu denen die Nanotechnologie gegenwärtig gehört, die Kernfrage, wie der (gewissenhafte und zivilisierte) Mensch die Nanotechnologie in einer Weise nutzen kann, dass das

Risiko andere Menschen zu schädigen, so gering wie möglich bleibt. Auch eine Innovations- und Technikanalyse (ITA) im Sinne von *Technology Assessment* wird wahrscheinlich in absehbarer Zeit keine allgemeingültige Antwort auf eine solche Fragen finden, doch kann sie dazu beitragen, dass das Chancen- und Risikopotenzial einer Technologie in einem möglichst breiten Kontext rechtzeitig thematisiert wird und - da wo notwendig - frühzeitig Gestaltungsalternativen erörtert werden. Ein erster konstruktiver Beitrag für nachfolgende Diskussionen und weitere Arbeiten sollte mit den Erträgen dieser ITA-Vorstudie geleistet sein.

## 5 Literatur

- Bachmann, G. (1998): Innovationsschub aus dem Nanokosmos, hg. vom VDI-Technologiezentrum, Zukünftige Technologien Nr. 28, Düsseldorf
- Bachmann, G. (1999): Nanotechnik als industrielle Chance, in: Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Das Magazin Nr. 1/99, Düsseldorf
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (1998): Nanotechnologie. Innovationsschub aus dem Nanokosmos, Bonn
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2000): Beschäftigungspotenziale im Bereich Bio- und Gentechnologie, Bonn
- Coates, J. (2000): There is No Joy in My Life, vervielf. Manuskript
- Degussa AG (2000): Winzige Zwerge mit großer Zukunft - Werkstoffe aus Nanopulver, Pressemitteilung
- Drexler, E. u. a. (1991): Unbounding the Future. The Nanotechnology Revolution, New York
- Fuchs, H. (1999): Nanotechnologie - Schlüssel zur Zukunft, in: Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Jahrbuch 1998/99, Düsseldorf
- Güntheroth, H.-J. (1999): Nanotechnologie: Aufbruch in eine neue Welt, in: Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Das Magazin Nr. 1/99, Düsseldorf
- Hoffschulz u. a. (1998): Technologieanalyse Nanoröhren, hg. vom VDI-Technologiezentrum, Zukünftige Technologien Nr. 25, Düsseldorf
- Hauff, V. (Hg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Bericht), Greven
- Jordan, A. (1999a): Nanotechnologie und Medizin: Neue Wege in der Krebstherapie, in: Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Das Magazin Nr. 1/99, Düsseldorf



- Jordan, A. u. a. (1999b): Magnetic fluid hyperthermia (MFH): Cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles, in: Journal of Magnetism and Magnetic Materials Nr. 201
- Kastenholz, H. u. a. (Hg.) (1996): Nachhaltige Entwicklung, Berlin u. a.
- Knaus, A./Renn, O. (1998): Den Gipfel vor Augen. Unterwegs in eine nachhaltige Zukunft, Marburg
- König, U./Hefner, A. (1995): A La Bastille. Frequenzweltrekord mit SiGe-Transistoren, in: Elektronik Praxis, Nr. 5
- Kurzweil, R. (2000a): Homo S@piens. Leben im 21. Jahrhundert – was vom Menschen bleibt, 3. Auflage, Köln
- Kurzweil, R. (2000b): Promise and Peril: Deeply Intertwined Poles of Twenty First Century Technology, vervielf. Manuskript
- Markl, H. (2000): Was ist dran an den Schreckenstechnologien?, vervielf. Manuskript
- National Science and Technology Council (1999): Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom, Washington D.C.
- National Science and Technology Council (2000): National Nanotechnology Initiative. The Initiative and Its Implementation Plan, Washington D.C.
- Neue Zürcher Zeitung (1999): Nano!, NZZ Folio Nr. 2, Zürich
- Radke, V. (1999): Nachhaltige Entwicklung, Heidelberg
- Rennings, K. u. a. (1997): Nachhaltigkeit, Ordnungspolitik und freiwillige Selbstverpflichtung, Heidelberg
- Rocco, M. (2001): A Frontier for Engineering, The American Society of Mechanical Engineering, Washington D.C.
- Swiss National Science Foundation (2000): Nationales Forschungsprogramm Nanowissenschaften. Abschließende Zusammenfassung 1996-2000, Bern

Ten Wolde, A. (1998): Nanotechnology. Towards A Molecular Construction Kit, STT, The Hague

## 6 Gesprächsleitfaden für die Experteninterviews

Die Strukturierung des Gesprächsleitfadens für die Experteninterviews erfolgt durch die Gliederung des Themas Nanotechnologie in sechs Wirkungsdimensionen:

- Technische Dimension
- Ökonomische Dimension
- Ökologische Dimension
- Gesundheitliche Dimension
- Individuelle und soziale Dimension
- Politische Dimension

Diese Wirkungsdimensionen sind unterteilt in die vier zeitlichen Entwicklungsdimensionen kurz-/mittelfristig (bis 5 Jahre), langfristig (bis 10 Jahre), visionär (bis 30 Jahre) und Science Fiction (mehr als 30 Jahre bzw. nicht absehbare Realisierbarkeit). In einem abschließenden Teil sollen zudem noch nicht berücksichtigte Perspektiven thematisiert werden. Der Leitfaden wird flexibel eingesetzt, so dass auf Anmerkungen und besondere Kenntnisse/Erfahrungen des Interviewpartners jederzeit eingegangen werden kann.

### ***Strukturdaten***

Ort und Datum:

Gesprächspartner:

Organisation/Institution:

## Technische Dimension

- Welche nanotechnologischen Entwicklungen (Produkte) existieren bereits im Bereich X (Chemie/Materialwirtschaft, Medizin/Pharmazie, Feinmechanik/Optik, Elektronik)?
- Welche sind hier kurz-, mittel- bzw. langfristig zu erwarten? Was ist eher visionär? Was ist zum jetzigen Zeitpunkt Science Fiction?
- Wie funktioniert die Entwicklung/Forschung bei Ihnen technisch? Was könnten „Show Stopper“ (z. B. Gesundheits-, und Sicherheitsauflagen) in Ihrem Bereich sein?
- An welchem Punkt in der Entwicklung wird man auf physikalische Grenzen stoßen?
- Gibt es in Ihrem Bereich (kostengünstigere) Alternativen zu nanotechnologischen Entwicklungen/Produkten? Wenn ja, welche? Worin besteht die Exklusivität der Nano-Variante?
- Sind in Ihrem Bereich bereits „Nebenprodukte“ (im positiven und im negativen Sinne) entstanden? Wenn ja, welche und wie? Mit welchen Folgen?
- Existieren in Ihrem Bereich Möglichkeiten zur Massenproduktion bzw. sind diese zu erwarten?
- *Ergänzungsfrage (Überleitung notwendig): Welche technischen Erwartungen weckt Eric Drexler mit seinen Ausführungen zur Herstellung von selbstreplizierenden Nanomaschinen?*

## Ökonomische Dimension

- Welches Marktpotenzial existiert zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Ihrem Bereich?
- Mit welchem Marktpotenzial rechnen Sie kurz-, mittel- bzw. langfristig in Ihrem Bereich?
- In welche anderen Bereiche sind Ihre nanotechnologischen Entwicklungen/Produkte bereits gestoßen bzw. wo erwarten Sie dies?

- Welche Einsparungspotenziale (Produktion, Transport, Energie etc.) sind für die Unternehmen zu erwarten?
- Welche wirtschaftlichen Vorteile hat die Nanotechnologie für Großunternehmen bzw. für KMU? Ist mit nachteiligen Auswirkungen zu rechnen (u. a. hohe Entwicklungskosten)? Wenn ja, mit welchen? Wie könnten diese aufgefangen werden?
- Welche Einspar- bzw. Kostenpotenziale sind durch den Einsatz von Nanoprodukten in der Medizin für das Gesundheitswesen zu erwarten?
- Mit welchen volkswirtschaftlichen Einsparungen bzw. Mehrkosten ist für den „Standort Deutschland“ zu rechnen (u. a. Steuern, Sozialversicherungen, staatliche Innovationsförderung)?
- Mit welcher Beschäftigungsentwicklung rechnen Sie in Ihrem Bereich (kurz-, mittel- bzw. langfristig)? Auswirkungen auf andere Bereiche?
- Von welchem Verbraucherverhalten gehen Sie für Ihren Bereich aus?
- Wie stellt sich in Ihrem Feld die inländische und ausländische Wettbewerbssituation dar?
- Halten Sie Kooperationen zwischen Unternehmen für sinnvoll? Wenn ja, wie und in welchen Bereichen können diese erreicht werden?
- Welche rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland halten Sie für vorteilhaft, welche stufen Sie als eher hinderlich ein?

### **Ökologische Dimension**

- Welche ökologischen Nutzen (u. a. Ressourcenschonung, Materialeinsparung, geringerer Energieverbrauch, größere Stabilität der Produkte) sind bereits durch nanotechnologische Entwicklungen/Produkte aus Ihrem Bereich zu verzeichnen?
- Mit welchen rechnen Sie kurz-, mittel- bzw. langfristig durch Ihren Bereich (u. a. auch aufgrund der Selbstorganisation im Nano-Bereich)? Was ist eher visionär? Was ist zum jetzigen Zeitpunkt Science Fiction?

- Welche Chancen sehen Sie insgesamt für eine nachhaltige Entwicklung (z. B. durch die Katalyse auf der Nano-Ebene)?
- Können zum jetzigen Zeitpunkt bereits Aussagen zur Umweltverträglichkeit der Herstellungsverfahren in Ihrem Bereich gemacht werden? Wenn ja, welche?
- Falls - vom heutigen Stand der Technik ausgehend - die Nutzung gesundheitsgefährdender Stoffe in Ihrem Bereich noch notwendig ist: Welche Alternativen werden in Betracht gezogen?
- Welche toxischen Stoffe können durch Nanomaterialien in Ihrem Bereich erkannt und ersetzt werden? Was ist eher visionär? Was ist zum jetzigen Zeitpunkt Science Fiction?
- Welcher Forschungsbedarf besteht noch auf diesem Feld?
- Wie hoch ist der Grad der Recyclebarkeit von Nano-Produkten aus Ihrem Bereich?
- Wie haben sich Umwelt- und Verbraucherverbände, Ärztekammern, Landärzte bisher zu nanotechnologischen Entwicklungen/Produkten aus Ihrem Bereich geäußert? Von welchen Positionen gehen Sie kurz- mittel- bzw. langfristig aus?
- *Ergänzungsfrage (Überleitung notwendig):* Was ist von der Aussage zu halten, dass sich die von Eric Drexler avisierten Assembler selbstständig verändern und ungebremst in der Natur vorkommende Substanzen abbauen könnten?

### **Gesundheitliche Dimension**

- Welchen Nutzen haben nanotechnologische Entwicklungen/Produkte bereits im Bereich Medizin/Pharmazie?
- Welche sind hier kurz-, mittel- bzw. langfristig zu erwarten? Was ist eher visionär? Was ist zum jetzigen Zeitpunkt Science Fiction?
- Inwieweit lassen sich Herstellungsverfahren/Versuche im Bereich der Medizin/Pharmazie durch nanotechnologische Entwicklungen/Produkte verbessern?

- Welche gesundheitsgefährdenden Substanzen können kurz- und mittelfristig bzw. langfristig durch Nanomaterialien ersetzt werden?
- Inwieweit wird in Ihrem Bereich geprüft, ob Nanopartikel toxisch sein können?
- Wenn eine Toxizität festgestellt würde, welche Schritte oder Alternativen wären dann einzuleiten (Herstellungsverfahren, produktionstechnische Sicherheitsmaßnahmen, Verbraucherschutz etc.)?
- Welcher Forschungsbedarf besteht noch in diesem Feld?

### **Individuelle und soziale Dimension**

- Sind Akzeptanzschwierigkeiten in Bezug auf (bestimmte) Nano-Produkte in der Bevölkerung zu erwarten? Wenn ja, wie kann diesen begegnet werden? Wie kann - bei eventuell nachgewiesenen Folgen - die Gefahr einer verallgemeinernden Nano-Kritik abgewendet werden?
- Wird der Einsatz von nanotechnologischen Produkten aus Ihrem Bereich summa summarum zu einer Expansion oder Reduktion von Erwerbsarbeit führen?
- Welche Berufsbilder sind für die Tätigkeit in Ihrem Bereich relevant? Was sollte an ihnen geändert werden?
- Wie sollten z. B. Ingenieure für die Tätigkeit in Ihrem Arbeitsbereich qualifiziert sein? Andere Berufsgruppen?
- Welches Freizeitverhalten ist kurz-, mittel- bzw. langfristig zu erwarten?
- Wo sehen Sie kurz-, und mittel- bzw. langfristig Auswirkungen nanotechnologischer Entwicklungen/Produkte auf das soziale Verhalten (Arbeits- und Freizeitwelt)?
- Kann durch nanotechnologische Entwicklungen ein höherer Grad an Sicherheit erreicht werden? Wenn ja, auf welche Weise?
- Wie kann einem Missbrauch von Nanosicherheitssystemen (z. B. dauerhafte Überwachung von Belegschaften) frühzeitig vorgebeugt werden?

## Politische Dimension

- Wie kann der Gesetzgeber für einen ausreichenden Rechtsschutz für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft in Bezug auf nanotechnologische Entwicklungen/Produkte sorgen?
- Welche Randbedingungen könnte der Gesetzgeber in der Gesundheits- und Sozialpolitik in Bezug auf die Anwendung von Nanosystemen setzen? Welche Bedeutung haben dabei ethische Fragen kurz-, und mittel- bzw. langfristig?
- Welche Randbedingungen könnte der Gesetzgeber in der Umweltpolitik in Bezug auf die Anwendung von Nanosystemen setzen?
- Welche Schritte sind in der Bildungspolitik zu unternehmen? Welche Ausbildungsgänge/Studiengänge/Möglichkeiten zur Weiterbildung werden für die Arbeit im Bereich der Nanotechnologie benötigt (z. B. „Nanochemiker“)? Welche Bedeutung werden Modulierung und Simulation haben?
- Ließe sich das Bildungssystem durch die Einführung von Nano-Chips verbessern? Wenn ja, wie?
- Welche Forschungsförderformen erwachsen in Verbindung mit veränderten Anforderungen im Bereich der Bildung? Sind mehr Kompetenzzentren einzurichten? Wird mehr Geld für die Förderung benötigt?
- Welche Kooperationsformen und strategischen Allianzen sind (z. B. zwischen Nordamerika, Westeuropa und Süostasien) für Unternehmen im Feld der Nanotechnologie sinnvoll? Welche sind möglich und wie sollten sie gefördert werden?
- Welche Optionen halten Sie für den Bereich der entwicklungsbegleitenden Normung für sinnvoll?
- Wie kann sich die EU kurz-, mittel- bzw. langfristig in die Förderung der Nanotechnologie einbringen?
- Welche Kontrollmöglichkeiten sollte es hinsichtlich des militärischen Missbrauchs der Nanotechnologie geben?



- Wie können die Kompetenzzentren im Bereich der Nanotechnologie noch stärker auf die Förderung der Nanotechnologie eingehen?
- Inwieweit werden Fragestellungen der Technikfolgenabschätzung in die Kompetenzzentren eingebracht bzw. dort bearbeitet?
- Gibt es Hemmnisse von staatlicher Seite bei der Entwicklung von Nanotechnologie in Deutschland? Wenn ja, welche? Und wie könnten diese reduziert werden?
- Wie schätzen Sie die Bedeutung von Öffentlichkeitsarbeit für den Bereich der Nanotechnologie ein? (Wenn von Bedeutung), in welcher Form und in welchem Umfang sollte Öffentlichkeitsarbeit betrieben werden?

### **Noch nicht berücksichtigte Perspektiven**

- Welche Fragen sind zu ergänzen?
- Welche Fragen sind zur Zeit noch offen?
- Weitere Anmerkungen und Ergänzungen des Gesprächspartners