



TA 47/2003

Studie des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung

Nanotechnologie in der Medizin

**Walter Baumgartner, Barbara Jäckli
Bernhard Schmithüsen, Felix Weber**

www.ta-swiss.ch

Diese Publikationsreihe enthält die Ergebnisse der Studien, die im Auftrag des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung (TA-SWISS) beim Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierat (SWTR) durchgeführt wurden.

TA-SWISS hat zum Ziel, die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien möglichst umfassend zu untersuchen. Es geht darum, die allfälligen positiven und negativen Einflüsse der Technologie auf soziale, politische, wirtschaftliche und ökologische Systeme und Abläufe abzuschätzen.

Um diese Aufgabe zu erfüllen, setzt der SWTR einen Leitungsausschuss aus Fachleuten von Wissenschaft, Industrie, Politik und NGO's (Nichtstaatliche Organisationen) ein, welcher die massgeblichen Themen und Fragen definiert, die TA-SWISS behandelt.

Nach einer Pilotphase von vier Jahren haben der Bundesrat und das Parlament den SWTR beauftragt, die TA-SWISS Aktivitäten für die Periode 1996 bis 1999 weiterzuführen. Ende 1999 wurde vom Parlament beschlossen, die Technologiefolgen-Abschätzung zu institutionalisieren. Dies ist im Bundesgesetz über die Forschung vom 8. Oktober 1999 festgehalten.

Die materielle Verantwortung für den Bericht liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Cette série de publications de TA-SWISS contient les résultats des projets menés dans le cadre du Centre d'évaluation des choix technologiques (Technology Assessment) auprès du Conseil Suisse de la science et de la technologie (CSST).

TA-SWISS vise à cerner de la manière la plus approfondie possible les effets des nouvelles technologies sur la société. Il s'agit là des influences potentielles, aussi bien positives que négatives, que la technologie peut avoir sur des procédures et des systèmes sociaux, politiques, économiques et écologiques.

Pour répondre à cette demande, le CSST a nommé un Comité Directeur composé de scientifiques, de spécialistes des domaines industriel et politique ainsi que des représentants des organisations non gouvernementales (NGO).

Après une phase pilote de quatre années, le Conseil fédéral et le Parlement ont chargé le CSST de poursuivre les activités de TA-SWISS pour la période 1996-1999. Le Parlement a décidé fin 1999 d'institutionnaliser les activités d'évaluation des choix technologiques. Cette décision est consignée dans la loi fédérale sur la recherche du 8 octobre 1999.

Ce rapport n'engage que ses auteur(e)s.

Herausgeber TA-SWISS
Zentrum für Technologiefolgen-
Abschätzung
Birkenweg 61
CH-3003 Bern

Telefon +41 (0) 31 322 99 63
Fax +41 (0) 31 323 36 59
E-Mail ta@swtr.admin.ch
Internet www.ta-swiss.ch

Editeur TA-SWISS
Centre d'évaluation
des choix technologiques
Birkenweg 61
CH-3003 Berne

Téléphone +41 (0) 31 322 99 63
Fax +41 (0) 31 323 36 59
E-Mail ta@swtr.admin.ch
Internet www.ta-swiss.ch

ISBN-Nr. 3-908174-08-2

Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung
beim Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierat
Centre d'évaluation des choix technologiques
auprès du Conseil suisse de la science et de la technologie
Centro per la valutazione delle scelte tecnologiche
presso il Consiglio svizzero della scienza e della tecnologia
Centre for Technology Assessment
at the Swiss Science and Technology Council



Nanotechnologie in der Medizin

Walter Baumgartner
Barbara Jäckli
Bernhard Schmithüsen
Felix Weber

November 2003

TA 47/2003

www.ta-swiss.ch

Auftraggeber

TA-SWISS, Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung beim schweizerischen Wissenschafts- und Technologierat

Begleitgruppe

Markus Ehrat, Zeptosens AG

Andrea Arz de Falco, Bundesamt für Gesundheit (ab Mitte 2002)

Hans-Joachim Güntherodt, Universität Basel, Institut für Physik

Philipp U. Heitz, Universitätsspital Zürich (Präsident der Begleitgruppe, Mitglied des TA-SWISS Leitungsausschusses)

Karl Höhener, Temas AG

Patrik Hunziker, Kantonsspital Basel

Margrit Kessler, Schweizerische Patienten-Organisation

Bernhard Nievergelt, Forschungsstelle für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte

Flavia Schlegel, Bundesamt für Gesundheit (bis Mitte 2002)

Hans-Peter Schreiber TA-SWISS (bis Mitte 2002, Mitglied des TA-SWISS Leitungsausschusses)

Louis Tiefenauer, Paul Scherrer Institut

Barbara Vonarburg, Tages-Anzeiger

Tatjana Weidmann-Hügler, Universität Zürich

Christiane Ziegler, Universität Kaiserslautern

Auftragnehmer

Basics AG

Entscheidungsgrundlagen für Politik und Wirtschaft

Beckenhofstrasse 16

8035 Zürich

AutorInnen und MitarbeiterInnen

Walter Baumgartner

Barbara Jäckli

Bernhard Schmithüsen

Felix Weber

Cosima Borrer

Claudia Bucher

Marietta Hausmann

Dank

Wir möchten an dieser Stelle allen Beteiligten für ihren grossen Einsatz und ihren Durchhaltewillen danken. Der Dank gebührt insbesondere jenen beiden Interviewerinnen, die sich von noch so vielen Absagen nicht entmutigen liessen und es immer wieder schafften, einen viel beschäftigten Experten, eine viel beschäftigte Expertin zur Teilnahme zu bewegen (Cosima Borrer und vor allem Marietta Hausmann). Der Dank gebührt auch der Begleitgruppe, die in kritischen Phasen des Projektes mit konstruktiven Ideen mithalf, das Schiff auf Kurs zu halten.

Die Projektverantwortlichen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Summary

Résumé

1	Auftrag und Vorgehen	1
1.1	Ausgangslage und Auftrag	1
1.2	Vorgehen	4
2	Was ist überhaupt Nanotechnologie?	9
2.1	Arbeitsdefinition	10
2.2	Technologie des 21. Jahrhunderts	12
2.3	Entwicklungshindernisse	15
2.4	Exkurs: Assembler und Nanoroboter	21
3	Anwendungen in der Medizin	23
3.1	Nanotechnologischer Werkzeugkasten	23
3.2	Spezielle Anwendungen	35
3.3	Anwendungspotenziale in sieben Krankheitsgruppen	40
3.4	Risiken	42
4	Auswirkungen in der Medizin	47
4.1	Medizinische Forschung	47
4.2	Diagnose	48
4.3	Therapie	53
4.4	Auswirkungen in sieben Krankheitsgruppen	56

5	Auswirkungen für den Einzelnen	58
5.1	Lebensqualität	59
5.2	Gesundheitsvorsorge und Lebensplanung	61
5.3	Krankheit und Tod	64
5.4	Ethische Überlegungen	65
6	Auswirkungen für die Gesellschaft	67
6.1	Morbidität und Mortalität	67
6.2	Gesundheitswesen	69
6.3	Missbrauchsrisiken	72
7	Steuerung der Entwicklung?	73
7.1	Mögliche Gründe für die Steuerung	74
7.2	Mögliche Instrumente der Steuerung	76
7.3	Mögliche Leitplanken für die Nanotechnologie	78
7.4	Aktuelle Regulierung in der Schweiz	79
7.5	Beurteilung	82
8	Thesen	85
9	Empfehlungen	87
10	Referenzen	90
10.1	Literatur	90
10.2	Links	93
10.3	Interviewpersonen	95
	Anhang: Fragebögen	99

Zusammenfassung

Die Nanotechnologie gilt als eine der wichtigsten Zukunftstechnologien. Unter Nanotechnologie wird eine Vielzahl von Technologien und Produkten verstanden, deren gemeinsames Charakteristikum in der ausserordentlichen Kleinheit der massgeblichen Grössenverhältnisse besteht. Die Nanotechnologie zielt auf die konstruktive Beherrschung von Grössenordnungen, die den kleinsten funktionellen biologischen Strukturen entsprechen, d.h. nur noch Dimensionen von einigen Nanometern aufweisen. Sie betrifft die aktuelle Forschung in Quantenphysik, Materialwissenschaften, Elektronik, Informatik, Chemie, Mikrobiologie, Molekularbiologie, Zellbiologie und Medizin.

Die Nanotechnologie steht aber erst am Anfang. Dennoch ist absehbar, dass sie vor allem auch in der Medizin eine grosse Zukunft haben wird. Damit stellt sich automatisch die Frage nach den möglichen Auswirkungen einer solchen Entwicklung, die die Grenze zwischen lebender und toter Materie zusehends in Frage stellen könnte, nach der ethisch-moralischen Dimension, aber auch nach den Möglichkeiten, diese Entwicklung vielleicht so zu "steuern", dass allfällige negative Auswirkungen bestmöglich abgefangen werden könnten.

Das ist das Thema der vorliegenden Studie, die im Auftrag des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung durchgeführt wurde. Basierend auf einer Technologie-Prognose wurden im Sinne einer Technologiefolgen-Abschätzung die möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie in der Medizin untersucht. Sie liefert für interessierte Laien, aber auch für PolitikerInnen und EntscheidungsträgerInnen einen inhaltlichen Überblick über das Thema und schliesst ab mit konkreten Massnahmenvorschlägen.

Hierzu wurden in vier hintereinander geschalteten Befragungsrunden gesamthaft über 70 internationale ExpertInnen verschiedener Fachrichtungen zu ganz unterschiedlichen Aspekten befragt. Daraus ergibt sich ein Bild, das sich etwa wie folgt zusammenfassen lässt:

Die Nanotechnologie wird die Medizin bereits in den nächsten 20 bis 30 Jahren deutlich verändern, sowohl in der medizinischen Forschung, in der Diagnose wie auch in der Therapie. Diagnosen werden schneller, können schon im Frühstadium einer Krankheit durchgeführt werden, liefern spezifischere und genauere Resultate. Nanobasierte Therapien werden neue Therapiemöglichkeiten eröffnen, werden wirksamer sein als konventionelle Therapien und weniger Nebenwirkungen haben. Vor allem bei Krebs, aber auch bei viralen Erkrankungen und anderen Krankheiten sind erhebliche Fortschritte zu erwarten.

Längerfristig ist damit zu rechnen, dass die krankheitsarme Lebensspanne zunehmen wird, dass sich Verschiebungen in den Todesursachen und eine Vergrößerung der Lebenserwartung ergeben werden. Die Fortschritte der Nanotechnologie in der Medizin dürften mindestens mittelfristig aber keine Entlastung bei den Gesundheitskosten bringen.

Durch deutliche Verbesserungen bei Gen- und anderen Analysen wird die Tendenz zum "gläsernen" Bürger zunehmen. Es dürfte zusehends schwieriger werden, sich vor sich selbst aber auch vor der Gesellschaft zu verbergen. Das Recht auf "Nichtwissen" wird zur Debatte stehen. Missbrauchsrisiken werden zunehmen.

Bestehende Konfliktpotenziale, wie sie sich vor allem im Zusammenhang mit der Gentechnologie bzw. ihren direkten und indirekten Anwendungen in der Diagnose und der Therapie gezeigt haben, werden sich verstärken. Neue Konfliktpotenziale zeichnen sich ab bezüglich der Gefahren der Nanotoxizität und der möglichen Verschmutzung der Umwelt durch Nanopartikel und den damit verbundenen möglichen negativen Auswirkungen. Längerfristig ist mit Konfliktpotenzialen im Zusammenhang mit Befürchtungen zur unkontrollierten Selbstvermehrung von Nanostrukturen zu rechnen.

Die Empfehlungen der Studie zielen auf die Institutionalisierung eines permanenten Beobachtungs-, Reflexions- und Auseinandersetzungsprozesses, der von einem eigens zu schaffenden Fachgremium geleitet und verantwortet werden soll. Denn die Nanotechnologie in der Medizin und darüber hinaus ist nicht irgendein Technologie-Thema. Viele Fragen, die in der vorliegenden Studie nur provisorisch, auf dem heutigen Stand des Wissens beruhend, beantwortet werden konnten, müssen dringend vertieft untersucht werden. Dazu gehören in erster Priorität die erwähnten Risiken, damit zusammenhängend Akzeptanzfragen der Forschung und der Anwendung, Missbrauchsrisiken, moralisch-ethische Fragen und nicht zuletzt auch gesundheitspolitische und ökonomische Fragen.

Die Untersuchung dieser und anderer Fragen soll im Rahmen einer Förderung der Risikoforschung sowie einer zu institutionalisierenden permanenten Begleitforschung durchgeführt werden, mit soliden finanziellen und personellen Grundlagen. Diese Forschungsanstrengungen müssen ergänzt werden durch einen permanenten, gesamtgesellschaftlichen Verständigungsprozess, der alle relevanten Akteure umfasst: Die Forschung selbst, die interessierte Wirtschaft, die Öffentlichkeit und ihre staatlichen und privaten Vertreter. Nur so sind jene Fehler zu vermeiden, die in anderen Technologiebereichen (etwa bei der Gentechnologie) gemacht wurden. Bereits ist das Zeitfenster aber eng geworden.

Summary

Nanotechnology is considered to be one of the most important technologies of the future. Nanotechnology includes numerous technologies and products whose main common characteristic is their extraordinarily small size. Nanotechnology deals with objects that correspond to the smallest functional biological structures, i.e. which possess dimensions of only a few nanometers. This includes current research in quantum physics, materials sciences, electronics, informatics, chemistry, microbiology, molecular biology, cell biology and medicine.

Nanotechnology is, however, only in its beginnings. Nevertheless, it will certainly become important in the future, above all in medicine. This automatically raises some questions, i.e. 1) of the possible consequences of a development which could increasingly blur the border between living and dead matter, 2) of the ethical and moral dimensions, and 3) of the possibilities of "steering" this development to avoid or to counteract any negative effects in the best possible way.

This outlines the topic of this study which was commissioned by the Centre for Technology Assessment (of the Swiss Science and Technology Council). Based on a technology forecast, the technology assessment investigated the possible effects of nanotechnology in the field of medicine. It presents the interested lay person as well as politicians and decision makers with a factual overview of the topic and concludes with concrete recommendations.

For this purpose over 70 international experts of various professional backgrounds were questioned on diverse aspects in three successive rounds. The resulting picture can be summarized as follows:

Nanotechnology will clearly change medicine within the next 20 to 30 years, i.e. medical research as well as diagnosis and therapy. The diagnostic workup will become faster, will probably be carried out at an earlier stage of a disease and will provide more specific and more accurate results. Nanobased therapies will open up new possibilities and could become more effective than present "conventional" therapies and cause less side effects. Considerable progress can be expected especially in the field of cancer, but also for viral and other diseases.

A long term effect will be that the relatively healthy time span in a lifetime can be expected to increase, resulting in a shift in the causes of death and an increased life expectancy. But progress in nanotechnology in medicine is not expected to cause any medium term relief for health costs.

Distinct improvements in gene and other analyses will reinforce the trend towards the "transparent" citizen. It will become increasingly difficult to hide from

one's self and also from society. The right of ignorance ("not to know") will be a matter of debate. The risks of abuse will increase.

Potential conflicts such as those already existing in connection with gene technology and its direct and indirect applications in diagnosis and therapy will become more pronounced. New potential conflicts are emerging in the form of possible environmental pollution by nanoparticles and its possible effects on humans and animals. Additional concerns are caused by possible long term effects of uncontrolled self-replication of nanostructures.

The recommendations of this investigation point towards the institutionalisation of a permanent process of observation, reflection and critical analysis. For nanotechnology in (and apart from) medicine is not an "ordinary" technological issue. Many of the questions in this study are based on the very recent developments in research and can only be answered provisionally, and must be investigated in greater depth. They include first of all the above mentioned risks as well as questions concerning public acceptance of nanotechnology research and application, its misuse, moral and ethical aspects and, last but not least, health policy and economic questions.

The accompanying research necessary for the investigation of these and further questions should be carried out by new institutions with a solid foundation regarding finances and personnel. A complementary permanent process of communication with society as a whole has to take place in addition to this research. This has to include all the relevant "actors": research, business, society and its (official and unofficial) representatives in and outside of government. In this way mistakes which previously occurred during the course of the introduction of novel technologies, i.e. gene technology, may be avoided. At present the time-slot is already narrowing.

Résumé

La nanotechnologie passe pour être l'une des technologies-clés du futur. Elle recouvre une grande variété de technologies et de produits qui se caractérisent par l'extrême petitesse de leurs composants. En effet, la nanotechnologie vise la maîtrise constructive des plus infimes structures fonctionnelles biologiques, dont les dimensions atteignent quelques nanomètres seulement. Elle se nourrit de la recherche actuelle en physique quantique, en sciences des matériaux, en électronique, informatique, chimie, microbiologie, biologie moléculaire, biologie cellulaire et médecine.

Il est vrai que la nanotechnologie n'en est qu'à ses débuts. Mais elle semble promise à un bel avenir, en médecine surtout. D'où naturellement des interrogations, sur les effets possibles d'une telle évolution qui pourrait abolir un jour la frontière entre matière vivante ou inerte, sur sa dimension éthique et morale, mais aussi sur les possibilités de la "contrôler" en quelque sorte pour en pallier au mieux les éventuelles retombées négatives.

C'est là le thème de la présente recherche, menée sur mandat du Centre d'évaluation des choix technologiques. Elle passe en revue les applications possibles de la nanotechnologie en médecine, en s'appuyant sur des prévisions technologiques. Véritable synthèse à l'usage des profanes intéressés, des responsables politiques et des décideurs, elle s'achève par des propositions concrètes de mesures.

Pour les besoins de l'étude, plus de 70 expert(e)s internationaux issus de disciplines différentes ont été interrogés sur des aspects très variés, au cours de trois séries d'interviews successives. L'image qui s'en dégage peut être résumée de la manière suivante.

La nanotechnologie transformera distinctement la médecine d'ici 20 à 30 ans, au niveau tant de la recherche que des diagnostics et de la thérapie. Les diagnostics seront posés plus tôt – dès le stade précoce des maladies –, et ils gagneront en spécificité et en précision. Quant aux nanothérapies, elles ouvriront de nouveaux horizons, supplanteront en efficacité les thérapies classiques et auront moins d'effets secondaires. Des progrès considérables sont à prévoir, en cancérologie notamment, mais aussi face aux affections virales et à d'autres maladies.

A plus long terme, il faut s'attendre à un allongement de la durée de vie sans maladie: les causes de décès seront plus tardives, et l'espérance de vie augmentera. Cependent les progrès de la nanotechnologie en médecine ne se traduiront pas, à moyen terme tout au moins, par une baisse des coûts de la santé.

Par ailleurs, l'affinement des analyses – génétiques notamment – fera prévaloir le principe du "citoyen transparent". Ainsi, il deviendra toujours plus difficile de se cacher à soi-même ou vis-à-vis de la société. Le droit au "non-savoir" fera l'objet d'un grand débat, et les risques d'abus augmenteront.

Les potentiels de conflits s'exacerberont, comme cela s'est surtout vu avec le génie génétique et ses applications, directes ou indirectes, aux diagnostics et aux thérapies. D'autres controverses sont à prévoir sur les risques de la nanotoxicité ainsi que de pollution environnementale par des nanoparticules et sur leurs éventuelles retombées négatives. Un autre potentiel conflictuel apparaîtra à plus long terme, quand la crainte d'assister à une autoreproduction incontrôlée des nanostructures s'installera.

Au chapitre des recommandations, l'étude préconise l'institutionnalisation d'un processus permanent d'observation, de réflexion et de discussion, dont un comité d'experts qui se constituera lui-même prendrait la direction et la responsabilité. En effet, la nanotechnologie n'est pas un quelconque champ technologique, en médecine ni dans les autres sciences. Au surplus, de nombreuses questions n'ayant trouvé dans la présente étude qu'une réponse provisoire, basée sur l'état actuel des connaissances, nécessitent d'urgence une enquête approfondie. Cela concerne en premier lieu les risques précités, pour lesquels il y a lieu de mentionner la problématique de l'accueil réservé à la recherche et à ses applications, les risques d'abus, les questions morales et éthiques, sans oublier les questions économiques ou de politique de la santé.

L'examen de ces questions et d'autres encore s'effectuera de préférence au titre de la promotion de la recherche sur les risques ainsi que dans le cadre d'une recherche d'accompagnement permanente à institutionnaliser, dotées toutes deux de solides ressources financières et humaines. Cette recherche doit absolument aller de pair avec un processus permanent de concertation sociale impliquant tous les acteurs concernés, à savoir la communauté des chercheurs, les milieux économiques intéressés, le grand public et ses représentants dans la sphère étatique ou privée. Ainsi seulement, il sera peut-être possible d'éviter les erreurs commises dans d'autres secteurs technologiques (comme le génie génétique). Or le temps presse.

1 Auftrag und Vorgehen

Gegenstand der vorliegenden Studie ist die mögliche Entwicklung der Nanotechnologie in der Medizin in den nächsten rund 20 Jahren. Im Sinne einer Technologiefolgen-Abschätzung liefert sie eine Auslegeordnung, basierend auf einer Befragung von über 70 internationalen ExpertInnen, ergänzt und systematisiert durch die StudiennehmerInnen.

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Schon seit einigen Jahren wird die Nanotechnologie als *die* Zukunftstechnologie überhaupt bezeichnet. Anfänglich eher als Science Fiction abgetan, hat sie sich in den letzten Jahren zu einer eigentlichen Forschungsindustrie entwickelt. Zahlreiche Forschungsgruppen sind national und international mit nanotechnologischen Fragestellungen beschäftigt. Weltweit hat die staatlich geförderte Forschung die Zweimilliarden-US-Dollargrenze schon weit hinter sich gelassen - mit stark steigender Tendenz.¹ Die USA, Europa (insbesondere Deutschland) und Japan sind die Zentren (mit je etwa gleich grossen Aufwandssummen). Auch die Schweiz ist aktiv: Allein drei staatliche Forschungsprogramme fördern gegenwärtig die Forschung und Anwendung der Nanotechnologie (vgl. Kasten 1).

Unter Nanotechnologie wird gemeinhin eine Vielzahl von (möglichen) Technologien und (möglichen) Produkten verstanden, deren gemeinsames Charakteristikum in der ausserordentlichen Kleinheit der massgeblichen Grössenverhältnisse besteht. Nanotechnologie zielt auf die konstruktive Beherrschung von Grössenordnungen, die den kleinsten (funktionellen) biologischen Strukturen entsprechen, d.h. nur noch Dimensionen von einigen Nanometern aufweisen.² Damit will die Nanotechnologie bis an die Grenzen des (deterministisch) Konstruierbaren vorstossen.³ Dass damit technisch ungeahnte Möglichkeiten erschlossen würden (oder werden – je nach Standpunkt), ist offensichtlich und dass die möglichen Auswirkungen auf fast alle Bereiche unseres Lebens enorm wären, genau so.⁴

¹ Vgl. z.B. Stix, G. (2001): Little big Science, Scientific American, September 2001 (www.sciam.com/20001/0901stx.html) und vor allem: Global Nanotech Policy Workshop, Tokyo, Februar 2002.

² Ein Nanometer ist definitionsgemäss ein Milliardstel Meter. Zum Vergleich: Der Durchmesser eines typischen Atoms ist nur etwa 10 mal kleiner.

³ Weitere Informationen zur Nanotechnologie finden sich in Kapitel 2.

⁴ Die Liste der möglichen Anwendungen ist beliebig lang (und beliebig spekulativ): Sie reicht von intelligenten Sensoren, über massiv dichter packbare Speicherchips bis zu Nanorobotern, die auf Nanoebene völlig selbständig makroskopische Objekte zusammenbauen.

Kasten 1: Forschungsprogramme in der Schweiz zur Förderung der Nanotechnologie**Nationaler Forschungsschwerpunkt (NFS) "Nanowissenschaften"**

Fokus: Hier wird vor allem Grundlagenforschung betrieben.

Beginn: Juni 2001

Dauer: 4 Jahre

Budget: 64 Mio. CHF

(19.2 Mio. vom Schweizer Nationalfond, 22 Mio. von der Uni Basel, 18.4 Mio. Eigenmittel und 4.4 Mio. Drittmittel)

Website: www.snf.ch/de/rep/nat/nat_ccr_guentherodt.asp

Nationales Forschungsprogramm "Supramolekulare funktionale Materialien" (NFP 47)

Fokus: Das NFP 47 deckt den chemischen Teil der Nanotechnologie ab. Der Schwerpunkt liegt hier bei der anwendungsorientierten Grundlagenforschung.

Beginn: 1998

Dauer: 5 Jahre

Budget: 15 Mio. CHF

Website: www.swiss-science.org/nfp47/index.htm

Top Nano 21

Ein "Joint-Venture" zwischen dem ETH-Rat und der Kommission für Technologie und Innovation (KTI).

Beginn: 2000

Dauer: 4 Jahre

Budget: Bundesmittel von 62 Mio. CHF (14 Mio. für 2000, je 17 Mio. für 2001 und 2002, und 14 Mio. für 2003)

Website: www.temas.ch/nano/nano_homepage.nsf

Die Nanotechnologie steht am Anfang. Zwar gibt es bereits eine ganze Reihe von realen Produkten und Produktionsverfahren¹, die mit diesem Begriff in Zusammenhang gebracht werden (nicht immer ganz zu recht), aber noch ist deutlich mehr Spekulation als gesichertes Erkenntnis im Spiel, selbst wenn es "nur" um die nächsten 10 oder 20 Jahre der nanotechnologischen Möglichkeiten geht, von den möglichen Auswirkungen ganz abgesehen.

¹ Man vergleiche etwa die entsprechenden Ausführungen in Beckmann (2002), Fishbine (2002) oder Georgescu (2002).

Dennoch ist absehbar, dass die Nanotechnologie vor allem auch in der Medizin eine grosse und nicht allzu ferne Zukunft haben wird, etwa in der Filter- und Membrantechnik, in der Sensorik oder in der Schaffung von bioverträglicheren Oberflächen. Längerfristig dürften völlig neuartige Diagnose- und Therapiekonzepte entstehen, die denjenigen der "klassischen" Medizin in vielen Fällen weit überlegen sein werden.

Damit stellt sich automatisch die Frage nach den möglichen Auswirkungen einer solchen Entwicklung, die die Grenzen zwischen lebender und toter Materie zusehends in Frage stellen könnte, nach der ethisch-moralischen Dimension, aber auch nach den Möglichkeiten, diese Entwicklung vielleicht so zu "steuern", dass allfällige negative Auswirkungen bestmöglich abgefangen werden könnten.

Das ist das Thema der vorliegenden Studie. Im Sinne einer Technologiefolgen-Abschätzung sollen die möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie in der Medizin untersucht werden. Selbstverständlich kann diese Untersuchung das Thema innerhalb des gegebenen Rahmens nicht erschöpfend ausleuchten. Sie bezweckt vielmehr eine erste Orientierung und will darauf aufbauend zur Systematisierung des weiteren Diskurses beitragen. Denn viele weitere Untersuchungen werden im Laufe der Jahre folgen müssen, nicht zuletzt deshalb, weil die Entwicklung sehr schnell oder sprunghaft verlaufen könnte.

Die vorliegende Untersuchung ist selbstverständlich nicht die erste Technikfolgen-Abschätzung für die Nanotechnologie in Bezug auf die Medizin und schon gar nicht in Bezug auf die Nanotechnologie im allgemeinen (vgl. z.B. NSET 2001 oder Wood 2003). Speziell an der vorliegenden Studie ist der methodische Ansatz (Delphi-Verfahren, vgl. Abschnitt 1.2) sowie der Versuch, eine Gesamtschau anzustreben.

Unabhängig davon, wie man die zu erwartenden Auswirkungen bewertet, sie werden *on the long run* riesig sein. Es gibt übertriebene Hoffnungen aber auch grosse Ängste seitens der Gesellschaft. Ähnliche Auseinandersetzungen wie um gentechnologisch veränderte Nutzpflanzen oder um die Atomenergie könnten auch um die Folgen der Nanotechnologie entstehen, wenn diese allmählich einem grösseren Publikum klar werden. In diesem Sinne können Technologiefolgen-Abschätzungen helfen, den Diskurs rechtzeitig zu beginnen und den Weg in die Nanowelt sozialverträglich(er) zu gestalten. Allerdings stellt die Nanotechnologie eine besondere Herausforderung für eine Technologiefolgen-Abschätzung dar, indem inhaltlich und zeitlich noch sehr vieles offen ist. Gleichzeitig bietet sich so aber auch die besondere Chance, eine Entwicklung effektiv beeinflussen zu können.

Im wesentlichen geht es hier darum, die drei folgenden Fragen zu beantworten, bzw. erste Hinweise auf mögliche Antworten zu geben.

- (a) Welches sind in einem kurz- und mittelfristigen Zeitraum die nanotechnologischen Anwendungen in der Medizin?
- (b) In welchem Umfang werden diese Möglichkeiten im gleichen Zeitraum auch effektiv in der medizinischen Praxis angewendet?
- (c) Wie würde die Entwicklung ohne die Möglichkeiten verlaufen, die die Nanotechnologie bietet?¹

Gemäss Ausschreibung sind die möglichen Auswirkungen nach den Bereichen "Medizin" (als Wissenschaft), "Gesundheitssystem", "Akteure des Gesundheitssystems", "Individuum" und "Gesellschaft" zu unterscheiden. Und hierbei sollen zusätzlich verschiedene Dimensionen ins Auge gefasst werden, wie (soweit passend): humanwissenschaftliche, anthropologische, kulturelle und auch rechtliche. Die möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie in der Medizin werden in Kapitel 4 dargestellt, jene auf den Einzelnen in Kapitel 5, die gesellschaftlichen Auswirkungen schliesslich in Kapitel 6. Wir haben dabei versucht, inhaltliche Überschneidungen möglichst zu verhindern.

1.2 Vorgehen

Die Untersuchung musste untersuchungstechnisch mit drei Hauptproblemen fertig werden:

- "Nanotechnologie" betrifft die Spitzenforschung in sehr vielen, völlig verschiedenen Bereichen, die sich bislang in grossen Teilen weitgehend unabhängig entwickelt haben. Im wesentlichen sind dies: Quantenphysik, Materialwissenschaften, Elektronik, Informatik, Chemie, Mikrobiologie, Molekularbiologie, Zellbiologie und natürlich die Medizin selbst. Die Fachsprachen dieser Disziplinen unterscheiden sich erheblich, genauso wie die jeweiligen Arbeits- und Denkweisen. Damit ist schon die Kommunikation zwischen diesen Bereichen nicht einfach zu bewerkstelligen; erst recht schwierig wird die Kommunikation mit einem breiteren Publikum, das sich ja in der Regel in keiner dieser Fachwelten inhaltlich oder sprachlich zuhause fühlt.

¹ Natürlich darf man hier die Formulierung "ohne die Möglichkeiten" nicht allzu eng verstehen. Es geht eher darum, der Nanotechnologie bzw. ihrer Anwendung einigermaßen verlässlich, bestimmte (mögliche) Auswirkungen zuzuordnen, ohne ein eigentliches Vergleichsszenarium konstruieren zu wollen (oder zu müssen). Ein solches formulieren zu wollen wäre angesichts der ohnehin bestehenden Unsicherheiten auch gar nicht sinnvoll.

- Damit zusammenhängend: Bei der Nanotechnologie handelt es sich eher um eine Art "Konvergenzprogramm" von zahlreichen Einzelwissenschaften als um eine einzelne, relativ wohl definierte Technologie, die gegenüber anderen (alternativen) Technologien gut abgegrenzt und im Sinne einer Technologiefolgen-Abschätzung untersucht werden könnte – wie etwa die Atomenergie gegenüber anderen Energieformen.¹
- Und selbst wenn dieses Abgrenzungsproblem nicht bestehen würde: Nanotechnologie meint primär eine *künftige*, heute erst in Ansätzen inhaltlich absehbare Technologie.

Deshalb musste zunächst einmal die Frage geklärt werden, um was es in technischer Hinsicht in den nächsten 20 Jahren überhaupt gehen könnte. Dies war die Aufgabe der Technologie-Prognose (technology forecast). Dazu gehörte auch die Beantwortung der Frage, welche dieser Technologien in welchem Ausmass überhaupt in der Medizin Anwendungen finden könnten. Erst darauf basierend konnte dann die Auswirkungsanalyse, die eigentliche Technologiefolgen-Abschätzung (technology assessment) an die Hand genommen werden.

Wir haben mit der so genannten "Delphi-Methode" einen Untersuchungsansatz gewählt, der von Anfang an Synthese-Charakter aufweisen sollte. Eine Aufarbeitung quasi von den Primärinformationen her (inhaltliche Auswertung von Fachpublikationen usw.) wäre nach unserer Einschätzung mit grösster Wahrscheinlichkeit zum Scheitern verurteilt gewesen: Zu vielschichtig sind die Themen und auch viel zu sehr in einzelnen Fachdisziplinen verankert.

Die Grundidee eines Delphis besteht darin, dass man einschlägige ExpertInnen zu dem interessierenden Thema befragt, die Antworten inkl. Begründungszusammenhänge auswertet und den gleichen ExpertInnen zur Stellungnahme wieder vorlegt². So erhalten die Experten die Gelegenheit, ihre erste Einschätzung angesichts der Gesamtmeinung zu überdenken und gegebenenfalls zu revidieren. Zumeist resultiert aus einem solchen Verfahren, welches in der Regel dreistufig durchgeführt wird, eine gut abgestützte Konsensmeinung zu den befragten Themen. Oder es zeichnen sich klar definierte "Meinungsblöcke" ab, wenn das Thema umstritten und/oder komplex ist. Die Delphi-Methode wird in den verschiedensten Zusammenhängen angewendet; ein besonders instruktives Beispiel stellt das Delphi des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innova-

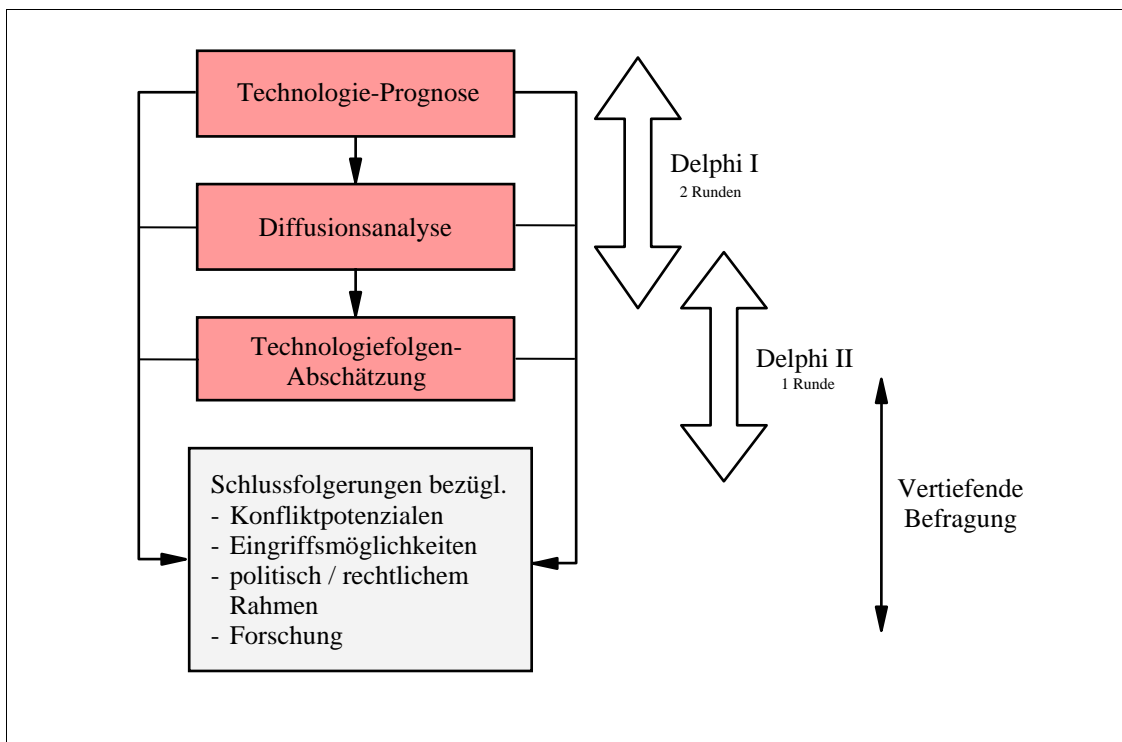
¹ Natürlich meint hier der Begriff "Konvergenzprogramm" nicht ein von irgend jemandem zu einem bestimmten Ziel festgelegtes und in Gang gesetztes Forschungsprogramm, sondern ein den Naturwissenschaften innewohnender erkenntnistheoretischer Grundzug.

² Die Antworten der einzelnen ExpertInnen werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Wer was gesagt hat, ist nur der befragenden Institution bekannt und wird nicht an Dritte weitergegeben.

tionsforschung zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik dar (ISI 1998).

In der vorliegenden Untersuchung wurden drei hintereinander geschaltete Befragungsrunden durchgeführt, aber mit zum Teil wechselnden ExpertInnen (vgl. Abbildung 1-1). Das erste Delphi mit Schwerpunkt "Technologie-Prognose" beinhaltete *zwei* vollständige Runden mit gesamthaft 36 ExpertInnen, das zweite Delphi mit Schwerpunkt "Technologiefolgen-Abschätzung" *eine* vollständige Runde und als unvollständige zweite Runde einige Vertiefungsinterviews zu speziellen Fragen mit gesamthaft ebenfalls 36 ExpertInnen.

Abb. 1-1: Inhaltliche Grundstruktur und Befragungen



Während das Delphi zur Technologie-Prognose voll elektronisch durchgeführt wurde (die ExpertInnen erhielten nach einem telefonischen Vorkontakt einen elektronischen Fragebogen¹, füllten diesen aus und schickten ihn an uns zurück), erhielten die ExpertInnen der zwei andern Befragungen nach einem telefoni-

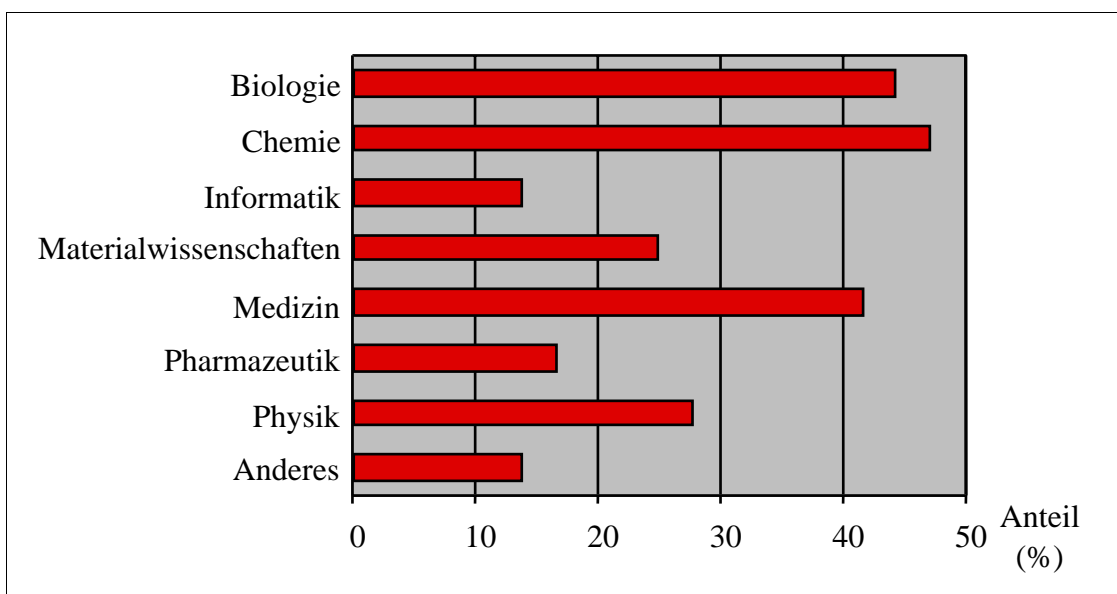
¹ Die Befragungen für die Technologie-Prognose wurde mit allen ExpertInnen auf englisch durchgeführt, jene für die Technologiefolgen-Abschätzung primär auf deutsch, einige auf englisch.

schen Vorkontakt den Fragebogen zugesandt und wurden zu einem abgemachten Zeitpunkt entlang diesen Fragebögen interviewt.¹

Die Qualität dieses Untersuchungsansatzes steht und fällt mit der Auswahl der geeigneten ExpertInnen (vgl. die Liste der einbezogenen ExpertInnen in Kapitel 10). Da im vorliegenden Fall die üblichen Repräsentativitätskriterien versagen, kann die Qualität der Ergebnisse eigentlich nur an den Ergebnissen selbst gemessen werden. Unseres Erachtens sind diese tatsächlich plausibel, die vorgebrachten Argumente überzeugen, passen mit Aussagen zusammen, die man in der Literatur findet, kurz: als Ganzes ergibt sich durchaus ein konsistentes Bild.

Vor allem für die Technologie-Prognose war es wichtig, in der Nanotechnologie grossmehrheitlich *aktive* Forscher und Forscherinnen zur Teilnahme zu gewinnen. Tatsächlich ist uns dies gut gelungen. Auch der fachliche Hintergrund streut angesichts des interdisziplinären Charakters der Nanotechnologie im gewünschten Umfang (vgl. Abbildung 1-2).

Abb. 1-2: Fachlicher Hintergrund der ExpertInnen des Delphis zur *Technologie-Prognose* (Mehrfachzuordnungen, N = 36)



Nicht zuletzt war es für den Erfolg der Untersuchung entscheidend, die internationale Entwicklung in der Nanotechnologie einzufangen und sich nicht zu sehr auf den europäischen oder gar schweizerischen Kontext zu beschränken. Auch

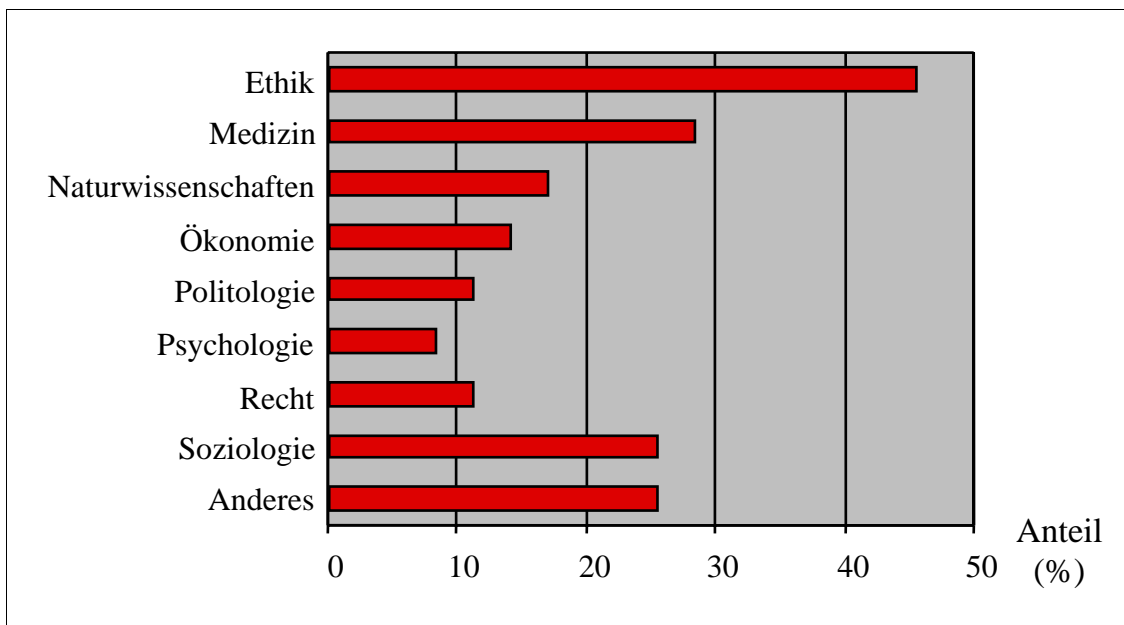
¹ Vgl. Anhang, in dem der *Fragenteil* der drei Delphi-Fragebögen (z.T. etwas verkürzt und layoutmässig angepasst) wiedergegeben wird

dies scheint uns recht gut gelungen (vgl. Abbildung 1-4 auf der nächsten Seite). Mehr als die Hälfte der ExpertInnen, die wir zur Technologie-Prognose befragten, stammen aus den USA und zum grösseren Teil aus sehr bekannten, in der Nanotechnologie führenden Institutionen.

Demgegenüber erforderte die Befragung zur Technologiefolgen-Abschätzung einen ganz anderen fachlichen Hintergrund. Disziplinen wie Ethik, Recht oder Ökonomie sollten hier massgeblich vertreten sein. Gleichzeitig sollten die ExpertInnen über ein gewisses Grundwissen über Nanotechnologie und Medizin verfügen.

Dass dies eine nicht gerade häufige Kombination darstellt, leuchtet unmittelbar ein; da aber Themen wie Gentechnologie, pränatale Diagnostik, Eugenik usw. schon länger Gegenstand des ethischen und rechtlichen Diskurses sind, gelang es uns dennoch, genügend auskunftsbereite ExpertInnen zu finden. Den fachlichen Hintergrund dieser ExpertInnen zeigt Abbildung 1-3. Von der Herkunft her konzentrierten wir uns auf den deutschsprachigen Raum (vgl. Abbildung 1-4).

Abb. 1-3: Fachlicher Hintergrund der ExpertInnen des Delphis zur *Technologiefolgen-Abschätzung* (inkl. Vertiefungsinterviews, Mehrfachzuordnungen, N = 36)

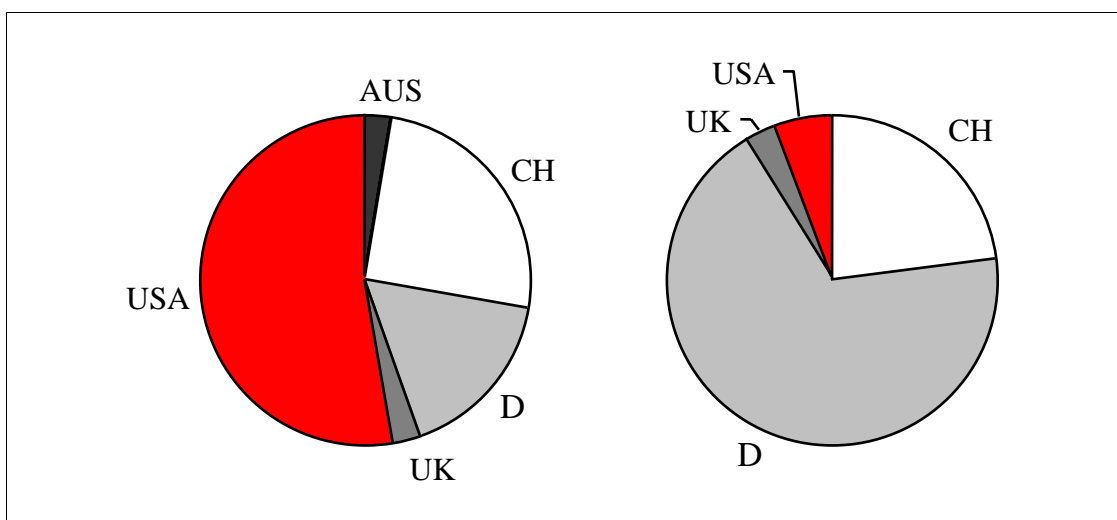


Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf die wichtigsten Aspekte und versucht den grossen Bogen herauszuarbeiten. Denn es geht hier nicht um die (ohnehin unsicheren) Details, sondern um die *Grundzüge einer künftigen Entwick-*

lung – so wie sie heute einigermaßen absehbar sind. Und diese erkennt man nicht in der akribischen Aufarbeitung und/oder Auflistung von Details.

Diese Art der Berichterstattung hat aber ihren Preis. Es kann nicht alles erklärt werden. Wir haben uns zwar bemüht so allgemeinverständlich wie möglich zu schreiben; es wird für viele Leser aber immer wieder Stellen im Bericht geben, die "schwierig" oder nur schwer verständlich sind. Diese soll man einfach überlesen. Denn die für uns wesentliche Botschaft liegt in der Gesamtaussage und nicht im wissenschaftlich-technischen Detail, das ja schon zum Zeitpunkt der Niederschrift dieser Zeilen so nicht mehr gelten muss, indem es eine entscheidende Relativierung oder Bestätigung erfahren haben könnte.

Abb. 1-4: Herkunft der befragten ExpertInnen (links für die *Technologie-Prognose*, rechts für die *Technologiefolgen-Abschätzung*)



Um die Nanotechnologie dem Laien etwas näher zu bringen, haben wir über den ganzen Bericht verteilt verschiedene ergänzende Kästen zu nanotechnologischen Einzelthemen eingefügt, die alle für sich allein gelesen werden können und anhand von Beispielen illustrieren sollen, was Nanotechnologie bedeutet.

2 Was ist überhaupt Nanotechnologie?

Zunächst wird der Begriff "Nanotechnologie" im Sinne einer Arbeitsdefinition gefasst. Dann werden verschiedene Entwicklungshindernisse diskutiert. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Exkurs über Nanoroboter, worin gezeigt wird,

dass diese für den Untersuchungszeitraum der vorliegenden Untersuchung keine Rolle spielen.

2.1 Arbeitsdefinition

Die Nanotechnologie befindet sich heute als Technologie in einem ausgesprochenen Frühstadium, auch wenn man deren "praktischen" Anfänge mit einer gewissen Berechtigung bis zurück ins Jahr 1981 verlegen könnte, in dem Gerd Binnig und Heinrich Rohrer das Rastertunnelmikroskop bauten, mit dem man einzelne Atome abbilden kann (vgl. auch den Kasten 2).¹

Damit gibt es für die Nanotechnologie noch keinen identifizierbaren "Trend", der es für reifere Technologien erlaubt, diese relativ zuverlässig in die Zukunft fortzuschreiben.² Was Nanotechnologie *in der Zukunft* meinen könnte, etwa gegen Ende des anvisierten Untersuchungszeitraumes von rund 20 Jahren, ist also ziemlich offen.

Davon abgesehen ist es schon schwierig zu sagen, was Nanotechnologie *heute* bedeutet. Es ist nicht nur eine Frage der relevanten Längendimension (z.B. 10 oder 100 Nanometer), sondern auch eine Frage der "Technik", der konstruktiven Beherrschbarkeit dieser Dimensionen. Im Sinne von Bill Joy könnte man sagen, dass Replikations- und Entwicklungsprozesse, die bislang nur der belebten Natur vorbehalten waren, durch die Nanotechnologie in den Einflussbereich des Menschen gelangen (vgl. seinen Artikel in Schirrmacher 2001).

Die *Kleinheit* an sich kann also nicht das alleinige konstituierende Merkmal sein, sondern die ganz *spezifische Art* des Umgangs damit. Neu ist, dass man im Prinzip ganz spezifisch mit *einzelnen* Molekülen oder gar Atomen "hantieren" kann, nicht nur mit einer *grossen Anzahl gleichzeitig*. In diesem letzteren Sinn stand die Nanowelt den Physikern oder Chemikern von der Grössendimension der Untersuchungsgegenstände schon lange Zeit zur Verfügung. Und niemand wäre auf die Idee gekommen, eine im Labor durchgeführte chemische Reaktion als nanotechnologischen Vorgang aufzufassen.

¹ "Theoretisch" ist die Nanotechnologie aber älter. Als Geburtsstunde hierfür könnte man jenen berühmten Vortrag bezeichnen, den der spätere Nobelpreisträger Richard Feynman am 29. Dezember 1959 im Rahmen einer Veranstaltung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft gehalten hat: "There's Plenty of Room at the Bottom". Den Text findet man beispielsweise unter <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

² Standardbeispiel ist das "Moore'sche Gesetz" in der Chipherstellung, welches eine Verdopplung der Integrationsdichte alle 18 Monate behauptet. Seit 1975 (!) wird diese Prognose mit grosser Genauigkeit von der realen Entwicklung nachvollzogen.

Kasten 2: Multifunktionale Werkzeuge – Rasterkraftmikroskope zeigen feinste Strukturen - und können diese sogar manipulieren

Das so genannte "Rasterkraftmikroskop" detektiert die Kräfte zwischen der zu untersuchenden Probe und einer feinen Spitze, die an einer sehr weichen Blattfeder angebracht ist. Dabei wird die Spitze Zeile für Zeile über die Probe geführt.

Im so genannten Kontakt-Modus berührt die Spitze die Oberfläche der Probe – ähnlich wie die Nadel eines Plattenspielers, welche die Rillen des Tonträgers abtastet. Dabei wird laufend die Auslenkung der Feder gemessen; die Resultate werden dann im Computer zu einem Bild der Proben-Topografie ausgewertet. Mit einem Servosystem kann man die Auslenkung auf einen konstanten Wert einstellen. Eine gezielte Erhöhung der Kraft ermöglicht dann Modifikationen der Probe. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Proteinschichten beseitigen, um andere, verborgene Schichten freizusetzen. Verändert man die Kraft an einer fixen Stelle der Probe, kann man die mechanischen Eigenschaften an dieser Stelle untersuchen.

Im dynamischen Nicht-Kontakt-Modus hingegen werden Kräfte gemessen, die bei winzigen Abständen zwischen Probe und Spitze auftreten. Das können Van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische oder magnetische Kräfte sein. Da diese sehr klein sind, eignet sich diese Methode gut für weiche oder lebende Proben (weniger Beschädigung von biologischem Material). Im Extremfall – bei ganz kurzen Abständen - erreicht man damit sogar atomare Auflösung.

Ordnet man die Blattfedern mit den mikrometerkleinen Nadeln in Reihen nebeneinander an, lassen sich Erbsubstanz-Proben nach bestimmten Gen-Sequenzen durchmustern. Dazu heftet man kurze DNA-Stränge an die Blattfedern. Treffen diese auf genetisches Material, das eine exakt komplementäre Sequenz enthält, so entsteht ein Zweistrang-Komplex, welcher die Blattfeder messbar verbiegt. Ein solches Verfahren wäre gegenüber bisherigen Verfahren einfacher, schneller und erst noch kostengünstiger.

Wir haben versucht, eine konsensfähige *Arbeitsdefinition* für die Nanotechnologie herauszuarbeiten. Arbeitsdefinition meint: Damit soll klar sein, wovon die Rede ist, es geht aber nicht um legalistische Strenge. Aus den beiden Befragungsrunden zur Technologie-Prognose hat sich folgende, durch einen breiten Konsens getragene Definition ergeben.

"Die Nanotechnologie beschäftigt sich mit dem geplanten Austausch von Informationen zwischen der Makrowelt und der Submikrowelt¹. Sie beschäftigt sich

¹ Ein Mikron ist ein Millionstel Meter und entspricht damit tausend Nanometer.

insbesondere mit (zumeist leblosen) Materialien, Strukturen und Systemen mit den folgenden Eigenschaften:

- sie messen in mindestens einer Dimension weniger als 100 Nanometer,
- sie werden durch Prozesse erzeugt, die es erlauben ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften auf der molekularen Ebene zu kontrollieren,
- einige können zu grösseren Strukturen zusammengefügt werden (via Selbstorganisation oder Nanomanipulation)."

Interessant sind hier die Bemerkungen, die von den ExpertInnen gemacht wurden, die diese Definition so nicht oder nur zum Teil mittragen mochten. Zum einen geht es um die in Klammern gesetzte Einschränkung "zumeist leblos" ("mostly non-living"). Für rund die Hälfte jener ExpertInnen, die die Arbeitsdefinition nicht mittragen wollten, war dies eine überflüssige Einschränkung (wenn auch einer meinte, wenn damit Bakterien oder Viren ausgeschlossen würden, dann sei dies schon richtig). Dabei störte weniger die Formulierung als der "Tonfall", indem ja z.B. gerade für die Bionanotechnologie eine grosse Zukunft gesehen wird. Zum andern geht es um die Grösseneinschränkung.

Hier scheint sich also tatsächlich ein klarer Dissens abzuzeichnen, indem "Nano" als Grössenmassstab ganz unterschiedlich verstanden wird. Für den klar grösseren Teil der ExpertInnen beginnt "Nano" erst dann, wenn man deutlich in den Submikronbereich vorstösst – mindestens in einer Dimension, für die andern gehören Systeme im Mikronbereich aber sehr wohl schon zur Nanotechnologie ("Mikrosystemtechnik").

Das ist *nicht* ein Streit um des Kaisers Bart. Denn ein Projekt mit "Nanoaspekten" liegt im Trend und hat darum eine grössere Aussicht auf Genehmigung bzw. Finanzierung. Insofern haben unterschiedliche Begriffsabgrenzungen der Nanotechnologie wohl auch eine strategische Funktion: Im Grössenbereich der Mikrosystemtechnik sind heute schon echte "Maschinen" als Abbilder makroskopischer Maschinen gebaut worden; im engeren Nanobereich ist man von einer solchen Leistung aber noch weit entfernt, vgl. auch Abschnitt 2.4.

2.2 Technologie des 21. Jahrhunderts

Die ExpertInnen sind sich einig, dass die Nanotechnologie *das* Technologiethema der kommenden Jahre sein wird. Dies ist insbesondere auch die Meinung jener ExpertInnen, die *nicht* aktiv in diesem Bereich tätig sind. Die Gründe hierfür sind klar: Zwar sind (etwas salopp gesprochen) die technisch-praktischen Schwierigkeiten in der Manipulation von Nanostrukturen enorm, aber noch sind die Kosten für diese Forschung auf der Ebene einzelner Forschungsgruppen rela-

tiv bescheiden und es winken tagtäglich neue Erkenntnisse, die in etablierten Feldern der Wissenschaft heute nicht mehr so einfach zu haben sind.

Kasten 3: Universelles Material der Nanowelt – Kohlenstoff-Nanoröhren haben verblüffende Eigenschaften

Fester als Stahl, wärmeleitend wie Diamant, verformbar wie Gummi – solche Eigenschaften charakterisieren ein Material, das erst seit etwa zehn Jahren bekannt ist. Die Rede ist von so genannten "Nanoröhren" - Strukturen aus reinem Kohlenstoff, die regelmässig und symmetrisch aufgebaut sind wie Kristalle. Entdeckt wurden die nur wenige Millionstel Millimeter starken Fäden vom japanischen Physiker Sumio Iijima, der eigentlich nach Fullerenen gesucht hatte: Kohlenstoffbällchen von der Form eines Fussballs.

Nanoröhren weisen auch ausserordentliche elektrische Eigenschaften auf: Zum Beispiel lassen sie sich zwischen Leiter, Halbleiter und Isolator so fein abstimmen wie kein anderes bekanntes Material. Sie erlauben 1000mal höhere Stromdichten als Kupferdrähte. Dies und ihre ohnehin winzigen Dimensionen ermöglichen eine bis vor kurzem unvorstellbar kompakte Bauweise elektronischer Schaltkreise. Wobei diese erst noch 1000mal schneller schalten als die besten Silizium-Transistoren.

Ebenfalls viel versprechend: Elektrisch geladene Nanoröhren konzentrieren ein elektrisches Feld an ihren Enden und emittieren von dort Elektronen in sehr hoher Frequenz. Damit lassen sich Lampen und Displays bauen, die nicht nur heller und langlebiger sind als herkömmliche Produkte, sondern auch mit einem Bruchteil der Energie auskommen. Prototypen solcher Systeme wurden bereits gebaut und haben ihre Funktionstüchtigkeit bewiesen. Eine industrielle Massenfertigung, wie man sie von der herkömmlichen Chipfabrikation her kennt, liegt allerdings noch in weiter Ferne.

Entsprechend zieht dieses Feld auch viele junge und talentierte Forscher an. Zudem unterstützen handfeste wirtschaftliche Interessen diesen Prozess. Einschränkend wird allerdings auch geltend gemacht, dass in der näheren Zukunft die ganz grossen Fortschritte vielleicht weniger im Medizinbereich bzw. im Materialbereich als in der Informatik erwartet werden. Oder dass Akzeptanzprobleme auftreten und den Fortschritt aufhalten könnten (ähnlich wie beispielsweise bei der Gentechnologie).

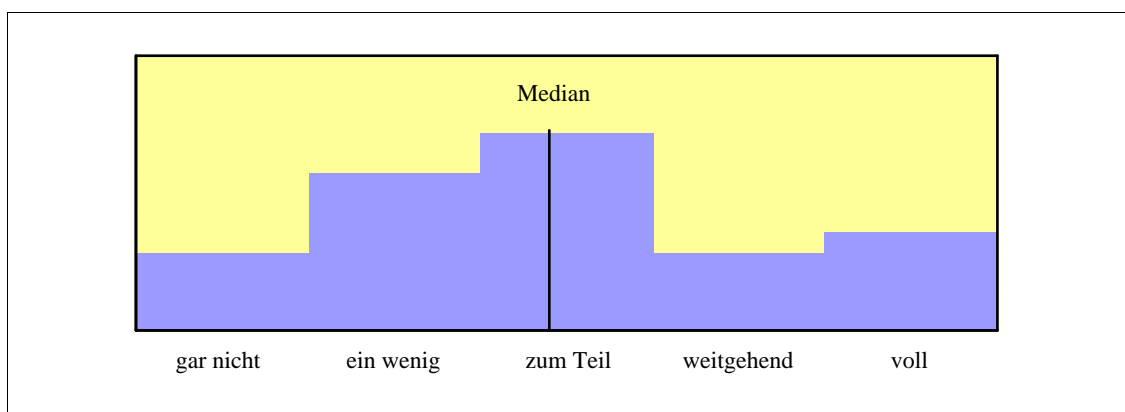
Wie sind ganz grundsätzlich das *Entwicklungspotential* und die *Entwicklungsdynamik* der Nanotechnologie zu sehen? In welchen Bereichen sind die grossen Durchbrüche zu erwarten?

In den beiden Befragungsrunden zur Technologie-Prognose haben wir den ExpertInnen entsprechende Fragen gestellt. Eine einfache Zusammenfassung der Meinungen fällt hier nicht leicht: Werden doch ganz unterschiedliche Facetten und Anwendungsmöglichkeiten beleuchtet. Ein Grundtenor zeichnet sich aber doch recht klar ab: Die Nanotechnologie wird *auf kürzere Sicht* ein eher "fragmentiertes" Gebiet bleiben. Dies bedeutet z.B., dass eine erfolgreiche Konstruktion eines bestimmten Partikels oder einer bestimmten Nanostruktur oder eine geglückte Nanomanipulation oft nur exemplarischen Charakter aufweisen und zunächst kaum Auswirkungen bzw. Anwendungen in andern Gebieten zur Folge haben. Dies ist nach unserer eigenen Einschätzung aber gleichzeitig auch Garant dafür, dass das Gebiet an Dynamik und Vielfalt gewinnen wird, und dass etwaige "Forschungssackgassen" nur sehr begrenzt den Fortschritt hemmen werden.¹

Auf längere Sicht zeichnet sich aber auch ab: Der Mensch wird in der Summe technisch deutlich mehr können als bisher – mit Auswirkungen auf fast alle Bereiche unseres Lebens. Dies deshalb, weil die Nanotechnologie Möglichkeiten eröffnet, die bis vor wenigen Jahren nicht zugänglich waren. Und: diese Entwicklung dürfte klar exponentiellen Charakter haben. Bis 2010 eher wenige, bis 2020 schon deutlich breiter gestreute Anwendungen.

Aber wie sicher sind diese Aussagen zur Zukunft der Nanotechnologie? In der zweiten Runde der Technologie-Prognose haben wir die ExpertInnen ausdrücklich danach gefragt, ob sie die Meinung teilen, dass für die Entwicklung der Nanotechnologie in den nächsten 20 Jahren eine dem Thema inhärente Unsicherheit bestehe (vgl. Abbildung 2-1).

Abb. 2-1: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N= 31) zu folgender These: "Für die Entwicklung der Nanotechnologie in den nächsten 20 Jahren besteht eine inhärente Unsicherheit."



¹ Wir verzichten hier darauf, konkrete, von den ExpertInnen genannte Items zu rekapitulieren. Bezogen auf medizinische Anwendungen ist dies nämlich Gegenstand von Kapitel 3.

Der Median¹ der Meinungen der ExpertInnen liegt knapp unterhalb von "zum Teil einverstanden". Interessanter als diese Aussage ist aber die grosse Streuung der Ansichten der Experten mit den relativ vielen Nennungen je an den Enden der Skala. Wir haben uns gefragt, ob diese Einschätzungen mit dem Hintergrund der ExpertInnen und/oder ihrer institutionellen Verortung korrelieren könnte. Tatsächlich zeigt sich aber kein offensichtlicher Zusammenhang. Dies würde darauf hindeuten, dass es unter den ExpertInnen unabhängig davon so etwas wie zwei "extreme" Flügel gibt. Der eine betrachtet die künftige Entwicklung als relativ überschaubar und damit auch in bestimmten Grenzen als voraussehbar, für den anderen ist die Entwicklung sehr viel offener und zwar aus Gründen, die dem Thema inhärent sind.

Aus unserer Sicht muss vor allem diese letzte Meinung ernst genommen werden. Denn wenn wir im Folgenden ein doch relativ stimmiges Gesamtbild darstellen werden, darf dies nicht darüber hinweg täuschen, dass viele Unwägbarkeiten im Spiel sind. Und zwar nicht nur in dem trivialen Sinne, dass alle Aussagen über die Zukunft unsicher sind, sondern auch in einem ganz spezifischen, dem Thema eigenen Sinn: Vielleicht treten z.B. kaum voraussehbare technische Schwierigkeiten auf, deren Überwindung sich als unmöglich erweisen könnte. Dies ist das Thema des folgenden Abschnitts.

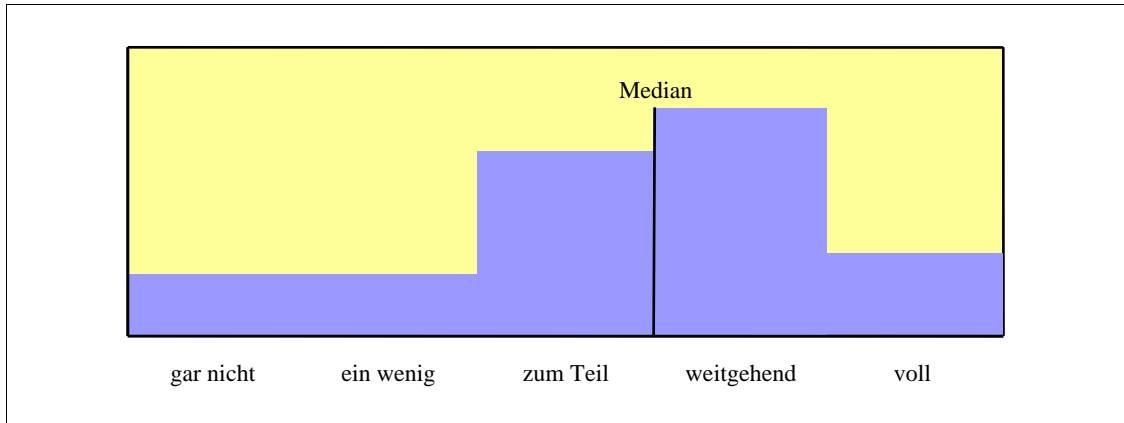
2.3 Entwicklungshindernisse

Auch wenn sich die Nanotechnologie als die Technologie des 21. Jahrhunderts darstellt, gibt es klar hindernde Einflüsse. Auf der "Problemseite" wurden in der ersten Runde der Technologie-Prognose ganz unterschiedliche Items angeführt. Wie z.B. ganz "handfeste" technische Schwierigkeiten, wie die zu kleine Langzeitstabilität von vielen Nanostrukturen, mangelnde Biokompatibilität (mit Blick auf medizinische Anwendungen), Upscaling-Probleme und anderes. Aber auch die Angst kam zum Ausdruck, dass fehlendes Geld die Forschung und damit den Fortschritt beeinträchtigen könnte, oder dass z.B. die Kommerzialisierung der Erkenntnisse und damit deren breite Verfügbarmachung deutlich schwieriger als erwartet sein könnte. Dabei wird auch ausdrücklich vor unrealistischen Erwartungen gewarnt – vor allem im medizinischen Bereich. Und last but not least wird als Problem gesehen, dass ethische oder soziale Fragen bei den Wissenschaftlern selbst zu wenig wahrgenommen bzw. antizipiert werden könnten. Wir haben deshalb einige dieser Punkte herausgegriffen und in Form von Thesen in der zweiten Runde den ExpertInnen des technischen Delphis wieder vorgelegt.

¹ Der Median bringt zum Ausdruck, dass die eine Hälfte der Expertenmeinungen darunter, die andere Hälfte darüber liegt.

Zunächst ging es um die Frage, ob unrealistische Erwartungen nicht an sich ein Problem sein könnten (vgl. Abbildung 2-2).

Abb. 2-2: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 30) zu folgender These: "Unrealistische Erwartungen sind speziell im medizinischen Bereich vorhanden."

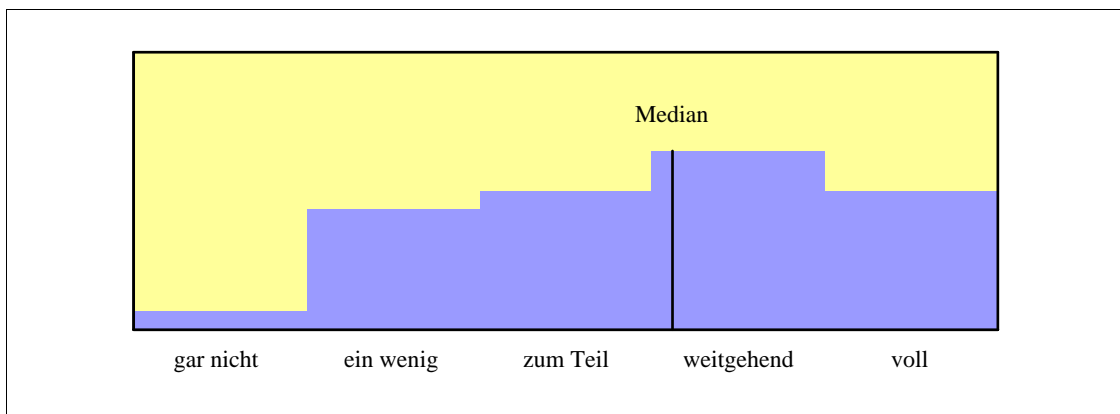


Bei dieser These ist sich das Gros der ExpertInnen recht einig, indem die These als zum Teil oder sogar weitgehend als zutreffend beurteilt wird. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass medizinische Anwendungen der Nanotechnologie in gewisser Weise auf der Hand liegen, dass aber gerade auch deshalb die Erwartungen in der Regel zu gross sein dürften. Problematisch aus der Sicht vieler Forscher dürften die überzogenen Erwartungen vor allem dann werden, wenn diese immer wieder enttäuscht würden und damit die Bereitschaft, in diese Art Forschung Geld zu investieren, abnehmen könnte.

Ein offensichtlicher Grund für überzogene Erwartungen ist die grosse Zeitspanne zwischen Forschung und effektiver Anwendung: Man unterschätzt die Schwierigkeiten, die zu bewältigen sind von der prinzipiellen Demonstration im Labor (welche in den Medien – von den Forschern unseres Erachtens durchaus "mitverschuldet" – in der Bedeutung überzeichnet wird) bis zu einer praxistauglichen Anwendung, welche von den Zulassungsbehörden auch genehmigt worden ist. Diese Einschätzung ergibt sich aus Fachgesprächen, aber auch aus der kritischen Lektüre von Publikationen, wie z.B. "The Investors Guide to Nanotechnology & Micromachines" (Fishbine 2002) und aus der Befragung der Forscher selbst (in der zweiten Runde der Technologie-Prognose, vgl. Abbildung 2-3).

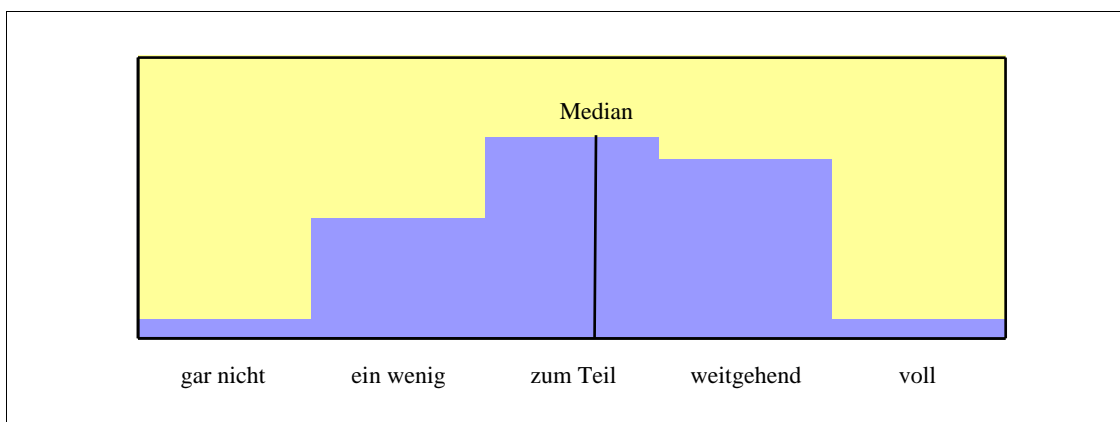
Danach sind sich die Forscher dieser Problematik des immer unterschätzten Zeitbedarfes ziemlich bewusst, was aber nicht automatisch bedeuten muss, dass sie dies bei ihren eigenen Antworten zur zeitlichen Dimension bestimmter Entwicklungen immer genügend berücksichtigen (vgl. Kapitel 3).

Abb. 2-3: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 30) zu folgender These: "Die grosse Zeitspanne zwischen Forschung und Anwendung wird stark unterschätzt."



Ein ganz grundsätzliches technisches Problem, womit die nanotechnologische Forschung konfrontiert sein dürfte, ist die Langzeitstabilität. Gemeint ist folgendes: Nanostrukturen sind z.T. so "fragil" oder unter so speziellen Bedingungen entstanden, dass sie nur schwer zum "Einsatzort" zu transferieren sind und dort unter ungünstigen Milieubedingungen auch leicht wieder zerfallen bzw. ihre Funktionalität einbüßen (können). Dies wäre vor allem für Anwendungen im Medizinbereich von grosser Bedeutung. Auch diese Einschätzung wird von den ExpertInnen eher geteilt, ein weiteres Indiz dafür, dass die "Entwicklungsgeschwindigkeit" der Nanotechnologie überschätzt wird (Abbildung 2-4).

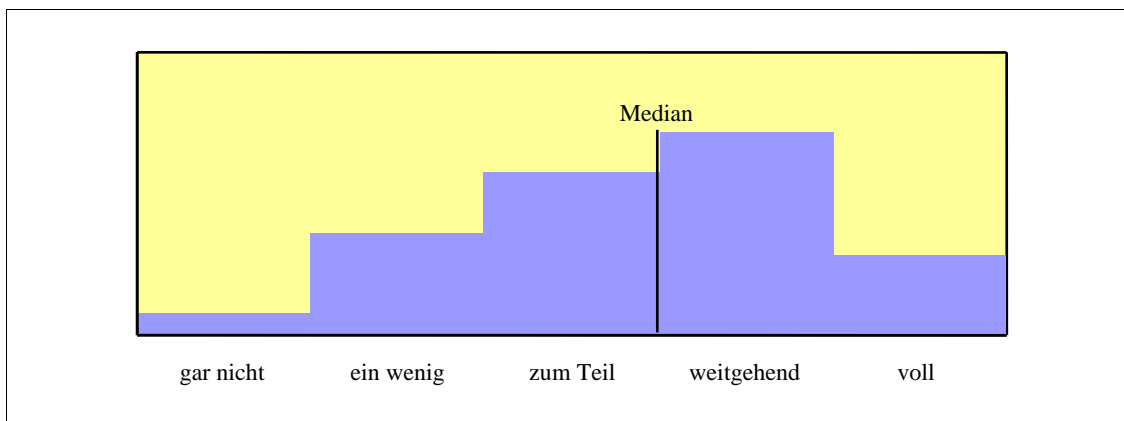
Abb. 2-4: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 27) zu folgender These: "Die Langzeitstabilität von Nanostrukturen ist ein grosses Problem."



Unklar ist auch, ob der rein quantitative Übergang von der an sich erfolgreichen Laborsituation in ein kommerzielles Setting nicht ein grosses Problem sein könn-

te. Auch hier sind die ExpertInnen offenbar realistisch: Das Gros der ExpertInnen meint, dass es wohl doch grössere Probleme geben könnte (vgl. Abbildung 2-5).

Abb. 2-5: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 28) zu folgender These: "Das Upscaling von Prozessen zu Mengen und Volumina, die kommerziell interessant sind, ist ein grosses Problem."



Eine besonders interessante technische Frage ist mit der Dimensionalität von Nanostrukturen verbunden: Gemeint ist hier, dass man mit weitgehend klassischen Techniken (z.B. mit jenen der Galvanik) sehr dünne Schichten herstellen kann, d.h. in *einer* Dimension Nanogrösse erreicht. Technisch ungleich anspruchsvoller ist es, in *zwei* Dimensionen in den Nanobereich vorzustossen, z.B. nur einige Nanometer breite, nur wenige Nanometer dicke Leiterbahnen herzustellen (etwa mit fotolithografischen Methoden). Vollends schwierig wird dann die Herstellung *dreidimensional* charakterisierter Nanostrukturen, bei denen Top-Down-Prozesse¹ an ihre Grenzen stossen.² Dies ist für die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung deshalb von Bedeutung, weil nanotechnologische Anwendungen in der Medizin vor allem im therapeutischen Zusammenhang in allen drei Dimensionen "Nanocharakter" aufweisen würden.

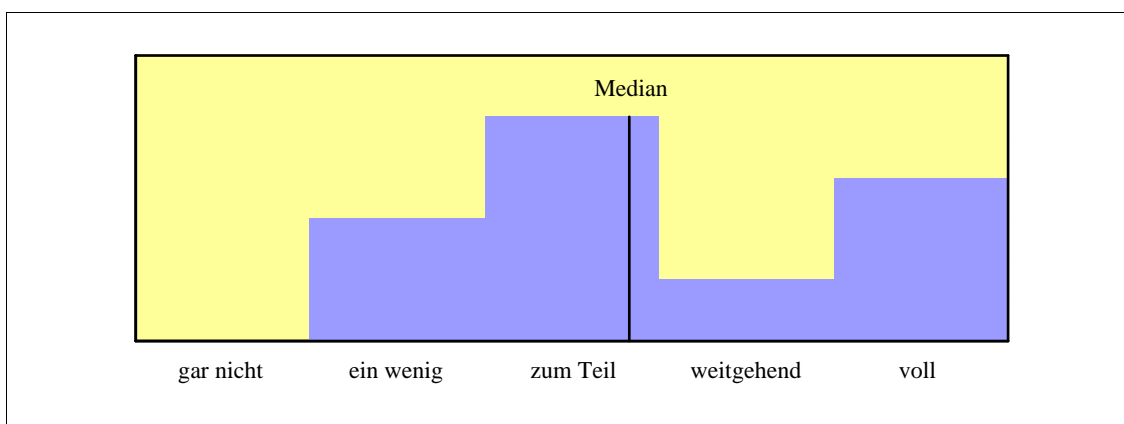
Bei der Beurteilung dieses Dimensionalitätsproblems durch die ExpertInnen zeigt sich, dass offenbar alle der Meinung sind, dass man dieses Problem unter-

¹ Top-Down ist ein Herstellungsprozess von Nanostrukturen dann, wenn er im Prinzip mit makroskopischen Geräten erfolgt (z.B. lithografische Verfahren). Bottom-up wäre demgegenüber ein Prozess, bei dem der Aufbau nanotechnologischer Strukturen in geeignetem Milieu durch Zusammenbau kleinster Einheiten vor Ort (durch einen so genannten Self-Assembly-Prozess) erfolgt.

² Natürlich gibt es Ausnahmen, etwa die bisher verfolgten Verfahren zur Herstellung von Fullerenen oder Nanoröhren.

schätzt. Bezüglich des *Grades* der Unterschätzung zeichnen sich zwei Positionen ab. Für die eine ist das Dimensionalitätsproblem ein viel schwierigeres Problem als allgemein angenommen, für die andere wird das Problem einigermaßen richtig eingeschätzt (vgl. Abbildung 2-6). In diesen beiden Positionen kommt ein Stück weit die grundsätzliche Einschätzung der Entwicklungsdynamik der Nanotechnologie durch die ExpertInnen zum Ausdruck.

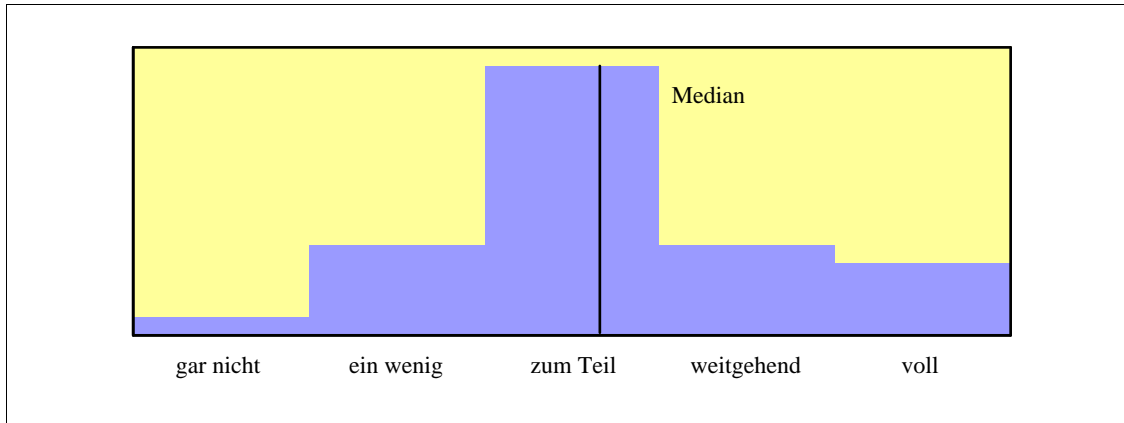
Abb. 2-6: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 28) zu folgender These: "Der Übergang von einer zu zwei oder drei Dimensionen ist sehr viel schwieriger als allgemein angenommen."



Noch hat die Nanotechnologie einen eher technisch-mechanischen "Touch", mit Anwendungen ausserhalb der Medizin. Anwendungen in der Medizin sind aber klar das Ziel. Vor allem auch von Technologie-kritischer Seite wird immer wieder die Vermutung geäußert, dass ganz grundsätzlich mangelnde "Biokompatibilität" von nanotechnologischen Materialien und Strukturen zum Problem werden könnte. Auch in der ersten Runde der Technologie-Prognose haben verschiedene ExpertInnen auf dieses Problem hingewiesen.

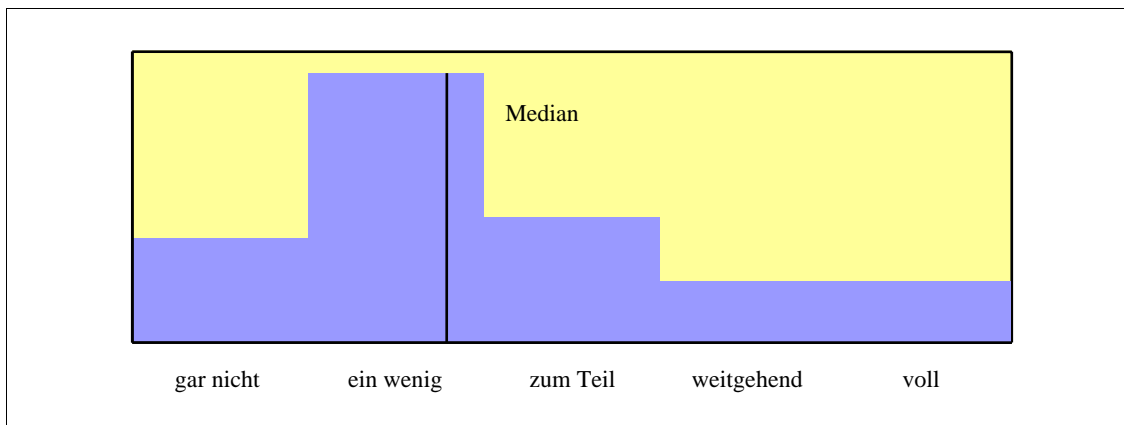
Wir haben deshalb in der zweiten Runde der Technologie-Prognose den ExpertInnen eine entsprechende These vorgelegt. Hier sind sich die ExpertInnen in ihrer Einschätzung sehr einig (vgl. Abbildung 2-7). Das Problem als Ganzes wird zwar ernst genommen, es wird aber in der starken Formulierung der These als etwas übertrieben dargestellt. Diese eher moderate Einschätzung des Problems muss man wohl auch dahingehend interpretieren (einige ergänzende Bemerkungen der ExpertInnen lassen zumindest diesen Schluss zu), dass das Problem nicht als ein grundsätzliches, sondern als ein fallspezifisches und damit lösbares Problem angesehen wird.

Abb. 2-7: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 30) zu folgender These: "Probleme um die Biokompatibilität von nanotechnologischen Materialien und Strukturen werden stark unterschätzt."



Ein für eine Technologiefolgen-Abschätzung besonders wichtiger Punkt betrifft die Wahrnehmung von ethischen und sozialen Aspekten durch die Wissenschaftler selbst. Etwas plakativ formuliert: Ist ihnen – angesichts der grossen Möglichkeiten – bewusst, was sie tun (vgl. Abbildung 2-8)?

Abb. 2-8: Grad der Zustimmung der ExpertInnen (N = 30) zu folgender These: "Ethische und soziale Fragen werden von den Wissenschaftlern zu wenig wahrgenommen bzw. antizipiert."



Wichtig ist hier, dass wir in der Nanotechnologie *aktive* Wissenschaftler befragten. Gesamthaft gesehen wird diese These denn auch klar am wenigsten als gültig erachtet. Die Hälfte der ExpertInnen ist überhaupt nicht oder nur ein wenig damit einverstanden, die andere Hälfte teilt sich in die übrigen Abstufungen des Zustimmungsgrades.

Die Interpretation dieses Ergebnisses ist unklar. Sind die mit der Nanotechnologie befassten Wissenschaftler gegenüber ethischen und sozialen Fragen im Durchschnitt tatsächlich sensibilisiert oder antworten die befragten ExpertInnen diesbezüglich einfach beschönigend? Eine abschliessende Antwort auf diese Frage wird vorläufig kaum möglich sein, höchstens so etwas wie eine vorläufige Einschätzung. Tatsächlich scheint es dem Aussenstehenden so, als ob sich mindestens ein Teil der wissenschaftlichen Gemeinschaft dieser Aspekte durchaus bewusst ist. Jedenfalls deutet das eine Reihe von spontanen Bemerkungen an, indem z.B. entsprechende Leitplanken oder mindestens vorausschauende Reflexion gefordert wurden. Aber zu behaupten, das Gros der Wissenschaftler würde sich schon *heute* eingehend mit den ethischen und sozialen Implikationen für den Fall befassen, dass nanotechnologische Anwendungen in grösserem Ausmass in der Medizin Einzug halten würden, wäre nach unserer Ansicht übertrieben. Dies würde ja auch der Interessenlage vieler aktiver Wissenschaftler widersprechen, indem diese "vorwärtsmachen" und sich nicht durch ethische oder soziale Überlegungen "behindern" lassen wollen. Dass umgekehrt gerade die mit den Erkenntnisfortschritten parallel sich intensivierende Untersuchung von ethischen und sozialen Implikationen zur Akzeptanzsicherung der Forschung beitragen könnte, wird unseres Erachtens gesamthaft wohl noch zu wenig gesehen.¹

Nimmt man die oben angesprochenen Entwicklungshindernisse für die Nanotechnologie zusammen, so könnten diese – wenn man entsprechenden Äusserungen der ExpertInnen glaubt – zwar technisch überwindbar sein, aber sie werden die Entwicklung wohl erheblich verzögern. Mit andern Worten: In den in Kapitel 3 dargestellten möglichen Anwendungen der Nanotechnologie in der Medizin sollten diese eher prinzipiellen Hindernisse immer mitgedacht werden, und zwar in dem Sinne, dass eine starke Tendenz besteht, den Einfluss solcher Hindernisse vor allem in zeitlicher Hinsicht massiv zu unterschätzen. Viele Beispiele aus der Technikgeschichte belegen dieses Phänomen.

2.4 Exkurs: Assembler und Nanoroboter

Spätestens seit 1986, als der Amerikaner K. Eric Drexler sein Buch "Engines of Creation" publizierte (Drexler 1986), hat sich die Idee von Nanomaschinen verbreitet, die sich selbst replizieren und gemäss den ihnen übertragenen Aufgaben praktisch alles herstellen (oder vernichten) könnten. Neben diesen so genannten "Assemblern" tauchen in den Medien auch immer wieder Nanoroboter auf, die sich zielstrebig durch Blutbahnen bewegen, um Zellen zu reparieren oder zu vernichten und so in der Lage wären, Krankheiten wie Krebs zu heilen. Und nicht

¹ Dies Einschätzung wird z.B. auch von A. Mnysiwalla et al. bezüglich der Nanotechnologie ganz allgemein geteilt (Mnysiwalla (2003)).

überraschend ist dies heute *das* Bild, das beim breiten Publikum gemeinhin für die Nanotechnologie steht (vgl. z.B. einen Artikel über Nanotechnologie in der Wissenschaftsbeilage der NZZ vom 30. Januar 2002, der mit der Darstellung eines Nanoroboters illustriert wurde).

Doch so spannend das auch tönen mag: Das meiste davon gehört noch sehr lange ins Reich der Science Fiction.¹ Die Assembler zum Beispiel, die durch Manipulation einzelner Atome Dinge zusammensetzen sollen, werden wohl an zwei fundamentalen Schwierigkeiten scheitern: dem "Problem der dicken Finger" und dem "Problem der klebrigen Finger". Da der Manipulator nämlich selbst aus Atomen besteht, sind seine "Finger" für die geplanten Aufgaben schlicht zu dick und überdies auch zu klebrig: Dessen Atome bleiben an den Atomen, die bewegt werden sollen, einfach haften. Überdies ist zu bedenken, dass beim "mechanischen" Zusammenbauen von Atomen und Molekülen zu grösseren Strukturen räumliche Behinderungen auftreten können, die auch Nanostrukturen nicht überwinden können – weil diese zu gross sind. Dies scheint zwar ein überzeugender Einwand, ist es aber nur so lange, als man nicht in der Lage ist, die Replikationsprinzipien der belebten Natur zu kopieren. Denn jede Zelle ist ja ein reales Beispiel für (natürliche) Assembler-Prozesse.

Aber auch die Nanoroboter sind noch eine reichlich utopische Angelegenheit. Denn wie man solche Roboter überhaupt bauen könnte, ist zur Zeit noch völlig unklar; sicher ist nur, dass sie für Nano-Verhältnisse zunächst alles andere als klein wären und ausserdem für ihren Betrieb viel Energie bräuchten, die sie den vorhandenen Nährstoffen entnehmen müssten. Ein weiteres Problem wäre die Navigation: Die "echten" Nanoroboter müssten nicht nur gegen einen starken Blutstrom ankämpfen bzw. damit fertig werden, sie stünden zusätzlich unter einem Dauerbeschuss durch Wassermoleküle (Brown'sche Bewegung); statt der gewünschten zielgerichteten Fortbewegung würde wohl eher ein zufälliges Ankommen resultieren. Darüber hinaus wäre das Passieren feinsten Kapillargefässe ein Problem; die Nanoroboter könnten stecken bleiben und damit Thrombosen verursachen.

Andererseits gibt es bereits heute erste Anstrengungen zur Konstruktion von Motoren im Nanobereich. Wir haben deshalb die ExpertInnen in der zweiten Runde des technischen Delphis ausdrücklich gefragt: "Bis wann werden Nanoroboter das erste mal in der Medizin genutzt werden?"

Aus den Antworten jener ExpertInnen die es tatsächlich wagten, eine Jahreszahl zu nennen (22), ergibt sich als Mittelwert ziemlich genau das Jahr 2030. Allerdings streuen die Meinungen tatsächlich sehr. Der optimistischste Experte meint

¹ Vgl. z.B. den leicht lesbaren Artikel von R. Smalley (2001).

sogar, dass dies bis 2010 der Fall sein könnte, der pessimistischste sieht dies erst in hundert Jahren (einige Experten meinen gar, dass es Nanoroboter wohl gar nie geben würde). Diese grosse Streuung hat wohl nicht nur mit einer unterschiedlichen Einschätzung darüber zu tun, wie schwierig es ist, einen Nanoroboter herzustellen, sondern auch, was darunter effektiv verstanden wird.

Für die weiteren Ausführungen ziehen wir daher den Schluss, dass eigentliche Nanoroboter bis weit ins 21. Jahrhundert hinein für die Medizin kein Thema sind. Das heisst aber nicht, dass nicht Teilaspekte realisiert sein könnten, wie Pumpen im Mikro- und Nanobereich, nanobasierte künstliche Muskeln usw. (vgl. das folgende Kapitel 3).

3 Anwendungen in der Medizin

In diesem Kapitel wird die absehbare Entwicklung der Nanotechnologie für einen Zeitraum von rund 20 Jahren möglichst konkret auf die Medizin umgelegt.

Im vorigen Abschnitt ist darauf hingewiesen worden, dass Nanotechnologie nicht einfach eine wohl definierte "Technologie" meint, sondern eher so etwas wie ein Konvergenz-Programm, welches die unterschiedlichsten Techniken und Vorgehensweisen einbezieht. Natürlich gibt es bereits eine ganze Reihe von Anwendungen von nanotechnologischen Verfahren oder Produkten, die schon (oder bald) kommerziell genutzt werden. Daraus lässt sich leider kein konsistentes (mögliches) Bild für die Zukunft ableiten, denn zu punktuell sind diese Beispiele. Genau so punktuell und verschiedenartig sind denn auch die heutigen Forschungsanstrengungen und die möglichen Anwendungen.

Eine gewisse prognostische "Ordnung" wird dadurch erreicht, dass wir zunächst eine Art nanotechnologischen Werkzeugkasten zusammengestellt und speziell viel versprechende Anwendungen identifiziert haben, um darauf basierend mit Experten-Unterstützung eine Umlegung auf sieben Krankheitsfelder vorzunehmen. Den Schluss des Kapitels bilden einige Ausführungen zu den möglichen Risiken der Nanotechnologie.

3.1 Nanotechnologischer Werkzeugkasten

Die Idee besteht darin, idealtypisch einen nanotechnologischen Werkzeugkasten für die Medizin zusammenzustellen, um so den *Grundzug* der Gesamtentwicklung abschätzen zu können. Die Idee ist also nicht, hier punktuell "richtig" zu liegen, sondern lediglich einen verlässlichen Gesamteindruck dafür zu bekom-

men, was gesamthaft und mit welcher Dynamik etwa möglich werden könnte. Mehr ist nach unserer Meinung in einem synthetisierenden Sinn zur Zeit gar nicht möglich.

"Werkzeug" darf hier nicht allzu wörtlich verstanden werden. Wir haben schon gesagt, dass Nanotechnologie eine Vielzahl von Produkten, Methoden und Verfahrensweisen bedeutet. Der "Werkzeugcharakter" der Nanotechnologie kommt in unserem Verständnis nun dadurch zum Ausdruck, dass sie für bestimmte Zwecke "angewendet" wird, so in der Medizin etwa für diagnostische oder therapeutische Zwecke.

Für das Folgende unterscheiden wir fünf Typen von Werkzeugen, die die Gesamtheit der Möglichkeiten abdecken sollten¹:

- Partikel (eher einfach strukturierte "Teilchen", die über das Konzept eines Moleküles hinausgehen, aber von den Lineardimensionen her zur "Nanowelt" gehören)
- Strukturen (eher komplex strukturierte Teilchen oder Systeme von verbundenen Teilchen)
- Oberflächen (ausgedehnte flächige Strukturen)
- Devices (hochkomplexe Strukturen mit mechanisch, chemisch oder elektrisch aktiven funktionellen Einheiten)
- Methoden (übliche Untersuchungs- und Verarbeitungsmethoden in der Nanotechnologie).

Natürlich sind die Übergänge zwischen den verschiedenen Typen fließend und die Zuordnung ist nicht immer eindeutig. Dennoch hat sie sich nach unserer Einschätzung recht gut bewährt.

Die erste Runde der Technologie-Prognose hatte nun vor allem den Zweck, im Rahmen dieser Kategorisierung eine Übersicht über die möglichen Werkzeuge zu schaffen, wenn man sich von Beginn an auf die Anwendungen in der Medizin beschränkt. Dabei wurden nicht nur die Chancen und Möglichkeiten thematisiert, sondern auch mögliche technische oder andere Probleme. Spezielles Gewicht wurde vor allem auf eine zeitliche Verortung gelegt: Bis wann könnte man damit rechnen, dass die jeweiligen (Schlüssel-)Anwendungen wissenschaftlich bewiesen und praktisch verfügbar sind?

Wir fassen die wichtigsten Resultate zusammen. Bei der jeweils gegebenen Kurz-Beurteilung stützen wir uns auf die zahlreichen, zum Teil auch gegensätzlichen Expertenkommentare. Unsere Darstellung erhebt nicht den Anspruch, eine

¹ Für die Mithilfe beim Finden einer geeigneten Kategorisierung möchten wir speziell Louis Tiefenauer, einem Mitglied der Begleitgruppe, danken.

erschöpfende Beurteilung darzustellen, sondern soll nur das Thema umreißen. Sie beruht im übrigen zwar auf den Angaben der ExpertInnen, berücksichtigt aber auch unser eigenes Verständnis der jeweiligen Items. Für einige sind in separaten Kästen zusätzliche Informationen verfügbar. Bei der zeitlichen Dimension haben wir jeweils versucht, aus den Angaben der ExpertInnen eine Art Konsenshypothese zu kreieren.

3.1.1 Partikel

Optische Quantenpunkte als Marker an Antikörper für Diagnose anheften: Dies stellt gegenüber heute praktizierten Methoden lediglich eine fortgeschrittenere, deutlich effizientere Technologie zur diagnostischen Identifikation dar (vgl. auch Kasten 4). Es ist damit kein zusätzlicher Informationsgewinn verbunden. Sie erlaubt aber ein deutliches Hinausschieben der Nachweisbarkeitsgrenzen, in dem man mit viel weniger Substrat auskommen kann. Mit dieser Methode können auch pathologische Mechanismen besser analysiert und auch direkt(er) modifiziert werden. Diese Anwendung stellt vermutlich die erste "richtig kommerzielle" Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin dar. Die Methode ist als Diagnoseverfahren bereits heute zum Teil im Labor verfügbar, in ausgereifterer Form dürfte dies um 2005 - 2008 der Fall sein.

Einsatz von Quantenpunkten für die Gensequenzierung und -identifikation: In diesem Bereich dürfte vor allem die gegenüber konventionellen Methoden erheblich gesteigerte "Analysegeschwindigkeit" (high throughput applications) von Bedeutung sein. Neue oder zusätzliche Informationen sind auch hier nicht zu erwarten. Allerdings ist denkbar, dass sich später daraus Methoden entwickeln lassen, die sogar die Sequenzierung einzelner DNA-Moleküle erlauben würde. Erste Vorläufer solcher Methoden werden wahrscheinlich bereits in etwa einem Jahr auf dem Markt sein; voll verfügbar dürften diese Methoden im Zeitraum 2005 bis 2008 / 2010 werden. Allerdings gibt es auch vereinzelte ExpertInnenstimmen, die die marktmässige Verfügbarkeit über das Jahr 2020 hinaus ansetzen.

Magnetische Nanopartikel als Marker an Antikörper anheften: Die Verwendung magnetisierter oder magnetisierbarer Nanopartikel weist in Verbindung mit einer hochempfindlichen Magnetfelddetektion ein grosses Anwendungspotenzial auf, sowohl in vitro (mit deutlich verbesserten Nachweislimiten) als auch in vivo über entsprechende Bildgebungsverfahren (MRI, magnetic resonance imaging). Weiter werden auch fortschrittlichere Zell-Separationsverfahren möglich werden, zunächst rein analytisch, später auch therapeutisch. Gesamthaft gesehen dürften die diagnostischen Möglichkeiten enorm sein. In 5 bis 10 Jahren sollten solche Verfahren für Diagnosezwecke praktisch verfügbar sein.

Kasten 4: Quantenpunkte lassen sich als Etiketten oder Bausteine nutzen**Proben analysieren**

Quantenpunkte sind Nanokristalle, die aus einigen hundert Atomen bestehen und bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht in einer bestimmten Farbe fluoreszieren. Dank dieser Eigenschaft eignen sie sich zur Markierung von Biomolekülen. Es gibt Quantenpunkte in verschiedensten Formen: Kugeln, Stäbe, Quader, etc. Organische Substanzen ummanteln dabei den Kristallkern, der beispielsweise aus Cadmium-Selenid bestehen kann. Die Grösse der Struktur bestimmt die elektrischen, magnetischen und optischen Eigenschaften des Quantenpunkts – je dicker er beispielsweise ist, desto langwelliger (röter) ist das von ihm ausgesendete Licht.

Cadmiumselenid-Nanoteilchen gehören zu den ersten kommerziellen Produkten der noch jungen Disziplin. Die amerikanische Firma Quantum Dot Corporation bietet solche an. Forscher können die Nanokristalle als biologische Etiketten brauchen, um Proteine oder DNA-Moleküle zu markieren. Dank ihrer Fluoreszenz verraten die Kristalle nämlich den momentanen Standort der markierten Moleküle – wobei sie das viel präziser tun als herkömmliche organische Fluoreszenz-Farbstoffe. Auf diese Weise liesse sich beispielsweise das Erbmaterial einer Probe mit einer Bibliothek bekannter DNA-Sequenzen vergleichen und so feststellen, welche Gene in bestimmten Zellen oder Geweben aktiv sind.

Neue Strukturen aufbauen

Nanoteilchen sind auch Kandidaten für Bauteile, aus denen man gezielt neue Strukturen aufbauen möchte – zum Beispiel Datenspeicher mit extrem hoher Kapazität. Forscher am IBM Thomas J. Watson Research Center sprechen dabei von Billionen Datenbits pro Quadrat-Inch, was etwa der 100fachen Kapazität heutiger Speichersysteme entspricht.

Noch spekulativer sind auf Nanoteilchen basierende Fertigungsprozesse, die jenen der Natur nachempfunden sind. Was in den "Ribosomen" genannten Proteinfabriken einer Zelle abläuft, ist allerdings von einer Komplexität, welche die heutigen Möglichkeiten bei weitem übertrifft.

Magnetische Nanopartikel in der Krebstherapie: Wenn sich magnetische Nanopartikel gezielt an Krebszellen anlagern lassen, so können diese durch Anlegen eines magnetischen Wechselfeldes zum Schwingen angeregt werden, was lokal eine Erwärmung erzeugt (Hyperthermie) und die Krebszellen zum Absterben bringt. Vermutlich wird nach wie vor aber eine chemotherapeutische Ergänzung nötig sein (idealerweise ebenfalls nanobasiert). Möglicherweise ist die Selektivität aber zu gering. Offen ist auch die Frage der Nebenwirkungen (z.B. im Zu-

sammenhang mit dem Abbau und dem Ausscheiden der nicht mehr benötigten Nanopartikel). Auch in diesem Fall ist anzunehmen, dass die Zulassungsbehörden eher vorsichtig sein und nur zögerlich ihr OK geben werden. In 5 bis 10 Jahren sollten grundsätzlich klinisch einsetzbare Therapieverfahren zur Verfügung stehen, eventuell einige wenige Jahre später.

Kasten 5: Gezielter Transport von Medikamenten durch Dendrimere und Polymerkapseln

Eine zielgenaue Therapie basiert darauf, Wirkstoffe in winzigen Behältern unbeschadet durch den Körper zu transportieren und an der relevanten Körperstelle – und nur dort – freizusetzen. Als Transportbehälter kommen beispielsweise Dendrimere oder Polymerkapseln in Frage.

Dendrimere sind kugelförmige Moleküle, die etwa so gross sind wie ein typisches Protein, aber viel stabiler. Sie enthalten Hohlräume, die sich als ideale Behälter für Wirkstoffe anbieten. Um ihre Fracht am Zielort freizugeben, müssen sie so konstruiert sein, dass sie nur in Gegenwart bestimmter Auslösermoleküle aufquellen und ihren Inhalt entweichen lassen.

Für Polymerkapseln gibt es keine solchen Auslösermoleküle – sie müssen am Zielort durch Wärme verformt werden, um die Wirkstoffe freizusetzen. Möglich ist das mit so genannten "Nanohülsen". Das sind kleine Perlen aus goldbeschichtetem Glas, die man an die Transportkapseln heftet, bevor man diese auf die Reise ins Körperinnere schickt. Da die Nanohülsen Infrarotlicht absorbieren, lassen sie sich zum gegebenen Zeitpunkt von aussen mit einem Infrarotstrahler aufheizen, bis sich die Kapsel entleert hat.

Gezielte Medikamentenabgabe (drug targeting) mit magnetischen Nanopartikeln: Durch die Ankopplung an ein äusseres Magnetfeld liesse sich die Medikamentenabgabe von aussen steuern. Allerdings dürfte es schwierig sein, Wirktiefen von mehr als einigen Zentimetern zu erreichen. Vermutlich erst in mehr als 10 Jahren klinisch verfügbar.

Separation von Zellen mit magnetischen Nanopartikeln: Magnetische Nanopartikel können zur Zellseparation (zunächst in vitro) eingesetzt werden, etwa zur Extraktion von Stammzellen, oder zur Separation verschiedener Blutbestandteile. Bereits ab 2005 könnte mit erfolgreichen Anwendungen im Labormassstab gerechnet werden.

Dendrimere zur lokalisierten, extern kontrollierten Medikamentenabgabe: Nach Ansicht vieler ExpertInnen bieten Dendrimere hierfür viel versprechende Aussichten. Es sollte möglich sein, diese so zu konstruieren, dass sie nur in Gegenwart bestimmter Auslösermoleküle aufquellen und ihre Wirkstoffe freigeben. Allerdings sind noch viele Probleme zu lösen. So ist z.B. unklar, ob die komplizierte Synthese dieser Moleküle nicht eine Produktion in kommerziellen Mengen verhindert. Dendrimere sind nur ein Beispiel für Polymere, die in der geschilderten Art als Transportmittel für Medikamente eingesetzt werden könnten. Es gibt aber auch "klassische" Verfahren, die eine Verbesserung zulassen. Insofern sind hier die verschiedensten Alternativen möglich. Sollte sich binnen 3 bis 5 Jahren zeigen, dass Dendrimere wirklich "funktionieren" (was noch offen ist), könnten effektive Anwendungen etwa bis zum Jahr 2010 verfügbar sein.

Kasten 6: Hocheffiziente Analyse-Instrumente – Gen-Sequenzen erkennen mit DNA-Chips oder beschichteten Goldpartikeln

Seit bekannt ist, dass es ursächliche Zusammenhänge gibt zwischen gewissen Gen-Sequenzen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Tumoren etc. und dass bestimmte Genmutationen zu Erbkrankheiten oder Brustkrebs führen, suchen die Mediziner fieberhaft nach Methoden, um präzisere und effizientere "high throughput-Screenings" für solche genetische Prädispositionen zu entwickeln.

Ein effizientes Analyse-Instrument dafür, wie auch für die Früherkennung von Krankheiten, sind die so genannten "DNA-Chips". Diese sind vergleichbar mit Chips aus der Halbleitertechnik – mit dem Unterschied, dass sie anstelle von Transistoren Abertausende von DNA-Schnipseln (sog. "Spots") enthalten. Zum Sensor wird ein solcher Chip, weil jeder dieser DNA-Spots auf komplementäre Gen-Sequenzen anspricht. Gibt es eine solche in der Probe, bleibt sie am entsprechenden Spot haften. Erkennen lässt sich diese anhand von fluoreszierenden Farbstoffen, mit denen die unbekanntes DNA-Stücke der Probe zuvor markiert wurden: Muster und Intensität der Fluoreszenz verraten die Reaktionen, die beim Test auftreten, und damit auch die Gen-Sequenzen in der Probe.

Eine alternative Gen-Erkennungsmethode, die Patienten ohne Instrumenteneinsatz bequem bei sich zu Hause durchführen könnten, arbeitet mit Nanopartikeln aus Gold in einer wässrigen Lösung. Dabei ist ein Teil der Goldpartikel mit DNA beschichtet, die zu einer Hälfte der gesuchten Gen-Sequenz komplementär ist, der andere Teil mit DNA, die zur zweiten Hälfte passt. Falls die gesuchte Gen-Sequenz in der Probe vorkommt, verbindet sie sich mit beiden Typen von Goldteilchen, und es entsteht ein dichter Klumpen mit andern optischen Eigenschaften. Die dabei auftretende Verfärbung der Lösung lässt sich mit bloßem Auge feststellen.

Dendrimere zur Gentherapie: Bei geeigneter Konstruktion könnten Dendrimere auch DNA-Bruchstücke in die Zellen transportieren. Diese könnten weniger gefährlich sein als bisher verwendete Methoden mittels Viren. Der Zeithorizont dürfte ähnlich sein wie für die Medikamentenabgabe mittels Dendrimeren.

Kopplung von Nanoshells an Antikörper, die sich spezifisch an Tumorzellen anlagern: Durch von aussen gesteuertes Aufheizen der Kügelchen werden die von den Antikörpern erkannten Krebszellen thermisch zerstört. Die Beschränkung der Wirkungstiefe ist zwar ein Problem; es gibt aber bereits Ansätze, diese zu überwinden. Für viele Experten verspricht der Einsatz von Nanoshells ein grosses therapeutisches Potential. Der mutmassliche Zeitrahmen für die Verfügbarkeit einer praxistauglichen Therapie dürfte von 2005 (eher 2010) bis 2015 reichen.

Kopplung von Nanoshells an wärmeempfindliche Polymere mit Wirkstoffen: Mit diesem Verfahren wäre es möglich, durch Einstrahlen von Infrarotlicht die Nanoshells und damit durch Wärmeleitung die angekoppelten Polymere (z.B. Dendrimere) so zu erwärmen, dass diese ihre Wirkstoffe gezielt abgeben. Es wären aber auch andere "Trigger" denkbar, die die Polymere zur Freigabe ihrer Wirkstoffe zwingen könnten. Etwa ein geeigneter pH-Wert, spezifische Ionen oder andere Moleküle. Diese hätten nicht die oben erwähnte Beschränkung der Wirktiefe. Entsprechende Versuche sind ebenfalls im Gang. Vor 2010 ist aber nicht mit einer demonstrierten Therapie zu rechnen.

3.1.2 Strukturen

Nanostrukturierte Matrix zur Unterstützung des Knochenwachstums: Diese Möglichkeit wird grundsätzlich als ein sehr interessanter Ansatz gesehen, über die Anwendung beim Knochenwachstum hinaus (für andere Organe, auch im kardiovaskulären Bereich). Allerdings werden die klinischen Anwendungen als schwierig betrachtet. Für einige ExpertInnen ist möglicherweise hier "Nano" zu klein. Bezüglich des zeitlichen Horizontes schwanken die Einschätzungen sehr stark (auch aus definitorischen Gründen), sie liegen zwischen heute und 2020.

Chemische Sonden mit Nanoröhren: Als "Sondenspitze", z.B. in einem Rasterkraftmikroskop, könnte so ein schnelles und sehr spezifisches Analyseverfahren entstehen, das auch die Abtastung von dreidimensionalen Strukturen erlauben würde. Z.T. schon heute existierend könnte die Methode bis 2010 voll verfügbar sein.

Hyperempfindliche Sensoren mit Nanoröhren: Halbleitende Nanoröhren ändern ihren elektrischen Widerstand sehr stark und damit leicht messbar, wenn sie bei

Raumtemperatur z.B. bestimmten Gasen ausgesetzt werden. Mit diesem oder andern Ansätzen könnte schliesslich die Diagnose am Krankenbett Wirklichkeit werden. Allerdings: Das funktioniert in einem kommerziellen Sinn aber nur, wenn die Herstellung von Nanoröhren spezifischer erfolgen kann. Zu erwähnen ist das Problem des zu wenig differenzierenden Responses (gerade wegen der Hyperempfindlichkeit). Eventuell kann dies aber durch Anbringen von selektierenden Materialien gelöst werden. Auf jeden Fall wird das Thema von vielen Forschungsgruppen verfolgt. Falls die angedeuteten Probleme zu lösen sind, könnten solche Sensoren bis 2010 verfügbar sein.

Kasten 7: Werkzeuge für die Nanowelt

Ein Team um den ETH-Chemiker François von Diederich hat ein Greifwerkzeug für kleine Moleküle gebaut. Das nur wenige Nanometer kleine Gebilde gleicht einer Hand mit vier Fingern. Damit lassen sich Objekte in der Nanowelt manipulieren. Das nächste Ziel der Forscher sind Greifer für grössere Moleküle wie Fullerene oder Kohlenstoff-Nanoröhren, die wichtige Bausteine der molekularen Elektronik abgeben könnten.

Mechanische Anwendungen von Nanoröhren in der Medizin: Hier geht es z.B. um die Möglichkeiten, mit Nanoröhren künstliche Muskeln, kleinste Pumpen für die gesteuerte Medikamentenabgabe oder andere mechanische Anwendungen zu realisieren. Das ist deshalb möglich, weil mit Nanoröhren sehr grosse Kräfte erzeugt werden können. Vor 2020 ist aber kaum mit der klinischen Verfügbarkeit zu rechnen.

Nanostrukturierte Materialien für die Dialyse: Nanobasierte Membranen existieren bereits. Es werden dieser Technologie grosse Potenziale zugestanden. Allerdings gibt es auch klassische Alternativen. Möglicherweise sind die Forschungsbudgets im Moment für substanzielle Fortschritte zu klein. Deutliche Weiterentwicklungen werden im Zeitraum 2005 bis 2015 erwartet.

Nanostrukturierte Materialien für künstliche Lungen und andere Anwendungen: Hier geht es "technisch" um ähnliche Themen wie für die Dialyse. Grössere Fortschritte wären bis 2010 denkbar. In-vivo-Anwendungen liegen aber noch in ferner Zukunft.

3.1.3 Oberflächen

Nanobasierte biokompatible Materialien: Solche Materialien können als Abdeckung von Implantaten, als künstliche Haut oder Ähnliches dienen. Diesen Materialien wird ein grosses Anwendungspotenzial zugeschrieben. Noch gibt es für einige ExpertInnen aber keine überzeugenden klinischen Hinweise, dass dies funktionieren könnte. Entsprechend breit ist die Schätzung bezüglich der Verfügbarkeit. Die Spanne reicht von heute bis ins Jahr 2020.

Nanosizing: Durch geometrisches Verkleinern von zu groben Strukturen können diese lösbar und damit als Wirksubstanzen einsetzbar gemacht werden. Dies würde die Palette einsetzbarer aktiver Substanzen für medikamentöse Zwecke erheblich vergrössern. Einerseits sind damit zwar grosse Potentiale angesprochen, andererseits könnten sich z.B. unüberwindliche Stabilitätsprobleme ergeben. Zudem ist Löslichkeit nur einer von mehreren Faktoren, der die biologische Verfügbarkeit von Wirksubstanzen bestimmt. Nach den Antworten der ExpertInnen ergibt sich für eine Realisierung ein Zeitrahmen von etwa 2005 bis 2010.

Kasten 8: Bessere Implantate

Bei Implantaten (typisches Beispiel: künstliches Hüftgelenk) kommt es wegen Wechselwirkungen mit dem menschlichen Gewebe immer wieder zu Unverträglichkeiten. Würden die Oberflächen der Verankerung eines künstlichen Gelenkes nanostrukturiert, würde sich die Verankerung fester mit dem umgebenden Knochen verbinden und nach Ansicht von Fachleuten entzündliche Reaktionen weitgehend ausschliessen. Ein medizinisches Forschungsprojekt am Zentrum für Werkstoffanalytik im deutschen Lauf soll nun diese These genauer untersuchen.

3.1.4 Devices

Nanosensoren für die Diagnose: In diesem Bereich sehen die Experten speziell grosse Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten. Denn mit der Nanotechnologie wird eine massive Miniaturisierung und Parallelisierung von Diagnose-Prozessen möglich – bis hin zur Heimanwendung. Die wichtigsten Fortschritte werden zwischen 2005 und 2010 erwartet.

Prothesen für Auge und Ohr: Auch in diesem Bereich werden der Nanotechnologie grosse und vielfältige Anwendungspotenziale attestiert. In der ferneren Zu-

kunft sind sogar künstliche Organe denkbar (z.B. gewachsen aus Stammzellen¹). Kritische Stimmen warnen aber auch vor zu grossen Erwartungen, sprechen von einer "Jesus-Technologie" (die es nie geben wird). Aber nicht alle in diesem Bereich zu erwartenden Fortschritte sind der Nanotechnologie "gutzuschreiben". Einer der Experten meinte, dass "mikro" genügen würde. Erste substantielle Erfolge sind nicht vor 2010 zu erwarten.

Neuronale Prothesen: Auch wenn dies erst recht nach Science Fiction tönt, verschiedene ExpertInnen sehen in diesem Bereich grundsätzlich grosse Möglichkeiten. Nicht zuletzt auch deshalb, weil hier "mikro" genügt oder genügen könnte. Die Probleme liegen damit nicht so sehr in der Kleinheit, als vielmehr in der "Schnittstelle". Der Zeithorizont liegt allerdings weit jenseits des Jahres 2020.

Kasten 9: Mechanische Sonden

Mechanische Sonden sind Sensoren, die molekulare Erkennungsprozesse in nanomechanische Bewegungen umsetzen. Ein Beispiel dafür ist der im IBM-Forschungslabor Rüschlikon entwickelte "Nanomechanical Olfactory Sensor" (NOSE), der mit kammartig angeordneten Blattfedern arbeitet. Wenn man diese mit spezifischen Erkennungsmolekülen beschichtet, die auf entsprechende Krankheitsmarker reagieren, so verbiegen sich die Blattfedern dabei nach einem Muster, das den aktuellen Stoffwechselzustand des Patienten verrät.

Von solchen Sensoren erhofft man sich präzise und vor allem auch rasch verfügbare Resultate, die bei akuten Erkrankungen wie Herzinfarkten lebensentscheidend sein können.

Minimal-invasive Chirurgie: Hier geht es primär um die Verbesserung existierender mikromechanischer Methoden. Die Erwartungen sind aber alles in allem eher bescheiden. Die wichtigsten Fortschritte werden zwischen 2005 und 2010 erwartet. Aber echt "nanotechnologisch" werden sie (noch?) nicht sein. Erst deutlich nach 2010 ist damit zu rechnen.

Mechanisch kontrollierte lokalisierte Medikamentenabgabe: Auch hier geht es primär um die Verbesserung bereits existierender mikromechanischer Lösungen. Diese werden nicht vor 2005 veranschlagt.

¹ Vgl. z.B. auch die kürzlich abgeschlossene TA-SWISS-Studie über menschliche Stammzellen (Hüsing 2003)

Künstliche Organe bzw. Organteile: Hier zeichnet sich eine Vielzahl von Möglichkeiten ab (die z.T. schon angesprochen wurden), gesamthaft gesehen sind aber vor 2020 keine grossen Fortschritte zu erwarten, abgesehen von Einzelfällen, wie etwa Herzklappen, Gelenkteile oder Muskelstützen.

Nanorobotische Systeme: Diese wurden schon in Kapitel 2 angesprochen. Hier ist tatsächlich sehr viel möglich, z.B. künstliche rote oder weisse Blutzellen mit den entsprechenden Funktionalitäten, aber all dies wird erst weit nach 2020 Wirklichkeit werden (wenn überhaupt, wie nicht wenige ExpertInnen meinen).

3.1.5 Methoden

Rastersondenmikroskop mit optischen Pinzetten: Diese Methode verbessert vor allem die Möglichkeiten der "Nanomikroskopie" in vivo, indem nur sehr kleine Haltekräfte im Spiel sind und damit schon beinahe zerstörungsfrei beobachtet werden können. Für die medizinische Forschung dürfte dies ein ausserordentlich interessantes Beobachtungsinstrument werden. Die Methode ist schon weitgehend entwickelt und könnte bis 2005 in grösserem Ausmass verfügbar sein.

Kasten 10: Miniaturisiertes Abtastsystem

Ein vom schweizerischen Nationalfonds unterstütztes, interdisziplinäres Team von Biologen, Kardiologen, Medizinern, Physikern und Mikrofabrikationsspezialisten entwickelt ein miniaturisiertes Abtastsystem auf der Basis des Rasterkraftmikroskops, das sich in medizinische Endoskope einbauen lässt. Dieses soll die Topografie im Innern von Gefässen erkennen und so Frühdiagnosen (z.B. von Arteriosklerose, Knorpelerkrankungen in Gelenken, etc.) ermöglichen - und eines Tages sogar therapeutische Eingriffe an einzelnen Zellen und ihren Komponenten erlauben. Der Strukturbiologe Ueli Aebi vom Biozentrum Basel rechnet bereits für das laufende Jahr mit ersten Prototypen solcher Apparate.

Nanotechnologisches Rastersonden-Mikroskop für die Gensequenzierung und Genidentifikation: Die Methode erlaubt die simultane Identifikation einer grossen Anzahl von DNA-Sequenzen (bzw. Genen). Die Methode ist (noch) nicht sonderlich schnell, und es werden auch alternative Ansätze verfolgt. Trotz verschiedener Probleme dürfte die Methode zwischen 2005 und 2010 verfügbar sein.

Rastersonden-Mikroskop zum Nachweis biochemischer Funktionen: Mit geeignet beschichteten Auslenkern wäre die zerstörungsfreie Untersuchung von Ionen-Austausch-Prozessen über biologische Membranen möglich. Dies wäre ganz grundsätzlich für die Molekularbiologie von Interesse, aber speziell auch für die Aktivitätskontrolle von Medikamenten. Bereits für 2005 werden mögliche Anwendungen gesehen.

Gensequenzierung mit "Nanoporen" (nanopore sequencing): Dies ist eine der oben erwähnten Alternativen. Sie ist zudem sehr schnell. Die Verfügbarkeit in einem praxistauglichen Massstab wird bis 2010 für möglich gehalten.

Einzel-Molekül-Chemie: Nanotechnologie ermöglicht Chemie im Pico-Liter-Bereich, d.h. Chemie mit einzelnen (grossen) Molekülen, z.B. DNA-Fragmenten. Dies wird wichtige Erkenntnisgewinne für die Medizin ermöglichen. Bis 2005 sollten entsprechende Verfahren für ein breiteres Forschungspublikum zur Verfügung stehen.

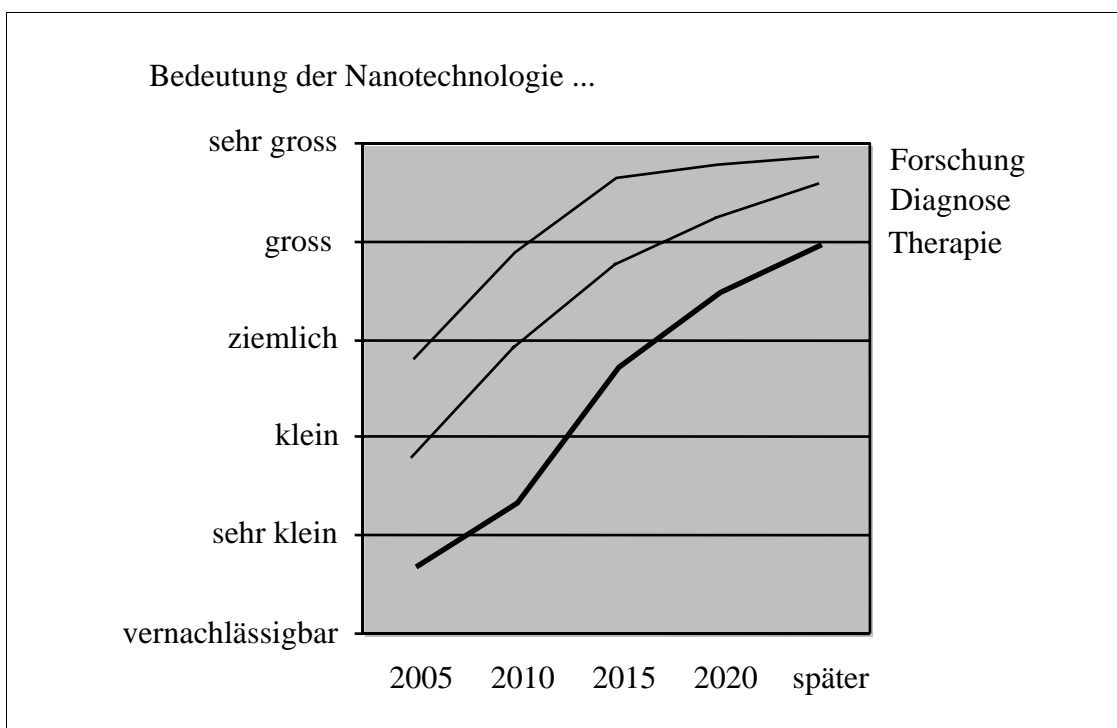
3.1.6 Synthese

Der oben dargestellte Werkzeugkasten zeigt, dass eine Vielzahl von Ansätzen und Methoden für die unterschiedlichsten Anwendungen verfolgt werden. Auch wenn vieles nicht realisiert oder sehr viel später als vorausgesehen realisiert würde, wird klar, dass die Nanotechnologie in der Medizin in vielfältigster Weise Einzug halten wird. Die einzelnen Anwendungen sind für sich allein genommen – von Ausnahmen abgesehen – nicht sonderlich spektakulär, als ganzes "Paket" wird die Nanotechnologie aber einen erheblichen Einfluss auf die Medizin haben. Dies ist auch die Meinung der befragten Nanotechnologie-ExpertInnen: Wir haben diese in der ersten Runde für die Technologie-Prognose gefragt, wie sie die Bedeutung der Nanotechnologie im Zeitablauf sehen, differenziert nach den Tätigkeitsfeldern (medizinische) Forschung, Diagnose und Therapie (vgl. Abbildung 3-1).

Nicht sehr überraschend wird die Bedeutung der Nanotechnologie in den drei Bereichen unterschiedlich eingeschätzt. Schon in naher Zukunft wird die medizinische Forschung von der Nanotechnologie spürbar profitieren können, und schon deutlich vor Ende des Betrachtungszeitraumes wird die Nanotechnologie in der Forschung eine grosse bis sehr grosse Bedeutung erreichen. Demgegenüber verläuft die "Therapiekurve" um 10 bis 15 Jahre verschoben. Aber auch sie erreicht bis 2020 schon einen recht hohen Wert. Alles in allem: Mit der Nanotechnologie ist in der Medizin zu rechnen.

Auf einen wichtigen Punkt ist in diesem Zusammenhang speziell hinzuweisen. Indem die Diagnostik deutlich früher von der Nanotechnologie profitieren dürfte als therapeutische Verfahren, dürfte der "Gap" zwischen dem, was man im Sinne einer Diagnose weiss und dem was man therapeutisch effektiv tun kann, tendenziell zunehmen. Wir werden in Kapitel 5 und 6 darauf zurückkommen.

Abb. 3-1: Stark wachsende Bedeutung der Nanotechnologie in der Medizin für Forschung, Diagnose und Therapie (Medianwerte der Experteneinschätzungen, N = 19)



3.2 Spezielle Anwendungen

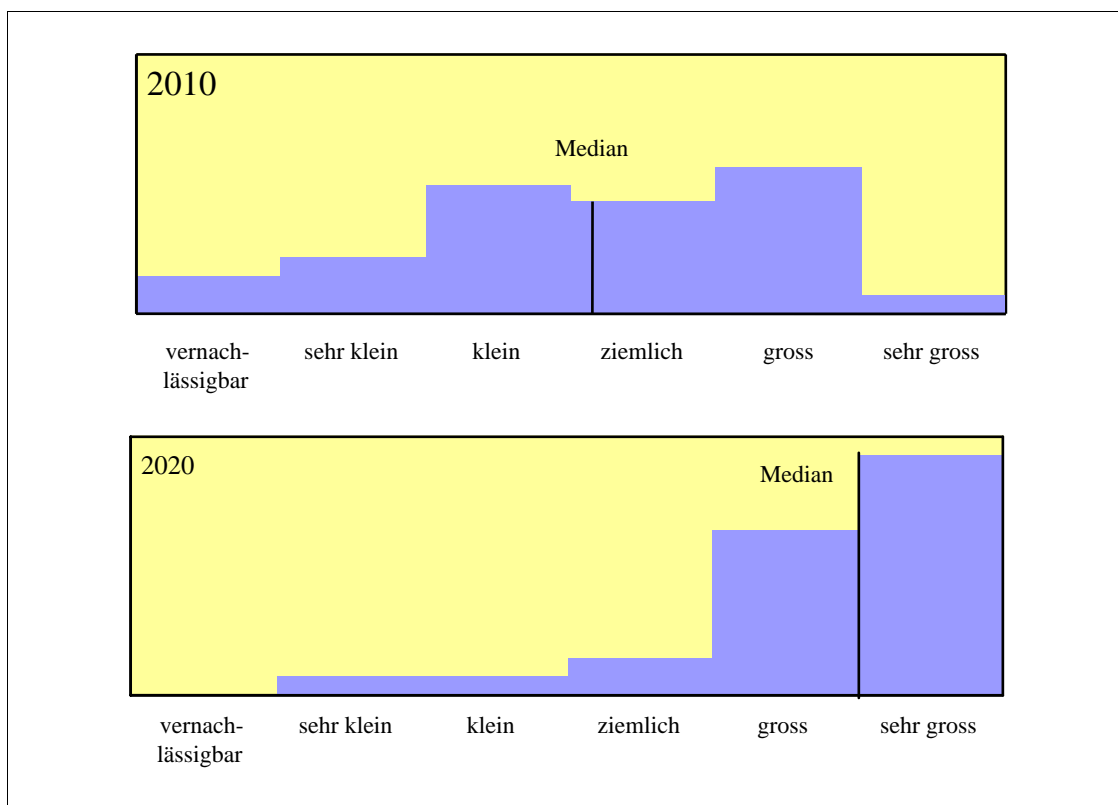
3.2.1 Nanotechnologie-basierte Gen-Sequenzierung

Das nanotechnologische Gen-Sequenzieren scheint eine wichtige und schon bald "kommerziell" verfügbare Technologie darzustellen, die es gegenüber heutigen Ansätzen erlauben würde, viele Gene gleichzeitig und schnell identifizieren zu können (vgl. auch Abschnitt 3.1). Dies ergibt sich aus den Antworten der ExpertInnen in der ersten Runde der Technologie-Prognose, aber auch Exponenten der Begleitgruppe sind dieser Meinung. Wir haben deshalb in der zweiten Runde der Technologie-Prognose nachgehakt und wollten wissen, inwiefern nanotechnologisches Gen-Sequenzieren und -identifizieren in der Medizin tatsächlich verbreit-

tet sein wird. Dabei haben wir, um eine etwaige Entwicklungsdynamik einfangen zu können, zwei Zeithorizonte unterschieden: 2010 und 2020.

Bis 2010 ergibt sich noch ein ziemlich gemischtes Bild (vgl. Abbildung 3-2). Der Grossteil der ExpertInnen sieht die Wahrscheinlichkeit im Bereich zwischen klein bis gross. Ein völlig anderes Bild ergibt sich für das Jahr 2020. Bis dann muss man nach der deutlichen Mehrheit der ExpertInnen mit grosser bis sehr grosser Wahrscheinlichkeit damit rechnen, dass das Gen-Sequenzieren eine Standard-Anwendung der Nanotechnologie sein wird. Skeptisch sind nur wenige Experten. Aufgrund ergänzender Kommentare denken diese Experten z.B. daran, dass es auch alternative, gegebenenfalls billigere und technisch einfachere Verfahren geben könnte.¹ Allerdings stellen sich hier Abgrenzungsfragen: Was ist Nanotechnologie, was ist noch keine Nanotechnologie?

Abb. 3-2: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 27) für die These: "Nanotechnologische Gen-Sequenzierung bzw. Gen-Identifikation wird ein Standard-Werkzeug bis 2010 bzw. 2020."



¹ Jedenfalls sind mehrere ExpertInnen der Meinung, dass mindestens bis 2010 (weiterentwickelte) konventionelle Verfahren nanobasierten Verfahren in vielerlei Hinsicht überlegen sein könnten.

Unabhängig davon deutet sich damit aus unserer Sicht an, dass eine "gentechnologische Unschuld" der Nanotechnologie nicht aufrechterhalten werden kann. Dies zeigen auch die inhaltlichen Antworten der ExpertInnen auf die Frage nach den Grundanwendungen dieser Technik in der Medizin. Die folgende Liste gibt eine unkommentierte Übersicht über die wichtigsten Anwendungen:

- Schnelle und verlässliche Identifikation von pathogenen Keimen
- Genanalysen in nativen Systemen
- Grundlage für massgeschneiderte Medikamenten-Abgabe, die auf genetische Dispositionen Rücksicht nimmt (bis zur Diagnose am Krankenbett für personen-spezifische Medikation)¹
- Grundlage für breit angelegte Screenings
- Grundlage für Krebsdiagnose
- Grundlage für genetisches Engineering / Gentherapien
- gerichtliche sowie versicherungstechnische Anwendungen u.a.

3.2.2 Nanotechnologie-basierte Medikamenten-Abgabe

Die örtlich und mengenmässig optimal definierte Abgabe von Medikamenten scheint aufgrund der ersten Runde der Technologie-Prognose ebenfalls eine viel versprechende und realistische Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin zu werden (vgl. auch den Werkzeugkasten). Wir haben deshalb auch hier nachgehakt (und wiederum zwei Zeithorizonte unterschieden):

Schon überraschend hoch wird gesamthaft die Wahrscheinlichkeit eingeschätzt, dass bis 2010 die nanotechnologische Medikamenten-Abgabe zum Standard-Werkzeug wird (vgl. Abbildung 3-3). Die Streuung der Antworten ist allerdings recht gross. Die Skeptiker denken vor allem auch an die lange Zeit, die es braucht, bis ein Medikament nach der klinischen Testphase eine offizielle Zulassung erhält (vgl. auch Kapitel 2). Bis zum Jahr 2020 sind die ExpertInnen gesamthaft noch viel optimistischer: Danach würde die nanotechnologische Medikamentenabgabe in der Medizin mit grosser Wahrscheinlichkeit eine Standard-Methode darstellen.

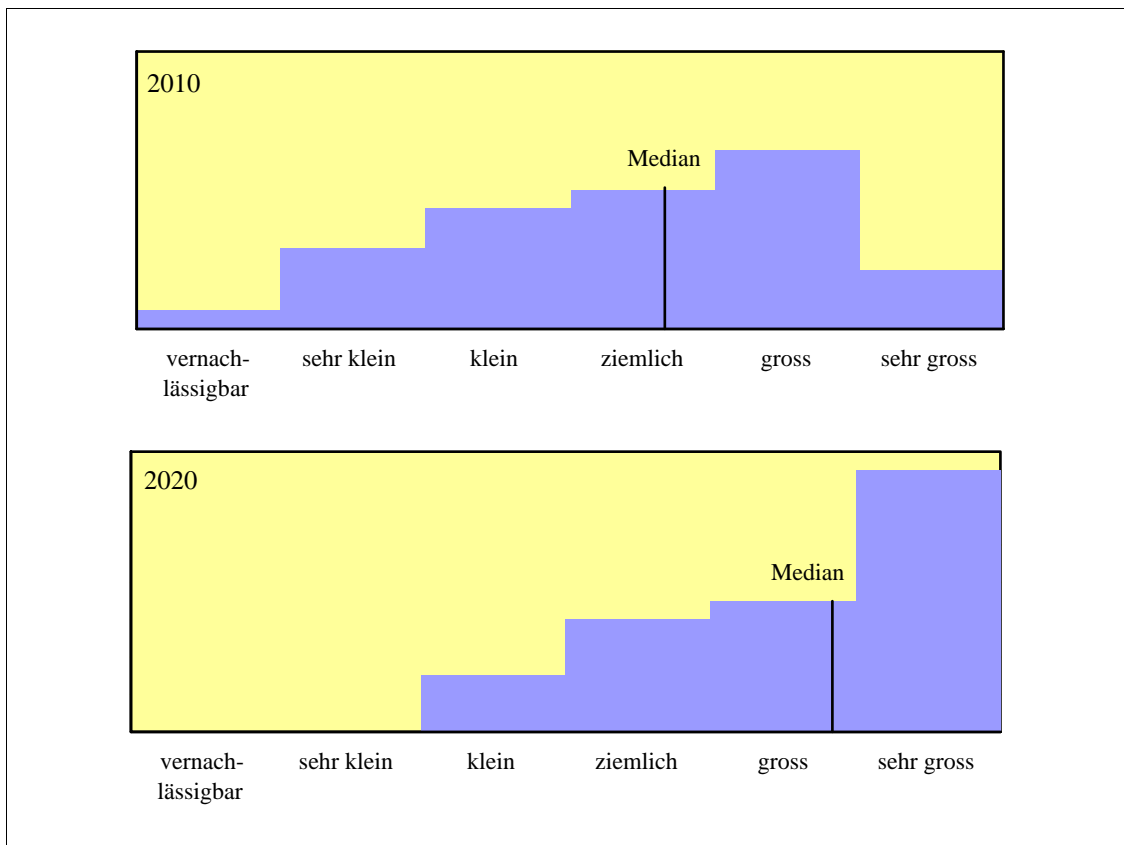
Einige Beispielanwendungen sollen auch hier verdeutlichen, um was es bei der nanotechnologischen Medikamenten-Abgabe inhaltlich gehen könnte:

- Behebung von Enzym-Defizienzen (z.B. durch Einfügen fehlender DNA-Sequenzen)

¹ Vgl. in diesem Zusammenhang auch die zur Zeit laufende TA-SWISS-Studie über Pharmacogenomics (Rippe o. J.)

- Neue Typen von Impfprozessen
- Elimination von Tumor und Prä-Tumor-Gewebe
- Medikamenten-Abgabe bei Diabetes, Herzkrankheiten, ev. Parkinson
- Implantate zur kontinuierlichen oder zeitlich regelbaren Medikamenten-Abgabe
- Lokalisierung der Medikamenten-Abgabe
- Verbesserung der Löslichkeit von Wirksubstanzen
- Verbesserung der Absorption von Wirksubstanzen u.a.

Abb. 3-3: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 30) für die These: "Nanotechnologische Medikamenten-Abgabe wird bis 2010 bzw. 2020 ein Standard-Werkzeug."

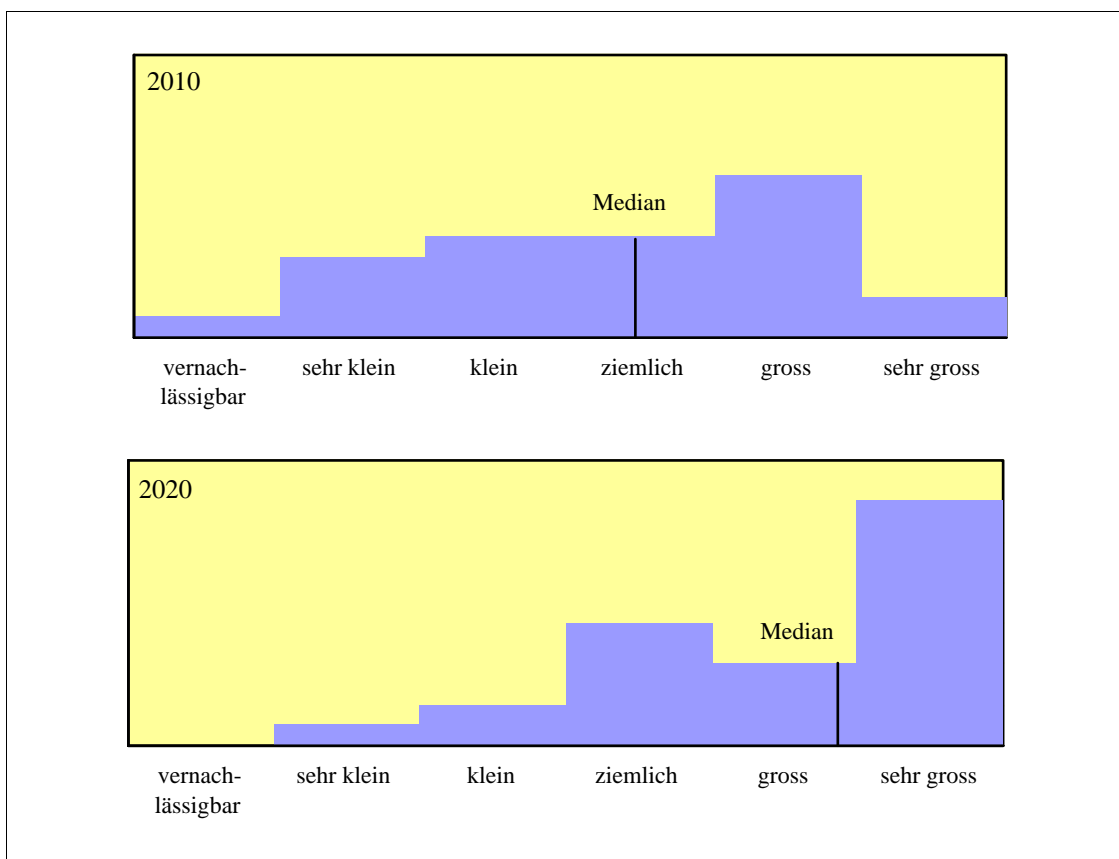


Nach unserer Einschätzung (die sich mit einigen Bemerkungen der ExpertInnen deckt) dürfte bei der doch sehr optimistischen Einschätzung der nanotechnologischen Medikamenten-Abgabe der "bremsende" Effekt der Zulassungsbehörden unterschätzt werden. Bis ein neues Medikament von den zuständigen Behörden die Zulassung erhält, können Jahre vergehen (eine nanotechnologische Medikamenten-Abgabe würde wohl – selbst bei bereits zugelassener Wirksubstanz – als *neues Medikament* interpretiert werden).

3.2.3 Nanotechnologie-basiertes Targeting

Als letzte spezielle und viel versprechende Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin greifen wir das "Targeting" heraus, das gezielte "Andocken" nanotechnologischer Partikel – wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben – an ganz spezifischen Zielen ("Targets"). Targeting ist hier als eine Art "Querschnittstechnologie" gemeint, die nur in Kombination mit andern Technologien medizinisch interessant wird. Insbesondere für die "zielgenaue" Medikamenten-Abgabe ist das Nanotechnologie-basierte Targeting eine wichtige Voraussetzung, aber auch für die Nanotechnologie-basierte Diagnose. Die Abbildung 3-4 zeigt, wie sich nanotechnologisches Targeting nach Ansicht der ExpertInnen durchsetzen könnte.

Abb. 3-4: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 25) für die These: "Nanotechnologisches Targeting wird bis 2010 bzw. 2020) ein Standard-Werkzeug."



Bis 2020 muss man danach mit dem Targeting als Standard-Werkzeug rechnen. Inhaltlich werden aber verschiedene Vorbehalte gemacht. So könnten Träger- und Transportstrukturen toxikologische Probleme aufwerfen, Spezifität und Se-

ektivität könnten geringer als erwartet sein oder ganz generell könnte sich die Produktion von kommerziellen Mengen schwieriger als erwartet erweisen. Gesamthaft korrespondiert die erwartete Entwicklung aber mit jener bei der nanotechnologischen Medikamenten-Abgabe und wird vom Projektteam als plausibel erachtet.

Kasten 11: Punktgenaue Therapie von Hirntumoren

Andreas Jordan von der Berliner Charité ist zusammen mit Kollegen vom Saarbrücker Institut für Neue Materialien einer verheissungsvollen Therapie gegen Hirntumore auf der Spur: Wenn sie ein modifiziertes kommerzielles Tomographie-Kontrastmittel, das nanometerkleine Eisenpartikel enthält, in das Tumorgewebe einspritzen und dann ein starkes Hochfrequenz-Magnetfeld anlegen, geraten die Teilchen in Schwingung und erhitzen sich so, dass die Krebszellen zerstört werden.

3.3 Anwendungspotenziale in sieben Krankheitsgruppen

Für welche Krankheiten könnten nanobasierte Therapien speziell geeignet sein? Verschiedentlich sind schon entsprechende Bemerkungen gemacht worden. Für eine Gesamteinschätzung ist es aber fast notwendig, die möglichen Anwendungen auf "konkrete" Krankheitsgruppen umzulegen, auch wenn man sich damit auf *sehr* schwankenden Grund vorwagt. Entsprechend vorsichtig müssen denn auch die hier wiedergegebenen Einschätzungen interpretiert werden.

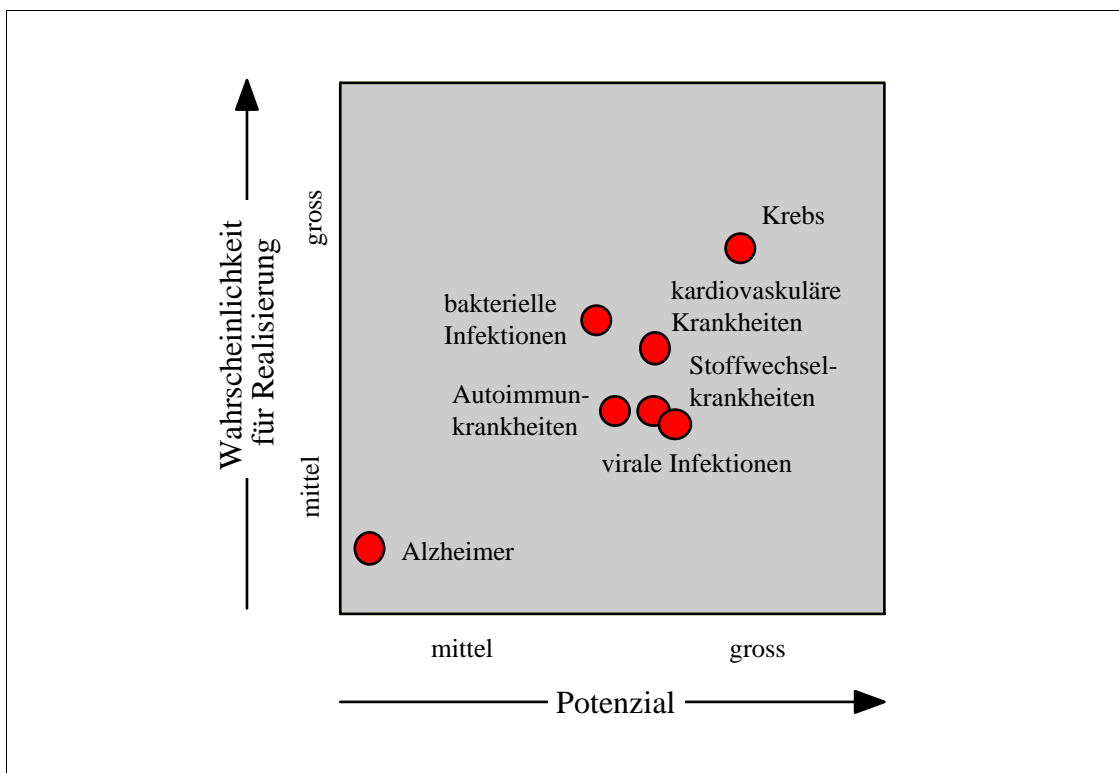
Aufgrund der Resultate der ersten Runde der Technologie-Prognose haben wir die sieben wichtigsten Krankheitsgruppen identifiziert, für die die Nanotechnologie bis ins Jahr 2020 therapeutisch grundsätzlich eine gewisse Bedeutung erlangen könnte. Es sind gleichzeitig jene Krankheitsgruppen, die in den Industrieländern mit Abstand die häufigsten Todesursachen sind:

- Krebs
- Kardiovaskuläre Krankheiten
- Bakterielle Infektionen
- Virale Infektionen
- Alzheimersche Krankheit
- Autoimmunkrankheiten
- Stoffwechselkrankheiten.

In einem ersten Schritt haben wir die ExpertInnen gefragt, wie gross wohl die therapeutischen *Potentiale* von nanobasierten Therapien bis 2020 sein könnten,

wenn man sie mit heute praktizierten Therapien vergleicht. Die vorgegebene Skala reichte mit vier Zwischenwerten von "vernachlässigbar" bis "sehr gross". In einem zweiten Schritt fragten wir nach der *Wahrscheinlichkeit*, dass diese Potenziale realisiert sein könnten (in der gleichen Skala). Wir verzichten auf die Darstellung der Einzelresultate, sondern fassen diese in einer zweidimensionalen Darstellung zusammen (vgl. Abbildung 3-5). Die Abbildung beschränkt sich dabei auf einen Skalen-Bereich der etwas unterhalb einer "mittleren" Marke ("ziemlich") startet und bis etwas über "gross" hinausreicht. Eingetragen sind die jeweiligen Medianpositionen.

Abb. 3-5: Therapiepotenziale und Realisierungswahrscheinlichkeiten der Nanotechnologie in sieben Krankheitsgruppen bis 2020 (Medianwerte, N = 31)



Grob gesprochen lassen sich drei Gruppen unterscheiden. Deutlich oben aus schwingt der Krebs sowohl bezüglich des erwarteten Potenzials wie auch bezüglich der Realisierungswahrscheinlichkeit. Beides wird von den ExpertInnen im Sinne des Medians als "gross" angesehen. Im mittleren Bereich (sowohl bezüglich der Potenziale wie auch bezüglich der Realisierungswahrscheinlichkeiten) liegen die Infektionskrankheiten, die kardiovaskulären Krankheiten, die Autoimmunkrankheiten wie auch die Stoffwechselkrankheiten. Dabei sollten die Un-

terschiede in der relativen Lage nahe beieinander liegender Punkte *nicht* überwertet werden (im statistischen Sinne ist sie nicht signifikant).

Am wenigsten dürfte die Nanotechnologie nach Einschätzung der ExpertInnen für die Alzheimer'sche Krankheit bringen, sowohl bezüglich des Potentials wie auch bezüglich der Realisierungswahrscheinlichkeiten. Diese Einschätzung macht nach unserer Meinung durchaus Sinn; denn im Gegensatz etwa zum Krebs ist über die Ätiologie dieser Krankheit noch sehr wenig bekannt. Entsprechend schwierig ist es dann auch, in diesem Bereich Mutmassungen über die Bedeutung der Nanotechnologie anzustellen. Entsprechend wird sie aus heutiger Sicht als gering angenommen.

Im Übrigen ist zu betonen, dass die in obiger Abbildung zusammengefassten Resultate mögliche *Einschränkungen der Anwendung* (z.B. juristischer oder ökonomischer Art) *nicht* berücksichtigen.

Kasten 12: Therapie von Herz- und Krebserkrankungen

Ein Team um Thomas Sawitowski von der Universität Essen entwickelt spezielle Implantat-Oberflächen für die Kardiologie und Onkologie. Neuartige keramische Nanobeschichtungen rüsten die Implantate so aus, dass von ihrer Oberfläche therapeutisch aktive Substanzen in den Körper gelangen.

Die Forscher erhoffen sich davon in naher Zukunft schonendere Therapien, welche die heute üblichen Verfahren ersetzen oder zumindest ergänzen sollen. Damit werden zum Beispiel Tumorbehandlungen ohne Operation möglich, indem man durch schmale Kanülen entsprechende Implantate appliziert. Die Essener Methode soll sich neben der Krebstherapie auch für die Behandlung von Herzerkrankungen eignen.

3.4 Risiken

Obwohl die Nanotechnologie erst in ihren Anfängen¹ steckt, hat sich bereits eine intensive Risikodiskussion entfacht (vgl. stellvertretend für andere Kleiner und Hogan (2003) oder Naica-Loebell (2003)). Die Debatte dreht sich um die Gefahren der *Nanotoxizität* und der *Nanopollution*.

¹ Dies bedeutet *nicht*, dass die Nanotechnologie in Teilbereichen nicht schon bald "industriellen" Status erreichen wird, etwa bezüglich der Produktion von Nanoröhren, wenn man den Verlautbarungen einschlägiger Unternehmen glauben will (vgl. z.B. das Communiqué Nr. 76 der etc-group, p. 5, www.etcgroup.org).

Etwas vereinfacht geht es bei der Nanotoxizität darum, dass allein schon die Kleinheit der Nanopartikel zu toxischen Reaktionen führen könnte (vgl. auch Kasten 13). Denn durch die im Verhältnis zur Masse sehr grosse Oberfläche sind Nanopartikel sehr reaktionsfreudig, was die Bildung von hochreaktiven Radikalen begünstigen kann (vgl. z.B. Hett 2003). Von diesen ist bekannt, dass sie das Körpergewebe schädigen und u.a. auch an der Entstehung von Tumoren beteiligt sein können. Nanopartikel verfügen zudem (mindestens zum Teil) über eine hohe Mobilität und könnten über die Haut oder via Lunge oder Magen-Darm-Trakt in den Körper eindringen und sich über die Blutbahn oder das Lymphsystem ausbreiten. Je länger sie sich in der Blutbahn aufhalten, desto grösser könnte die Wahrscheinlichkeit werden, dass sie in andere Organe eindringen können, Herz Nieren, Muskelgewebe oder Hirn. Letzteres verlangt deshalb besondere Aufmerksamkeit, weil die Blut-Hirn-Schranke als sehr undurchlässig gilt aber die Gefahr besteht, dass Nanopartikel trotzdem das Gehirn erreichen, sich dort akkumulieren und möglicherweise toxisch wirken können.

Kasten 13: Mögliche Folgen "unfreiwilliger" Aufnahme von Nanopartikeln

Die Immunologin Silvana Fiorito von der Universität von Montpellier in Frankreich untersucht den Effekt von verschiedenen grossen Kohlenstoffteilchen mit unterschiedlicher Struktur auf Zellen von Ratten. Strukturen von 1 Mikrometer Länge verursachen eine heftige Immunreaktion. Nanometergrosse Partikel, inklusive fussballförmige Fullerene, schleichen sich aber "unbemerkt" in die Zellen hinein und werden toleriert.

Einerseits ist dies für eine gezielte Medikamentenabgabe positiv zu bewerten. Andererseits fragen sich Forscher an der Rice University in Houston, Texas, welche negative Auswirkungen diese "problemlose" Aufnahme solcher Teilchen in der Zelle haben könnte. Die Gruppe von Jennifer West fand, dass Proteine sich an die Oberfläche von Nanopartikeln anlagern können. Dies kann die Struktur der Proteine und dabei ihre Funktion verändern. Verklumpungen könnten auch zu Thrombosen führen.

Mark Wiesner fragt sich, welche Konsequenzen die Aufnahme und Akkumulation von nanobasiertem Material durch lebende Zellen, inklusive Bakterien, auch für die Umwelt haben könnten. Über Bakterien könnten sie so in die Nahrungskette eingeschleust werden. Zur Zeit werden Versuche mit verschiedenen an Nanomaterialien angelagerten toxischen Verbindungen durchgeführt, um abzuklären, ob sich diese so "per Huckepack" in Zellen einschleusen lassen.

Mit der Nanopollution ist die mögliche Verschmutzung der Umwelt durch gegebenenfalls toxische oder sonst wie schädlich wirkende Nanopartikel gemeint (vgl. z.B. Kasten 14). Insbesondere wird dabei an mögliche Inkorporationswege über die Nahrungskette oder über das Einatmen gedacht.

Von Kritikerseite wird hervorgehoben, dass über potenzielle Schädlichkeit der Nanopartikel je nach Partikelart im Einzelnen (noch) nichts oder nur wenig bekannt sei. Entsprechend vorsichtig müsse man im Umgang mit diesen Partikeln sein, vor allem dann, wenn deren Produktion und Anwendung aus dem gesicherten Laborumfeld in einen industriellen Massstab übergeführt würde. Bereits wird z.B. von der etc-group ein Moratorium für die Produktion von Nanoteilchen gefordert (vgl. z.B. die NZZ vom 18. Juli 2003).

Dazu kommt die Befürchtung, dass es in einer sehr langfristigen Optik (weit jenseits des Jahres 2020, vgl. Abschnitt 2.4) heute kaum einschätzbare Risiken geben könnte. Z.B. könnten sich nach einem Unfall selbstreplizierende Nanostrukturen unkontrolliert vermehren und dabei Mensch und Umwelt bedrohen.

Kasten 14: Vorsicht vor Nanoröhren

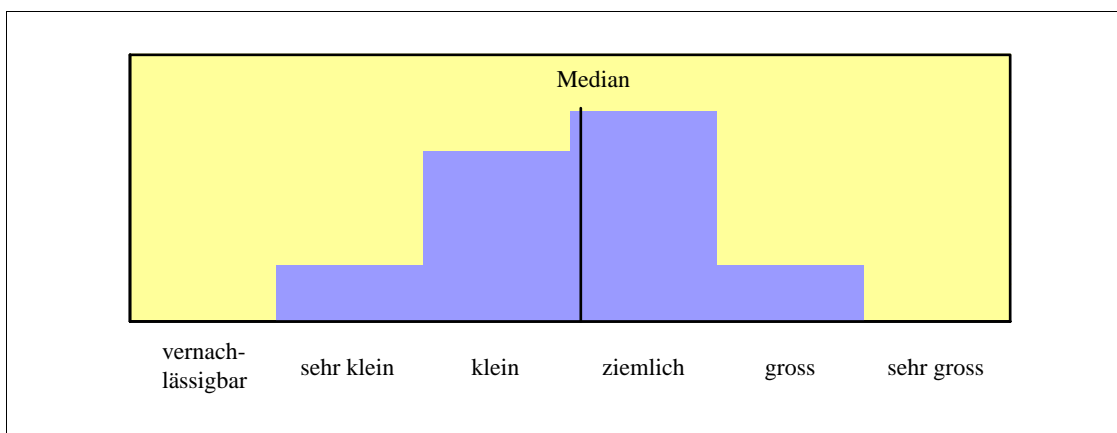
Bei der Produktion von Nanoröhren schützen sich Arbeiter mit Masken, die ein Inhalieren verhindert. Chiu-Wing Lam (Wyle Labor der NASA in Houston) und Robert Hunter (University of Texas, Health Science Center) untersuchten den Effekt von Nanoröhren auf die Lunge. Um die Einnahme präzise zu kontrollieren, gaben sie eine Suspension davon direkt in die Lungen von Mäusen anstatt sie inhalieren zu lassen. Nach einigen Wochen und Monaten fand Hunter, dass die Nanoröhren Klumpen bildeten, die von so genannten Makrophagen, Fresszellen des Immunsystems, umgeben waren. Diese Reaktion verursacht Narben in der Lunge. Eine weitere Studie von David Warheit (Haskell Labor von Du Pont in Newark USA) fand heraus, dass sich die Nanoröhren genügend zusammenklumpen, um die Bronchien zu verstopfen, so dass im Tierexperiment Ratten daran ersticken.

Für die vorliegende Untersuchung beschränkten wir uns in der Befragung der ExpertInnen auf jene Risiken, wie sie aus der *Nanotechnologie in der Medizin* entstehen könnten. Wir klammern also die eingangs erwähnten allgemeinen Risiken aus, was natürlich *nicht* bedeutet, dass sie nicht dringend und von unabhängiger Seite näher untersucht werden müssten (vgl. auch unsere Empfehlungen in Abschnitt 9).

Um ein allfälliges Risiko einigermaßen objektiv einschätzen zu können (z.B. mittels so genannter Risikoanalysen), muss man das "risikobehaftete" System möglichst genau kennen. Wie aus den Ausführungen der vorangehenden Abschnitte in Bezug auf medizinische Anwendungen klar geworden sein dürfte, ist aber heute erst in Umrissen absehbar, was technisch gesehen Nanotechnologie in der Medizin bedeuten könnte. Auch wenn es bereits erste Überlegungen dazu gibt, wie man methodisch in einem solchen Fall vorgehen könnte (vgl. z.B. von Gleich 2003), kann *heute* eine Antwort auf die Risikofrage kaum mehr als eine tentative ExpertInnen-Einschätzung sein.

Entsprechend haben wir in der zweiten Runde der Technologie-Prognose die ExpertInnen direkt nach der Wahrscheinlichkeit für ein toxikologisches Risiko bei medizinischen Anwendungen der Nanotechnologie gefragt. Damit ist gewissermaßen die Gretchenfrage für die Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin gestellt. Sie ist eigentlich an die "Falschen" gerichtet, aber niemand anderer könnte *heute* hier eine Antwort geben (weil, wie gesagt, die notwendigen Kenntnisse fehlen). Das Resultat der Expertenbefragung zeigt Abbildung 3-6. Das Resultat ist insofern etwas überraschend, als die häufigste Nennung "ziemlich" lautet.

Abb. 3-6: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 26) für die These: "Nanopartikel, die in der Medizin angewandt werden sollen, könnten sich als toxisch (oder im weiteren Sinne als "gefährlich") erweisen."



Was könnten das für Risiken sein? Um hier eine Idee zu vermitteln, haben wir einige Bemerkungen der ExpertInnen zusammengefasst. Wenn Nanopartikel nicht stabil sind, könnte es unbekannte Sekundäreffekte geben. Umgekehrt könnten dauerhafte Partikel zu Problemen führen, wenn sie nicht ausgeschieden werden können. Grössere Partikel im Mikrometerbereich könnten Thrombosen in

den Kapillaren auslösen. Die Konsequenzen der Interaktion von Immunsystem und Nanopartikeln sind offen. Unvorhergesehene katalytische Prozesse könnten durch Nanopartikel ausgelöst werden. So wird beispielsweise Gold normalerweise als katalytisch inaktiv betrachtet, aber bei Partikeln mit Durchmessern kleiner als 5 Nanometer wird Gold katalytisch sehr aktiv. Eine mögliche Toxizität von Nanopartikeln hängt auch von ihrer chemischen Zusammensetzung ab. So sollte etwa Cadmium für die Herstellung von Quantenpunkten vermieden werden.

Verschiedene ExpertInnen wiesen in diesem Zusammenhang ausdrücklich darauf hin, dass es bei der Risikoabwägung für die medizinische Anwendung auch darum gehe, das "Alles-über-alles-Risiko" zu verringern. Wenn durch den Einsatz von nanotechnologischen Mitteln beispielsweise ein Medikament zielgenau und in der optimalen therapeutischen Dosis eingebracht werden könne, dann reduziere dies in grossem Masse auch die klassischen Nebenwirkungen.

Die Einschätzung der ExpertInnen bezüglich der möglichen Risiken zeigt auf, dass diese nicht einfach unter den Tisch gekehrt werden dürfen. Insofern diese Risiken toxischen Charakter haben, müssen die entsprechenden Nanopartikel wie gewöhnliche Medikamente behandelt werden, d.h. die möglichen Nebenwirkungen müssten genauestens untersucht werden, bevor an einen klinischen Einsatz gedacht werden kann. Da Nanopartikel aber grösser sind als die Moleküle klassischer Medikamente, sind auch neue Typen von Reaktionen denkbar.

Nach Ansicht der ExpertInnen, die wir im Rahmen der Technologiefolgen-Abschätzung zu dieser Thematik befragt haben, öffnen sich damit zwar keine *grundsätzlich* neuen Risikofelder, weil die bisher üblichen Vorkehrungen zur Bewältigung solcher Risiken ausreichend sein sollten. Aber Risikoforschung und Risikoanalyse müssten *integrierender Bestandteil* aller medizinischer Entwicklungen der Nanotechnologie sein, genauso wie bei der medizinischen Anwendung von andern Technologien. In Kapitel 7 kommen wir darauf zurück.

Das oben zitierte Resultat über mögliche toxische Risiken der Nanotechnologie in der Medizin hat nach unserer Einschätzung auch Konsequenzen für die allgemeine Risikodiskussion. Wenn schon im *kontrollierten medizinischen* Umfeld die Wahrscheinlichkeit für Toxizitäts-Probleme als nicht vernachlässigbar eingeschätzt wird, könnten diese Probleme angesichts der Vielzahl möglicher Nanoteilchen in andern Anwendungsbereichen und der Vielzahl möglicher Ausbreitungs- und Inkorporationswege für die allgemeine Risikodiskussion der Nanotechnologie von ähnlicher oder noch grösserer Bedeutung sein.

Oben haben wir auch die von einigen Kritikern der Nanotechnologie befürchtete Möglichkeit erwähnt, dass sich selbstreplizierende Strukturen nach einem Unfall Mensch und Umwelt bedrohen könnten. Als *reale* Bedrohung ist dies im Betrachtungszeitraum dieser Untersuchung sicher gänzlich irrelevant (vgl. Abschnitt 2.4). Die Frage bleibt aber, ob für die Risikodiskussion der Nanotechnologie bis 2020 diese (bloss theoretischen?) Möglichkeiten nicht auch von Belang sein könnten, etwa in dem Sinne, dass diese Befürchtungen z.B. die Akzeptanz von nanobasierten Medikamenten in Frage stellen könnten.

Eine entsprechende Frage haben wir den ExpertInnen zur Technologiefolgen-Abschätzung gestellt. Eine grosse Mehrheit der ExpertInnen ist tatsächlich der Meinung, dass diese in einer fernerer Zukunft liegenden Gefahren durchaus eine gewisse Bedeutung für die Risikodiskussion der Nanotechnologie generell haben. Aber man müsse aufpassen – wie es ein Experte formulierte, der *für* einen frühzeitigen Einbezug dieser Gefahren in die Risikodiskussion plädierte –, dass dabei die Wissenschaft nicht zum vornherein in eine kriminalistische Ecke gestellt würde. Ein Experte meinte – nicht untypisch –, dass "schlafende Hunde, die geweckt wurden, eben auch untersucht werden sollten". Andere Experten vertraten demgegenüber die Auffassung, dass diese Risiken so weit weg seien und auch so unwahrscheinlich sind, dass wir uns im Moment lieber um reale, uns echt bedrohende Risiken kümmern sollten.

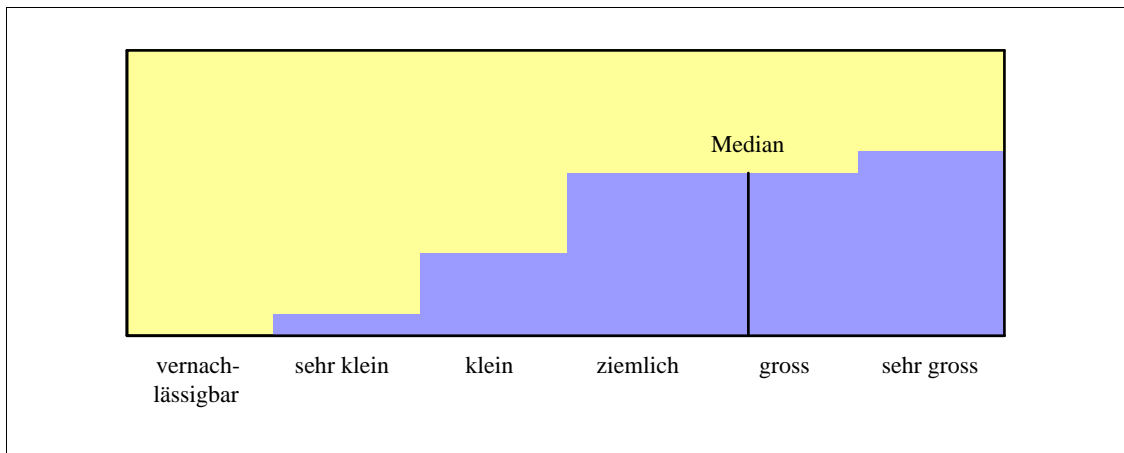
4 Auswirkungen in der Medizin

In Abschnitt 3.1 haben wir schon die wachsende *Bedeutung* der Nanotechnologie in der Medizin in den Bereichen Forschung, Diagnose und Therapie dargestellt. In diesem Kapitel wird diese wachsende Bedeutung in Form von Auswirkungen konkretisiert und auf sieben Krankheitsgruppen bezogen.

4.1 Medizinische Forschung

Die Bedeutung der Nanotechnologie in der medizinischen Forschung wird von den ExpertInnen bis 2020 als gross bis sehr gross eingeschätzt. Was bedeutet dies? Sind spektakuläre Durchbrüche dank nanotechnologischer Methoden zu erwarten? Natürlich kann man hier nur "spekulieren". Wir haben die ExpertInnen der Technologie-Prognose aber dennoch danach gefragt. Von einigen Skeptikern abgesehen sind sie sich sehr einig: Die Wahrscheinlichkeit dafür wird im Sinne des Medians als gross angesehen (vgl. Abbildung 4-1). Dabei muss beachtet werden, dass in der wahrscheinlichkeitsmässig zu bewertenden These ausdrücklich von "spektakulären" Durchbrüchen die Rede war.

Abb. 4-1: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 30) für die These: "Die Nanotechnologie wird spektakuläre Durchbrüche in der medizinischen Forschung bis 2020 ermöglichen."



Natürlich wollten wir wissen, woran die ExpertInnen hier denken. Es wurde eine breite Palette von möglichen Durchbrüchen genannt. Hier eine Liste der häufigsten und interessantesten Nennungen: Nanotechnologie ...

- erlaubt die Untersuchung lebender (Zell-)Strukturen, was viel "authentischere" Einsichten in die molekularen Prozesse ermöglicht als die heutigen Ansätze in vitro; damit wird das molekulare Verständnis von Gesundheit und Krankheit des Menschen massiv zunehmen
- kann bei der Entdeckung neuer Wirkstoffe/Medikamente einen wichtigen Beitrag leisten
- ermöglicht weitaus gezieltere und effizientere Gen- und Krebstherapien
- beschleunigt die Forschung in der Proteomik
- eröffnet völlig neue Möglichkeiten im Bereich der Gehirnforschung
- unterstützt die Forschung im Bereich der Oberflächenbehandlung von implantierten Materialien zur Verbesserung der Biokompatibilität
- verbessert die Diagnostik in vivo bis hin zu implantierten Diagnoseelementen u.a.

Natürlich muss man diese Liste mit einer gewissen Skepsis zur Kenntnis nehmen, in dem sie *auch* Zielvorstellungen der in der Nanotechnologie aktiven Wissenschaftler beinhaltet.

4.2 Diagnose

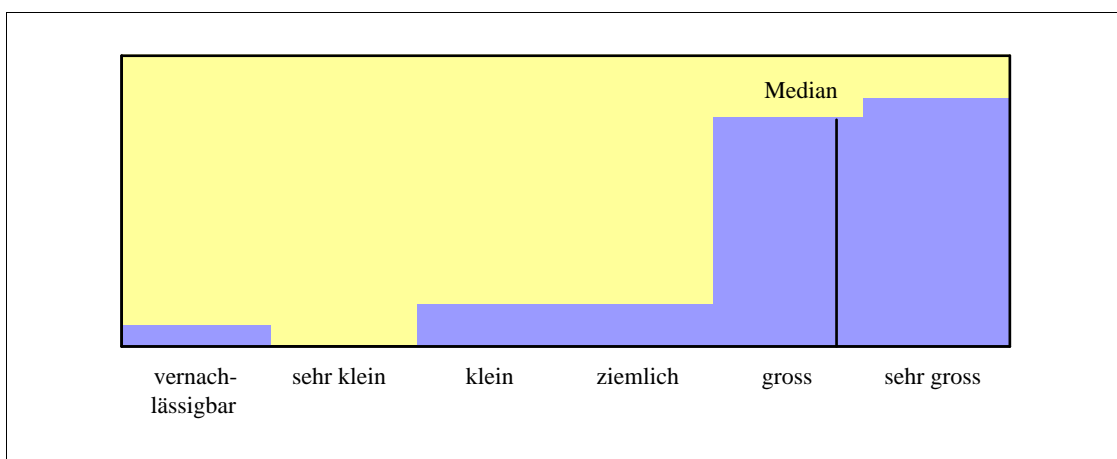
In der ersten Befragungsrunde zur Technologie-Prognose war die künftige Rolle der Nanotechnologie für die Diagnose nur unwesentlich tiefer eingeschätzt wor-

den als für die medizinische Forschung. Anwendungsmöglichkeiten werden vor allem beim Ersatz und der Verbesserung bestehender Diagnosetechniken gesehen. Vor allem eröffnet sich über die Nanotechnologie die Möglichkeit, medizinische Bildgebungsverfahren bis zur molekularen Auflösung zu steigern. Auch wird die Möglichkeit gesehen, gewissermassen am Patientenbett mit "Handgeräten" auch komplizierte Diagnosen durchführen zu können (z.B. über Blutanalysen oder die Analyse der Ausatemluft). Diagnostische Fortschritte werden auch darin gesehen, dass eine Vielzahl von Substanzen auch in kleinsten Mengen gleichzeitig analysiert bzw. detektiert werden können und so komplexe Diagnoseprofile möglich werden. Und last but not least ist natürlich die Entdeckung von emergenten (neuen) Krebszellen bei Krebspatienten nach einer erfolgreichen Therapie ein grosses Thema.

Wir wollten deshalb in der zweiten Runde wissen, ob dies bedeute, dass nanobasierte Diagnoseverfahren schon bald nicht mehr nur die Ausnahme sondern die Regel bedeuten könnten. Die Antwort der ExpertInnen ist sehr klar (vgl. Abbildung 4-2): Abgesehen von ganz wenigen Skeptikern wird diese Wahrscheinlichkeit als gross bis sehr gross taxiert.

Wenn der Einfluss der Nanotechnologie in der medizinischen Diagnostik so gross werden dürfte: In welchem Sinn würde sich dann der durchschnittliche "diagnostische Akt" im Vergleich zu *heute* verändern? Natürlich kann man genau besehen diese Frage gar nicht richtig beantworten. Denn zu vielfältig können Diagnoseverfahren sein, von den zu diagnostizierenden Tatbeständen ganz abgesehen.

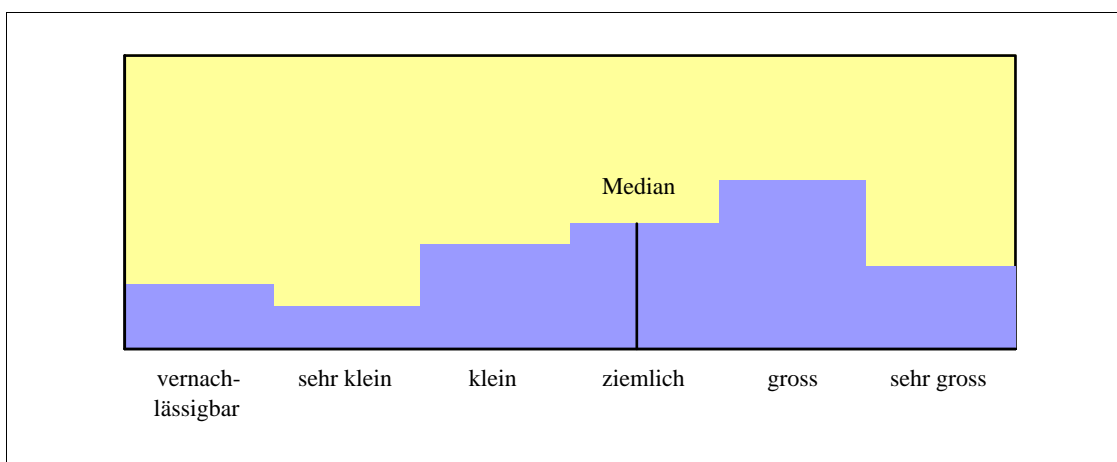
Abb. 4-2: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 28) zu folgender These: "Nanobasierte Diagnoseverfahren sind bis 2020 die Regel statt die Ausnahme."



Wir haben aber dennoch versucht, einige wesentliche *Attribute* von nanobasierenden diagnostischen Akten gewissermassen als plausiblen Durchschnitt in Erfahrung zu bringen und in der zweiten Runde der Technologie-Prognose die ExpertInnen entsprechend befragt.

Werden nanobasierte Diagnosen *technisch einfacher* sein als vergleichbare heutige Diagnosetechniken? Offensichtlich sind sich die ExpertInnen ziemlich uneins, wobei einige wenige Experten sehr skeptisch sind (vgl. Abbildung 4-3). Es wird in einigen Bereichen wohl technisch einfacher werden, muss es aber nicht. Gesamthaft gesehen darf die Wahrscheinlichkeit dafür aber nicht allzu gross eingeschätzt werden.

Abb. 4-3: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 28) zu folgender These: "Ein einzelner diagnostischer Akt wird im allgemeinen technisch einfacher werden."



Bei der Frage nach der *Geschwindigkeit* nanobasierter Diagnoseverfahren sind sich die ExpertInnen hingegen sehr einig. Die überwiegende Mehrheit ist der Meinung, dass diese mit grosser oder sehr grosser Wahrscheinlichkeit im Allgemeinen viel schneller sind als heutige Diagnoseverfahren (vgl. Abbildung 4-4). Der Hauptgrund für diese Einschätzung ist klar: Nanobasierte Diagnoseverfahren können ganz grundsätzlich sehr viel "paralleler" laufen als bisherige Verfahren, d.h. es können sehr viel stärker als bisher verschiedene Items gleichzeitig überprüft werden.

Ein wichtiges Argument für nanobasierte Diagnosen ist deren mutmasslich sehr viel *grössere Spezifität*¹ als sie klassische Verfahren aufweisen. Auch hierfür er-

¹ *Spezifität* bedeutet hier das Vermögen, nur ganz bestimmte Substanzen (Proteine, Enzyme, DNA-Stränge usw.) nachzuweisen und ist von der *Genauigkeit* des Nachweises zu unter-

gibt sich unter den ExpertInnen eine breite Zustimmung (vgl. Abbildung 4-5). Auch diese Einschätzung leuchtet ein, wenn man z.B. das nano-basierte Targeting als breit angewendete Querschnittstechnologie voraussetzt

Abb. 4-4: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 29) zu folgender These: "Ein einzelner diagnostischer Akt wird im allgemeinen viel schneller durchgeführt werden können."

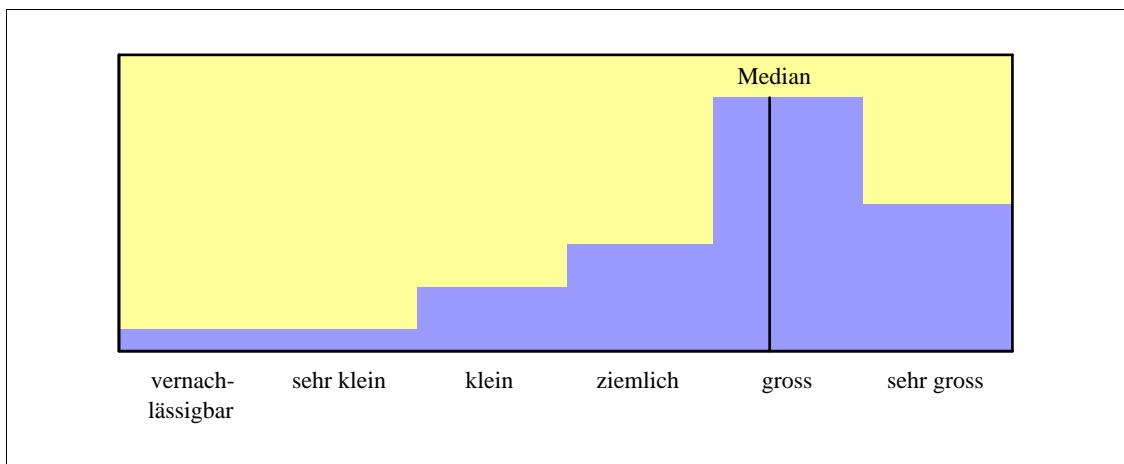
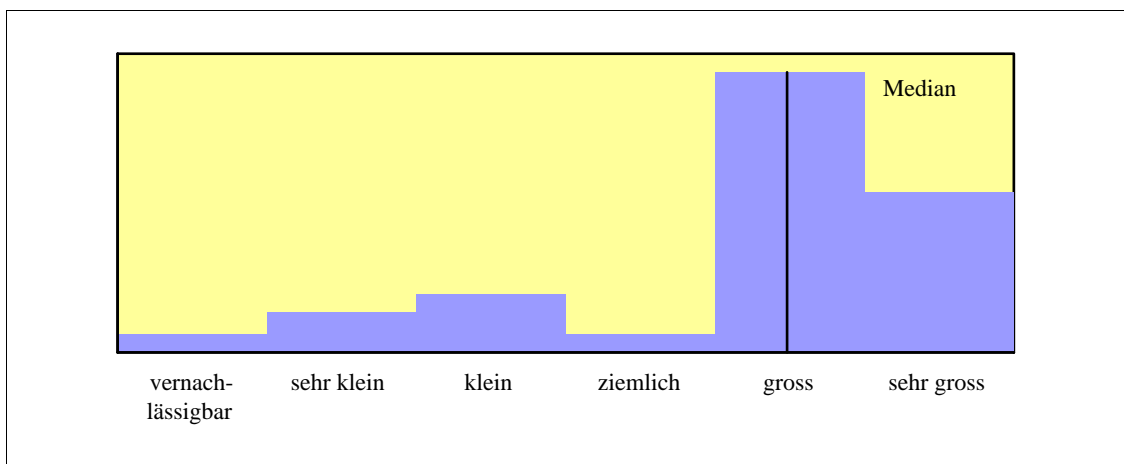


Abb. 4-5: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 29) zu folgender These: "Ein einzelner diagnostischer Akt wird im allgemeinen sehr viel spezifischer werden."

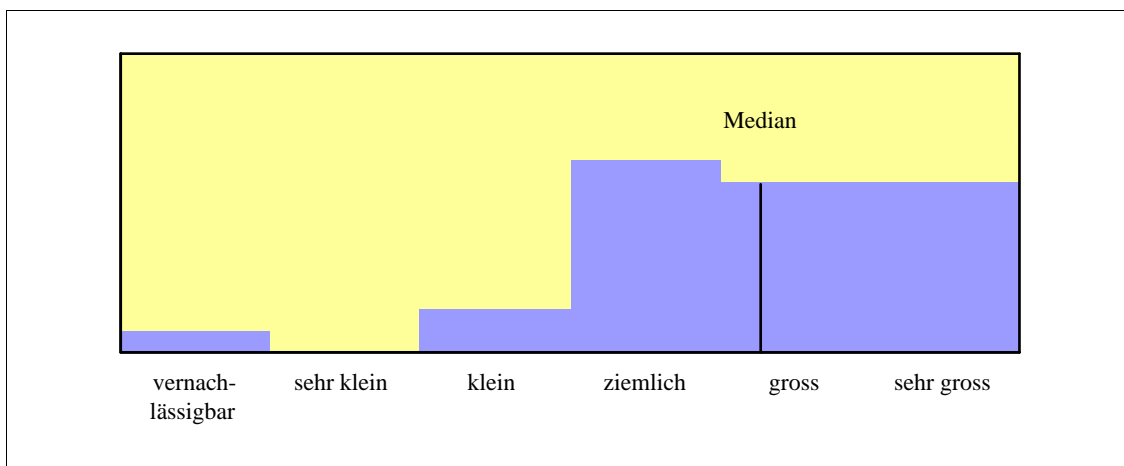


Ein wichtiger Vorteil nanobasierter Diagnosen sollte darin liegen, dass diese wegen der grösseren Spezifität und Genauigkeit sehr viel früher, d.h. ganz am An-

scheiden. Wir haben die ExpertInnen tatsächlich getrennt nach Spezifität und Genauigkeit befragt, mit praktisch identischem Resultat.

fang einer Krankheit, durchgeführt werden könnten. Insbesondere *nach* einer Krebstherapie wäre dies z.B. von grosser Bedeutung, könnte man doch so ein allfälliges Wiederaufflackern des Krebses sehr früh erkennen. Auch hierfür zeichnet sich nach den Aussagen der ExpertInnen eine recht grosse Wahrscheinlichkeit ab (vgl. Abbildung 4-6).

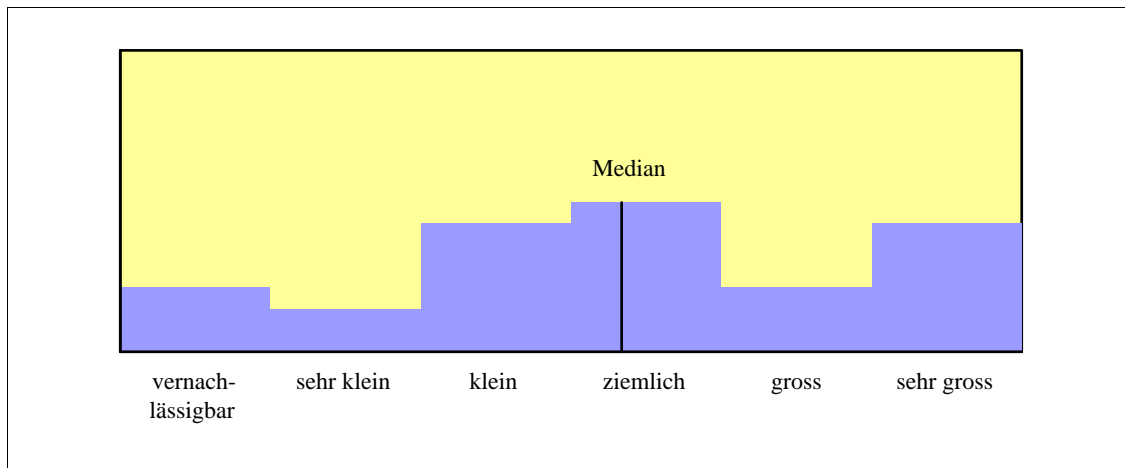
Abb. 4-6: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 28) zu folgender These: "Diagnosen können sehr viel früher (d.h. ganz am Anfang einer Krankheit oder sogar vor Ausbruch einer Krankheit) durchgeführt werden."



Und die gesundheitsökonomische Gretchenfrage: Wird es *billiger* werden? Hier streuen die Meinungen sehr stark (vgl. Abbildung 4-7). Gesamthaft gesehen scheinen damit die grossen diagnostischen Möglichkeiten der Nanotechnologie nicht mit einer deutlichen Verbilligung einherzugehen. Man wird in diesem Bereich zwar deutlich mehr können, aber viel billiger wird es für den einzelnen diagnostischen Akt nicht werden. Diese Einschätzung ist aus unserer Sicht durchaus plausibel, aber was ein einzelner diagnostischer Akt ist, lässt gerade bezüglich der Kosten einen erheblichen Interpretationsspielraum zu.

Zusammenfassend könnte man also sagen: *Einzelne Diagnosen werden schneller, können schon im Frühstadium einer Krankheit durchgeführt werden, liefern spezifischere und genauere Resultate, und werden vermutlich nicht sehr viel billiger – wenn überhaupt.*

Abb. 4-7: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 27) zu folgender These: "Ein einzelner diagnostischer Akt wird im allgemeinen viel billiger werden."



4.3 Therapie

In der globalen Betrachtung wird von den ExpertInnen der Technologie-Prognose die Bedeutung der Nanotechnologie in der Therapie in den kommenden 10 bis 15 Jahren deutlich geringer eingeschätzt als für die medizinische Forschung und die Diagnose (vgl. Abbildung 3.1). Doch bis zum Jahr 2020 und darüber hinaus dürfte die Bedeutung der Nanotechnologie in der Therapie stark zunehmen. Könnte dies damit auch im therapeutischen Bereich einen gewissen Paradigmenwechsel bedeuten?

Konkret wollten wir von den ExpertInnen in der zweiten Runde der Technologie-Prognose erfahren, ob nanobasierte Therapien die Medizin deutlich verändern würden, und zwar schon in den nächsten 20 Jahren. Tatsächlich sind die ExpertInnen der Meinung, dass die Wahrscheinlichkeit dafür relativ gross ist (vgl. Abbildung 4-8).

Wenn das aber so ist, was hätte dies für Konsequenzen für einen einzelnen therapeutischen Akt? Auch hierzu stellten wir einige Ergänzungsfragen, um eine Idee zu erhalten, inwiefern sich nanobasierte Therapien von heutigen Therapien ganz allgemein unterscheiden könnten. Zunächst könnten nanobasierte Therapien *technisch* (d.h. in der praktischen Anwendung) *einfacher* werden. Diesbezüglich sind sich die ExpertInnen ziemlich uneins (vgl. Abbildung 4-9). Eine Erklärung dafür könnte darin bestehen, dass die "technische Einfachheit" nicht nur eine intrinsische Eigenschaft der Methode darstellt sondern auch davon abhängt, wie verbreitet eine bestimmte Therapieform ist bzw. wie viel "Handlingserfahrung" schon darin enthalten ist.

Abb. 4-8: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 29) zu folgender These: "Nanobasierte Therapien werden die Medizin deutlich verändern – nicht erst in der fernen Zukunft, sondern schon in den nächsten 20 Jahren."

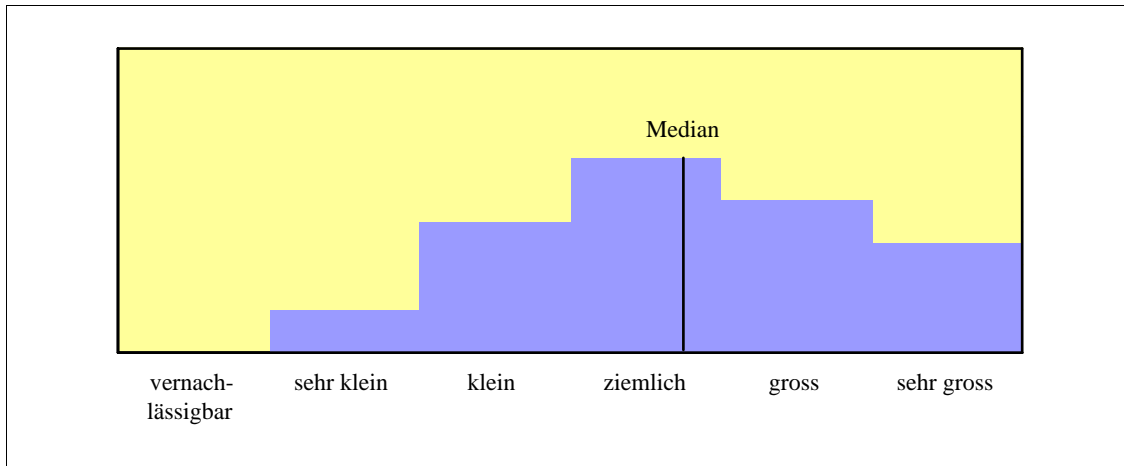
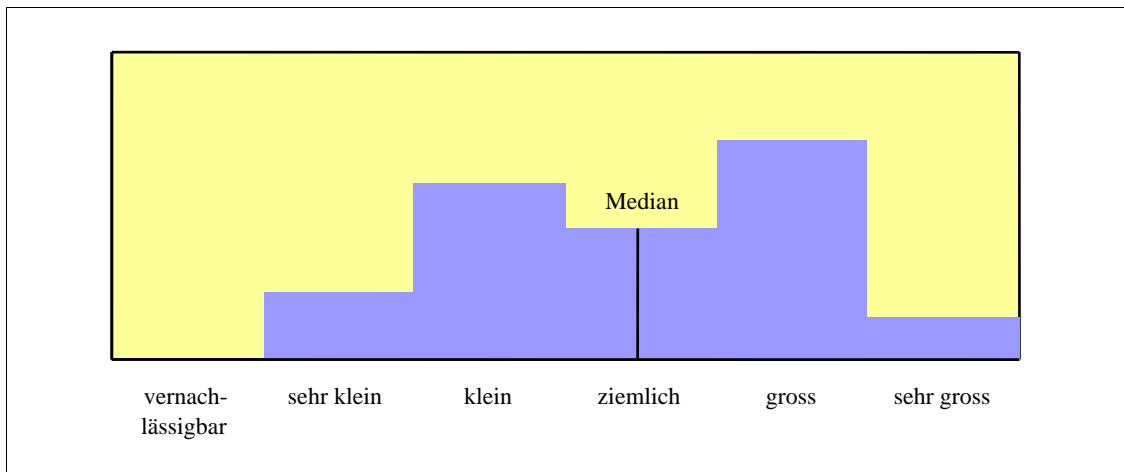
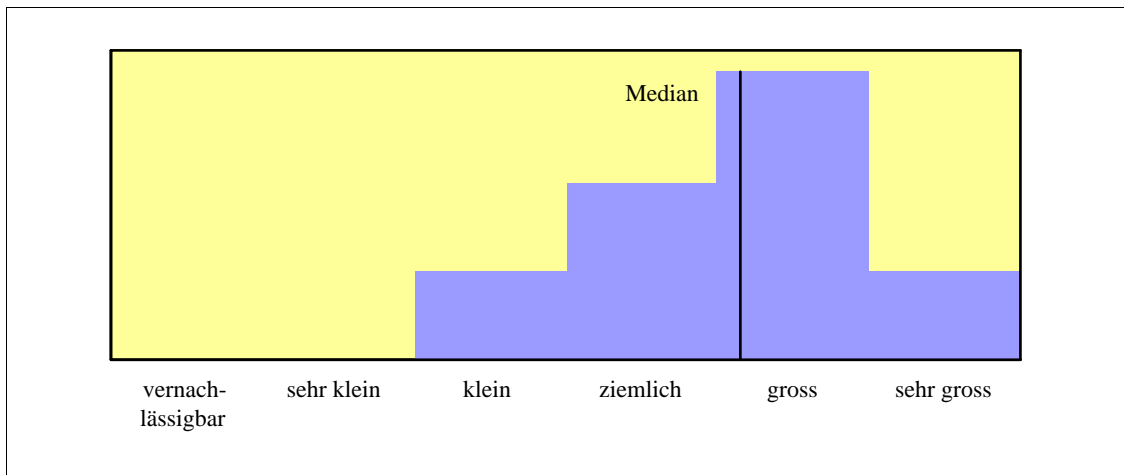


Abb. 4-9: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 29) zu folgender These: "Ein einzelner therapeutischer Akt wird technisch einfacher."



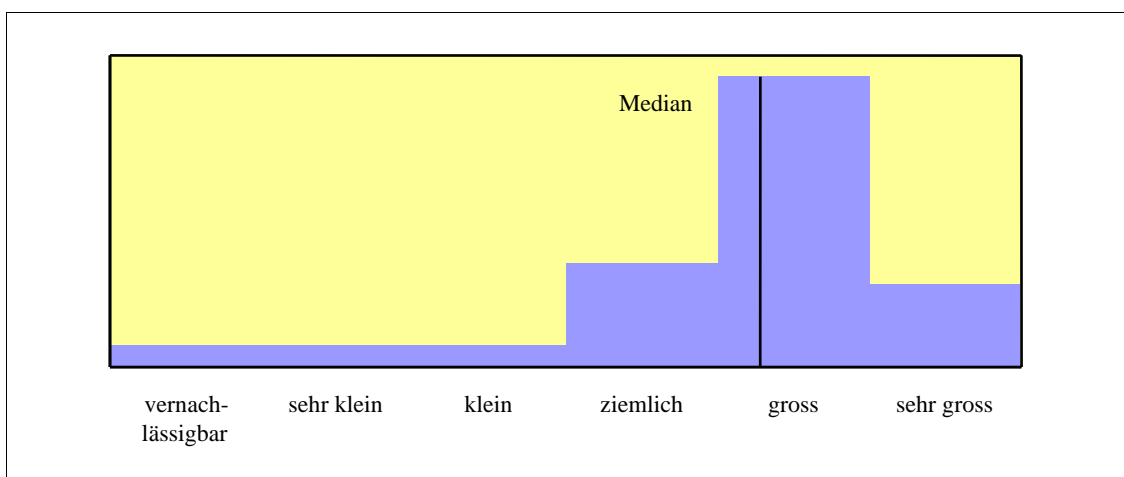
Nach dem bisher Gesagten wäre zu erwarten, dass ein einzelner therapeutischer Akt auch *wirksamer* sein müsste als heutige Therapien (und/oder gar Therapien zulassen, für die es heute noch gar keine Ansätze gibt, etwa bei gewissen Hirntumoren). Nach der allgemeinen Einschätzung der ExpertInnen zeichnet sich das – trotz einiger Skeptiker – recht eindeutig ab (vgl. Abbildung 4-10). Ein Grund für diese Einschätzung liegt darin, dass z.B. die nanobasierte Medikamentenabgabe sehr viel zielgenauer erfolgen kann und damit weniger Tumorzellen "übersehen" werden.

Abb. 4-10: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 29) zu folgender These: "Ein einzelner therapeutischer Akt wird sehr viel wirksamer sein (im Sinne der Outcome-Forschung)."



Was die *Nebenwirkungen* betrifft: Mehr als zwei Drittel der ExpertInnen sind der Meinung, dass diese durch verbessertes Targeting mit grosser oder sehr grosser Wahrscheinlichkeit geringer sein werden (vgl. Abbildung 4-11). Darin sehen die ExpertInnen einen der Grundvorteile nanotechnologischer Therapien (sofern sie überhaupt realisiert werden können).

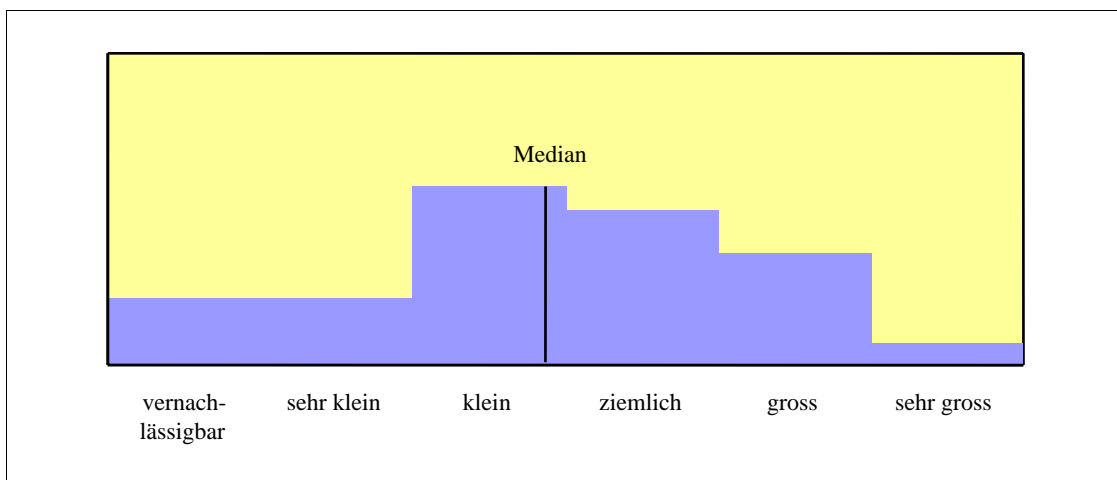
Abb. 4-11: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 26) zu folgender These: "Ein einzelner therapeutischer Akt wird weniger Nebenwirkungen mit sich bringen."



Und auch für die Therapie die Gretchenfrage: Wird es pro therapeutischem Akt *billiger* werden? Nach Ansicht der ExpertInnen ist die Wahrscheinlichkeit dafür

eher klein (vgl. Abbildung 4-12). Dies ist umso bedeutsamer, als die *Zahl* der therapeutischen Eingriffe ja ansteigen dürfte – nicht zuletzt wegen der zunehmenden Therapiemöglichkeiten und wegen der diagnostischen Fortschritte, die den Therapiemöglichkeiten tendenziell ja vorausseilen dürften.

Abb. 4-12: Einschätzung der Wahrscheinlichkeit durch die ExpertInnen (N = 27) zu folgender These: "Ein einzelner therapeutischer Akt wird sehr viel billiger werden."



Etwas pointiert könnte man damit nanobasierte Therapien im Sinne einer Zusammenfassung wie folgt charakterisieren: *Nanobasierte Therapien werden wirksamer und vielleicht technisch auch einfacher, werden (deutlich) weniger Nebenwirkungen haben, aber ziemlich sicher nicht billiger.*

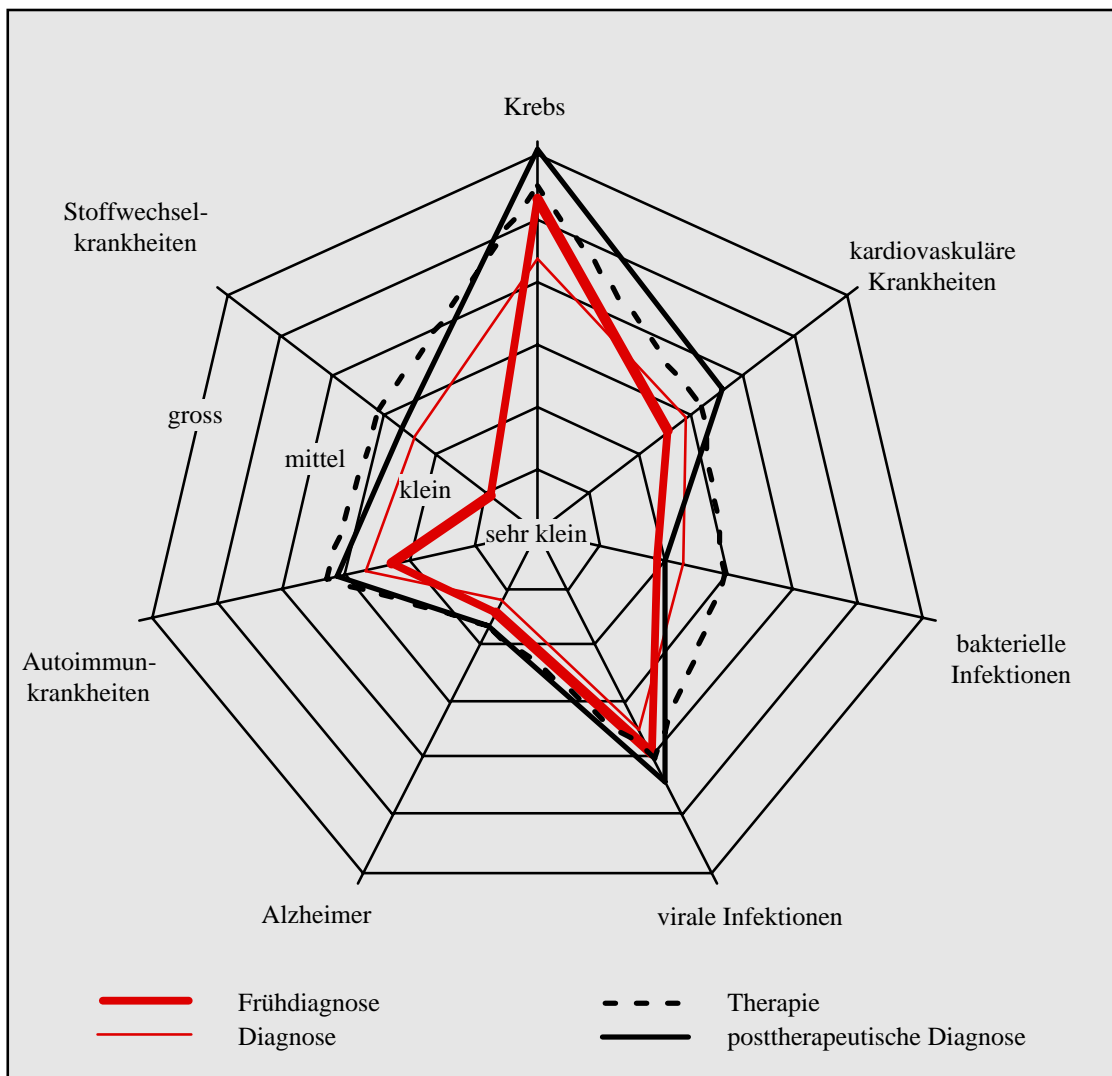
4.4 Auswirkungen in sieben Krankheitsgruppen

In der ersten Befragungsrunde zur Technologie-Prognose hatten wir auch nach der Bedeutung und dem Einfluss der Nanotechnologie in verschiedenen medizinischen "Praxisfeldern" gefragt. Wir hatten dabei drei idealtypische Felder unterschieden, nämlich Forschung, Diagnose und Therapie. Die entsprechenden Einschätzungen der ExpertInnen sollen nun im Hinblick auf die sieben oben ausgewählten Krankheitsgruppen vertieft werden. Dabei haben wir die Forschung weggelassen, dafür aber die Diagnose aufgeteilt in Frühdiagnose, (eigentliche) Diagnose und posttherapeutische Diagnose (gewissermassen entlang einem typischen "Krankheitsprozess").

Für jeden der 4 mal 7 Kombinationsmöglichkeiten wollten wir dann wissen, welche Auswirkungen die Nanotechnologie bis 2020 zeitigen könnte – vergli-

chen mit den heute üblichen Prozeduren. Auf einer Skala von 1 (= vernachlässigbar) bis 6 (= sehr gross) sollten die ExpertInnen ihre Einschätzung vornehmen. Das Resultat zeigt Abbildung 4-13 in Form eines Netzdiagramms. Je weiter aussen eine Marke liegt, desto grösser sind die Auswirkungen in den entsprechenden Krankheitsfeldern einzuschätzen. Im statistischen Sinne signifikant ist ein Positionsunterschied dann, wenn er grob gesprochen dem Abstand zweier konzentrischer Netzlinien entspricht.

Abb. 4-13: Mögliche Auswirkungen (implications) der Nanotechnologie in den sieben ausgewählten Krankheitsfeldern nach Einschätzung der ExpertInnen (N = 31, Mittelwerte)



Vielleicht etwas überraschend liegt die "Therapiekurve" im Sinne der erwarteten Auswirkungen bei allen befragten Krankheitsgruppen praktisch immer zuäus-

erst, mit Ausnahme der bakteriellen Infektionen. Dies scheint ein Stück weit der Gesamteinschätzung der Experten in der ersten Runde der Technologie-Prognose zu widersprechen. Diese waren klar der Meinung gewesen, dass im Zeitraum bis 2020 die Nanotechnologie ganz allgemein im Diagnosebereich eine grössere Rolle spielen würde als in der Therapie. Wir glauben aber, dass die in Abbildung 3-5 zum Ausdruck kommende *Einschätzung für die ausgewählten Krankheitsgruppen* unter dem Aspekt der Auswirkungen in der medizinischen Praxis damit verträglich ist. Denn hier wurde nicht allgemein gefragt, sondern relativ spezifisch in Bezug auf die sieben ausgewählten Krankheitsgruppen.¹ Dazu kommt, dass die ExpertInnen ihre Einschätzungen unter Berücksichtigung aller Kombinationsmöglichkeiten vornehmen konnten, womit eine grössere interne Konsistenz der Antworten zu erwarten ist, als wenn beispielsweise die Krankheitsgruppen oder die Praxisfelder einzeln abgefragt worden wären. (Dies zeigt sich denn auch in den relativ kleinen Streuungen der ExpertInneneinschätzungen.)

Was bedeutet nun das in Abbildung 4-13 dargestellte Auswirkungsmuster? Zunächst: Bei den Krankheiten dürften erhebliche Verschiebungen auftreten. Krebs dürfte anteilmässig deutlich zurückgehen, wobei umgekehrt die typischen Alterskrankheiten, an denen man in der Regel nur nach langem Leiden stirbt, zunehmen. In diesem Sinne könnte der Anteil jener Menschen, die schliesslich an Alzheimer sterben, zunehmen - sicher solange, als bei dieser Krankheit nicht ebenfalls grosse Fortschritte erzielt würden (was im Moment aber nicht absehbar ist). Mit andern Worten: Es ist auch eine Verschiebung der typischen Todesursachen zu erwarten. Einige der befragten Mediziner sind gar recht klar der Meinung, dass die schliesslich entscheidende Todesursache immer stärker im kardiovaskulären Bereich zu finden sein wird. Gesamthaft dürfte damit die Zahl der "vorzeitigen" Todesfälle zurückgehen.

5 Auswirkungen für den Einzelnen

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die Nanotechnologie erhebliche Verschiebungen bei den Krankheiten und auch bei den Todesursachen mit sich bringen könnte. Wichtig dabei ist aber nicht nur der therapeutische, sondern auch der diagnostische "Teil" der Nanotechnologie, denn dieser dürfte tendenziell stärker profitieren, vor allem auch im Bereich der Genanalyse und der Proteomik². Was könnte

¹ Allerdings: Das Ausmass an Spezifität dieser Einschätzungen, das durch die Fokussierung auf sieben Krankheitsgruppen gewonnen wird, darf man auch nicht überschätzen. Man denke nur an die kaum überblickbare Vielfalt von Krebserkrankungen.

² Für die in einem Organismus ablaufenden Prozesse sind nicht die Gene selbst, sondern die Proteine von entscheidender Bedeutung. Der Aufbau der Proteine wird zwar durch die Gene gesteuert, ihre Vielfalt und Komplexität ist aber um ein Vielfaches grösser als jene der

gesamthaft eine solche Entwicklung für den Einzelnen bedeuten? Etwa in Bezug auf die allgemeine Lebensqualität, auf die Gesundheitsvorsorge im Speziellen, auf die Lebensplanung und ganz grundsätzlich auch auf die Wahrnehmung von Krankheit und Tod?

Natürlich dürften diese Auswirkungen sehr vielfältig und auch im Ausmass sehr unterschiedlich sein. Insofern sind die folgenden Ausführungen nicht als "Durchschnitt" zu verstehen, sondern als Darstellung einer Palette von möglichen Auswirkungen, als eine erste Auslegeordnung. Und selbstverständlich: Es geht hier um Tendenzen, die durch die erfolgreiche Nanotechnologie verstärkt würden, nicht um Punktprognosen. Auch ohne Nanotechnologie würde die Medizin Fortschritte machen, vielleicht nur weniger schnell und weniger spektakulär. Aber nicht einmal das ist sicher.

Weiter ist zu beachten, dass sowohl die konkreten Auswirkungen wie auch deren Beurteilung naturgemäss sehr stark von den individuellen Gegebenheiten (Alter, Geschlecht, Gesundheit, sozioökonomischer Status usw.) abhängen. Zudem ist die Abgrenzung zu den gesellschaftlichen Wirkungen (vgl. Kapitel 6) zum Teil etwas arbiträr.

Die eingangs angesprochenen Fragen waren Gegenstand der Befragung zur Technologiefolgen-Abschätzung und einiger vertiefender Fragen in Ergänzung dazu (vgl. auch Kapitel 1). Gesamthaft sind hier die Meinungen von 36 ExpertInnen eingeflossen. Wir präsentieren hier die wichtigsten Resultate und Überlegungen. Wir haben hier bewusst keine quantitativen Auswertungen vorgenommen, sondern geben die von uns aufgearbeiteten Meinungen der ExpertInnen im Sinne einer qualitativen und eher knapp gehaltenen Synthese wieder. Wir unterscheiden dabei die drei Dimensionen Lebensqualität, Gesundheitsvorsorge und Lebensplanung sowie Krankheit und Tod. Den Schluss bildet ein kurzer Abschnitt über die ethische Dimension der Anwendungen der Nanotechnologie in der Medizin.

5.1 Lebensqualität

Unter Lebensqualität verstehen wir grob gesprochen die Gesamtheit aller Elemente, die das subjektive Wohlbefinden eines Menschen ausmachen. Dabei interessiert uns hier die mutmassliche Veränderung, die die Lebensqualität des Einzelnen durch in Kapitel 4 angedeuteten Auswirkungen der Nanotechnologie in der Medizin haben könnte.

Gene. Zudem ist ihre Funktion variabel. Die Untersuchung dieser Zusammenhänge ist Gegenstand der Proteomik.

Die nachstehenden Ausführungen sollen den Grundtenor der Experteneinschätzungen zum Thema Lebensqualität deutlich machen. Sie rekapitulieren zudem die wichtigsten Argumente, die zur Begründung der jeweiligen Position angeführt wurden.

Eine deutliche Mehrheit der ExpertInnen ist alles in allem der Meinung, dass die mutmasslichen Effekte der Nanotechnologie in der Medizin eine deutliche *Steigerung* der Lebensqualität bringen dürften. Die krankheitsarme Lebensspanne wird zunehmen, indem viele Krankheiten heilbar(er) werden, Therapien weniger Nebenwirkungen haben und, last but not least, weil durch Früh- und Ultrafrühdagnostik bislang nicht anwendbare präventive Massnahmen möglich werden. Und natürlich: Die Menschen werden dadurch *ceteris paribus* älter werden.

Auch wenn die Lebensqualität im genannten Sinne zunehmen wird, bleibt aber – wie es ein Experte treffend ausdrückte – das "memento mori" bestehen; jeder weiss auch künftig, dass er sterben muss. Für viele ExpertInnen ist klar, dass wir ein stärkeres Bewusstsein für die damit verbundene grössere Eigenverantwortung für unsere eigene Zukunftssicherung und Gesundheitsvorsorge brauchen werden und auch praktizieren müssen.

Bisher schicksalhafte Krankheiten werden vermeidbar oder gelten bald als heilbar. Die Beschäftigung mit der Vermeidung von Krankheiten wird insgesamt einen deutlich grösseren Platz im Leben der Menschen einnehmen. Einerseits bringt das insofern eine Steigerung der Lebensqualität mit sich, als damit gewisse Krankheiten dann effektiv vermieden bzw. in einem Frühstadium noch "abgefangen" werden können. Die Beschäftigung mit der eigenen Gesundheit diszipliniert aber auch die Menschen, das Leben wird immer weniger als "sorglos" wahrgenommen.

Wenn dann doch eine Krankheit eintritt, wird man eher sich selbst die Schuld dafür geben, weil man z.B. eine an sich verfügbare Präventionsmassnahme glaubt verpasst zu haben – oder man wird mit diesem Vorwurf konfrontiert werden. Denn es ist nicht auszuschliessen, dass der gesellschaftliche Druck zur dann jeweils "allgemeinüblichen" Prävention (sprich: Frühdiagnostik) zunimmt. Auch wenn grundsätzlich diese Art "vorausschauender" Gesundheitsvorsorge wünschenswert ist, verstärkt sie doch die heute schon laufende Psychologisierung von Krankheit: Der schon Kranke wird zusätzlich belastet, weil er sich schuldig fühlt. Die Tendenz zur Selbstbeobachtung dürfte sich also generell verstärken. Jeder Einzelne muss sich viel stärker als heute mit seinem Körper befassen und eine persönliche, nicht immer einfache Entscheidung treffen, was er über seinen Körper wissen möchte. Will oder muss ich wissen, ob ich in 10 Jahren unheilbar an Krebs erkrankte, weil meine Disposition dieses nahe legt?

Die Lebensqualität wird speziell dann Einbussen erleiden, wenn eine routinemässige Untersuchung eine bestimmte Krankheitsdisposition oder bestimmte Vorboten einer Krankheit lange vor dem Ausbruch tatsächlich zu Tage gefördert hat, *ohne* dass schon entsprechende Therapiemethoden vorhanden sind. Oder noch schwieriger zu ertragen: Sie wären an sich verfügbar, sind aber nicht bezahlbar. Die psychologische Belastung wird dann enorm werden, jedenfalls nicht abschätzbar. Das vorzeitige Wissen belastet auch die sozialen Beziehungen des Betroffenen, sei es in der Familie oder im Beruf.

Allerdings sollte man diese Gefahr nicht überschätzen. Verschiedene ExpertInnen weisen darauf hin, dass z. B. noch nicht allzu viele ausreichend abgesicherte monogenetische Dispositionen (und die stehen in der näheren Zukunft im Vordergrund) bekannt sind. Dies könnte aber umgekehrt zum Problem werden, wenn in einer späteren Phase dank der Fortschritte in der Nanotechnologie immer mehr multigenetische, aber auch durch Lebensführung, durchgemachte Krankheiten oder die Lebensumstände bedingte Dispositionen auf einer nur "statistischen" Basis erkannt würden. Dann wäre eine bestimmte Disposition nur nach Wahrscheinlichkeit gegeben und ein sinnvoller Umgang mit einer solchen Information wird nicht einfach sein, weder aus der Sicht des Arztes, noch aus der Sicht des "Patienten": "Was weiss ich, wenn ich etwas weiss?"

Wie ein Experte es formulierte: Die Diagnosen können präziser werden, aber nicht unbedingt die Prognosen. Dies könnte z.B. dazu führen, dass bei der Entdeckung einer "Disposition nach Wahrscheinlichkeit" im Rahmen der Gesundheitsvorsorge die permanente Kontrolle intensiviert wird, damit ein etwaiger Krankheitsausbruch rechtzeitig erkannt wird.

5.2 Gesundheitsvorsorge und Lebensplanung

Schon aus den obigen Ausführungen ist ableitbar, dass die Gesundheitsvorsorge eine Individualisierung erfahren bzw. ermöglichen wird. Durch die verbesserten diagnostischen Möglichkeiten können nicht nur Therapien, sondern auch die Ernährung bzw. die gesamte gesundheitsrelevante Lebensweise auf die individuellen Dispositionen/Krankheitszustände massgeschneidert werden.

Selbst wenn beispielsweise die "Rundum-Genanalyse" aus dem Internet kommt (schon heute gibt es Vorläufer dazu, vgl. Kasten 15): Für viele ExpertInnen ist klar, dass der prognostische Wert vieler genetischer und anderer Dispositionen wie oben erwähnt (noch) gering ist; ein richtiges Risikoprofil für den Einzelnen wird daher so bald wohl gar nicht möglich sein. Es wird deshalb argumentiert, dass nur für spezifische Fragestellungen, die sich aus der Anamnese des Patienten ergeben könnten, z.B. Gentests gemacht werden. In jedem Fall müsse ver-

mieden werden, dass sich die Vorstellung verbreitet, das gesundheitliche Schicksal liege allein in den Genen und man brauche also auf gesunde Ernährung oder ausreichende körperliche Betätigung keinen Wert mehr zu legen.

Damit sind ganz generell die Probleme der prädiktiven Diagnostik angesprochen. Selbst wenn in Zukunft sehr differenzierte Risikoprofile erstellt werden könnten, die springende Frage aber ist: Wie viel Risiko *mehr* als die "Norm" ist für den Einzelnen relevant? Die Antworten der ExpertInnen lassen etwa folgende Schlussfolgerung zu: Entscheidend ist, dass die durch die prädiktive Diagnostik dingfest gemachten Risiken nicht mehr als allgemeine Lebensrisiken wahrgenommen werden, sondern seinem eigenen Leben quasi als Grundausstattung zugeschrieben werden. Im Einzelfall kann dies einen gewaltigen Einfluss auf die Lebensplanung haben.

Generell sind sich die ExpertInnen ziemlich einig, dass die Möglichkeiten zur Lebensplanung deutlich verbessert werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie ein Mensch mit dem verbesserten Wissen über sich selbst fertig werden kann. Weiss ein Mensch, dass er mit hoher Wahrscheinlichkeit früh sterben wird (sei es z.B. wegen einer entsprechenden genetischen Disposition oder wegen einer nicht-therapierbaren viralen Infektion), so hat dies enorme Konsequenzen auf sein aktuelles und künftiges Leben. Man muss daher den Menschen unbedingt selbst entscheiden lassen, wie viel an Wissen er über seine Dispositionen erlangen will. Wie es verschiedentlich zur Sprache kam: "Das Recht auf Nichtwissen sollte garantiert sein." Was das allerdings in einem operationellen Sinne bedeuten könnte, muss vorderhand offen bleiben.

Verschiedene ExpertInnen weisen in diesem Zusammenhang allerdings darauf hin, dass es schon immer Menschen gegeben hat, die ungewollt mit einer solchen Information fertig werden mussten (man denke nur an einen HIV-Test, der einem beim Blutspenden oder beim Abschluss einer Risikoversicherung standardmässig abverlangt wird).

Dadurch, dass man mehr über sich selbst weiss, muss die Lebensplanung aber nicht notwendig einfacher werden. Ob es einfacher oder schwieriger wird, hängt natürlich auch davon ab, was man konkret unter "Lebensplanung" versteht. Auf jeden Fall könnten Lebens-Entscheide z.B. dann schwieriger werden, wenn es um die Familienplanung geht. Wie geht man mit bekannten eigenen Dispositionen um, wenn bekannt ist, dass diese sich schlecht vertragen könnten mit entsprechenden Dispositionen des Partners? Wird man eine pränatale Diagnostik machen wollen? Wie wird man entscheiden, wenn die Diagnose für den Fötus positiv ist?

Kasten 15: Gentests im Eigenauftrag

Unter www.gentest.ch kann man z.B. einen Vaterschaftstest oder forensische Analysen in Auftrag geben. Da heisst es u.a.:

- Ein Vaterschaftstest ist eine wissenschaftliche Analyse, die den Verwandtschaftsgrad zwischen zwei oder mehreren Personen feststellen kann. Die Ergebnisse liegen innerhalb von 10-15 Werktagen vor, die Zuverlässigkeit der Aussage liegt in der Regel bei über 99 %. Zur Durchführung der Analyse werden Speichelproben der beteiligten Personen benötigt. Dies sind in der Regel Vater, Mutter und Kind. Der Test kann auch ohne die Speichelprobe der Mutter durchgeführt werden.
- Dieser Test ergibt eine zuverlässige Aussage über eine Täter-Spur Zuordnung. Bei forensischen Proben bieten wir Ihnen verschiedene Zusatz-Dienstleistungen an. Eine genaue Berechnung der Ausschluss-Wahrscheinlichkeit ist im Gutachten enthalten. Als Standard werden 15 Genorte + Amelogenin mit dem Powerplex 16 STR-Kit untersucht. Zusätzliche Merkmale können auf Wunsch hinzugenommen werden.

Je mehr man über sich weiss, desto stärker dürfte auch die Grenze zwischen Krankheit und Gesundheit zum Verschwinden kommen. In den Worten eines Experten sinngemäss zitiert: Das naive "Sich-Gesund-Fühlen" wird immer weniger möglich sein, denn man wird angesichts von rund 30'000 Genen immer etwas entdecken, das nicht der Norm entspricht. Und dies gilt erst recht für die Vielzahl physiologischer Parameter, die bei einer medizinischen Untersuchung bestimmt werden oder bestimmt werden könnten.

Viele ExpertInnen weisen auch ausdrücklich darauf hin, dass genetische und andere körperbezogene Informationen, gerade wenn sie immer leichter verfügbar werden, umso mehr einen gut funktionierenden Datenschutz erzwingen. Solche Informationen sollten ohne ausdrückliche Einwilligung des Betroffenen weder erhoben noch an Dritte weitergegeben werden. Auf die Vermeidung missbräuchlicher Verwendung – etwa im Versicherungskontext – muss sehr geachtet werden (vgl. hierzu auch Kapitel 6).

Eine Reihe von ExpertInnen hat betont, dass das vergrösserte Wissen über sich selbst dem mündigen und reifen Menschen sehr wohl eine grosse Hilfe für die eigene Lebensplanung und -gestaltung sein und ihm so eine deutlich grössere Autonomie geben kann. Sie geben aber auch zu bedenken, dass viele Menschen damit überfordert sein könnten. Ein Experte schlug gar eine neue Kategorie von

Lebensberatern vor, die einem dabei helfen, mit den feststehenden, eventuell nicht veränderbaren (künftigen) Defiziten/Krankheiten umzugehen.

Kasten 16: Angst vor dem Rinderwahnsinn? Auszüge aus einem Prospekt von Medica, Labormed und Virion (www.labor-zuerich.ch)

Möglicherweise ist Ihre Angst grundlos!

Ob Sie sich mit den krank-machenden BSE-Erregern anstecken und die gefürchtete neue Variante der Creutzfeldt-Jakob Krankheit (nvCJD) entwickeln können steht nicht in den Sternen, sondern in Ihrer Erbsubstanz, den so genannten Genen, festgeschrieben. Nur Menschen mit einer ganz bestimmten erblichen Anlage in ihrer DNA sind bis heute an den BSE-Erregern erkrankt und ausnahmslos innert zwei Jahre an der nvCJD gestorben (Durchschnittsalter weniger als 30-jährig). (...)

Etwa 60 % der europäischen Bevölkerung hat in ihren Genen keinen kritischen Bauplan. (...) Die restlichen 40 % besitzen in ihren Genen in Bezug auf das BSE-Ansteckungsrisiko einen "kritischen" Bauplan. Ohne eine einzige Ausnahme stammen alle bis heute bekannten nvCJD-Opfer aus dieser Bevölkerungsgruppe.

Welches ist Ihr DNA-Bauplan in Bezug auf das BSE-Risiko? Testen Sie Ihre entsprechende Erbanlage mit dem neuen PrionXXGene-Test. (...)

Die durch die Nanotechnologie beschleunigten Fortschritte der Genetik und der Proteomik implizieren für viele ExpertInnen generell einen grossen Aufklärungsbedarf. Das Problem sei, dass sich die genetische Welt der alltäglichen Erfahrung entziehe und dennoch unser Leben stark mitbestimme. Um so mehr müsse sich demnach der Einzelne mit dieser Thematik befassen, wenn er ihr nicht schutzlos ausgeliefert sein will.

5.3 Krankheit und Tod

Krankheit und Tod stellen zentrale Aspekte des Menschseins dar. Inwiefern werden diese durch den medizinischen Fortschritt verändert?

Wie ein Experte es zum Ausdruck brachte: die "Binnenperspektive" der Menschen wird eine andere werden. Das Thema wird sein: Was ist ein gelungenes Leben? Aber auch: Wie wollen wir sterben? Verschiedene ExpertInnen erwarten

hier längerfristig einen erheblichen Wertewandel – nicht zuletzt induziert durch die Fortschritte in der Medizin.

Verschiedene ExpertInnen betonen, dass man den Einfluss der Gene gegenüber den Umwelteinflüssen aber auch nicht überbewerten solle. Eine wichtige Frage sei hier auch, wie Risikoinformationen gegenüber anderen zentralen Lebensfragen (Glück, Liebe etc.) überhaupt gewichtet werden sollen oder können. In den Worten eines Experten: "Wie steht es mit dem Mut und der Lust zu leben, die beide nicht zuletzt auch von der Offenheit und Unklarheit des Lebens ihre Energie beziehen?"

Je genauer man Bescheid weiss, je genauer die eigene "Krankheit" bekannt ist, desto stärker dürfte auch der Druck auf die Medizin werden, entsprechende Lösungen anzubieten. Leiden an Krankheit und erst recht der vorzeitige Tod werden immer weniger akzeptiert werden. Damit verändert sich insbesondere das Bild von Krankheit. Krankheit wird zum technisch behebbaren Mangel.

Umgekehrt könnten Krankheit und Tod leichter zu ertragen sein, wenn sich die damit verbundenen Schmerzen und Ängste durch den medizinischen Fortschritt verringern lassen. Das Sterben kann so auch bewusster in die Lebensplanung eingebaut werden. Auch Selbsttötung (etwa bei Alzheimer) könnte vermehrt eine Option werden. Wie ein Experte etwas ironisch meinte: "Die Menschen werden immer öfter nur noch gezielt sterben."

5.4 Ethische Überlegungen

Natürlich kann die vorliegende Untersuchung die ethische Dimension bestenfalls antippen. In diesem Sinne: Gibt es Einschränkungen aus ethischer Sicht für die Anwendung nanotechnologischer Methoden in der Medizin? Wie steht es mit der ethischen Bewertung der sich auflösenden Grenze zwischen Künstlichem und Lebendigem?

Aus den Antworten der ExpertInnen lassen sich zwei Grundmeinungen herauslesen:

Die eine Gruppe sieht für die Nanotechnologie keine zusätzlichen, ethisch zu motivierenden Einschränkungen. Die naturwissenschaftliche Annäherung an den Menschen sei nicht an sich ethisch problematisch. Grenzen gäbe es beim Einsatz aller Technologien, insofern sei die Nanotechnologie eben nichts Besonderes, auch wenn sie sich gewissermassen bis auf "Zellniveau" herablasse. Dies sei erst recht der Fall, wenn man die möglichen Fortschritte in den nächsten 20 Jahren einigermaßen realistisch betrachte. Aus ethischer Sicht reichen da die Grenzen,

wie sie bereits heute in der Medizin und der Gentechnik gelten, völlig aus (vgl. auch Kapitel 7). Wichtig sei, wie ein Experte formulierte, die "konstruktive Intention", die hinter jeder Anwendung stehen muss. Es muss eine gute Absicht dahinter stecken und selbstverständlich sollte Missbrauch verhindert werden. Und natürlich sollte ein neues Medikament erst dann am Menschen angewendet werden, wenn intensive Risikoabklärungen vorgängig durchgeführt wurden.

Dabei dürfen weder die menschliche Autonomie, noch die menschlichen Lebensrechte beschnitten werden. Wichtig ist, dass die betroffenen Menschen selbst darüber entscheiden können, was geschieht (etwa bei Keimbahneingriffen, bei Eingriffen im psychischen Bereich oder im Bereich der Wahrnehmung).

Allerdings werden auch in dieser Gruppe spezifische inhaltliche Vorbehalte gemacht, etwa im eugenischen Bereich (wenn es z.B. aktiv oder passiv um die explizite "Verbesserung" des Menschen geht) oder in Bezug auf hirnphysiologische Anwendungen (Neurochips u. ä.).

Die andere Gruppe nähert sich dem Thema grundsätzlicher, indem gesagt wird, dass die Nanotechnologie – angesichts ihrer Möglichkeiten – eigentlich die grundlegende Wertorientierung unserer Gesellschaft betreffe. Bereits heutzutage seien nämlich starke Tendenzen auszumachen, die danach trachteten, die moralischen und rechtlichen Grenzen des bisher Erlaubten zu überwinden. Dies ebne nach den Worten eines Experten z.B. den Weg für den Verbrauch von Embryonen zur Herstellung von transplantierbaren Geweben und Organen. Und dies sei mit der Würde des Menschen nicht vereinbar.

Kasten 17: Nanokapseln statt Insulinspritzen

Bio-Ingenieure um die Forscherin Tejal Desai von der University of Illinois haben eine Nanokapsel für die Diabetes-Behandlung entwickelt, die Insulin sekretierende Zellen enthält und permanent im Blutstrom zirkuliert. Damit diese Zellen nicht von Antikörpern zerstört werden, mussten Desai und ihre Kollegen die Poren der Kapsel so dimensionieren, dass sie gross genug waren für den Austritt von Insulin und die Nährstoffversorgung mit Zucker und Sauerstoff, aber gleichzeitig zu klein, um Antikörpern den Zutritt zu erlauben.

Versuche haben gezeigt, dass sich mit dieser Methode zuckerkrankte Ratten heilen lassen. Die Forscher denken auch bereits an mögliche Einsätze bei der Behandlung von Parkinson und Blutern. Mit entsprechenden Therapien für Menschen ist allerdings erst in Jahren zu rechnen.

Was die Auflösung der Grenze zwischen Lebendigem und Künstlichem betrifft, so lassen sich ebenfalls klar zwei Meinungsschwerpunkte ausmachen. Für die eine Gruppe der ExpertInnen ist diese Grenze erstens relativ feststehend (und also nicht in Auflösung begriffen) und damit zweitens aus ethischer Sicht mindestens vorläufig nicht zu problematisieren. Für die andere Gruppe ist diese Grenze schon lange überschritten: Die meisten Medikamente, alle Implantate seien "künstlich" und werden von der Grosszahl der Menschen ohne ethische Probleme akzeptiert. Dazu komme, dass der Mensch von sich aus ein Kulturwesen sei und sich schon immer selbst gestaltet habe, auch mit "künstlichen" Mitteln. Von daher sei die Grenze selbst etwas "künstlich" und damit irrelevant.

6 Auswirkungen für die Gesellschaft

Auch für die folgenden Überlegungen gilt als Ausgangspunkt, dass sich die Nanotechnologie in der Medizin bis 2020 etwa so entwickeln könnte, wie in Kapitel 4 dargestellt. Dabei kommt es auch hier weniger auf die Details als auf den Generaltrend an.

Die klinische Verfügbarkeit einer bestimmten Therapie-Methode ist das eine, ihre Auswirkungen über den Einzelfall hinaus das andere. Insofern muss hier darauf hingewiesen werden, dass es sich bei diesen Auswirkungen erst recht um die Identifikation von möglichen Entwicklungsrichtungen handelt und nicht um "Prognosen" im eigentlichen Sinn. Dabei ist auch zu bedenken, dass die Nanotechnologie in der Medizin tendenziell die ohnehin laufenden Diskussionen über Gentechnologie, Stammzellenforschung, Klonen usw. verstärkt und ergänzt und damit automatisch *auch* in diesem Kontext wahrgenommen wird.

Zur Abschätzung der möglichen Auswirkungen für die Gesellschaft haben wir im Delphi II zur Technologienfolgen-Abschätzung ebenfalls verschiedene Fragen gestellt. Wiederum sollen die Antworten der ExpertInnen in Form einer qualitativen Synthese zusammengefasst werden. Wir unterscheiden drei Teilaspekte: Morbidität und Mortalität, Gesundheitswesen sowie mögliche Missbrauchsrisiken. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Antworten von 36 ExpertInnen.

6.1 Morbidität und Mortalität

Zunächst sind die meisten ExpertInnen damit einverstanden, dass sich aufgrund der Resultate der Technologie-Prognose die Auswirkungen der Nanotechnologie in der Medizin etwa so manifestieren könnten, wie sie in Kapitel 4 dargestellt

wurden. Verschiedentlich wurde aber auf den doch sehr spekulativen Charakter dieser Aussagen hingewiesen.

Der Grundtenor ist klar: Gesamthaft dürfte *ceteris paribus* eine durchschnittliche Verbesserung des Gesundheitszustandes resp. eine abnehmende Morbidität resultieren. Die Einschränkung rührt daher, dass heute nicht abschätzbar ist, welche längerfristigen Einflüsse beispielsweise die Umweltverschmutzung, die Veränderung von Nahrungsgewohnheiten oder die allgemeinen Lebensumstände auf den Gesundheitszustand haben werden.

Die Möglichkeiten der Medizin werden unabhängig von der Nanotechnologie nach Ansicht vieler ExpertInnen aber grundsätzlich überschätzt: Ihre "Reparatur-Ansätze" greifen nur bei einem Teil der Fälle; sehr viele Krankheiten und Todesfälle sind auf externe Faktoren zurückzuführen, die nicht im Einflussbereich der Medizin liegen.

Dass dagegen die Mortalität z.B. bei Krebs mit der Nanotechnologie deutlich herabgesetzt werden könnte, wird als plausibel erachtet. Oder dass Menschen mit Stoffwechselkrankheiten oder mit hämatologischen Krankheiten im Sinne einer verbesserten Lebensqualität profitieren können, ist auch unbestritten.

Die Lebenserwartung dürfte damit zwar ansteigen, aber mit zunehmendem Alter werden die typischen Alterskrankheiten wichtiger, so etwa kardiovaskuläre Erkrankungen und Demenzerkrankungen. Vor allem letztere könnten den Pflegebedarf stark ansteigen lassen, da sich solche Krankheiten oft über Jahre hinziehen. Nicht wenige ExpertInnen sehen damit als Haupteffekt der Nanotechnologie eine Verschiebung von Krankheit in die Zukunft. Dabei darf diese Verschiebung von Krankheiten und auch jene von Todesursachen quantitativ aber nicht überschätzt werden. Denn dies sei ein sehr langfristiger Prozess. Die damit verstärkte demografische Grundtendenz ist aber für die ExpertInnen klar: Die Alterspyramide wird noch kopflastiger.¹

Nicht überschätzt werden darf der "frühdiagnostische" Effekt im Vorsorgebereich. Diesen halten verschiedene ExpertInnen für eher gering, weil Vorsorgeuntersuchungen vor allem von jüngeren Menschen meist schlecht in Anspruch genommen werden. Anders bei bereits in Behandlung befindlichen Patienten: Hier erlauben die nanotechnologischen Möglichkeiten ein besseres Monitoring des Krankheitsverlaufs, eine individuell besser angepasste Therapie. Und vor allem könne die posttherapeutische Diagnose helfen, Rückfälle zu vermeiden und den Heilungsprozess effektiv zum Abschluss zu bringen.

¹ In Martin (2003) findet man Abschätzungen darüber, welchen Effekt auf die Lebenserwartung man erwarten könnte, wenn man verschiedene Krankheiten (z. B. Krebs, kardiovaskuläre Krankheiten, Diabetes) effektiv heilen könnte.

Andere ExpertInnen halten demgegenüber gerade die frühdiagnostischen Möglichkeiten, die die Nanotechnologie eröffnen könnte, für besonders interessant und folgenreich. Allerdings sehen auch sie das motivationale Problem, sich ohne gegebenen Anlass frühdiagnostisch unter die Lupe nehmen zu lassen. Ganz abgesehen von den damit verbundenen Kosten (vgl. den nächsten Abschnitt).

Eine ganze Reihe von ExpertInnen hat zudem darauf hingewiesen, dass durch nanotechnologische Verfahren nicht nur *alte* Krankheiten geheilt, sondern auch *neue* Krankheiten entdeckt werden dürften. Dabei wird sich allerdings immer dringender die Frage stellen, was denn überhaupt eine Krankheit ist, was nicht. Oder konkreter: Welches ist das kritische Mass an Beeinträchtigung, das zur Subsumption unter den Krankheitsbegriff ermächtigt? Oder wird damit die Scheidung gesund/krank an sich hinfällig, in dem es nur noch unterschiedliche Grade von Gesundheit bzw. Krankheit gibt?

6.2 Gesundheitswesen

Am Anfang werden "echte" nanotechnologische Anwendungen vermutlich sehr teuer sein. Mit zunehmender technischer Reife dürften sie im Laufe der Zeit aber deutlich billiger werden. Doch könnte die dann stark steigende Zahl dieser Anwendungen diesen Effekt wieder zunichte machen – selbst wenn damit andere klassische Anwendungen wegfallen.

Deshalb ist für den Grossteil der ExpertInnen klar: Das Gesundheitswesen wird gesamthaft teurer werden, mindestens mittelfristig. Längerfristig wäre es zwar denkbar, dass die Gesamtaufwendungen wieder zurückgehen könnten, indem teure Medizin im Alter vermieden werden kann etwa durch die medizinischen Erfolge in jüngeren Jahren. Allerdings weisen eine Reihe von ExpertInnen darauf hin, dass heute der Hauptteil der Kosten relativ kurz vor dem Tod anfällt – fast unabhängig vom Alter. Das Ziel müsste also sein, möglichst "gesund" im Alter zu sterben.¹ Für viele ExpertInnen ist dies tatsächlich eine valable Zielvorstellung, ob dies zu erreichen ist (mit oder ohne Nanotechnologie), ist allerdings eine sehr offene Frage.

Für einige ExpertInnen stehen andererseits die Chancen gar nicht so schlecht, dass "Gesundheit" wirklich billiger werden könnte – wenigstens dann, wenn die Nanotechnologie das halte, was sie verspreche und der eingangs erwähnte Mengeneffekt nicht in diesem Masse eintrete.

¹ Vielleicht ist damit (nach unserer persönlichen Einschätzung) *die* Illusion aller medizinischen Forschung überhaupt angesprochen. Wieso dann noch sterben, wenn man gesund ist?

Nicht für alle ExpertInnen sind die steigenden Kosten ein Problem an sich. Warum soll die Gesellschaft gesamthaft nicht mehr Geld für die Gesundheit ausgeben? Wie es ein Experte sagte: "Gesundheit soll ruhig etwas kosten." Oder ein anderer: "Wir könnten doch genau so gut 20 Prozent unseres Einkommens für die Gesundheit ausgeben, statt nur 10 Prozent." Und schliesslich: "Die Frage ist doch bloss, wie wir damit umgehen."

Was natürlich nicht heisst, dass die Verteilungsprobleme (Stichworte: Zweiklassenmedizin, Solidarität zwischen alt und jung) nicht gesehen würden. Für praktisch alle ExpertInnen ist klar, dass diese Probleme (weiter) zunehmen werden, wenn die nanotechnologischen Fortschritte nicht eine erhebliche Verbilligung bringen. Befürchtet wird, dass sowohl für diagnostische wie auch für therapeutische Zwecke sehr viel Geld ausgegeben werden muss. Von den Pflegeaufwendungen ganz zu schweigen.

Für viele ExpertInnen ist klar, dass der Zugang zu medizinischen Leistungen eingeschränkt werden bzw. die Deckung durch die übliche Grundversicherung nicht mehr gewährleistet sein wird. Ob dies auch den (früh)diagnostischen Teil der nanotechnologischen Anwendungen betrifft ist unklar. Einige Experten meinen, dass diese Anwendungen sehr teuer sein und bleiben dürften, andere meinen, dass deren Preise aus markttechnischen Gründen eher tief gehalten würden zulasten der Preise für die neuen Medikamente.

Versicherungen, die wie heute eigentlich alle Leistungen decken, werden unerschwinglich werden. Deshalb empfehlen verschiedene ExpertInnen auch ganz bewusst, eine Art "Lebensbudgetierung" für die Gesundheitskosten anzustreben, und sich z.B. schon in jüngeren Jahren gezielt für die teure Altersmedizin zu versichern. Natürlich wird in diesem Zusammenhang auch die Lebensarbeitszeit angesprochen. Länger arbeiten ist in einer sich zusehends überalternden Gesellschaft ein Thema. Nicht nur zur Bezahlung der Gesundheitskosten, auch zur Bezahlung der Renten, wie argumentiert wurde.

Hier werden auch sozialetische Dimensionen angesprochen: Verschiedene ExpertInnen betonen, dass man bei der Bewertung der Nanotechnologie in der Medizin zu stark auf den technischen Fortschritt bei dieser Entwicklung fixiert sei und zuwenig die damit einhergehende soziale Veränderung beachte. Anstatt die Lebensbedingungen so zu verändern, dass sie weniger krankmachen, werde voll auf die Technik gesetzt. Es stelle sich deshalb ganz grundsätzlich die Frage, ob dies der Weg sei, den wir gehen wollen, wie ein Experte formulierte. Die Krebsbekämpfung sei sicherlich ein legitimes Ziel, aber gehen wir dabei den richtigen Weg? Die Investitionen in diesem Bereich könnten zu Lasten anderer Patienten gehen, wobei man hier auch einen globalen Blick einnehmen sollte: Mit deutlich

weniger Mitteln könnte man deutlich grössere Erfolge, etwa in der Malariabekämpfung, erreichen.

Auf das Stichwort Zweiklassen-Medizin ergibt sich seitens der ExpertInnen eine relativ einhellige Mehrheitsmeinung, die man wie folgt zusammenfassen könnte:

- Die *Zweiklassen-Medizin* gibt es eigentlich schon *heute*: Zunächst mal ökonomisch. Aber auch hinsichtlich der Informiertheit. Medizinische Neuerungen werden vor allem von jenen Leuten nachgefragt, die gut informiert sind, bzw. es verstehen, sich die notwendigen Informationen zu beschaffen und sich aktiv am Diagnose- bzw. Therapieprozess zu beteiligen.
- Nanotechnologische Anwendungen dürften die Tendenz zur Zweiklassen-Medizin verstärken. Hightech-Medizin habe generell diese Tendenz, wie es ein Experte ausdrückte. Allerdings (in den Worten eines anderen Experten): Noch seien die Leistungskataloge für die Krankenversicherer relativ umfassend, so dass *heute* der ökonomische Teil dieses Problem (noch) nicht überbewertet werden dürfe. *Mittelfristig* sei dies aber wohl ganz anders.
- Vor allem im Alter hängen Gesundheit und Lebensqualität nicht nur vom Geldbeutel ab, sondern auch von der Rationalität der Patienten, also davon, wie weit sie es schaffen, die Lebensführung den individuellen gesundheitlichen Risiken anzupassen. Hier könnten vor allem die durch die Nanotechnologie verbesserten frühdiagnostischen Möglichkeiten ganz unterschiedlich zum Tragen kommen. Denn in wie weit man solche Möglichkeiten sinnvoll und lebbar nutzt, hängt zwar auch vom sozioökonomischen Status ab, aber vor allem auch von der Rationalität in der Lebensführung und der Gesundheitsvorsorge.
- Soweit sich die ExpertInnen überhaupt dazu äussern: Alle sind der Meinung, dass man aus ethischen Überlegungen heraus eine Zweiklassenmedizin natürlich unbedingt vermeiden müsse.

Aber nicht alle ExpertInnen teilen die Einschätzung, dass die Nanotechnologie die Tendenz zur Zweiklassen-Medizin verstärke. Es könnte z.B. nach Ansicht einer Expertin der paradoxe Fall eintreten, dass aus der Tatsache heraus, dass neue medizinische Therapieverfahren bzw. Diagnosetechniken nicht mehr bezahlt werden können, es zu einem Stillstand der Forschung und damit auch der Entwicklung neuer nanotechnologischer Verfahren in der Medizin käme und die Nanotechnologie in der Medizin sich so gar nicht recht entwickeln könnte.

6.3 Missbrauchsrisiken

Nach einhelliger Meinung der im Rahmen der Technologie-Prognose befragten ExpertInnen wird die nanotechnologische Gensequenzierung bzw. Genidentifikation bis 2020 ein Standard-Werkzeug in der Medizin werden. Nebst positiven Effekten (deutlich schnellere und verlässlichere Identifikation von pathogenen Keimen, Unterstützung von Gentherapien, Krebsdiagnose u.v.a.m.) zeichnet sich damit auch eine Vergrößerung der heute schon bestehenden Missbrauchsrisiken ab. Gemeint ist das von den Betroffenen nicht autorisierte oder gewollte oder gewünschte Weitergeben von genetischen Informationen an Dritte, sei es am Arbeitsplatz, sei es beim Abschluss von Versicherungen, sei es im Zusammenhang mit der Verbrechensbekämpfung bzw. -aufklärung. Die Frage stellt sich, inwiefern damit die Nanotechnologie die aktuelle Diskussion über die Risiken der Gentechnologie oder der DNA-Analyse intensiviert.

Solche und ähnliche Fragen haben wir auch den ExpertInnen im Rahmen der Delphis zur Technologiefolgen-Abschätzung gestellt. Bei der Beurteilung der Antworten muss allerdings beachtet werden, dass diese bestehende oder künftige juristische Schranken ausser Acht lassen (vgl. die Ausführungen in Abschnitt 7.4 über bestehende und in Vorbereitung befindliche gesetzliche Regelungen, die solche Missbräuche verhindern sollen), also tatsächlich das Missbrauchsrisiko thematisieren.

Aus den Antworten der ExpertInnen lässt sich die doch recht einhellige Meinung herauslesen, dass Nanotechnologie zunächst mal primär als "Technologie" (d.h. als technisches Können) verstanden werden muss, und die bisher ohnehin schon laufende Diskussion einfach verstärkt, indem nanotechnologische Methoden u.a. effizienter, schneller und genauer sind bzw. sein werden. Insofern habe die hier angeschnittene Diskussion auch einen technikumabhängigen Charakter. Missbrauchsrisiken gäbe es überall, a priori sei dies kein Argument gegen eine spezielle Technologie.

Der Grund für die Vergrößerung der Missbrauchsrisiken liegt darin, dass bis heute gendiagnostische Massnahmen effektiv immer noch recht aufwändig und daher teuer sind. Insofern werden nur wenige Tests durchgeführt, so dass sich in Bezug auf Versicherungsmärkte oder den Arbeitsmarkt bislang kaum Konsequenzen ergeben haben.

Im einzelnen unterscheiden sich die Einschätzungen der ExpertInnen über die Grösse dieses Effektes aber dann doch beträchtlich. So wird auf der einen Seite die Meinung vertreten, dass die Missbrauchsrisiken bezüglich genetischer Informationen zwar zunehmen dürften, dass man diesen Effekt aber nicht überschätzen dürfe. Denn die inhaltlichen Fortschritte der Genanalyse (im Sinne einer ver-

lässlichen Zuordnung von bestimmten DNA-Abschnitten zu bestimmten Eigenschaften oder Dispositionen) dürften weit hinter derjenigen der rein technischen Identifizierung bleiben. Insofern bietet die Komplexität der genetischen Wirklichkeit mindestens für eine gewisse Zeit einen nicht unbeträchtlichen Schutz. Für eine echte Bedrohung sei auch, wie es ein Experte betonte, der vorgegebene Zeitrahmen (2020) einfach zu knapp.

Auf der andern Seite wird die Meinung vertreten, dass die Missbrauchsrisiken gewissermassen überproportional zunehmen, weil die Nanotechnologie nicht nur die Identifikation deutlich erleichtere, sondern auch die gezielte Manipulation am Genom und damit auch die dadurch gewinnbaren genetischen Kenntnisse deutlich grösser würden.

Durch die erleichterte Verfügbarkeit von genetischen und andern Informationen gäbe es sicher für eine Personengruppe ein erhöhtes Risiko für Benachteiligungen: Es wären dies jene Menschen mit genetisch leicht identifizierbaren Krankheiten oder Dispositionen, für die es relativ gesicherte Aussagen über den Ablauf gibt. Aber auch Personengruppen mit vom "Üblichen" abweichenden Dispositionen könnten benachteiligt werden, selbst wenn es gar keine gesicherten Aussagen über die möglichen negativen Wirkungen gibt. Diese Benachteiligungen betreffen sowohl die Bereiche "Arbeit" wie "Versicherung". Ein Arbeitgeber könnte eine Anstellung ablehnen, könnte auf Weiterbildungsmassnahmen oder Beförderungen verzichten, weil es sich "nicht (mehr) lohnt", wie ein Experte die Situation umriss. Ein Versicherer betreibt Risikoselektion und/oder passt seine Prämien dem tatsächlichen (oder vermeintlichen) Risiko an. Nutzniesser einer solchen Entwicklung wären die Gesunden. Diese könnten durch Einbezug genetischer und/oder anderer Informationen eine genauere Risikoeinschätzung und so auch billigere Prämien erhalten.

Schliesslich wird befürchtet, dass die Fortschritte der Medizin ganz grundsätzlich die Grundlage schaffen könnten für völlig neue gesundheitspolitische Ansätze, etwa über genetische Bevölkerungsscreenings oder arbeitsmedizinische Multiparameterprofile und dass der allgemeinen Entsolidarisierung und Individualisierung von Gesundheit und Krankheit dadurch Vorschub geleistet wird.

7 Steuerung der Entwicklung?

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass über die Nanotechnologie und ihre medizinischen Anwendungen erhebliche Auswirkungen auf den Einzelnen wie auch die Gesellschaft als Ganzes zu erwarten sind. Diese Auswirkungen sind zwar inhaltlich wie auch zeitlich nur grob abschätzbar, die vorliegende Darstel-

lung dürfte in ihrer *Grundtendenz* aber wohl ein zutreffendes Bild ergeben. Es stellt sich deshalb auch die Frage, ob denn diese Entwicklung erwünscht sei, ob man steuernd eingreifen könnte und wenn ja mit welcher Zielrichtung.

Auch zum Thema Steuerung haben wir im Rahmen der Befragung zur Technologiefolgen-Abschätzung verschiedene Fragen gestellt. Wiederum werden die Antworten der ExpertInnen in Form einer qualitativen Synthese zusammengefasst und nach den Themen Gründe, Instrumente und Leitplanken gegliedert. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Übersicht über die aktuelle Regulierung in der Schweiz sowie eine Beurteilung aus unserer Sicht.

7.1 Mögliche Gründe für die Steuerung

Es ist u.E. wichtig, möglichst früh die Fragen zur Steuerung und Entwicklung einer neuen Technologie zu stellen - bevor diese so weit fortgeschritten und verbreitet ist (d.h. die Fragen so brisant werden), dass Eingreifen und Lenken schwierig werden. Die Nanotechnologie ist zur Zeit in diesem Sinne noch nicht "brisant", weist aber ein grosses Potenzial auf. Ihre Entwicklung folgt nicht einem einzigen klar definierten Entwicklungsstrang. Vielmehr spielt sie sich in Form eines sich immer stärker vernetzenden Prozesses ab, der kaum überblickbar die verschiedensten Wissenschaften betrifft, die sich gegenseitig beeinflussen. Plötzliche massive Entwicklungsschübe sind denkbar (vgl. auch Kapitel 4). Deshalb sollten die Gesellschaft und ihre Repräsentanten grundsätzlich darauf vorbereitet sein, um auch angemessen reagieren zu können.

Noch ist die Nanotechnologie vor allem Programm und kaum Realität. Dennoch ist nach dem bisher Gesagten absehbar, dass die realisierte Nanotechnologie die Medizin als Wissenschaft wie auch als praktische Medizin schon mittelfristig im angedeuteten Sinn erheblich verändern dürfte. Ist diese Entwicklung bzw. deren Förderung überhaupt *wünschenswert*?

Diese Frage haben wir natürlich den ExpertInnen zur Technologiefolgen-Abschätzung gestellt. Mit einigen Vorbehalten sind sie sich weitgehend einig: Wünschenswert oder nicht zu verhindern (weil unter anderem schon zu weit fortgeschritten). Grundsätzlich wird argumentiert, dass der nanotechnologische Fortschritt tatsächlich Fortschritte mit sich bringe, eben und vor allem auch in der Medizin. Darüber hinaus wird auch ganz grundsätzlich der Nutzen vermehrter und verbesserter Erkenntnis – nicht nur im Bereich der Life Sciences¹ – herausgestrichen. Einige ExpertInnen gehen gar soweit, dass alles, was im weitesten Sinne dazu dienen kann, Krankheiten zu bekämpfen und Leiden zu lindern,

¹ Gemeint sind jene (Natur-)Wissenschaften, die sich mit dem Lebendigen in allen seinen Ausprägungen beschäftigen: Medizin, Biologie, Biochemie, Biotechnologie usw.

auch wert sei, gemacht zu werden. Wobei, wie ein Experte formulierte, es natürlich nicht um "unsinnige Lebensverlängerungen" gehen dürfe. Gesamthaft gesehen würden die Vorteile die Nachteile (wie sie zum Teil in den Kapiteln 5 und 6 zur Sprache kamen) überwiegen.

Einige wenige Stimmen sind demgegenüber sehr skeptisch. So sei das langfristige (wenn auch nicht ausgesprochene) Ziel, den Menschen zu manipulieren oder schliesslich gar neu zu erschaffen, grundsätzlich abzulehnen (wenn auch vielleicht nicht zu verhindern). Die Gesellschaft müsse darüber diskutieren, ob sie mit ihren Ressourcen diese Entwicklung unterstützen will oder nicht. So gehe es nicht um die Frage des "wie" und "wann", sondern tatsächlich um die Frage des "ob".

Bezüglich der staatlichen Förderung ergibt sich eine relativ klare Gesamtmeinung: Der Staat soll nur die Grundlagenforschung fördern, alles andere sei eher die Aufgabe der Privatwirtschaft. Dies auch deshalb, weil wegen allenfalls überzogener Zukunftsversprechen gesellschaftliche Ressourcen eingebunden würden, ohne dass dies durch einen entsprechenden Output gerechtfertigt wäre.

Ist eine *Steuerung* der Entwicklung notwendig? Die Einschätzungen der ExpertInnen hierzu streuen stark. Die Antworten reichen von "keine Steuerung und keine Eingriffe" nötig (eher die Mehrheit) bis zu einem uneingeschränkten "ja". Dieses breite Spektrum erklärt sich zum Teil dadurch, dass noch eine grosse Unsicherheit besteht, um was es inhaltlich geht. Und es wird auch darauf hingewiesen, dass jede Regelung die Gefahr in sich trägt, die Entwicklung in die falsche Richtung zu lenken.

Eine gewisse Einhelligkeit der Meinungen zeigt sich darin, dass die Grundlagenforschung grundsätzlich frei sein sollte, dass hingegen für die konkreten Anwendungen Einschränkungen nötig werden könnten. Verbote sollten erst ausgesprochen werden, wenn Gefahren und Missbrauch konkret bzw. verlässlich abschätzbar werden.

Aus den Antworten der ExpertInnen lässt sich der Schluss ziehen, dass die Miniaturisierung bzw. die Nanotechnologie *selbst* kein eigener Regelungsstatbestand ist. Regelungsbedarf ergibt sich aber z.B. im Bereich der Erhebung und des Umgangs mit Daten des Einzelnen. Mit der voranschreitenden technologischen Entwicklung wird dieser Bedarf zunehmen. Wichtig ist es deshalb, die Persönlichkeitsrechte ganz allgemein, speziell aber die Rechte benachteiligter Gruppen (z.B. Menschen mit von der "Norm" deutlich abweichenden Krankheiten oder Disposition) zu schützen. Die Entwicklung muss auf jeden Fall "begleitet" werden, und zwar – wie verschiedene ExpertInnen betonen – auf allen Ebenen. Nur

wo sich ein Regulierungsbedarf aber klar stellt, sollte effektiv reguliert werden. Eine Regulierung auf Vorrat sei zu vermeiden.

7.2 Mögliche Instrumente der Steuerung

Nicht wenige ExpertInnen sind der Meinung, Entwicklungen wie jene der Nanotechnologie seien, zumindest auf Forschungsebene, gar nicht richtig steuerbar. Was natürlich nicht heisst, dass nicht auch die Forschung, insbesondere im humanmedizinischen Bereich, mit gewissen Rahmenbedingungen belegt ist und es auch bleiben wird (vgl. auch Abschnitt 7.4, in dem kurz die aktuelle Situation in der Schweiz dargestellt wird). Umgekehrt wird aber auch die Befürchtung zum Ausdruck gebracht, dass die heutigen (bzw. absehbaren) Regelungen von der Forschung als zu eng empfunden werden könnten.

Die Antworten lassen sich für jene ExpertInnen, die einen Eingriff nicht grundsätzlich ablehnen bzw. diesen nicht für unmöglich ansehen, etwa wie folgt zusammenfassen: Selbstregulierung und staatliche Intervention müssen nebeneinander bestehen.

Die Einschätzung der Selbstregulierung ist aber etwas schillernd. Zum einem wird diese als notwendig erachtet, damit quasi von der Basis her die nötige Einsicht überhaupt entsteht, bzw. die Forscher ihre Verantwortung wahrnehmen können. Zum andern wird diese Selbstregulierung aber als nicht sehr effizient angesehen.

Die Selbstregulierung muss nach Meinung einer ganzen Reihe von ExpertInnen durch staatliche Interventionen, Gesetze, Ethikkommissionen, ausgedehnte Begleitforschung sowie nationale und internationale Abkommen ergänzt werden (wie etwa die europäische Biomedizinkonvention, vgl. Kasten 18). Ein besonders starkes Instrument stellt nach Meinung verschiedener Experten die Subventionspolitik in der Grundlagenforschung dar. Diese sei in der Lage, Schwerpunkte zu setzen, was man mit Erfahrungen aus der Stammzellenforschung belegen könne. Denn gerade in der Nanotechnologie kann es sich kaum eine Institution leisten, ohne erhebliche (meist staatliche) Aussenfinanzierung zu forschen.

Aufgabe von Ethikkommissionen wäre es u.a. "Grenztatbestände" zu definieren als mögliche Leitplanken für das, was speziell in der Anwendung noch erlaubt wäre, was nicht. Die Haltung der ExpertInnen zu solchen Kommissionen ist aber ambivalent: Einerseits werden sie von vielen ExpertInnen ausdrücklich gefordert, andererseits ist bei praktisch gleich vielen ExpertInnen diesbezüglich eine grosse Skepsis zu verspüren: Man fürchtet u.a. endlose Debatten.

Kasten 18: Europäische Biomedizinkonvention

Der Europarat hat am 4. April 1997 ein Übereinkommen zum Schutz der Menschenrechte und der Menschenwürde im Hinblick auf die Anwendung von Biologie und Medizin (Biomedizinkonvention, BBl 2002 340 ff.) verabschiedet, das erstmals auf internationaler Ebene verbindliche Rechtsregeln für den Bereich der Biomedizin vorsieht. Die Schweiz beabsichtigt, der Konvention beizutreten. Beispielhaft sind einige wichtige Bestimmungen herausgegriffen:

Schutz des Genoms: Die Diskriminierung wegen des Erbgutes ist verboten (Art. 11). Prädiktive genetische Untersuchungen dürfen nur zu medizinischen Zwecken oder für die medizinische Forschung durchgeführt werden (Art. 12). Interventionen zur Veränderung des menschlichen Genoms dürfen nur zu präventiven, diagnostischen und therapeutischen Zwecken vorgenommen werden; die Keimbahntherapie ist verboten (Art. 13). In der medizinisch unterstützten Fortpflanzung wird die Geschlechtswahl verboten, ausser zur Vermeidung einer schweren, geschlechtsgebundenen erblichen Krankheit (Art. 14).

Forschungsfreiheit: Die wissenschaftliche Forschung ist im Bereich der Biomedizin grundsätzlich frei (Art. 15). Die Forschung am Menschen wird aber von einer Reihe von Voraussetzungen abhängig gemacht, wobei das Fehlen von Alternativen, die Einwilligung der Betroffenen und die Billigung des Vorhabens durch eine zuständige Stelle unter Berücksichtigung ethischer Gesichtspunkte hervorzuheben sind (Art. 16).

Verbot der Erzeugung menschlicher Embryonen in vitro zu Forschungszwecken (Art. 18).

Öffentliche Diskussion: Es ist dafür zu sorgen, dass über die Grundsatzfragen der Biomedizin eine öffentliche Diskussion statt findet und zu ihren möglichen Anwendungen angemessene Konsultationen statt finden (Art. 28).

Die Idee einer (permanenten) Begleitforschung wird im Übrigen weit herum unterstützt. Diese kann dazu dienen, einerseits die Entwicklung kritisch zu verfolgen, rechtzeitig Fehlentwicklungen zu entdecken, gegebenenfalls auch Leitplanken für die Anwendung zu finden und argumentativ zu unterstützen. Alle Spezialistengremien müssten aber grundsätzlich etwas kritisch betrachtet werden. Spezialisten hätten oft eine natürliche Nähe zur Forschung und sei es nur im Denken, weil "die Forschung das Gebiet ist, das sie nährt", wie ein Experte es formulierte.

Schliesslich wird von vielen der befragten ExpertInnen als wichtigste Steuerungsmöglichkeit ein *offener Dialog* zwischen Wissenschaft auf der einen Seite

und Gesellschaft und Staat auf der andern Seite gesehen (etwa auch im Sinne der in der Schweiz praktizierten PubliForen¹). Dies setzt aber voraus, dass letztere von der Wissenschaft immer wieder Informationen einfordern und die Wissenschaft es umgekehrt lernt, diese Informationen in offener und geeigneter Form zu liefern. Stichworte sind: Diskussionsforen, Gesprächsgruppen usw. Diese können auch dazu dienen, dem breiteren Publikum klar zu machen, um was es bei der Nanotechnologie geht, was daran speziell ist und wie diese Entwicklung sich im Ganzen der technisch-wissenschaftlichen Entwicklung positioniert.

Die Internationalität der Entwicklung (Stichwort: Globalisierung der Medizin) führt auch zur Frage, ob es denn überhaupt möglich sei, lokal unterschiedliche Standards durchzusetzen – sei es in der Forschung, sei es in der Entwicklung. Soweit sich hierzu die ExpertInnen äussern, sind sie skeptisch. Vermutlich dürften sich nur Minimal-Standards durchsetzen. Daraus liesse sich nach unserer Einschätzung schliessen, dass nationalen Regelungen weiterhin ein grosser Stellenwert zuzubilligen ist.

7.3 Mögliche Leitplanken für die Nanotechnologie

Schliesslich geht es darum, mögliche Leitplanken zur Steuerung der nanotechnologischen Entwicklung in der Medizin zu identifizieren – soweit solche erwünscht oder als notwendig erachtet werden. Aus den Antworten der ExpertInnen lassen sich drei Meinungskreise herauskristallisieren:

- Der erste sieht keine speziellen Leitplanken. Zum Tragen kämen die gleichen Prinzipien wie bei andern vergleichbaren Technologien (etwa bei der Gentechnologie). Diese seien mindestens vorläufig ausreichend. Bei Bedarf sei es immer noch möglich, weiter zu gehen.
- Der zweite Meinungskreis betrifft die Rechte des Individuums. Die Leitplanken müssten so beschaffen sein, dass nach wie vor ein Pluralismus von Lebensstilen und Lebensentwürfen möglich sei. Für den Einzelnen sollen keine Einschränkungen seiner Individualität erlaubt sein, er soll in eigener Person frei entscheiden dürfen. Die Vorteile einer Therapie sollen bei der Anwendung grösser sein als die möglichen Risiken. Die Verteilungsgerechtigkeit soll nicht geschmälert werden; die soziale Einbettung der neuen Technologien ist sicherzustellen. Gesamthaft sollen die Risiken minimiert werden.

¹ Vgl. das zur Zeit von TA-SWISS und dem Bundesamt für Gesundheit gemeinsam durchgeführte PubliForum "Forschung am Menschen" (Internet www.publiforum.ch)

- Der dritte Meinungskreis betrifft ganz grundsätzlich die Revidierbarkeit bzw. die Umkehrbarkeit von Entwicklungen im technischen aber auch im sozialen Sinn. Entwicklungen sollten danach überprüfbar und revidierbar bleiben. Aber gerade bei neuen Technologien kann die Umkehrbarkeit recht schnell verloren gehen, wenn sie z.B. zu integralen Bestandteilen anderer Handlungsfelder werden. Deshalb müsste eigentlich schon im Vorfeld die Frage gestellt und beantwortet werden, was denn überhaupt entwickelt werden darf. Ist die Technik einmal da, ist sie nicht mehr begrenztbar, wie es ein Experte formulierte. Die Frage ist daher, wie die Forschung und nicht wie die Anwendungen begrenzt werden sollen. Hier stellen sich aber zentrale Probleme: Auf einzelne Bereiche kann man diese modernen Technologien nicht begrenzen, weil deren Vorteil ja gerade darin besteht, dass sie universal einsetzbar sind: Man entwickelt etwas in der Werkstofftechnik und kann es dann mit einem gewissen Zeitverzug auch in der Medizin einsetzen.

Aus den Antworten der ExpertInnen lassen sich darüber hinaus auch einige *formale* Anforderungen an Leitplanken ableiten: Sie müssen transparent sein, sich am Vorsorgeprinzip orientieren, in einer leicht verständlichen Sprache formuliert sein und allgemein anerkannten ethischen Grundsätzen genügen.

Schwierig ist die Konkretisierung solcher Leitplanken über das Gesagte hinaus. Angesichts des mindestens heute bestehenden Wissens- und Prognoseproblems ist dies auch nicht verwunderlich. Möglicherweise hilft hier nur ein leitbildorientiertes Handeln und Entwickeln im Sinne einer "eigensicheren" Nanotechnologie weiter (nach von Greif 2003). Weiterer Input hierzu wird von der vorgeschlagenen Begleitforschung erwartet (vgl. Kapitel 9).

7.4 Aktuelle Regulierung in der Schweiz

Besonders im Bereich der Medizin ist die nanotechnologische Forschung in der Schweiz schon heute mit Rahmenbedingungen konfrontiert, die teilweise unmittelbar aus dem Verfassungsrecht abgeleitet werden.¹ Hervorzuheben sind die Art. 119 und 119a der Bundesverfassung, welche gewisse unüberwindbare Grenzen für den Umgang mit menschlichem Keim- und Erbgut, Organen, Geweben und Zellen setzen. Im Einzelnen ist die Forschung am Menschen aber noch nicht klar geregelt. Ein entsprechendes, umfassendes Humanforschungsgesetz ist im Bund zwar in Vorbereitung, dürfte aber wegen der Komplexität der Materie kaum in nächster Zeit verabschiedet werden. So ist mit einer Vernehm-

¹ Die folgenden Ausführungen sind einer im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstandenen Übersicht über die rechtlichen Leitprinzipien der Biomedizin (Schmithüsen 2003) entnommen. Sie soll separat veröffentlicht werden.

lassung nicht vor Ende 2004 zu rechnen. Solange noch kein entsprechendes Bundesgesetz vorliegt, sind die Richtlinien der schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften primär massgebend (insbesondere die Richtlinie vom 5. Juni 1997 betreffend Forschungsuntersuchungen am Menschen), die als ärztliches Standesrecht rechtlich beschränkt verbindlich sind.

Daneben finden sich eine Reihe von gesetzlichen Bestimmungen, die sektoriell für die verschiedenen Bereiche der Gentechnologie, der Nanotechnologie, aber auch der Bioinformatik einen verbindlichen Rahmen definieren bzw. in absehbarer Zeit definieren werden. Die folgende Aufstellung berücksichtigt neben bereits beschlossenen Gesetzen auch veröffentlichte Entwürfe des Bundesrates und Rechtssetzungsaufträge des Parlamentes.

- Heilmittelgesetz vom 15. Dezember 2000 (HMG)
- Fortpflanzungsmedizingesetz vom 18. Dezember 1998 (FMedG)
- Entwurf zu einem Embryonenforschungsgesetz vom 20. November 2002 (EFG)
- Entwurf zu einem Gesetz über genetische Untersuchungen beim Menschen vom 11. September 2002 (GUMG)
- Entwurf zu einem Transplantationsgesetz vom 12. September 2001 (Transplantationsgesetz; dieser Entwurf soll den heute in Kraft stehenden Bundesbeschluss über die Kontrolle von Transplantaten vom 22. März 1996 ablösen)
- Entwurf zu einem DNA-Profil-Gesetz vom 8. November 2000 (DNA-Profil-Gesetz)
- Parlamentarischer Auftrag an den Bundesrat zur Schaffung eines Bundesgesetzes betr. medizinische Forschung am Menschen (Motion Gian-Reto Plattner vom 1. Dezember 1998)
- Parlamentarischer Auftrag an den Bundesrat zur Schaffung einer Verfassungsbestimmung betreffend Forschung am Menschen (Motion der Kommission für Wissenschaft, Bildung und Kultur des Ständerates vom 18. Februar 2003).

Besonders interessant ist im vorliegenden Zusammenhang der Entwurf für ein Gesetz über genetische Untersuchungen beim Menschen vom 11. September 2002 (BB1 2002, 7481 ff.). Darin wird eine ganze Reihe von Aspekten aufgenommen, die im vorliegenden Bericht schon mehr oder weniger direkt zur Sprache gekommen sind:

- Verbot von Diskriminierung auf Grund des Erbgutes (Art. 4): Der Entwurf enthält ein allgemeines Diskriminierungsverbot auf Grund des Erbgutes, das in die gesamte Rechtsordnung hinein wirken soll.

- Einwilligung der Betroffenen: Genetische und pränatale Untersuchungen (einschliesslich Reihenuntersuchungen) setzen die Einwilligung nach Aufklärung der Betroffenen voraus (Art. 5).
- Recht auf Nichtwissen: Jede Person soll selbst entscheiden können, ob sie vom Resultat der Untersuchung Kenntnis nehmen will (Art. 6).
- Verbot der Abgabe genetischer In-vitro-Diagnostika: Zum Schutz vor den Gefahren eines unkontrollierten Gebrauchs sollen verwendungsfertige Erzeugnisse zum Nachweis von Eigenschaften des Erbguts (In-vitro-Diagnostika) nur an Personen abgegeben werden dürfen, die sie im Rahmen ihrer beruflichen oder gewerblichen Tätigkeit einsetzen dürfen (Art. 9).
- Reihenuntersuchungen: Diese müssen gesondert bewilligt werden, wobei die Expertenkommission für genetische Untersuchungen beim Menschen sowie unter Umständen die nationale Ethikkommission im Bereich der Humanmedizin angehört werden muss (Art. 12).
- Grundsätzliches Verbot genetischer Untersuchungen im Arbeitsbereich: Es ist dem Arbeitgeber verboten, präsymptomatische genetische Untersuchungen oder die Offenlegung früherer Untersuchungen zu verlangen bzw. deren Ergebnisse zu verwerten. Die Ausnahmen sind restriktiv geregelt (Art. 21 ff.).
- Allgemeines Untersuchungsverbot und begrenztes Nachforschungsverbot im Versicherungsbereich: Die Aufnahme in eine Versicherung darf nicht von der Vorlage einer präsymptomatischen oder pränatalen genetischen Untersuchung abhängig gemacht werden. Eine (vertragliche) Offenlegungspflicht ist nur in bestimmten Fällen erlaubt (Art. 27 f.).

Auch im schon bestehenden *Fortpflanzungsmedizinengesetz* (SR 814.90) werden Einschränkungen gemacht, die für die Nanotechnologie in der Medizin von Bedeutung sein könnten:

- Verbot der Wahl bestimmter Eigenschaften des zu zeugenden Kindes: Bei der Auswahl von Keimzellen dürfen das Geschlecht und andere Eigenschaften des zu zeugenden Kindes beeinflussende Faktoren nur berücksichtigt werden, wenn die Abwendung einer schweren, unheilbaren Krankheit anders nicht bewerkstelligt werden kann. Es können aber bei gespendeten Samenzellen die Blutgruppe und die Ähnlichkeit der äusseren Erscheinung des Spenders mit dem Mann, zu dem ein Kindesverhältnis begründet werden soll, berücksichtigt werden. Gesundheitliche Risiken, insbesondere für die schwangere Frau, sind bereits bei der Auswahl von Spendern zu berücksich-

tigen, andere Kriterien (wie deren Intelligenz, musische Begabung etc.) sind demgegenüber nicht zulässig (Art. 5, 19, 22).

- Verbot der Präimplantationsdiagnostik: Verboten ist die Ablösung und Untersuchung von Zellen des Embryos *in vitro* (Art. 5).
- Verbot der Eingriffe in die Keimbahn: Eingriffe in Keimbahn- oder embryonale Zellen sind verboten, soweit sie nicht unvermeidliche Begleiterscheinungen von ärztlichen Behandlungen (Strahlentherapie und ähnliche) sind, denen sich eine Person unterzieht (Art. 35).
- Verbot der Klonen, der Chimären und Hybridbildung: Die Bildung oder Übertragung eines Klons, einer Chimäre oder von Hybriden wird unter Strafe gestellt (Art. 36).

Ebenfalls von Bedeutung ist die europäische Biomedizinkonvention aus dem Jahre 1997, der die Schweiz beizutreten gedenkt (vgl. Kasten 18). Darüber hinaus sind für die Schweiz auf Bundesebene noch eine Reihe von Kommissionen zu erwähnen (Kasten 19).

7.5 Beurteilung

Im Folgenden wird versucht, eine erste Beurteilung der Entwicklung mit Blick auf steuernde Eingriffe vorzunehmen. Wir möchten ausdrücklich betonen, dass es sich dabei um *unsere eigene Einschätzung* handelt. Die folgenden Überlegungen haben zwar ihren Ausgangspunkt in der Nanotechnologie und ihren Anwendungen in der Medizin, beziehen sich nach unserem Verständnis grundsätzlich aber auch auf den ganzen Bereich der Biotechnologie im Humanbereich.

Mit den stark zunehmenden Kenntnissen in diesen sich überlappenden und sich gegenseitig nur schwer abgrenzbaren Bereichen stellen sich für die Gesellschaft eine Reihe von ganz besonderen Herausforderungen. Diese ergeben sich aus den immensen Möglichkeiten dieser Technologien, aber auch aus der Komplexität biologischer Systeme und damit zusammenhängend aus den nur schwer abschätzbaren Risiken. Sie beruhen auch darauf, dass die "Richtung" der Entwicklung nur grob abschätzbar ist. Dabei ist zwischen der Entwicklung neuer Technologien und der Entwicklung neuer Anwendungen zu unterscheiden. Da angesichts eines kaum lösbaren Prognoseproblems nicht von vornherein gesagt werden kann, ob sich eine Technologie in der Anwendung zum Nutzen oder zum Schaden der Gesellschaft entwickeln wird, sollte – wie bisher – der Forschungsfreiheit ein hoher Stellenwert zugemessen werden, während im Bereich der Zulassung von Anwendungen besondere Vorsicht geboten ist.

Kasten 19: Für die Biomedizin relevante Kommissionen in der Schweiz**Eidgenössische Fachkommission für biologische Sicherheit (EFBS)**

Die EFBS berät die Behörden beim Schutz von Mensch und Umwelt im Bereich der Biotechnologie. Sie nimmt Stellung zu Bewilligungsgesuchen und empfiehlt Sicherheitsmassnahmen für Arbeiten mit genetisch veränderten oder pathogenen Organismen. Zu Erkenntnissen im Bereich der Biosicherheit informiert sie die Öffentlichkeit.

Nationale Ethikkommission im Bereich der Humanmedizin (NEK)

Die NEK berät die Behörden zu ethischen Fragen im Bereich der Humanmedizin. Sie verfolgt die wissenschaftliche Entwicklung insbes. der Biomedizin und soll in einigen Fällen auch Stellung zu Bewilligungsgesuchen nehmen. Die NEK kann öffentliche Veranstaltungen oder Hearings zu medizinethischen Fragen durchführen.

Ethikkommissionen für klinische Versuche

Diese regional verankerten Kommissionen beurteilen klinische Versuche mit Arzneimitteln und anderen medizinischen Produkten. Nach dem geplanten Embryonenforschungsgesetz sollen sie für die Bewilligung von Forschungsprojekten an embryonalen Stammzellen zuständig sein.

Expertenkommission für genetische Untersuchungen beim Menschen

Das geplante Gesetz über genetische Untersuchungen beim Menschen sieht eine neu zu schaffende Fachkommission vor, welche die wissenschaftliche und praktische Entwicklung im Bereich der Genomforschung verfolgen und entsprechende Empfehlungen ausarbeiten soll. Für den Bereich der genetischen Untersuchungen erhält sie eine Reihe von Vollzugs- und Beurteilungsaufgaben.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass die Entwicklung der Nanotechnologie in der Medizin nicht einer einzelnen wissenschaftlichen Disziplin zugeordnet werden kann, sondern in hohem Masse interdisziplinär und arbeitsteilig organisiert ist. Damit einher geht die Schwierigkeit, regelungsbedürftige Tatbestände zu formulieren. Die Konzentration auf einzelne, jeweils sich allmählich klarer abzeichnende Bereiche nanotechnologischer Anwendungen, verbunden mit einer systematischen Technologiefolgen-Abschätzung, sollte hier eine massgebliche Hilfe darstellen.

Die Bestimmung von Tatbeständen, die eine besondere staatliche und gesellschaftliche Aufmerksamkeit verdienen und allenfalls auch gesondert geregelt werden müssen, muss aber dort ihre Grenze finden, wo hoch spezifische Probleme einzelner Forschungs- oder Anwendungsbereiche unangemessen stark in den Vordergrund gerückt werden. Notwendig ist daher immer auch eine die gesamte Technologieentwicklung reflektierende, fortwährend aktualisierte Gesamtschau. Sie sollte die allgemeinen Grundlagen für den Umgang mit risikobehafteten Technologien liefern.

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen müssen den Kriterien der Rechtssicherheit und der Vorhersehbarkeit staatlichen Handelns genügen. Rechtssicherheit und Vorhersehbarkeit müssen aber auch mit der Notwendigkeit abgewogen werden, gesetzgeberische Entscheidungen unter Umständen zurückzunehmen. Dies ist eine Konsequenz des Vorsorgeprinzips, das eine permanente Überprüfung der Entwicklung, u.a. mit Risikoanalysen verlangt. Nur so ist sicherzustellen, dass die bestehenden Rechtsvorschriften mit dem Stand von Wissenschaft und Technik und der (internationalen) Rechts- und Werteentwicklung übereinstimmen. Bei der Risikoanalyse sollten nicht nur wissenschaftlich messbare Sicherheitsinteressen, sondern auch allgemeine öffentliche Bedenken ernst genommen und berücksichtigt werden (z.B. fehlende Sozialverträglichkeit, vages Unsicherheitsgefühl, allgemeine ethische Bedenken).

Die Entwicklung von konsensfähigen Rahmenbedingungen für nanotechnologische Anwendungen in der Medizin und darüber hinaus hängt eng mit einer möglichst breiten Einbindung der in diesem Bereich relevanten Akteure zusammen. Dabei sollten die Forscher, die an der Forschung und ihrer Verwertung interessierten Unternehmen sowie die Organisationen der Zivilgesellschaft möglichst eng in die Konsensbildung eingebunden werden.

Dabei sind die Entwicklungen in der EU, in den wichtigsten Forschungsstandorten, wie den USA und Japan, aber auch in den Entwicklungsländern zu berücksichtigen. Nachhaltige internationale Verhandlungslösungen sind angesichts des grenzüberschreitenden Charakters wissenschaftlicher Forschung unabdingbar. In diesem Sinne ist die vom schweizerischen Bundesrat angestrebte Unterzeichnung der Biomedizinkonvention von grosser Bedeutung. Sie fördert einen akzeptablen und gangbaren europäischen Regelungsrahmen.

Besonderes Augenmerk verdient auch die Entwicklungspolitik. In einer langfristigen Perspektive scheint klar, dass sich die Nanomedizin nur dann zum Wohl aller Menschen durchsetzen kann, wenn eine international gerechte Verteilung ihres Nutzens gefördert wird. Als einer der grossen Akteure im Bereich Biowissenschaften hat die Schweiz hier sicher eine besondere Verantwortung.

Die Nanomedizin wird die Palette möglicher medizinischer Interventionen deutlich vergrössern. Die Auseinandersetzung, wem welche medizinischen Leistungen unter welchen Bedingungen zugute kommen sollen, ist bereits heute im Gange; ihre Intensivierung ist damit absehbar. Diese Auseinandersetzung könnte schwerwiegende Konsequenzen insbesondere für das Recht auf informationelle Selbstbestimmung haben. Es könnte z.B. der (ökonomische) Druck zunehmen, bestimmte Leistungsbezieher von Krankenkassen zu Untersuchungen über ihre Krankheitsveranlagungen zu zwingen – als Voraussetzung für eine (weiterhin) vollständige Risikoabdeckung. In wie weit es gelingt, mit dem neuen Gesetz über genetische Untersuchungen beim Menschen dieser Tendenz entgegenzutreten, muss abgewartet werden.

Auf die eigentliche Forschung kann der Staat vor allem durch eine gezielte Vergabe von Fördergeldern Einfluss nehmen. Die Förderung der wissenschaftlichen Forschung sollte dementsprechend breit diskutiert werden. Wichtig sind klare und transparente Regelungen der Vergabepaxis. Diese muss auch Massnahmen vorsehen, um kontroverse Fragen wie ethische und sozioökonomische Themen zu behandeln.

Schliesslich ist auf Herausforderungen im Bereich der Information und der Bildung hinzuweisen. Zu recht hebt die Biomedizinkonvention den Stellenwert der öffentlichen Diskussion über Chancen und Risiken hervor. Ohne entsprechende Bildung und Information in der Öffentlichkeit lässt sich eine derartige Diskussion aber nicht auf breiter Front durchführen. Bildungsbedarf besteht aber auch bei den eigentlichen Spezialisten. Der geforderte Dialog zwischen Wissenschaftlern, die an biotechnologischen Methoden und Anwendungen forschen, und anderen, den gesellschaftlichen Konsens mitprägenden Akteuren, kann nämlich nur gelingen, wenn eine entsprechende interdisziplinäre Basis geschaffen wird.

8 Thesen

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse unserer Untersuchung in Form von einigen prägnanten Thesen zusammengefasst. Sie bilden zusammen mit unseren Überlegungen in Abschnitt 7.5 die Grundlage für die Empfehlungen für das weitere Vorgehen (vgl. Kapitel 9).

These 1: Die Nanotechnologie ist eines der ganz zentralen Technologie-themen des 21. Jahrhunderts. Sie betrifft die Forschung von zahlreichen Disziplinen, unter anderem die Physik, die Chemie, die Materialwissenschaften, die Biologie und die Medizin.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 1.1, 2.2 und 3.1.

These 2: Die Nanotechnologie wird die Medizin bereits in den nächsten 20 bis 30 Jahren deutlich verändern, sowohl in der medizinischen Forschung, in der Diagnose wie auch in der Therapie. Diagnosen werden schneller, können deutlich stärker zur Prävention eingesetzt werden, liefern spezifischere und genauere Resultate. Nanobasierte Therapien werden neue Therapiemöglichkeiten eröffnen, werden wirksamer sein als konventionelle Therapien und weniger Nebenwirkungen aufweisen. Zahlreiche Entwicklungshindernisse (u.a. wissenschaftliche, technische, regulatorische, soziale) dürften das Tempo der Entwicklung zwar verlangsamen, aber nicht aufhalten.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 2.3, 3.1, 3.2 und 3.3 sowie 4.1, 4.2, 4.3 und 7.5.

These 3: Vor allem bei Tumorerkrankungen, bei viralen Erkrankungen sowie bei anderen Krankheiten sind erhebliche Fortschritte zu erwarten. Längerfristig dürfte die krankheitsarme Lebensspanne zunehmen, dürften sich Verschiebungen in den Todesursachen und eine Vergrößerung der Lebenserwartung ergeben.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 4.4 sowie 5.1, 6.1 und 6.2.

These 4: Die Tendenz zum "gläsernen" Bürger wird zunehmen. Wissen über individuelle Krankheitsdispositionen, physiologische Besonderheiten usw. dürfte, von gesetzlichen Beschränkungen abgesehen, frei verfügbar werden. Es dürfte zusehends schwieriger werden, das verfügbare Wissen vor sich selbst aber auch vor der Gesellschaft zu verbergen. Das Recht auf "Nichtwissen" wird zur Debatte stehen. Missbrauchsrisiken werden zunehmen.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 5.2, 5.3, 6.2 und 6.3.

These 5: Die Fortschritte der Nanotechnologie in der Medizin dürften mindestens mittelfristig kaum eine Entlastung bei den Gesundheitskosten bringen; und der Trend zur Zweiklassenmedizin dürfte eher verstärkt werden.

Weitere Ausführungen dazu finden sich im Abschnitt 6.2.

These 6: Bestehende Konfliktpotenziale, wie sie sich vor allem im Zusammenhang mit der Gentechnologie bzw. ihren direkten und indirekten Anwendungen in der Diagnose und der Therapie gezeigt haben, werden sich verstärken.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 3.4 und 6.3.

These 7: Neue Konfliktpotenziale zeichnen sich ab bezüglich der möglichen Gefahren der "Nanotoxizität" und der "Nanopollution" (insbesondere bezüglich der ungewollten Aufnahme von Nanopartikeln über die Umwelt und deren Integration in die Nahrungskette) und längerfristig um Befürchtungen zur ungenügend kontrollierten Selbstreplikation von Nanostrukturen.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 2.4 und 3.4.

These 8: Noch hat die Frage danach, was wir als Menschen sind und was wir als Menschen sein wollen, einen eher philosophischen Zug. Mit den Fortschritten der Nanotechnologie in ihrer Anwendung auf den Menschen werden diese Fragen aber eine immer "praktischere" Bedeutung erlangen. Man wird sich nicht vor der Beantwortung dieser Fragen dispensieren können. Denn sie werden schliesslich entscheidend dafür sein, ob man eine bestimmte Forschung, eine bestimmte Anwendung erlauben will oder nicht.

Weitere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 5.4 sowie 7.1, 7.2 und 7.3.

9 Empfehlungen

Die schon heute absehbaren technischen Möglichkeiten der Nanotechnologie sind riesig und beeindruckend, vor allem auch in der Medizin. Gerade deshalb darf sie sich nicht der beurteilenden und damit auch wertenden Reflexion entziehen. Die Auswirkungen auf den Einzelnen und die Gesellschaft müssen deshalb Gegenstand eines permanenten "Beobachtungs- und Reflexionsprozesses" sein.

Es sollte daher mit hoher Priorität ein interdisziplinär zusammengesetztes *Fachgremium* geschaffen werden, wenn möglich auf internationaler Basis, welches die Entwicklungen im Bereich der Nanowissenschaften (über die Nanotechnolo-

gie in der Medizin hinaus) vertieft und fortlaufend analysiert und deren kurz-, mittel- und langfristige Auswirkungen in einem umfassenden Sinne verfolgt. Dazu gehört das Verfolgen der technischen Möglichkeiten genau so, wie das Abschätzen von Risiken, die Analyse der ökonomischen und sozialen Auswirkungen oder die Identifikation ethisch fragwürdiger Entwicklungen. Im Wesentlichen geht es darum, etwaige Risiken und Fehlentwicklungen rechtzeitig zu erkennen und geeignete Lösungen zu erarbeiten und den verantwortlichen Instanzen zu unterbreiten.

Dieses Gremium müsste gegenüber den Partikularinteressen einzelner Gruppen oder staatlicher Stellen unabhängig sein und über die erforderliche fachliche Autorität verfügen. In diesem Gremium müssten Fachleute aus dem ganzen Bereich der betroffenen Natur- und Sozialwissenschaften Einsitz nehmen und es müsste mit den erforderlichen Mitteln und Kompetenzen ausgestattet werden, um seiner Aufgabe nachkommen zu können.

Für die *konkrete Arbeit* des vorgeschlagenen Fachgremiums ergeben sich drei Schwerpunkte:

1. Risikoforschung fördern

Beim derzeitigen Wissensstand kommt der Förderung der Risikoforschung auf dem Gebiet der *Nanotoxizität* und der *Nanopollution* eine grosse Bedeutung zu. In diesem Bereich bestehen grosse Wissensdefizite. Wie sich Nanopartikel in biologischen Systemen und im ökologischen Zusammenhang verhalten, ist noch weitgehend ungeklärt. Es bestehen aber deutliche Indizien, dass sich mit dem Einsatz von Nanopartikeln unvorhergesehene neue medizinische Situationen einstellen könnten, dass diese in der Lage sind, das Immunsystem zu "hintergehen" oder die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden. Unabhängig von allfälligen medizinischen Anwendungen besteht hier ein erheblicher Forschungsbedarf. Unbeantwortet sind zur Zeit auch noch viele Fragen in Bezug auf die Giftigkeit der Nanopartikel selbst und auf ihr Vermögen, giftige Verbindungen in Zellen zu transportieren bzw. dort einzugehen. Während sich die allfällige Toxizität von Nanopartikeln, welche für medizinische oder andere Anwendungen vorgesehen sind, im Laborexperiment grundsätzlich mit bewährten Methoden prüfen lässt, ist nicht klar, wie die Gefahren abgeschätzt werden können, die aus einer Freisetzung von Nanoteilchen in die Umwelt und deren Verbreitung z.B. über die Nahrungskette erwachsen könnten. In diesem Bereich muss noch erhebliche methodische Entwicklungsarbeit geleistet werden.

2. Begleitforschung einrichten

Hier geht es um die Einrichtung einer *permanenten Begleitforschung*, welche weit über die im ersten Punkt gemeinte Risikoforschung hinausweist. Wichtig ist, dass immer wieder neu darüber nachgedacht wird, was die Zukunft bringen wird, welche Risiken in welchem Umfang absehbar und tatsächlich fassbar werden, wie man mit bestimmten Entwicklungen in einer Gesamtschau umgehen kann, welche Vorkehrungen gegebenenfalls zu treffen sind usw.

Aus der hier vorgelegten Untersuchung ergeben sich u.a. die folgenden *Untersuchungsschwerpunkte*:

- Eng verknüpft mit der Risikofrage ist die *Akzeptanz* künftiger Forschungen und Anwendungen der Nanotechnologie in der Medizin und darüber hinaus. Welche Bedingungen wird die Gesellschaft daran knüpfen wollen? Was sollen überhaupt die Ziele dieser Forschungen sein? Salopp formuliert: Welche Medizin wollen wir? Welche *Bedingungen* sollen an die Forschung und später an die Anwendungen gestellt werden? Und natürlich: Nach welchen Kriterien könnte die öffentliche Hand angesichts beschränkter Geldmittel bestimmte Forschungsthemen in der (medizinischen) Nanotechnologie priorisieren?
- Auf der informellen Seite sind *Anwendungsprobleme und Missbrauchsrisiken* absehbar. Wie geht man damit um, dass genetische und andere Informationen mit prädikativem Charakter frei verfügbar werden, sei dies legal oder illegal? Welche Lösungsmöglichkeiten, insbesondere im Versicherungs- und Arbeitskontext sind denkbar?
- Eng verknüpft mit den obigen Punkten und diese ergänzend ist die *ethisch-moralische Dimension*. Der Mensch ist daran, so viel mehr zu können und zu wissen als bisher, dass die Frage, was wir im Einzelfall oder ganz grundsätzlich erlauben und / oder tun wollen und was nicht, von eminenter Bedeutung wird.
- Ein wichtiger Fragenkomplex betrifft die längerfristigen *ökonomischen Folgen* einer breiten Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin, wenn tatsächlich eine Verschiebung der Todesursachen eintreten sollte, die krankheitsfreie oder -arme Zeit und die Lebenserwartung zunehmen würde usw. Was sind die gesundheitspolitischen Auswirkungen? Wie sind diese zu bewerten?
- Angesichts der schon heute kaum überschaubaren Vielfalt nanotechnologischer Aktivitäten muss auch die Frage angegangen werden, wie man das hochkomplexe Geflecht nanotechnologischer Errungenschaften in der Medizin im Sinne eines *Monitorings* überhaupt systematisch erfassen und für ein

breiteres Publikum verstehbar aufbereiten kann. Und erst recht stellt sich die Frage, wie man das damit verbundene Prognoseproblem in den Griff bekommen könnte.

3. Gesamtgesellschaftlicher Verständigungsprozess einleiten

Die potenziellen Auswirkungen der Nanotechnologie in der Medizin und darüber hinaus sind derart einschneidend, dass ergänzend zur Begleitforschung ein permanenter gesamtgesellschaftlicher Verständigungsprozess einzuleiten ist. Nur so können wenig fruchtbare Polarisierungen und Fehler, die in anderen Technologiebereichen wie etwa bei der Gentechnologie gemacht wurden, vermieden werden. Dies gelingt aber nur, wenn eine breit abgestützte Diskussion und Auseinandersetzung mit diesem Thema stattfindet. (Natur)wissenschaftliche, ökonomische, politische wie auch ethische Aspekte müssen dabei zur Sprache kommen. Nach unserer Einschätzung darf damit aber nicht zugewartet werden, bis das erste ernsthafte "Problem" auftritt und eine kaum mehr deblockierbare Situation entstanden ist.

Damit dies gelingt, müssen in diesen Prozess alle relevanten Akteure einbezogen werden: Die Forschung selbst, die an der Verwertung der Erkenntnisse interessierten Unternehmen, die Öffentlichkeit und ihre staatlichen und privaten Vertreter sowie die Geld gebenden Institutionen. Ziel ist die öffentliche Diskussion und Reflexion von Chancen und Risiken - eng verzahnt mit und alimentiert von der laufenden Begleitforschung. Dazu gehört auch die Diskussion des grundsätzlichen Verhältnisses von Forschung und Gesellschaft, damit zusammenhängend von Kriterien zur Forschungsförderung, von möglichen Randbedingungen bei der Anwendung, usw. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass eine gemeinsame Sprache gefunden wird, dass auch entsprechende Bildungs- und Informationsanstrengungen unternommen werden. Mit der Institutionalisierung eines solchen Verständigungsprozesses könnte gerade die Schweiz international gesehen eine "Nische" besetzen, indem bisherige Anstrengungen in dieser Richtung (etwa in den USA) nicht mal alle zur Verfügung stehenden Geldmittel ausschöpften (vgl. z.B. Mnyusiwalla 2003).

10 Referenzen

10.1 Literatur

Die Literatur über Nanotechnologie und ihre (möglichen) Anwendungen ist bereits heute unüberblickbar. Selbst wenn man sich auf den medizinischen Kontext

beschränkt, ist es heute nicht mehr möglich, eine Übersicht nur schon über die wichtigsten Publikationen zu erlangen. Die folgende Liste ist damit notwendigerweise eine Auswahl. Die zitierten Arbeiten haben wir effektiv zu Rate gezogen, und sie liegen uns in Papierform oder als käufliche Diskette vor. Wir beschränken uns, von den eigentlichen "Klassikern" abgesehen, auf aktuelle Veröffentlichungen.

- Basics (1996): Neue Technologien und nachhaltige Entwicklung der Industrie, Studie im Auftrag des Schweizerischen Wissenschaftsrates, Programm TA, Bern
- Beckmann M. und Lenz P. (2002): Profitieren von Nanotechnologie, Investment der Zukunft, FinanzBuch Verlag, München
- Borchard-Tuch C. und Gross M. (2002): Was Biotronik alles kann, Blind sehen, gehörlos hören ..., Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Brockhaus (2000a): Technologien für das 21. Jahrhundert, F. A. Brockhaus, Leipzig / Mannheim
- Brockhaus (2000b): Mensch, Maschinen, Mechanismen, F. A. Brockhaus, Leipzig / Mannheim
- Caspar W. (2000): Medizinische Terminologie, Lehr- und Arbeitsbuch, Georg Thieme Verlag, Stuttgart / New York
- Decker M. (Ed. 2001): Interdisciplinarity in Technology Assessment, Implementation and its Chances and Limits, Springer, Berlin et al.
- Drexler K. E. (1986): Engines of Creation, The Coming Era of Nanotechnology, Anchor Books, New York et al.
- Düwell M. und Hübenthal M. H. W. (Hrsg., 2002): Handbuch Ethik, Verlag J. B. Metzler, Stuttgart / Weimar
- Eckhardt A. (1998): Gentherapie, Studie im Auftrag des Schweizerischen Wissenschaftsrates, Programm TA, Bern
- Fishbine G. (2002): The Investor's Guide to Nanotechnology & Micromachines, John Wiley & Sons, New York
- GEO (2002): Die neuen Wege der Medizin, Wie moderne Heilkunst und Biotechnik unser Leben verändern, GEO-Wissen, Nr. 30, Gruner + Jahr, Hamburg
- Georgescu V. und Vollborn M. (2002): Nanobiotechnologie als Wirtschaftskraft, Neue Märkte, neue Produkte, neue Chancen, Campus Verlag, Frankfurt / New York
- Hartmann U. (2001): Nanobiotechnologie, Eine Basistechnologie des 21. Jahrhunderts, Zentrale für Produktivität und Technologie Saar e. V., Saarbrücken
- Hett A. und Tanner R. (2003): Kleine Dinge – grosse Wirkung?, NZZ (30. September 2003)

- Hüsing B. et al. (2003): Menschliche Stammzellen, Zukunftsperspektiven und ethische Fragen embryonaler und adulter Stammzellen, Studie im Auftrag der TA-SWISS, Bern
- ISI (1998): Delphi 98, Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), Bonn
- Kleesattel W. (2002): Gentechnik, Cornelsen Skriptor, Berlin
- Kleiner K. und Hogan J. (2003): How safe is nanotech? New Scientist (29. März 2003)
- Köhler M. (2001): Nanotechnologie, Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik, Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Kornwachs K. (Hrsg. 1991): Reichweite und Potential der Technikfolgenabschätzung, C. E. Poeschel, Stuttgart
- Martin George M. et al. (2003) Research on Aging: The End of the Beginning, Science 299, p. 1339-1341
- Mieth D. (2002): Was wollen wir können? Ethik im Zeitalter der Biotechnik, Herder, Freiburg, Basel, Wien
- Naica-Loebell A. (2003): Je kleiner, desto giftiger, Heise-online, www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/lis/14655/1.html
- Mnyusiwalla A. et al. (2003): Mind the gap: science and ethics in nanotechnology, Nanotechnology 14, R9-R13
- NSET (2001): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, ed. by M. C. Roco and W. S. Bainbridge, National Science Foundation, Arlington, Virginia, USA (<http://itri.loyola.edu/nano/societalimpact/nanosi.pdf>)
- Olhansky S. J. und Cares B. A. (2001): The Quest for Immortality, Science at the Frontiers of Aging, W.W. Norton & Company, New York / London
- Petermann Th. (Hrsg., 1992): Technikfolgenabschätzung als Technikforschung und Politikberatung, Campus, Frankfurt / New York
- Pschyrembel (2002): Klinisches Wörterbuch, CD-ROM, Version 2002, de Gruyter, Berlin
- Rippe Klaus Peter et al. (o. J.): Pharmacogenomics, Genetische Grundlagen über Wirksamkeit bzw. Nebenwirkungen von Medikamenten, laufende Studie im Auftrag der TA-SWISS, Bern
- Rubahn H.-G. (2002): Nanophysik und Nanotechnologie, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden
- Schirmacher F. (Hg., 2001): Die Darwin AG, Wie Nanotechnologie, Biotechnologie und Computer den neuen Menschen träumen, Kiepenheuer & Witsch, Köln
- Schmithüsen B. (2003): Leitprinzipien der Biomedizin, Manuskript

- Schweizer R. J. (2002): Verfassungs- und völkerrechtliche Vorgaben für den Umgang mit Embryonen, Föten sowie Zellen und Geweben, Schulthess, Zürich
- Scientific American (2001): Special Issue: Nanotech, The Science of the Small Gets Down to Business, Scientific American, New York
- Smalley Richard E. (2001): Of Chemistry, Love and Nanobots, in: Scientific American (2001), p. 86 - 87
- Spektrum der Wissenschaft (2001): Spezial: Nanotechnologie, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg
- Spektrum der Wissenschaft (2002): Dossier: Gene, Klone, Fortpflanzung, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg
- STCG (2001): Das schweizerische Kompetenznetz in der Mikro- und Nanotechnologie, SWX Swiss Exchange, Zürich
- Steinfeldt M. (Hrsg. 2003): Mit Nanotechnologie zur Nachhaltigkeit? Prospektive Technologiebewertung einer zukünftigen Schlüsseltechnologie, Schriftenreihe des IÖW 166/03, Berlin
- VDI (2001): Innovations- und Technikanalyse, Vorstudie Nanotechnologie, im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf
- von Gleich A. (2003): Mögliche ökologische und gesundheitliche Wirkungen der Nanotechnologie, Ansätze für eine prospektive Technologie-Bewertung und Gestaltung, in: Steinfeldt (2003), S. 15 - 47
- Weber Th. P. (2002): Genforschung, DuMont, Köln
- Wood S., Jones R. Geldard A. (2003): The Social and Economic Challenges of Nanotechnology, Economic and Social Research Council (ESRC), Swindon
- Zoglauer Thomas (2002): Konstruiertes Leben, Ethische Probleme der Humangenetik, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt

10.2 Links

Was oben zu (wesentlich papierbasierten) Informationsquellen gesagt wurde, gilt erst recht für das Internet. Im Rahmen unserer Arbeiten haben wir viele Internet-Sites kontaktiert, insbesondere auch im Rahmen unserer Suche nach einschlägigen ExpertInnen. Die für ein breiteres Publikum interessantesten Seiten haben wir hier aus unserer Sicht zusammengestellt.

Unternehmen

www.nanosysinc.com Site eines US-Unternehmens, das generell Nanotechnologie entwickeln will

www.nanotherapeutics.com US-Unternehmen in Florida, das neue, auf Nanotechnologie basierende Medikamente entwickelt, übersichtliche und auch für Laien gut verständliche Website

Wissenschaftliche Institute

www.foresight.org Das kalifornische Foresight Institut hat sich auf "emerging technologies" spezialisiert - insbesondere auf die Nanotechnologie. Die Website bietet eine umfassende Übersicht über das Gebiet.

www.cnsi.ucsb.edu Das California Nanosystems Institute (CNSI) betreibt multidisziplinäre Forschung für biomedizinische, informations- und produktionstechnische Nano-Anwendungen. Die Website ist zur Zeit (Mai 2003) aber im Aufbau begriffen.

www.research.ibm.com/pics/nanotech IBM-Forscher haben zahlreiche Durchbrüche auf dem Gebiet der Nanotechnologie erzielt. Die Website bietet eine kompakte Übersicht über die Forschungsprojekte auf den unterschiedlichsten Gebieten.

Foren

www.nanodot.org Webforum über Nanotechnologie

www.tecsoc.org/innovate/focusbilljoy.htm Argumente zu und Diskussionsbeiträge über Bill Joy's Einschätzung der Nanotechnologie

Übersichten

www.foresight.org/NanoRev/FIFAQ.html Allgemeine Information über Nanotechnologie, FAQ

www.zyvex.com/nano Allgemeine Information über Nanotechnologie, viele gute Links

www.foresight.org/Nanomedicine Exzellente Übersicht über Nano-Medizin, FAQ, Links zu Dutzenden von Forschern auf diesem Gebiet

www.nanobionet.de Center of Excellence Nanobiotechnology Saarland-Rheinhesen-Pfalz, knappe, dafür auch für Laien verständliche Übersicht über unterschiedlichste Anwendungen der Nanobiotechnologie

www.nanomedicine.com Nüchtern gehaltene Website, auf welcher Bücher zur Nanomedizin vorgestellt werden. Der Inhalt der Bücher ist teilweise online abrufbar (auch Volltext, aber im schwer lesbaren HTML-Format)

www.cc-nanochem.de Übersicht über die Innovationen, welche die chemische Nanotechnologie auf verschiedensten Gebieten (Medizin, Sensorik, Elektronik, Optik, Oberflächentechnik, etc.) ermöglicht. Die Website ist sicher kein Meisterwerk der Präsentation, bietet aber gute, teilweise etwas "akademische" Information.

Portale

www.cordis.lu/nanotechnology Nanotechnologie-Portal der Europäischen Union. Die Website bietet eine Übersicht über die Innovationspolitik der EU und die Projekte im Europäischen Forschungsraum.

www.nanoforum.org Europäisches Nanotechnologie-Portal. Die Website ist ein guter Startpunkt, um Informationen zu holen über Technologien, Projekte in einzelnen Ländern, Veranstaltungen, Publikationen und Ausbildungsmöglichkeiten.

www.temas.ch Schweizer Portal für Dienstleistungen in neuen Technologien und Anwendung von wissenschaftlichen Erkenntnissen für Innovationen. Eine etwas karge Website, aber mit wichtigem Link zur internationalen Nano Conference, die im September in St. Gallen stattfindet.

Kritische Beobachter

www.etcgroup.org Kanadische Bewegung, die sich weltweit für nachhaltige und sozialverantwortliche Technologie-Entwicklung einsetzt

www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html Bill Joy's Artikel über die grossen Gefahren der Technologien des 21. Jahrhunderts

Schweizerische Nanotech-Links

www.temas.ch/nano/nano_homepage.nsf

Projekt "Top Nano 21" des ETH-Rats und der Kommission für Technologie und Innovation, leider eine etwas unübersichtliche Website

www.swiss-science.org/nfp47/index.htm Website des Nationalen Forschungsprogramms NFP 47, das den chemischen Teil der Nanotechnologie (sog. "Supramolekulare funktionale Materialien") abdeckt. Bietet unter "Supramolekulare Welt" auch eine leicht verständliche Übersicht sowie Links zu andern Forschungsgruppen und Gesellschaften sowie zu entsprechender Literatur.

www.snf.ch/nfp/nfp36/ Website des im Jahr 2000 abgeschlossenen Nationalen Forschungsprogramms NFP 36, das die Grundlagen der Nanotechnologie abdeckte. Die Website ist sehr nüchtern präsentiert, enthält aber eine ausführliche Zusammenfassung der einzelnen Projekte.

10.3 Interviewpersonen

Gesamthaft haben wir mit über 70 Persönlichkeiten fragebogenbasierte Interviews durchgeführt. Dazu kommen einige unstrukturierte informelle Gespräche. Darüber hinaus gab es bei der Expertensuche viele weitere Kontakte, die hier nicht ausgewiesen werden. Die folgenden ExpertInnen sind uns Red und Antwort gestanden:

-
- Banker, Gary, Ph. D., Oregon Health & Science University (OHSU), Portland Oregon, USA
- Bergstrom, Don, Ph. D., Department of Medicinal Chemistry and Molecular Pharmacology, Purdue University, West Lafayette, USA
- Birnbacher, Dieter, Prof. Dr., Philosophisches Institut, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, D
- Bora, Alfons, Prof., Universität Bielefeld, D
- Borchard-Tuch, Claudia, Dr. med., Zusmarshausen, D
- Born, Paul J.A., Prof., Institut für Umweltmedizinische Forschung (IUF), Universität Düsseldorf, D
- Braun, Kathrin, PD Dr., Institut für Politische Wissenschaft, Universität Hannover, D
- Busch, Roger J., Dr., Institut TTN, München, D
- Butt, Tauseef R., LifeSensors Inc., USA
- Carlson, Robert, The Molecular Sciences Institute, Malvern, USA
- Christen, Markus, Atelier Pantaris, Biel, CH
- Engel, Andreas, Prof., Universität Basel, CH
- Engelhardt Jr., H. Tristram, Dr., Dept. of Philosophy, Rice University, Houston, TX, USA
- Fink, Hans Werner, Prof., Universität Zürich, Physik-Institut, CH
- Frechet, Jean, Professor, University of California, Berkeley, Department of Chemistry, USA
- Freitas Jr., Robert A., Dr., Zyvex Corp., Richardson TX, USA
- Fuchs, Harald, Prof. Dr., Physikalisches Institut, Universität Münster, Kompetenzzentrum Nanoanalytik, D
- Genzer, Jan, Dr. Ph. D., NC State University, Department of Chemical Engineering, Raleigh, USA
- Gestrich, Christof, Prof., Theologische Fakultät, Humboldt-Universität, Berlin, D
- Gross, Michael, Dr., School of Crystallography, Birkbeck College London, UK
- Gundersen, Gregg, Prof., Columbia University, Department of Anatomy & Cell Biology, New York, USA
- Gutzwiller, Felix, Prof. Dr. med., Institut für Präventivmedizin, Universität Zürich, CH
- Haker, Hille, PD Dr. theol., Universität Tübingen, D
- Hampel, Jürgen, Dr., Akademie für Technikfolgenabschätzung, Stuttgart, D
- Haniel, Anja, Dr., Institut Technik-Theologie-Naturwissenschaften, München, D

-
- Hartmann, Uwe, Prof. Dr., Department of Experimental Physics, University of Saarbrücken, D
- Heckl, Wolfgang, Prof. Dr., Ludwig-Maximilians-Universität München, D
- Henn, Wolfram, Priv.-Doz. Dr., Institut für Humangenetik, Hamburg/Saar, D
- Hilpert, Konrad, Prof., Katholische theologische Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München, D
- Hohlfeld, Rainer, Dr. rer.nat., Berlin, D
- Hook, C. Christopher, M.D., Mayo Clinic, Rochester, USA
- Kerslick, Graham, Ph. D., Department of Chemistry and Chemical Biology, Baker Laboratory, Cornell University, Ithaca, USA
- Kliemt, Hartmut, Prof., Fach Philosophie, Universität Duisburg, D
- Koehler, J. Michael, Prof., Technische Universität Ilmenau, D
- Kollek, Regine, Prof., FSP Biotechnik, Gesellschaft und Umwelt, FG Medizin/Neurobiologie, Universität Hamburg, D
- Krohn, Wolfgang, Prof. Dr., Universität Bielefeld, D
- Kurz, Heinrich, Prof. Dr., Kompetenzzentrum NanoClubLateral AMO GmbH, Aachen, D
- Lawrence, David, Ph. D., Wadsworth Center, Albany, USA
- Lehrach, Hans, Prof. Dr., Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik, Berlin, D
- Lindau, Manfred, Prof., School of Applied and Engineering Physics, Cornell University, Ithaca, USA
- Ludi, Andreas, Prof., Chemisches Institut Universität Bern, CH
- Mange, Daniel, Prof., Logic Systems Laboratory, Ecublens, CH
- Maring, Matthias, PD Dr. phil., Institut für Philosophie, Uni Karlsruhe, D
- Meier, Wolfgang, Prof., University of Basel and International University of Bremen, CH
- Michel, Bruno, IBM Forschungslabor, Rüschlikon, CH
- Mieth, Dietmar, Prof., Universität Tübingen, D
- Müller, Klaus, Dr. rer. pol., Bern, CH
- Müller-Jung, Joachim, Dipl. Biologe und Wissenschaftsjournalist, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Redaktion, Frankfurt am Main, D
- Murer, Heini, Prof., Physiologisches Institut, Universität Zürich, CH
- Opitz, Heike, Dr., VITA 34 AG, Leipzig, D
- Oster, Georg, Prof., University of California, Berkeley, USA

-
- Paccaud, Fred, Prof. Dr. med., Institut universitaire de médecine sociale et préventive, Lausanne, CH
- Raguse, Burkhard, Dr., CSIRO Telecommunications and Industrial Physics, Lindfield, AUS
- Rubinsky, Boris, Prof., University of California, Berkeley, USA
- Ruhrmann, Georg, Prof., Universität Jena, D
- Sauer-Budge, Alexis, Ph. D., Harvard University, Department of Molecular and Cellular Biology, Cambridge, USA
- Saxl, Otilia, Institute of Nanotechnology, Stirling University, Scotland, UK
- Scheinberg, David A., Dr., Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, New York, USA
- Schmid, Günter, Prof. Dr., Institut für anorganische Chemie, Universität Essen, D
- Seeman, Nadrian C., Prof., Department of Chemistry, New York University, USA
- Smith, Steven S., Ph. D., City of Hope National Medical Center, Duarte, USA
- Spichiger-Keller, Ursula, Prof., Centre for Chemical Sensors and Chem-IT (ETHZ), Zürich, CH
- von Segesser, Ludwig K., Prof., Service de chirurgie cardio-vasculaire, CHUV, Lausanne, CH
- Wagner, Hermann, Prof., Institut für Biologie II, RWTH Aachen, D
- Weitschies, Werner, Prof., University of Greifswald, D
- Weltring, Klaus-Michael, Dr., Gesellschaft für Bioanalytik Münster e.V., D
- Whitesides, George, Prof., Department of Chemistry, Harvard University, Cambridge, USA
- Will, Peter, Prof., Scalable Systems Division, University of Southern California, Marina del Rey, USA
- Zoglauer, Thomas, Prof., TU-Brandenburg, Erfurt, D
- Zünd, Gregor, PD, Universitätsspital, Klinik für Herz- und Gefässchirurgie, Zürich, CH
- Zweifel, Peter, Prof., SOI, Universität Zürich, CH

Anhang: Fragebögen

Auf den folgenden Seiten ist der *Fragenteil* der drei Delphi-Fragebögen wiedergegeben, z.T. etwas verkürzt und layoutmässig angepasst.

Technology Forecast - Round 1

0. Personal background

Nanotechnology is being focussed on in many sciences: physics, medicine, microbiology, materials sciences, informatics, etc. This means researchers and experts in nanotechnology come from correspondingly varied professional backgrounds. Information on your background is important to us in evaluating your answers. Please put an "x" next to the subjects in the following table which pertain to you (multiple answers are expressly permitted) and note subjects in which you have specialized or where you possess specialized knowledge.

x	Subject	Subject of specialization
	Biology	
	Chemistry	
	Informatics	
	Materials sciences	
	Medicine	
	Pharmaceutics	
	Physics	
	Other:	

1. Working definition of nanotechnology

The term nanotechnology is extraordinarily complex. A generally accepted definition has yet to be established. A simple working definition of nanotechnology includes materials, structures and systems with the following properties (acc. to M. C. Roco, in *Scientific American*, September 2001, p. 28):

- they have at least one dimension between one and several* hundred nanometers,
- they are designed by processes exhibiting fundamental control over the physical and chemical properties of structures on a molecular scale,
- they can be assembled (deliberately) to form larger structures.

* We have expanded Roco's definition from one to several hundred nanometers in order to include this dimension in the nanotechnological "tool box" in question 3.

Can you agree to this working definition? What would you add or leave out?

Your answer:	
--------------	--

2. Nanotechnology in general

Nanotechnology is still in its beginnings but its development seems to be dynamic. Where do you expect the large breakthroughs as well as big problems (technical, economical, acceptance, etc.) within the next two decades?

Do not restrict yourself to nanotechnology in medicine alone but consider the entire field of nanotechnology. Please differentiate between two time spans: one until 2010, the other until 2020.

	Breakthroughs	Problems
Nanotechnology until 2010		
Nanotechnology until 2020		

Looking into the distant future, what do you assume will happen generally in nanotechnology and its applications?

Your answer:	
--------------	--

3. Applications of nanotechnology in medicine: "Preparing the tool box"

Nanotechnology's potential in medicine seems to be significant. Yet what do you think would be a realistic forecast predict until 2020?

In order to shed light on this question we have listed a **selection of nanotechnologies** either available today or in the near future (classified acc. to L. Tiefenauer).

If *in your view* important technologies are missing, please *add these* to the list (first column). Next to these nanotechnologies are listed some possible **key applications** in medicine (second column). We ask you to make similar *additions* here. Above all we are interested in what *you* see as the **perspectives** (considera-

tions, consequences) of these applications (third column, see examples). These may include e.g. technical difficulties, new categories of side effects or specific improvements. Please be as precise as possible. Finally we would like to know by **when** you estimate each of the applications will be scientifically proven and practically viable, i.e. when they would be available for medical practice (fourth column): Please choose one of the following entries: today 2005, 2010, 2015, 2020, later. If you have no comment to an item please explicitly note this by choosing "n.c." (no comment).

Feel free to overwrite any existing entry in the grey highlighted boxes.

Nanotechnological tool box	Possible applications in medicine	Perspectives consequences, considerations	Time frame
1. Particles			
Quantum dots	Can be attached as marker to an antibody (diagnosis)		
	Gene sequencing, gene identification		
Magnetic nanoparticles	Can be attached as marker to an antibody (diagnosis)		
	Cancer therapy: selective binding to tumor cells, which are destroyed by hyperthermia via alternating magnetic fields		
Dendrimers	localized externally controlled drug delivery		
Nanoshells	Nanoshells linked to antibodies bind specifically to tumor cells; heated by IR they destroy the tumor cells	only effective to a depth of a few cm	
2. Structures			
Scaffoldings	As basis to grow bones		
Nanotubes	chemical and genetic probes (atomic force microscope)		

	hypersensitive sensors (semiconducting nanotubes)	possibly not differentiating enough	
Nanostructured membrane	dialysis		
3. Surfaces			
Nano structuring	Biocompatible materials (e.g. for coatings of implants, artificial skin)		
Nanosizing	Compounds with low solubility can also be used as drugs	possibly doubling the amount of usable active substances (...)	
4. Methods			
Scanning probe microscope with optical pincers	Nanomicroscopy on living biostructures	Very low tracking force, less tissue damage	
Cantilever microscope	Gene sequencing and gene identification	Simultaneous identification of a large number of DNA sequences (...)	
5. Devices			
Nanosensors	diagnosis		
	prosthetics (eyes, ears)		
Nanomechanical devices	minimally invasive surgery		
	mechanically controlled localized drug delivery		

4. The role of nanotechnology from the perspective of medical research and practice

This question concerns the basic importance of nanotechnology in three main medical fields: research, diagnosis and therapy. We would like to know how important you estimate nanotechnology to be in each of these three fields at the given points on the time scale. Please use the following options: 1 = negligible; 2 = very small; 3 = small; 4 = quite, 5 = great; 6 = very great and state your reasons for these answers.

Medical research	2005	2010	2015	2020	later
Basic importance (1 to 6)					
Reason(s) for your answer					

Diagnosis	2005	2010	2015	2020	later
Basic importance (1 to 6)					
Reason(s) for your answer					

Therapy	2005	2010	2015	2020	later
Basic importance (1 to 6)					
Reason(s) for your answer					

5. A focus on some fields related to medical practice

Do you see some especially promising possibilities for applying nanotechnology in some of the following fields related to medical practice? Choose yes or no.

Explain your answer in the last column. Please keep in mind that the *time frame* of this survey is limited to the year 2020, i.e. the date by when a technique would be available for medical practice. If an important area is missing please add it to the list.

Examples	Yes or no	Your explanations and considerations
Gene technology in medicine		

Early and ultra-early diagnosis		
Pharmacology		

6. Implications of nanotechnology in some medical subject areas

What in *your view* will be the most significant implications of nanotechnology in the medical subject areas listed below? Please describe these as precisely as possible within the time frame of 2020.

If an important area is missing please add it to the list.

Subject area	Implications of nanotechnology in this area until 2020
Oncology	
Immunology	
Geriatrics	
Hereditary disease	
Psychiatry	

7. General comments

Would you like to add something in general or with the second round of the questionnaire in mind? Was something not addressed that in your view would have been important? Please feel free to state your opinion.

Your remarks:	
---------------	--

Technology Forecast - Round 2

1. Working definition of nanotechnology

The term nanotechnology is extraordinarily complex. A generally accepted definition has yet to be established. In the first round of the Mini-Delphi we proposed a simple working definition and asked for comments. As a result we now propose a slightly revised version:

"Nanotechnology concerns itself with the deliberate exchange of information between the macroworld and the submicroworld. It especially concerns itself with (mostly non-living) materials, structures and systems with the following properties:

- they measure, at least in one dimension, less than one hundred nanometers,
- they are designed by processes which allow to control their physical and chemical properties on a molecular scale,
- some can be assembled to form larger structures (through self-assembly or by nanomanipulation)."

Do you agree with this revised definition?

	Your answer (put an "x" where appropriate)	
	Yes	No
I agree with the revised definition.		

Would you like to add any additional comments?

Your comments:	
----------------	--

2. Nanotechnology in general

Nanotechnology is still in its beginnings but its development seems to be dynamic. In the first round, we asked where the large breakthroughs as well as big problems (technical, economical etc.) within the next two decades and beyond could be expected.

It is not easy to summarize the experts' opinions on the "technical" level, since very different aspects and possibilities for application have been listed (a survey will be given in the final report). However *one* main statement seems to crystallize out of the wealth of opinions: Nanotechnology will open up a completely new constructive field which was inaccessible until a few years ago. This development may be of a clearly exponential character, with rather few prominent applications until 2010, but broadly strewn applications by 2020.

Very different items are listed on the "problem side". Various experts think that money may become a bottleneck for research which should not be underestimated (as well as missing qualified personnel) but that the commercialization of knowledge (and thus also its broad availability) may be more difficult than expected. Other experts stress the technical difficulties (such as long term stability of nanostructures, biocompatibility, upscaling problems, among others). Problems of an ethical nature are also stated.

Choosing some aspects on the "problem side", we would like to hear your opinion.

Statement	I agree ... (put an "x" where appropriate)					
	not at all	a bit	partly	Mostly	fully	no comment
There is great inherent uncertainty about the development of nanotechnology within the next twenty years.						
The large time span between research and application is grossly underestimated.						
The long-term stability of nanostructures is a big problem.						
The upscaling of processes to amounts and volumes that are commercially interesting is a big problem.						
Stepping up from 1 to 2 or 3-dimensional structures is much more difficult than assumed.						
Unrealistic expectations are coupled with nanotechnology especially in the medical field.						

Problems concerning the biocompatibility of nanomaterials and structures are strongly underestimated.						
Ethical and social questions are not being perceived or anticipated sufficiently by the scientific community.						

Could there be a toxicity problem with nanoparticles?

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negli- gible	very small	small	quite	great	very great	no com- ment
Nanoparticles foreseen to be used in medicine may turn out to be toxic (or "dangerous" in a broader sense).							

What kind of particles and risks (if any) do you think?

Your answer:	
--------------	--

3. Applications of nanotechnology in medicine: "Preparing the toolbox"

Nanotechnology's potential in medicine seems to be significant. Yet what could be the (realistic) content of the nanotechnological toolbox in medicine until 2020?

In order to shed light on this question, we prepared a sparsely filled toolbox of nanotechnologies either available to date or in the near future. The toolbox to be filled up by the experts included materials, structures, systems and methods as well as some key applications in medicine. The main interest lay in the experts' assessment of the *perspectives* of these applications (e.g. with respect to specific improvements, technical problems, possible side effects, etc.) as well as on the estimated time frame within which an application could be assumed to become scientifically proven and practically viable, i.e. from when they would basically be available for medical practice. The revised toolbox will be contained in the fi-

nal report. Right now, we would like to ask some questions to three special applications.

3.1 Nanotechnological gene sequencing

How do you see the prospects of gene sequencing / identification (high throughput analysis)? Please answer by stating the respective probabilities.

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
Nanotechnological gene sequencing / identification will become a standard tool by							
... 2010							
... 2020							

Where do you see the basic difficulties?

Your answer:	
--------------	--

Where do you see the basic applications?

Your answer:	
--------------	--

3.2 Nanotechnological drug-delivery

How do you see the prospects of nanotechnological drug-delivery? Please answer by stating the respective probabilities.

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
Nanotechnological drug delivery will become a standard tool by							
... 2010							
... 2020							

Where do you see the basic difficulties?

Your answer:	
--------------	--

Where do you see the basic applications?

Your answer:	
--------------	--

3.3 Nanotechnological Targeting

How do you see the prospects of nanotechnological targeting? Please answer by stating the respective probabilities.

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negli- gible	very small	small	quite	great	very great	no com- ment
Nanotechnological targeting proce- dures will become a standard tool by							
... 2010							
... 2020							

Where do you see the basic difficulties?

Your answer:	
--------------	--

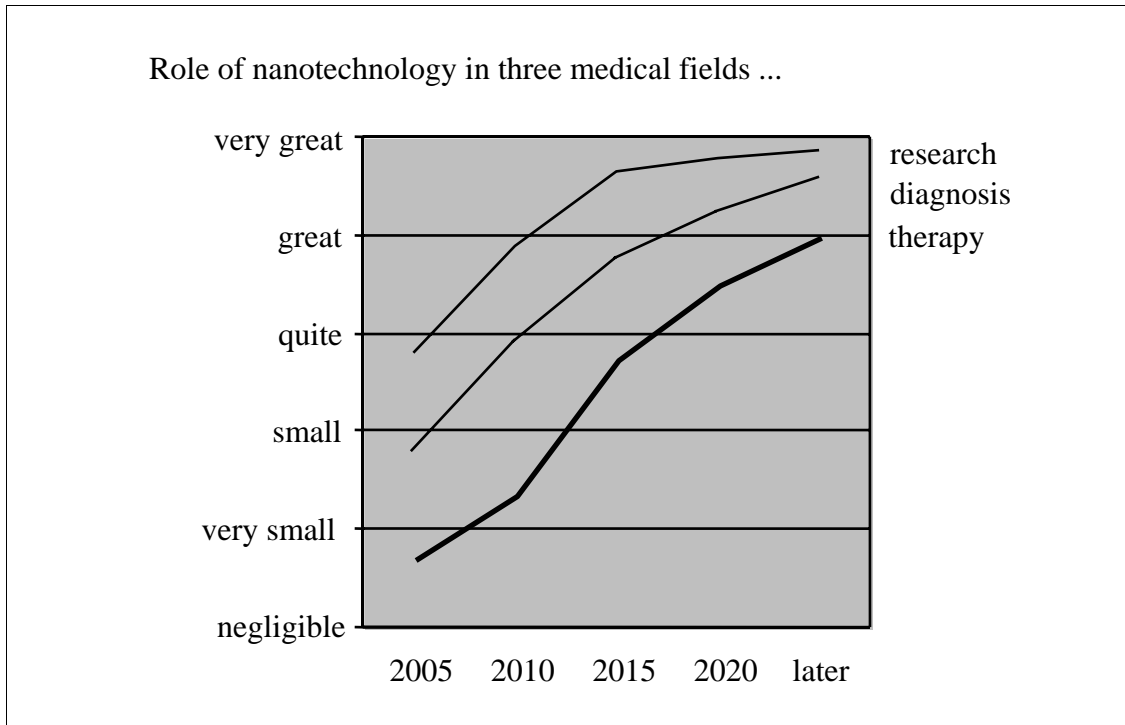
Where do you see the basic applications?

Your answer:	
--------------	--

4. The role of nanotechnology in medicine

The respective question of round one concerned the basic importance of nanotechnology in three main medical fields: research, diagnosis and therapy. We wanted to know how important nanotechnology will be in each of these three fields on the given time scale. The results of the first round are shown in the fol-

lowing figures. The curves are the direct (arithmetic) mean of the entries which were given as numbers from 1 to 6 (from 1 = negligible to 6 = very great).



4.1 Medical research

The support of medical research through nanotechnology is seen as being already quite large in the near future – with a strongly increasing tendency. It will already be more than "great" in already about 15 years and therefore become indispensable in medical research.

Does this mean that we can expect spectacular **breakthroughs** in medical research due to the use of nanotechnological methods during the next 20 years? Please answer by stating the probability.

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
Nanotechnology will allow spectacular breakthroughs in medical research by 2020							

much more accurate							
could be done much earlier							
much cheaper							

4.3 Therapy

The therapy curve lies clearly lower than the other two. Nevertheless nanotechnology-based therapies are predicted to attain quite high importance by 2020 and beyond. What does this mean? Is this equal to a certain "paradigm shift" in therapeutic medicine as well?

Bluntly put: will therapy in medicine significantly **change** because of nanotechnology – not just in the far future but already within the next 20 years? Please answer by stating the assumed probability.

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
Medical therapy in medicine will significantly change because of nanotechnology by 2020							

What are the **consequences** for nanobased therapeutic methods if you compare them with *existing* ones? Consider a time span until 2020. Please answer by stating the respective probabilities.

	Probability (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
A single therapeutic act will become in general ...							
technically easier							
much more effective							
will have less side effects							
much cheaper							

What are the presumable therapeutic **potentials** of nanotechnology for some groups of diseases until 2020 compared to *currently* applied therapies?

Therapeutic potentials of nanotechnology by 2020 for ...	Potentials (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
Cancer							
Cardiovascular diseases							
Bacterial infections							
Viral infections							
Alzheimer							
Autoimmune diseases							
Metabolic diseases							

What are the presumable **probabilities** that the above stated therapeutic potentials of nanotechnology may be **realized** until 2020?

Realization of therapeutic potentials of nanotechnology for ...	Probabilities (put an "x" where appropriate)						
	negligible	very small	small	quite	great	very great	no comment
Cancer							
Cardiovascular diseases							
Bacterial infections							
Viral infections							
Alzheimer							
Autoimmune diseases							
Metabolic diseases							

5. Implications of nanotechnology in some medical subject areas with respect to medical practice

In the first round we asked about the meaning and influence of nanotechnology in various medical areas. From the numerous conclusions we then attempted to construct an implication matrix out of the already above mentioned disease groups.

In which areas, until 2020, would nanotechnology have an especially great effect *with respect to the presently used procedures*? We tried to give very provisional marks for the **implications** in the various fields to get an idea of the overall pattern (1 = negligible, 2 = very small, 3 = small, 4 = quite, 5 = great, 6 = very great). Please write down your own marks.

	Early diagnosis		Diagnosis during therapy		Therapy		Post therapeutic diagnosis	
Cancer	5		3		5		6	
Cardiovascular diseases	2		3		3		4	
Bacterial infections	2		3		4		2	
Viral infections	6		4		6		6	
Alzheimer	2		3		3		3	
Autoimmune diseases	4		5		4		5	
Metabolic diseases	1		5		4		4	

6. Nanorobots in medicine

In the public mind, nanorobots play a significant role in the perception of nanotechnology. We excluded nanorobots in the first round because there were many indications that they would not play a significant role in medicine within the given time frame until 2020. Yet nanotechnological actuators have already been made from strings of DNA and first attempts have been made to construct nanosize motors. One expert believes that medical nanorobots could already be in use by about 2020.

For this reason we would like to ask you the "thousand dollar question": By when (year open) do you think **nanorobots** will be first **used** in medicine?

Your answer:	
--------------	--

7. General comments

Would you like to add a general statement? Was something not addressed that in your view would have been important? Please feel free to state your opinion.

Your answer:	
--------------	--

Technology Assessment

0. Persönlicher Hintergrund

(0) Eine Technologiefolgen-Abschätzung steht naturgemäss im Fokus der verschiedensten Disziplinen. Einige Angaben über Ihren Hintergrund können uns deshalb dabei helfen, ihre Antworten besser einzuschätzen. Bitte markieren Sie mit einem "x" jene Disziplinen (Mehrfachnennungen sind ausdrücklich erlaubt), die auf Sie zutreffen und geben Sie auch jene Bereiche an, wo Sie über spezielle Kenntnisse verfügen.

x	Disziplin	Spezielle Kenntnisse
	Ethik	
	Medizin	
	Ökonomie	
	Politologie	
	Psychologie	
	Recht	
	Soziologie	
	Anderes:	

1. Generelle Einschätzung

Schon seit einigen Jahren wird die Nanotechnologie als *die* Zukunftstechnologie überhaupt bezeichnet. Anfänglich eher als Science Fiction abgetan hat sie sich in den letzten Jahren zu einem eigentlichen Forschungszweig entwickelt, der die verschiedensten wissenschaftlichen und technischen Disziplinen umfasst (Biologie, Medizin, Chemie, Physik, Materialwissenschaften usw.). Zahlreiche Forschungsgruppen sind national und international mit nanotechnologischen Fragestellungen beschäftigt.

Noch ist nicht ganz klar, was Nanotechnologie inhaltlich wirklich meint. Unter Nanotechnologie wird nämlich ein Vielzahl von (möglichen) Technologien, Prozessen und Produkten verstanden, deren gemeinsames Charakteristikum in der ausserordentlichen Kleinheit der massgeblichen Grössenverhältnisse besteht. Nanotechnologie zielt auf die konstruktive Beherrschung von Grössenordnungen, **die den kleinsten funktionellen biologischen Strukturen entsprechen.** "Replikations- und Entwicklungsprozesse, die bislang der Natur vorbehalten wa-

ren, gelangen in den Einflussbereich des Menschen." (Bill Joy) Dass damit ungeahnte Möglichkeiten erschlossen werden könnten, ist offensichtlich; und die Auswirkungen auf fast alle Bereiche unseres Lebens wären enorm.

Die Nanotechnologie steht aber erst am Anfang. Zwar gibt es bereits eine ganze Reihe von realen Produkten und Produktionsverfahren, die mit diesem Begriff in Zusammenhang gebracht werden (nicht immer ganz zu recht), aber noch ist deutlich mehr Spekulation als gesicherte Erkenntnis im Spiel, selbst wenn es "nur" um die nächsten 20 Jahre der nanotechnologischen Entwicklung geht. Dennoch ist aufgrund der Resultate des Mini-Delphi zum Technology Forecast wohl damit zu rechnen, dass die Nanotechnologie vor allem auch in der Medizin eine grosse (und nicht allzu ferne) Zukunft haben wird, etwa in der Filter- und Membrantechnik, in der Sensorik oder bei der Schaffung von bioverträglicheren Oberflächen für Implantate. Im Bereich der Genanalyse dürfte durch den Einsatz nanobasierter Verfahren gegenüber heute grosse Fortschritte zu erwarten sein. Mittelfristig dürften sogar völlig neuartige Diagnose- und Therapiekonzepte entstehen, die denjenigen der "klassischen" Medizin in vielen Fällen weit überlegen sein werden (etwa in der Krebsbehandlung).

(1.1) Nanotechnologie könnte deswegen (aber auch aus andern Gründen) das Technologiethema der kommenden Jahre werden. Teilen Sie diese Auffassung? Was ist Ihre Begründung?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(1.2) Nanotechnologie könnte unser bisheriges Menschenbild längerfristig stark verändern (etwa durch eine partielle Auflösung der Grenze von Künstlichem und Natürlichem). Teilen Sie diese Auffassung? Was ist Ihre Begründung?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(1.3) Noch ist Nanotechnologie vor allem Programm und kaum Realität. Dennoch ist heute absehbar, dass die realisierte Nanotechnologie die Medizin als Wissenschaft wie auch als praktische Disziplin schon mittelfristig erheblich verändern dürfte. Angesichts des oben skizzierten Möglichkeiten, aber auch angesichts der speziellen Charakters der Nanotechnologie erachten Sie diese Entwicklung bzw. deren Förderung grundsätzlich für wünschenswert? Aus welchen Gründen?

Ihre Antwort:	
---------------	--

2. Risiken

(2.1) Aus dem Mini-Delphi zum Technology Forecast geht hervor, dass Nanopartikel (sowohl in der Diagnose wie auch in der Therapie) nicht a priori ungefährlich sind. Die ExpertInnen rechnen im Gegenteil damit, dass die Wahrscheinlichkeit ziemlich gross ist, dass sich bestimmte Nanopartikel im medizinischen Kontext als toxisch oder in einem andern Sinn als gefährlich erweisen könnten (z.B. krebserregend wie die mikroskopisch kleinen Asbestfasern). In Bezug auf solche "klassische" Risiken wären Nanopartikel also nichts Besonderes. Teilen Sie diese Auffassung? Oder müssten bestimmte Risikoaspekte angesichts der neuartigen Möglichkeiten der Nanotechnologie speziell untersucht werden?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(2.2) Nach einhelliger Meinung der ExpertInnen des Technology Forecast wird nanotechnologische Gensequenzierung bzw. -Identifikation bis 2020 ein Standardwerkzeug in der Medizin werden. Nebst positiven Effekten (deutlich schnellere und verlässlichere Identifikation von pathogenen Keimen, Unterstützung von Gentherapien, Krebsdiagnose, u.v.a.m.) zeichnet sich damit auch eine Vergrößerung der heute schon bestehenden Missbrauchsrisiken ab (etwa im Versicherungskontext oder am Arbeitsplatz). Inwiefern intensiviert damit die Nanotechnologie die aktuelle Diskussion über die Risiken der Gentechnologie oder der DNA-Analyse? Welche Folgerungen wären daraus insbesondere für eine Begleitforschung der künftigen Entwicklung zu ziehen?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(2.3) Darüber hinaus wären in einer sehr langfristigen Optik (weit jenseits des Jahres 2020, im Technology Forecast nicht ausdrücklich thematisiert) heute kaum einschätzbare Risiken denkbar. Z.B. könnten sich nach einem Unfall selbstreplizierende Nanostrukturen unkontrolliert vermehren und dabei Mensch und Umwelt bedrohen. Inwiefern müssten diese (bloss theoretischen?) Möglichkeiten für die Risikodiskussion der Nanotechnologie für einen Zeithorizont bis 2020 von Belang sein oder nicht?

Ihre Antwort:	
---------------	--

3. Auswirkungen aus gesellschaftlicher Sicht

Nach den ExpertInnen des Technology Forecast wird die Bedeutung der Nanotechnologie in der medizinischen Forschung, in der Diagnose und in der Therapie in den nächsten 20 bis 25 Jahren gesamthaft sehr stark zunehmen. In der Forschung werden vor allem im genetischen und onkologischen Bereich grosse Durchbrüche erwartet. Nanobasierte Diagnosen werden mit grosser Wahrscheinlichkeit schneller durchführbar sein, können schon im Frühstadium einer Krankheit durchgeführt werden, liefern spezifischere und genauere Resultate, werden vermutlich aber nicht viel billiger als heutige Verfahren sein – wenn überhaupt. Nanobasierte Therapien werden wirksamer sein als heutige Therapien, vielleicht auch technisch etwas einfacher, werden weniger Nebenwirkungen mit sich bringen, aber ziemlich sicher nicht billiger sein als heutige Therapien. Im Technology Forecast wurde auch versucht, eine Konkretisierung dieser Entwicklung in Bezug auf sieben ausgewählte Krankheitsgruppen vorzunehmen. Das Resultat zeigt die Figur auf der folgenden Seite. Sie stellt die mutmasslichen Auswirkungen der Nanotechnologie für das Jahr 2020 dar. Je weiter weg vom Zentrum ein Punkt liegt, desto grösser sind die mutmasslichen Auswirkungen in den sieben unterschiedenen Krankheitsgruppen. Auch wenn die Unsicherheiten gross sind, zeigt das Bild doch eine relativ klare Tendenz auf. **So** könnte sich die Nanotechnologie in der Medizin auswirken.

(3.1) Angenommen, die Medizin würde sich mit der Nanotechnologie tatsächlich in der angedeuteten Weise entwickeln, was wäre ganz allgemein Ihre Einschätzung für die damit verbundenen Veränderungen bezüglich Krankheitsabläufen und Todesursachen?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(3.2) Welche Auswirkungen sähen Sie auf die heute schon bestehenden Allokationsprobleme (starke Zunahme der Gesundheitskosten bei zunehmender Überalterung der Industriegesellschaften)? Welche Überlegungen müssten in diesem Zusammenhang angestellt werden?

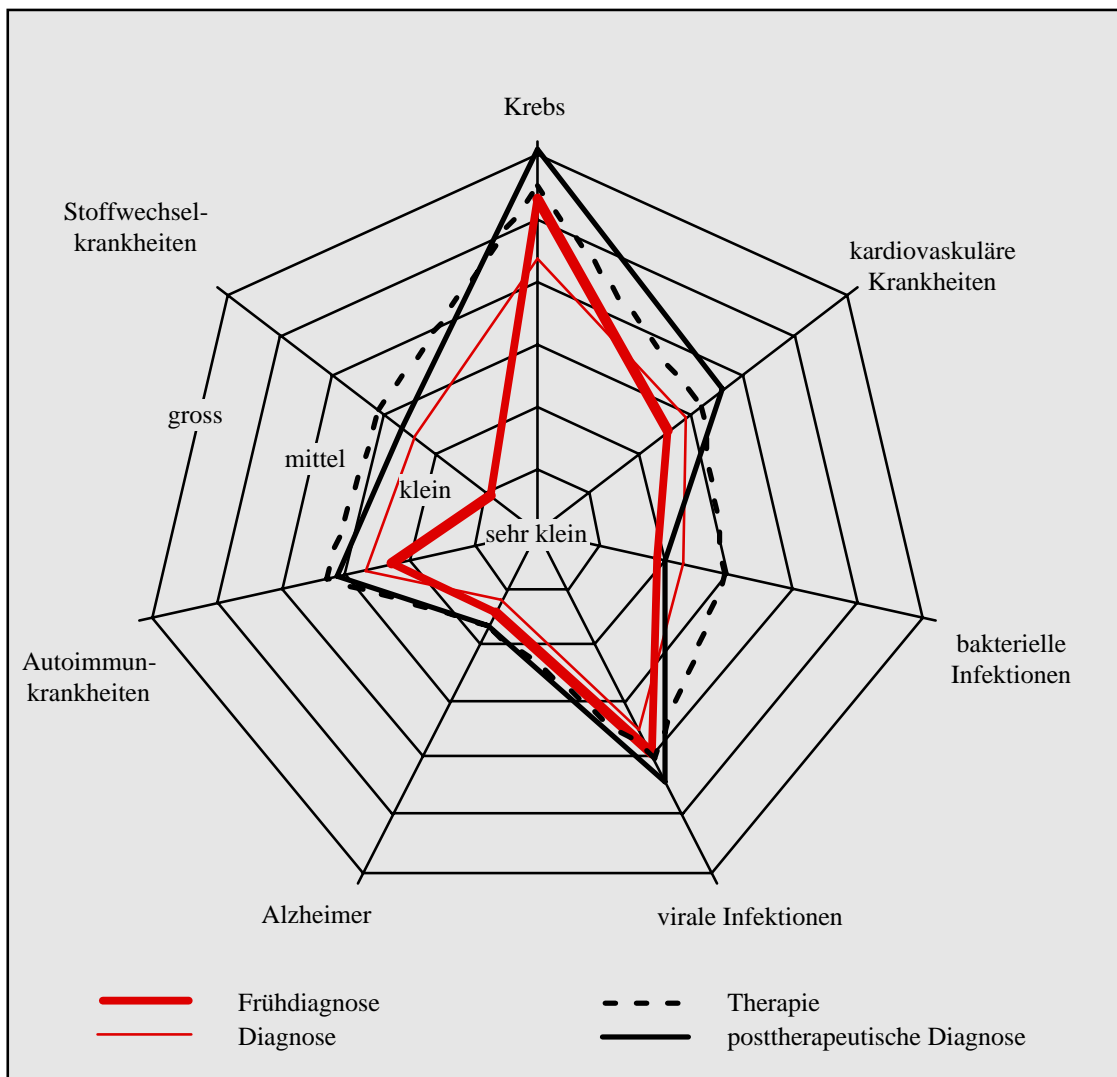
Ihre Antwort:	
---------------	--

(3.3) Welche Auswirkungen würden Sie auf das Gesundheitswesen als Ganzes erwarten? Könnte die Nanotechnologie die Tendenz zur Zweiklassenmedizin verstärken? Oder könnte sie z.B. über die zu erwartenden grossen Verbesserun-

gen in der Frühdiagnostik dazu beitragen, teure therapeutische Medizin im Alter oder vor dem Tod zu vermeiden?

Ihre Antwort:

Mögliche Auswirkungen auf verschiedene Krankheitsgruppen bis 2020



4. Auswirkungen aus individueller Sicht

Die Nanotechnologie dürfte erhebliche Verschiebungen bei den Krankheiten und den Todesursachen mit sich bringen. Besonders wichtig dürfte dabei die diagnostische Ebene sein, die von nanotechnologischen Methoden besonders profitieren würde, insbesondere auch im Bereich der Genanalyse.

(4.1) Welche Auswirkungen sehen Sie dabei für das Individuum, sei es in Bezug auf die Lebensqualität allgemein, auf die Gesundheitsvorsorge im speziellen, aber auch auf die Wahrnehmung von Krankheit und Tod?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(4.2) Wenn (z.B. genetisch fixierte) Dispositionen zu bestimmten Krankheiten deutlich einfacher feststellbar sein werden, würde dies eine grössere Transparenz des Einzelnen vor sich selbst, aber auch vor der Gesellschaft bedeuten. Wie könnte man damit als Individuum umgehen? Welche Auswirkungen hätte dies beispielsweise auf die "Lebensplanung"?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(4.3) Sehen Sie Schranken für die Anwendung von nanotechnologischer Methoden aus ethischer Sicht (auch z.B. in Bezug auf die sich abzeichnende Auflösung der Grenze von Künstlichem und Lebendigem)? Aus welchen Überlegungen heraus?

Ihre Antwort:	
---------------	--

5. Weitere Auswirkungen

(5.1) In den obigen Fragen sind einige wenige Auswirkungsdimensionen angesprochen worden. Müsste für eine (etwaige) zweite Runde des Mini-Delphis weitere Dimensionen berücksichtigt werden?

Ihre Antwort:	
---------------	--

6. Steuerung der Entwicklung

Die Nanotechnologie ist heute gerade daran, sich als "grosse" Wissenschaft zu etablieren; weltweit werden Organisationen und Institute geschaffen und mit stark wachsenden finanziellen und personellen Mitteln ausgestattet.

(6.1) Sind Sie der Meinung, dass man in die Entwicklung der Nanotechnologie im allgemeinen, aber speziell auch im medizinischen Bereich eingreifen sollte

(um z.B. Schwerpunkte zu setzen oder mit Leitplanken ethisch oder aus andern Gründen problematische Entwicklungen zu verhindern oder zu kontrollieren)?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(6.2) Wenn Sie der Meinung sind, dass ein Eingreifen nötig wäre, sollte man bereits im Bereich der Forschung oder erst bei Vorliegen konkreter Anwendungen eingreifen? Aus welchen Gründen?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(6.3) Wie könnte man überhaupt steuernd eingreifen (z.B. staatliche Intervention oder Selbstregulierung, Ethikkommissionen, nationale oder internationale Abkommen)? Welche Lehren kann man hierfür z.B. aus der bisherigen Debatte um die Gentechnologie oder der Stammzellenforschung ziehen?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(6.4) Was wären aus Ihrer Sicht die "Leitplanken" eines solchen steuernden Eingriffs?

Ihre Antwort:	
---------------	--

7. Offene Fragen

(7.1) Gibt es Themen oder Fragen, die bislang nicht angesprochen wurden, aber in einer (etwaigen) zweiten Runde des Mini-Delphis zum Technology Assessment unbedingt berücksichtigt werden müssten?

Ihre Antwort:	
---------------	--

(7.2) Möchten Sie darüber hinaus noch Bemerkungen machen?

Ihre Antwort:	
---------------	--