

Ergebnisse der Technologievorschau „Nanotechnologie pro Gesundheit“ 2003

von Robert Farkas und Christoph Monfeld, Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik – AKM

Im Rahmen einer vom BMBF geförderten „Innovations- und Technikanalyse zur Nanotechnologie“ hat ein Konsortium von fünf Instituten unter Federführung des Aachener Kompetenzzentrums Medizintechnik (AKM) eine Teilstudie zum Themenfeld Gesundheit durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Methodik sowie die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie vorgestellt. Im Mittelpunkt steht hierbei die Technologievorschau für den medizinischen Bereich und die sozial-ethischen Aspekte der zu erwartenden Entwicklungen.

1 Einleitung

Das Gesundheitswesen gilt als eines der vielversprechendsten Anwendungsgebiete der Nanotechnologie, eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts.

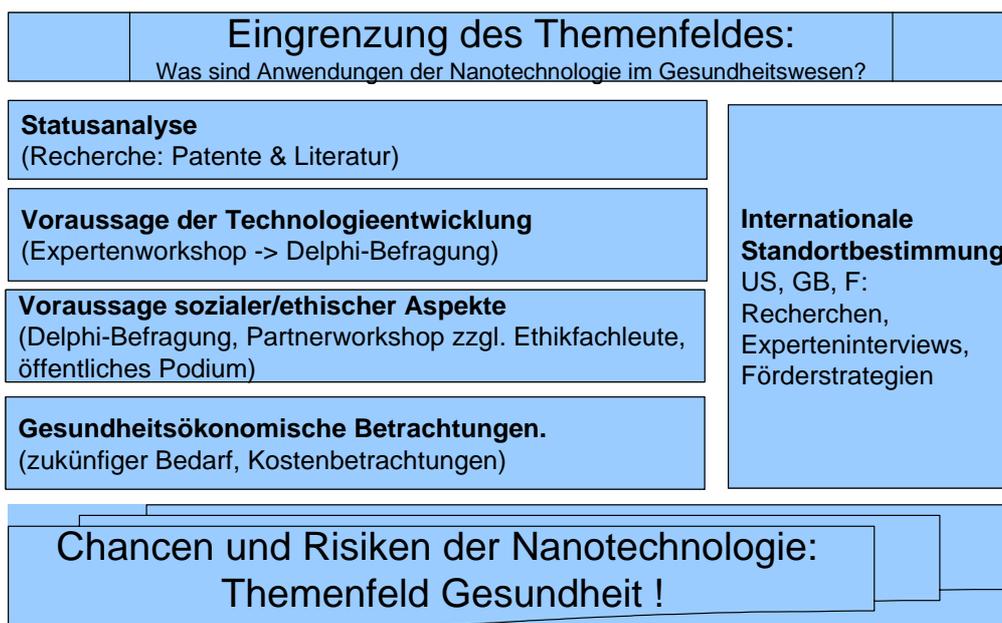
Aus Sicht des Bundesforschungsministeriums BMBF besteht dabei Klärungsbedarf u. a.

zu folgenden Fragen: Welche Anwendungen und Innovationen sind im Gesundheitswesen von der Nanotechnologie zukünftig zu erwarten? Wie stellt sich der aktuelle Stand in Forschung, Entwicklung und Industrie dar? Welche möglichen Folgeprobleme, auch mit Blick auf ethisch-soziale Aspekte gilt es ggf. zu bedenken? Wie werden sich die Gesundheitsausgaben durch nanotechnologische Innovationen verändern? Was kann getan werden, um das Themenfeld in Zukunft erfolgreich zu gestalten?

Mit der Bearbeitung dieser Fragen hat das BMBF im Herbst 2002 ein Konsortium unter Führung des Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik – AKM und der Aachener Gesellschaft für Innovation und Technologietransfer (AGIT) beauftragt. Gemeinsam mit den Fraunhofer Instituten für Lasertechnik (FhG-ILT) und für Molekularbiologie (FhG-IME) sowie dem Institut für Gesundheits- und Sozialforschung IGES wurde das Innovationsfeld „Nanotechnologie und Gesundheit“ in einer mehrstufigen Vorgehensweise beleuchtet (vgl. Abb. 1).

Allen Elementen der Vorgehensweise liegt ein gemeinschaftliches Themenverständnis zugrunde. In ausdrücklicher Abgrenzung von möglichem Missbrauch (z. B. als Kampfstoff) umschreibt „Nanotechnologie pro Gesundheit“ folgendes:

Abb. 1: Überblick zu den Hauptelementen der Vorgehensweise



„Nanotechnologie pro Gesundheit‘ umfasst medizinische Anwendungen und gesundheitliche Auswirkungen von Nanotechnologien in Diagnose, Therapie, Prävention unter Berücksichtigung möglicher Nebenwirkungen. Gegenstand der Nanotechnologie ist dabei die Erforschung, Herstellung und Anwendung von Systemen, deren funktionale Einheiten Ausdehnungen unter 100 nm aufweisen.“

Im Mittelpunkt der hier folgenden Ausführungen soll nur die Voraussage der Technologieentwicklung und korrespondierender sozial-ethischer Aspekte stehen.

2 Technologievorschau

Die Voraussage der Technologieentwicklung wurde nach der Delphi-Methode konzipiert und durchgeführt. Die bundesweit identifizierten Experten gaben ihre Einschätzung anhand eines partizipativ entwickelten Fragebogens ab (vgl. Abb. 2), der aus

- 49 Zukunftsvisionen über mögliche Anwendungen der Nanotechnologie im Gesundheitssektor,
 - 36 Maßnahmevorschlägen zur verantwortlichen Weiterentwicklung des Themenfeldes, und
 - einem soziometrischen Datenblatt
- bestand.

Für die Bearbeitung der verschiedenen Aspekte zu den Thesen und Vorschlägen waren mehrstufige Antwortskalen vorgegeben, die in der Gestaltung an den DELPHI'98 (Cuhls et al. 1998a) angelehnt wurden. Hinsichtlich der Zukunftsvisionen ging es dabei - ausgehend von der Einstufung der eigenen Fachkompetenz – um den zu erwartenden Zeitraum der Verwirklichung, die Position Deutschlands im internationalen Kontext sowie die besonderen Entwicklungschancen und möglichen Folgeprobleme für die Gesellschaft, Wirtschaft, Wissenschaft, Gesundheitsversorgung, Sicherheit und Umwelt.

Für die Maßnahmevorschläge standen die Fragen nach Eignung und Wirkungszeitraum im Mittelpunkt.

Die Erhebung wurde im Frühjahr/Sommer 2003 als Wiederholungsbefragung in zwei Runden durchgeführt. Der Rücklauf in den beiden Hauptrunden betrug 112 (20,4 %, 1. Runde) bzw. 68 (60,7 %, 2. Runde.) Antwortbögen. Die Respondenten waren überwiegend männlich mit einem Schwerpunkt in der Altersklasse von 30-39 Jahren und arbeiten zu je einem Drittel in Universitäten und Unternehmen. Ihre inhaltlichen Arbeitsprioritäten sind ausgesprochen weit gefächert. Besonders häufig wird „Sensorik...“, sowie „Nanomaterialien und -partikel“ angegeben. Fachleute mit dem Hauptarbeitsgebiet „ethische Folgen...“ haben nicht geantwortet.

Abb. 2: Ausschnitt aus dem Delphi-Fragebogen in der 2. Runde

A Bewertung von Zukunftsthese

These	Fachkenntnis				Chance für			Realisierungszeitraum				Position Deutschl.			Folgeprobleme								
	groß	mittel	gering	keine	Gesellschaft	Wissenschaft	Wirtschaft	Gesundheitsversorgung	bis 2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020	nach 2020	nie	führend	ausreichend	unklar	unbedeutend	Sicherheit	Umwelt	Gesellschaft	Gesundheitsversorgung	
1 "Künstliche Haut" -nanotechnologisch hergestellt- ersetzt die wesentlichen Funktionen des natürlichen Gewebes vollständig und dauerhaft. Sie wird insbesondere bei der Behandlung schwerer Verbrennungen angewendet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>														
Anmerkungen:																							
2 Sensoren, die innerhalb von Sekunden Bakterien oder Viren detektieren können, werden entwickelt, z.B. für Schutzanzüge.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>														
Anmerkungen:																							

Ein regionales Zentrum gemessen am Rücklauf ließ sich im Postleit-Gebiet 1 (Berlin, Mecklenburg-Vorpommern) ausmachen.

Zusätzlich zur Befragung wurden ethisch-soziale Aspekte in einem gesonderten Workshop vertiefend bearbeitet.

2.1 Zukunftsthesen

Zu jeder Zukunftsthese wurden die Befragten aufgefordert, ihre persönliche Fachkompetenz bzgl. des angesprochenen Sachverhaltes auf einer vierstufigen Skala einzuschätzen. In 30 % der Fälle lautete die Selbsteinschätzung „keine Fachkenntnis“. In Anbetracht der Vorgabe eines „Experten“-Delphi werden die weiteren Angaben (auf Ebene der Thesen) bei dieser Selbsteinstufung nicht weiter berücksichtigt.

Etwa 10 % der Experten arbeiten aktuell selbst im Themengebiet, 25-30 % lesen Primärliteratur und ca. 60 % lesen Sekundärliteratur bzw. sind im Austausch mit Fachleuten – ein Profil, das insgesamt mit dem Expertenprofil des Delphi’98 übereinstimmt. Analog zur damaligen Befragung wurde auch bei der vorliegenden Untersuchung beobachtet, dass die Zahl der antwortenden Fachleute mit selbst eingeschätzt großer Sachkenntnis von der ersten zur zweiten Runde abnahm.

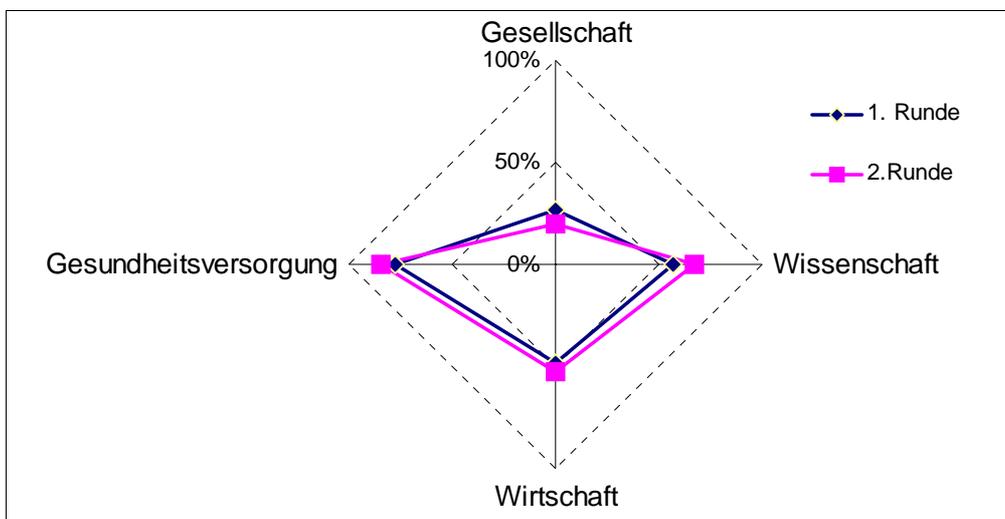
Gesamteinschätzung Nanotechnologie als Chance

Von der Nanotechnologie werden in erster Linie große Entwicklungsimpulse für die Gesundheitsversorgung und die Wissenschaft erwartet. Die Chancen für die Wirtschaft werden etwas zurückhaltender beurteilt, für die Gesellschaft sieht die Mehrheit der Experten kaum spezifische Potenziale (vgl. Abb. 3).

In der Detailanalyse einzelner Zukunftsthesen wird der „Abstimmung internationaler Zulassungsregularien“ herausragende Bedeutung sowohl für die Wirtschaft als auch die Gesundheitsversorgung zugesprochen. Wirtschaftliche Entwicklungsimpulse werden insbesondere den Verfahren der *in vitro*-Diagnostik zugeschrieben, die aufgrund ihres pharmakologischen Charakters große, globale Märkte in der Medikamentenentwicklung und -versorgung besetzen könnten.

Der Kampf gegen die „Volkskrankheit“ Krebs durch gezielte Verabreichung Zytostatikabeladener Nanopartikel verspricht in der Expertenmeinung größte Fortschritte in der Gesundheitsversorgung. Wissenschaftliche Entwicklungspotenziale werden dieser Zukunftsvision nicht (mehr) in diesem Maße zugeschrieben. Dazu liegen heute schon zu zahlreich Forschungsergebnisse (bis hin zur klinischen Erprobung und Anwendung) vor, so dass die

Abb. 3: Entwicklungschancen durch die Umsetzung der Nanotechnologie in der Medizin. Einschätzung der Experten in der 1. und 2. Hauptrunde der Delphi-Erhebung



Experten die Frage der Machbarkeit möglicherweise schon als beantwortet ansehen.

Neben den überwiegend technologischen Zukunftsvisionen taucht die „Nanomedizin als Studienfach“ als herausragender Potenzialträger für die Entwicklung der Wissenschaft auf:

„Die ‚Nanomedizin‘ als Brücke zwischen Natur-, Ingenieurwissenschaften und der Medizin wird als eigenständiges Studienfach an ausgewählten deutschen Universitätsstandorten eingerichtet.“ (These 26 des Delphi-Fragebogens, 78 % Zustimmung zu ‚Chance für die Wissenschaft‘)

Dies korrespondiert mit der Expertenmeinung zur besonderen Eignung jener Maßnahmevorschläge, deren Ziel die Förderung interdisziplinärer Arbeitsgruppen und fächerübergreifender Ausbildungen ist.

Realisierungserwartungen

„Was wird uns die Zukunft wann bringen?“ „Mit welchen Entwicklungen müssen wir rechnen, mit welchen eher nicht?“ Die Antworten auf diese Fragen bilden stets den Kern einer Technologievorschau. So auch in der vorliegenden Studie, wobei die nanotechnologischen Entwicklungen „pro Gesundheit“ im Mittelpunkt stehen. Die befragten Experten hatten sich für jede Zukunftsthese zwischen vorgege-

benen 5-Jahres-Zeiträumen von 2005-2020, der Zeit nach 2020 oder der Ablehnung einer Realisierungschance zu entscheiden (vgl. Abb. 4).

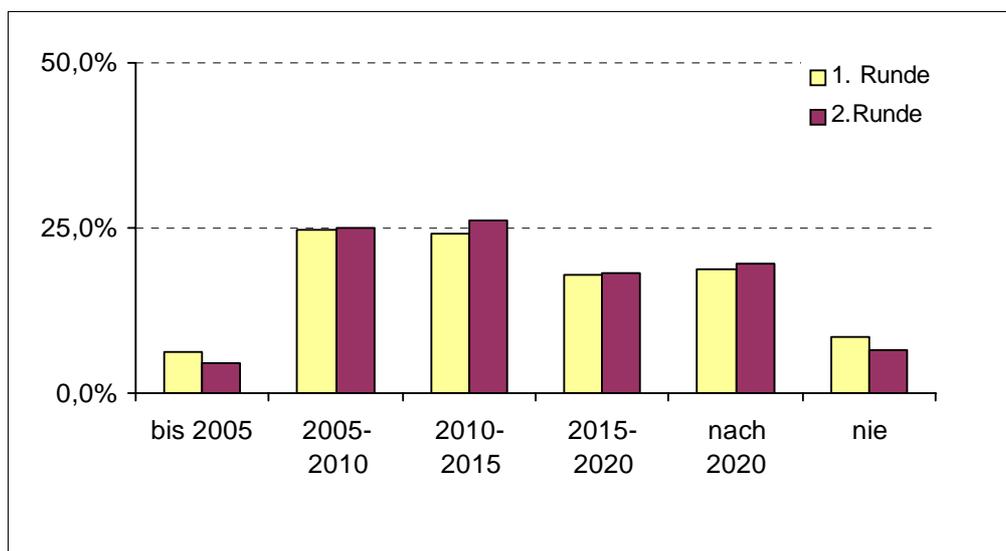
Die Zukunft - nach der allgemeinen Einschätzung der befragten Experten – wird insbesondere im Zeitraum zwischen 2005 und 2015 zahlreiche Umsetzungen nanotechnologischer Zukunftsvisionen in der Medizin bringen. Der „Innovationsschub aus dem Nanokosmos“ (Bachmann 1998) wird für die Medizin in den kommenden 10-12 Jahren seine Dynamik entfalten, also schon in relativ naher Zukunft. Diese Gruppenmeinung der Experten bleibt über beide Befragungsrunden der Delphi-Erhebung sehr konstant.

In der folgenden Detaillierung des o. a. Trends wird jeweils der 5-Jahres-Zeitraum betrachtet, bis zu dem zusammengenommen mehr als 50 % der Experten (der 1. Hauptrunde) die Realisierung als gegeben annehmen¹.

Die Zukunft im Zeitraum 2005-2010

Die Hautkrebsvorbeugung mit nanopartikulären Sonnencremes, die es teilweise heute schon gibt, wird generell angewendet. In der medizinischen Diagnostik gehören nanobasierte Kontrastmittel in der Bildgebung zum alltäglichen Standard und in den Laboren sind erste Prototypen von Chips entwickelt, mit deren Hilfe

Abb. 4: Durchschnittliche Gesamteinschätzung der Experten zu den Realisierungszeiträumen der nanotechnologischen Zukunftsthese aus der 1. und 2. Hauptrunde der Delphi-Befragung



genetische Dispositionen z. B. bei Allergien sicher vorhergesagt werden können.

In der Pharmaindustrie können Medikamente sehr viel schneller als bisher entwickelt werden, da sich das Wirkstoffscreening nach weiterer Miniaturisierung als Verfahren etabliert hat. Der Prototyp eines Schutzanzuges auf der Basis neuer Nano-Sensoren, die Bakterien und Viren entdecken können, liegt vor.

Die Zukunft im Zeitraum 2010-2015

In diese Zeit fällt die Hochphase nanotechnologischer Innovationen für Medizin und Gesundheitswesen. Die Umsetzung von 21 der insgesamt 49 Zukunftsthemen wird allein in diesem Zeitfenster erwartet.

Die intelligente Wirkstofffreisetzung erlebt ihren Durchbruch hin zur breiten Anwendung. Dies gilt z. B. für die wirkortspezifische Krebstherapie durch mit Medikamenten beladene Nanopartikel („Drug Release“) ebenso wie z. B. für die lokale Hyperthermie zur physikalischen Bekämpfung entarteter Zellen und Gewebe. Impfstoffe, die in Nanokapseln zur Einschleusung durch die Darmwand verborgen sind, werden klinisch erprobt.

Weitere therapeutische Innovationen betreffen die dauerhafte Schienung der Herzkranzgefäße durch Stents, deren spezielle Oberflächen eine erneute Verengung (Restenose) des Gefäßes verhindern. In analoger Weise gehören auch neue Implantatoberflächen zum medizinischen Standard, die eine Abstoßungsreaktion verhindern, also beinahe vollständig biokompatibel sind. Zudem liegen erste Labormuster von Endoprothesen vor (z. B. für den Hüftgelenkersatz), die durch Interaktion und Steuerung des Zellwachstums eine deutlich verbesserte Haftung und Verankerung versprechen.

Im Bereich der Diagnose sind große Fortschritte zu verzeichnen, und zwar gleichermaßen bei *in vitro*- und *in vivo*-Technologien: zunehmende Analysegeschwindigkeit, eine Senkung der Nachweisgrenze bis hin zum Nachweis von Einzelmolekülen und eine weitere Verminderung der Invasivität diagnostischer Eingriffe bilden die Hauptentwicklungslinien. So finden in einer zum Alltag gehörenden Telemedizin Nano-Sonden zur häuslichen Überwachung wichtiger Körperfunktionen breite Anwendung. Nicht-invasive Sensoren wer-

den produziert, die transkutan (ohne Verletzung, durch die Haut) biochemische Blutanalysen durchführen können. Sogar intelligente Pflaster mit Überwachungsfunktion des Heilungsverlaufes existieren als Labormuster.

In der Prävention verhelfen Zahncremes mit Partikeln im Nanometermaßstab, die die Anlagerung der Plaque verhindern, dem Kampf gegen Karies zu großen Erfolgen.

Alle beschriebenen Veränderungen gehen mit der Einrichtung eines interdisziplinären Studiengangs „Nanomedizin“ an einigen deutschen Hochschulen einher. Nicht nur die Ausbildung, sondern auch die klinische Praxis sieht sich Veränderungen gegenüber. So werden neue Konzepte für die Arbeitsabläufe (Workflow) in Krankenhäusern entwickelt und diskutiert.

Die Zukunft im Zeitraum 2015-2020

Das Zusammenwirken von Biologen und Ingenieuren im *Tissue Engeneering* etwa zur *in vivo*-Zellreparatur des Herzmuskels nach Infarkt ist in der klinischen Praxis zum Alltag geworden. Nanomatrizes als Träger des Zellwachstums spielen dabei eine wichtige Rolle. Sterilität medizinischer Instrumente wird nicht mehr nach jedem Gebrauch z. B. durch Gas oder Dampf (wieder-)hergestellt, sondern die Oberflächen sind nanotechnologisch so veredelt, dass Keime nicht mehr anhaften können.

Erstmals gelingt die Übertragung von Nervenimpulsen durch künstliche Nanofasern und auch die Kommunikation auf (sub-)zellulärer Ebene kann aufgeklärt werden.

Neue, international abgestimmte Richtlinien regeln die Zulassung von Medikamenten und Medizinprodukten auch im Bereich der medizinischen Nanotechnologie einheitlich.

Utopische Visionen: Die Zukunft nach 2020

In diesem weiten Umsetzungszeitraum finden sich die Zukunftsvisionen, die den Experten zwar sehr visionär (*Science Fiction*) vorkommen, ohne dass sich ihre Verwirklichung in sehr ferner Zukunft gänzlich ausschließen ließe: „Nanobots“ – „Nanomaschinen und –werkzeuge“ – „Selbstreplikation von Nanoteilchen“.

Auch die „*personalized Medicine*“, nach der die Pharmakotherapie eines Patienten am

Genotyp festgemacht werden kann, gehört zu den Utopien.

Nur eine These wird nach der Expertenmeinung nie eintreten:

„Der weit verbreitete Einsatz nanotechnologischer Diagnose- und Therapieverfahren wird die Anzahl der in Krankenhäusern tätigen Schwestern und Pfleger halbieren.“ (These 29, Akronym: ‚PflegeKräfteAbbau‘, des Delphi-Fragebogens)

Eine innovationsbedingte Entpersonifizierung der Pflege und Betreuung kann (oder will) sich niemand vorstellen – auch nicht in ferner Zukunft.

Position Deutschlands

Gemeinhin wird das generelle Innovationspotenzial Deutschlands im internationalen Maßstab als unverändert hoch angesehen (z. B. Malanowski 2001, S.44). Ob – nach Meinung der Experten – dies auch für nanotechnologische Anwendungen in Medizin und Gesundheitswesen gilt, oder ob Deutschland im diesem Feld den Anschluss verpasst habe – dazu haben die Befragten jede dargebotene Zukunftsvision auf einer vierstufigen Skala von „international führend“ bis „unbedeutend“ bewertet.

Im Antwortverhalten der Experten zeigte sich eine methodische Besonderheit des gewählten Verfahrens. Zum einem verwenden die Antwortenden nahezu ausschließlich lediglich

die „mittleren“, weniger stark polarisierenden Stufen der Antwortskala. Nicht „führend“ oder „unbedeutend“, sondern „aussichtsreich“ oder „unklar“ sehen die Experten die deutsche Position (vgl. Abb. 5).

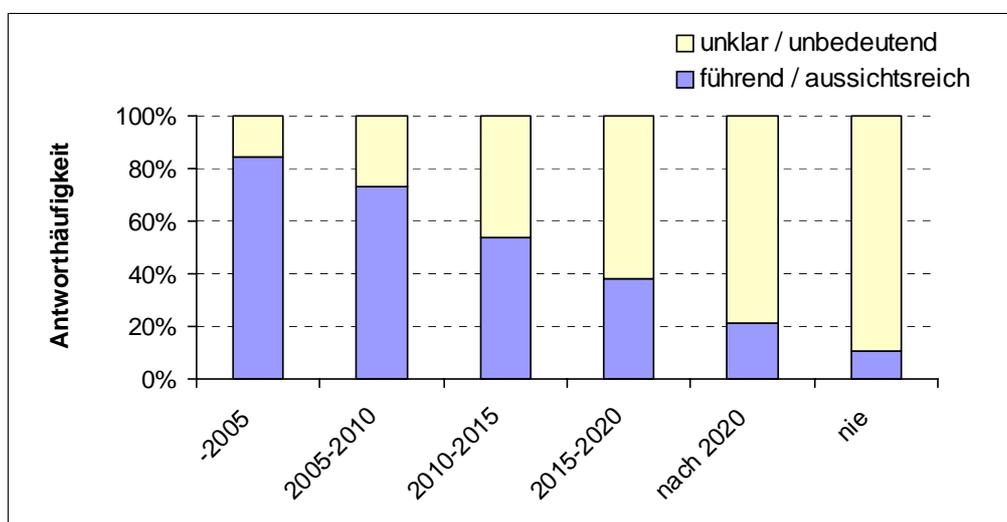
Zum anderen ist die Einschätzung der Position Deutschlands davon abhängig, wann die Umsetzung der jeweiligen Zukunftsthese erwartet wird. Je später eine Entwicklung erwartet wird, desto unklarer wird in den Augen der Experten auch die Position Deutschlands eingeschätzt.

Abseits dieser methodischen Besonderheit, die ein eher defensives, ggf. sogar kulturspezifisches Antwortverhalten nahe legt, kann angesichts dieses Zusammenhangs das größte Potenzial auf denjenigen Themenfeldern vermutet werden, auf denen die Experten die Realisierung der Technologien erst in späterer Zukunft erwarten, die Position Deutschlands aber dennoch als aussichtsreich einschätzen.

Zusammengefasst besteht dieses Potenzial demzufolge in folgenden Bereichen:

- Transport und zielgerichtete Freisetzung und Dosierung von Wirkstoffen (Medikamenten) z. B. im Kampf gegen Krebs;
- *in vitro* Analyse von Proteinen zur Früherkennung von z. B. Arthritis und Multipler Sklerose durch nanotechnologische Chips;
- Verbesserung der Haftung/Verankerung und damit der „Standzeiten“ von Implantaten durch Steuerung der Gewebsinteraktion;

Abb. 5: Abhängigkeit der Einschätzung der Position Deutschlands vom Realisierungszeitraum über alle Thesen der 1. Hauptrunde der Delphi-Befragung



- Entwicklung nanobasierter Kontrastmittel für die Bildgebung und Screening-Technologien für die beschleunigte Entwicklung neuer Medikamente.

2.2 Maßnahmen zur verantwortungsvollen Gestaltung des Themenfeldes

„Was ist zu tun, um das Zukunftsfeld ‚Nanotechnologie und Gesundheit‘ zu stärken, inter(-national) auszubauen und verantwortungsvoll zu gestalten?“ Ausgehend von dieser Frage beurteilten die Experten insgesamt 36 Maßnahmevorschläge bzgl. ihrer Eignung (sehr hoch ... sehr niedrig) und der Zeit bis zum Nachweis erster Erfolge (in 3, 4-5 oder 6-10 Jahren).

Insgesamt wird die Eignung der Maßnahmen überwiegend positiv („hoch“) gesehen, die Erfolge werden meist in 4-5 Jahren erwartet.

„Public awareness“ und besonders Interdisziplinarität unter Betonung des klinischen Bezuges sollen nach Meinung der Experten ausgebaut und mit entsprechenden Maßnahmen weiter entwickelt werden: Förderung interdisziplinärer Arbeitsgruppen und Ausbildung, Abbau bürokratischer Hemmnisse, Verbesse-

rung des Innovationsklimas, Förderung der Aufklärungsarbeit durch die Wissenschaftler selbst, Intensivierung des Technologietransfers, Beschleunigung der Aufnahme innovativer Produkte in den Erstattungskatalog der gesetzlichen Krankenversicherung.

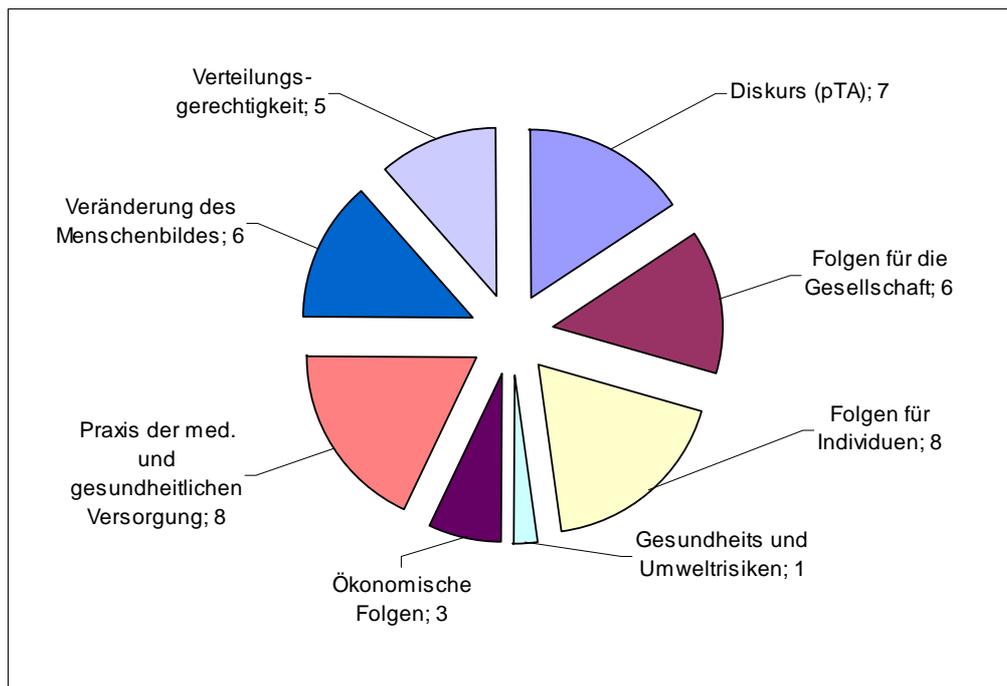
Die nationale Abstimmung der Forschungs- und Entwicklungsförderung ist nach Meinung der Experten zu intensivieren, ohne dass dazu jedoch eine „Nanotechnologie-Kommission“ eingerichtet werden soll.

2.3 Ethisch soziale Aspekte

Die im Rahmen der Delphi-Befragung unmittelbar angesprochenen Folgeprobleme können in zweierlei Erscheinungsformen auftreten: Unerwünschte (Neben-)Wirkungen oder absichtlicher Missbrauch bzw. die Gefahr eines Missbrauchs. Beides gilt es zu vermeiden oder zu kontrollieren und schon frühzeitige Anzeichen wahrzunehmen.

Das Themenfeld Nanotechnologie und Gesundheit wird in der Expertenmeinung insgesamt als „relativ risikoarm“ gesehen. Bezüglich der Folgeprobleme sehen die befragten

Abb. 6: Gruppierung (Cluster) und Anzahl der Nennungen aus dem Brainstorming zu Seiteneffekten/Risiken der nanotechnologischen Innovationen im Gesundheitssektor (n=44, „pTA“-partizipative Technikfolgenabschätzung)



Experten im Grunde kaum Auswirkungen für die Umwelt und zu einem geringen Teil (25 %) für Gesellschaft und Sicherheit. Folgeprobleme werden am ehesten im Bereich der Gesundheitsversorgung gesehen (Folgen von Frühdiagnosen, Zugangsbeschränkung/Regularien zu Versorgungsleistungen) (vgl. Abb. 6).

Bei diesen Einschätzungen gilt es zu bedenken, dass keiner der Antwortenden ethisch-soziale Fragen als sein/ihr Hauptarbeitsgebiet bezeichnet hat. Dies hat u. E. auch strukturelle Gründe, denn die bioethische Diskussion wird derzeit von der Stammzellen-Debatte dominiert. Eine eigenständige Perzeption der Nanotechnologie ist derzeit kaum erkennbar.

Dies bestätigten auch die Teilnehmer eines die ethisch-sozialen Fragen vertiefenden Workshops, die „Nanotechnologie und Gesundheit“ als ausgesprochen „jungen“ Gegenstandsreich einstuften.

Im Grunde besteht in weiten Teilen der Fragestellungen und Problemkreise eine hohe Übereinstimmung mit entsprechenden Aspekten der Höchstleistungsmedizin insgesamt. Spezifische Aspekte der Nanotechnologie werden eher durch sehr ferne Visionen aufgeworfen wie z. B. Selbstreplikation, ungewollte Diagnostik oder Chip-Implantate.

Derzeit – so die Workshopteilnehmer – fehlt in der ethischen Diskussion noch das Wissen über die Technologie, ihre Ansätze und Möglichkeiten. Noch größer ist die sachliche Unsicherheit in öffentlichen Diskursen. Der Stellenwert einer um die Technikfolgen bemühten Auseinandersetzung ist dabei oftmals geringer als die öffentliche Präsentation des technologischen Fortschritts. Als Beispiel für eine gelungene Diskursform wird das aktuell laufende „1000Fragen-Projekt“ der AKTION MENSCH angesehen (<http://www.1000fragen.de>).

Gesellschaftliche Folgen wie etwa die Lebensverlängerung durch verbesserte medizinische Möglichkeiten münden letztlich in die Diskussion über Werte. Aktuelle Antworten auf Fragen wie „Was wünscht sich die Gesellschaft?“ oder „Was ist wünschenswert?“ dürfen – so die Teilnehmer – jedoch nicht allein zur Ableitung der Normativität herangezogen werden. Vielmehr sieht hier die Ethik eine ihrer Hauptaufgaben und Zuständigkeiten, beispielsweise in der (Weiter-) Entwicklung von Kriterien und Ansätzen zur ethischen Bewer-

tung der Auswirkungen der gesundheitsbezogenen Nanotechnologie.

Für die zukünftige Gestaltung ist daher nicht nur die Intensivierung einer eigenständigen Erforschung der angesprochenen Problemkreise wichtig, sondern die konstitutive Integration der ethisch-sozialen Perspektive bei den technologischen Verbänden zur Entwicklung nanotechnologischer Anwendungen im Gesundheitswesen.

3 Fazit

Der Blick in die Zukunft geschah mit einer Expertenbefragung nach der Delphi-Methode, in der 112 Fachleute bundesweit nanotechnologische Zukunftsvisionen und Maßnahmevorschläge zur Gestaltung des Themenfeldes bewerteten. Neben der Einschätzung der Umsetzbarkeit, der aktuellen Position Deutschlands ging es dabei auch darum, in welchen Bereichen (Wirtschaft, Wissenschaft, Gesellschaft, Sicherheit, Umwelt, Gesundheitsversorgung) besondere Entwicklungschancen oder Anzeichen für etwaige Folgeprobleme zu erkennen waren. Der vertiefende Diskurs mit ethisch-sozialwissenschaftlich ausgerichteten Fachleuten lieferte Anhaltspunkte für die Art und die Auseinandersetzung mit möglichen Risiken für die Medizin von morgen.

Auf der Grundlage der genannten Analysen ergeben sich folgende Kernaussagen:

- Nanotechnologie pro Gesundheit ist derzeit international und in Deutschland in Bezug auf Forschung, klinische Anwendungen und marktreife Produkte noch ein kleines, da junges Feld.
- Die Technologievorschau unterstützt die Bedeutung bestimmter Technologiefelder des Themengebiets, die im Rahmen der Gesamtstudie (vgl. Abb. 1), insbesondere aus Literatur- und Patentrecherche, identifiziert wurden. Dies sind:
 - Diagnostik/Analytik (z. B. spezifische Kontrastmittel, chipbasierte Analyseinstrumente, neue Signalgeber)
 - „Drug-Delivery“ und „Carrier“-Systeme (z. B. biokompatible, beschichtete Nanopartikel mit Medikamentenbeladung)
 - Nanomaterialien/nanostrukturierte Oberflächen (z. B. modifizierte Stents, funktionalisierte Nanooberflächen auf Implantaten).

- Die Delphi-Analyse selbst konkretisiert die Bedeutung der genannten Technologiefelder auch in der zeitlichen Projektion und ergibt einen Innovationsschub (Realisierungserwartung) für nanotechnologische Anwendungen im Zeitraum von 2005-2015. Die Einschätzung der Position Deutschlands durch die befragten Experten ergibt besondere Stärken in Einzelaspekten in allen der genannten Schwerpunktfelder:
 - „intelligente“ Wirkstofffreisetzung insbesondere im Kampf gegen Krebs,
 - erhöhte Sensitivität der Analyse (z. B. Früherkennung),
 - nanobasierte Kontrastmittel für die Bildgebung
 - Verankerung von Implantaten durch die Steuerung der Gewebsinteraktion.
- Das Themenfeld Nanotechnologie und Gesundheit wird in der Expertenmeinung insgesamt als „relativ risikoarm“ gesehen. Die befragten Experten sehen im Grunde nahezu keine Auswirkungen für die Umwelt bei den dargestellten Zukunftsvisionen. Ein geringer Anteil (25 %) hält Folgen in den Bereichen Gesellschaft und Sicherheit für möglich. Folgeprobleme werden am ehesten im Bereich der Gesundheitsversorgung gesehen (Folgen von Frühdiagnosen, Zugangsbeschränkung/Regularien zu Versorgungsleistungen).
- Als Ergebnis des Ethikworkshops ist festzuhalten, dass die Nanotechnologie pro Gesundheit in der Ethikdiskussion noch nicht eigenständig thematisiert worden ist. Zunächst treten jedoch auch für nanotechnologische Innovationen in der Medizin in weiten Bereichen die gleichen ethisch-sozialen Fragestellungen auf, die für die gesamte Hochleistungsmedizin gelten. Spezifische Aspekte der Nanotechnologie werden eher durch sehr ferne Visionen aufgeworfen wie z. B. Selbstreplikation, ungewollte Diagnostik oder Chip-Implantate.

In der grundlegenden Auseinandersetzung mit Strukturen auf molekularer oder gar atomarer Ebene, wie sie für die Nanotechnologie prägend ist, verblässen die Grenzen der Fachdisziplinen zusehends. Dieser Trend muss sich, so trat es immer wieder im Verlauf der gesamten Studie zutage, auch in der Erforschung und Entwicklung konkreter Anwendungen gerade im Ge-

sundheitssektor fortsetzen. Hier liegt ein Schlüssel zum Erfolg nanotechnologischer Innovationsstätigkeit im Gesundheitssektor: in praktizierter und konstruktiver Interdisziplinarität entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Danksagung

Unser großer Dank gilt den zahlreichen Persönlichkeiten, die uns mit ihrer Expertise in Befragungen und Workshops so bereitwillig unterstützt haben. Besonders verbunden sind wir den Mitgliedern des ausführenden Konsortiums für die hervorragende Zusammenarbeit: Univ.-Prof. Dr. T. Schmitz-Rode (AKM); V. Appelbe, Dr. U. Schelhaas, U. Steinbusch, Dr. M.G. Floren (AGIT); Dr. E. Bremus-Köbberling, Dr. A. Gillner (Fraunhofer-ILT); Dr. T. Klockenbring, PD Dr. Dr. S. Barth (Fraunhofer-IME); Dr. J. v. Zahn, Dr. H. Gothe, G. Schiffhorst, Dr. V. Reuck, Prof. Dr. B. Häussler (IGES).

Für das durch die Beauftragung entgegengebrachte Vertrauen und die Kooperation danken wir dem BMBF und dem Projektträger ITA des VDI/VDE, Teltow, sehr herzlich.

Anmerkung

- 1) Statistisch handelt es sich dabei um die Medianklasse der kumulierten Häufigkeiten der ordinal skalierten Zeitachse als Lagemaß dieser Verteilung. Der „genaue“ Medianwert selbst liegt in dieser Klasse, hier also einem Zeitraum von 5 Jahren, und bezeichnet jenen Punkt, an dem insgesamt 50 % der Expertengruppe (die Mehrheit) erreicht wird.

Literatur

- Bachmann, G., 1998: Innovationsschub aus dem Nanokosmos. VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf, Zukünftige Technologien Nr. 28, Technologieanalyse durch den VDI im Auftrag des BMBF*
- Cuhls, K.; Blind, K.; Grupp, H., 1998a: Delphi'98 – Umfrage: Studie zu globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Studie im Auftrag des BMBF. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung*
- Malanowski, N., 2001: Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse (ITA): Nanotechnologie. Studie im Auftrag des BMBF. Zukünftige Technologien Nr. 35, Düsseldorf (Februar 2001)*

Weiterführende Literatur

Aichholzer, G.; Cas, J.; Nentwich, M.; Rakos, C.; Peissl, W.; Pisjak, P.; Schramm, W.; Torgersen, H.; Wild, C.; Tichy, G., 1998: Delphi Report Austria I-III. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr, März. Wien: Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Boeing, N., 2002: déjà vu: Die Neue Nanotech-Debatte. Hamburg; http://www.km21.org/23rd-century/nanodebatte_0703.html [17.11.2003]

Borm, P.J.A., 2000: Particle toxicology: from coal mining to nanotechnology. *Inhalation Toxicology*, 14, 3, S. 311-324

Brosi W.; Krekel, M.E.; Ulrich, J.G., 2003: Sicherung einer beruflichen Zukunft durch Forschung und Entwicklung: Ergebnisse einer Delphi-Befragung. Bielefeld: Bertelsmann

Brumfiel, G., 2003: A little knowledge.... In: *Nature*, Vol. 424, S. 246-248

BMBF/Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2002a: Standortbestimmung – Nanotechnologie in Deutschland. BMBF Publik, Bonn

BMBF/Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2002b: Förderprogramm IT-Forschung 2006: Förderkonzept Nanoelektronik. Förderkonzept des BMBF. Bonn

BMBF/Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2002c: Nanotechnologie in Deutschland Strategische Neuausrichtung. Studie des BMBF, Bonn

Bürger, F.; Elberfeld, R.; Flügel, D.; Hartmann, B.; Neuy, C.; Schmidt, T., 2002: Mikro- und Nanotechnologie: Branchenreport aus Sicht des Kapitalmarktes. Branchenreport der WGZ-Bank, Düsseldorf

Coenen, Chr., 2003: Utopien und Visionen zur Nanotechnologie. TAB Brief Nr. 24, Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag

Cuhls, K.; Blind, K.; Grupp, H., 1998b: Delphi'98 – Studie zu globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik – Methodik und Statistik der Delphi-Befragung. Studie im Auftrag des BMBF. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung

Cuhls, K.; Blind, K.; Grupp, H., 1998c: Delphi'98: Daten. Studie im Auftrag des BMBF. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Januar)

Hoffknecht, A., 2003: Technologiefrüherkennung: Elektronik der Zukunft. Mini-Delphi-Studie, Technologieanalyse. Studie des VDI im Auftrag des BMBF. Zukünftige Technologien Nr. 46, Düsseldorf

Lauterbach, K.W.; Stock, S., 2001: Zwei Dogmen der Gesundheitspolitik – Unbeherrschbare Kostensteigerungen durch Innovation und demographischen Wandel? http://www.medizin.uni-koeln.de/kai/igmg/Gutachten_Prof_Lauterbach_Gesundheitsystemanalyse.pdf [15.9.2003]

Roco, M.C.; Bainbridge, W.S., 2001: *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers

VDE/Verband Deutscher Elektrotechniker (Hrsg.), 2002: VDE-Studie Schlüsseltechnologien 2010, Mikroelektronik, Informations-, Mikrosystem- und Nanotechnik. Frankfurt a.M.

Wevers, M.; Wechsler, D., 2002: *Nanobiotechnologie I: Grundlagen und technische Anwendung molekularer, funktionaler Biosysteme*. Technologieanalyse des VDI im Auftrag des BMBF VDI-Technologiezentrum. Zukünftige Technologien Nr. 38, Düsseldorf

Wood, S.; Jones, R.; Gelhart, A., 2003: *The social and Economic Challenges of Nanotechnology*. Swindon, UK: Economic and Social Research Council

Kontakt

Dr. Robert Farkas

Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik – AKM

c/o AKM Innovationsmanagement mbH

Dennewartstr. 25-27, 52068 Aachen

Tel.: +49 (0) 241 / 963 - 24 20

Fax: +49 (0) 241 / 963 - 24 21

E-Mail: r.farkas@akm-aachen.de

Internet: <http://www.akm-aachen.de>

«