

Bernd Meier

Nanotechnik

Sozioökonomische Dimensionen
einer Schlüsselinnovation

Analysen

Forschungsberichte
aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln

Bernd Meier

Nanotechnik

Sozioökonomische Dimensionen
einer Schlüsselinnovation

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-602-14834-9 (Druckausgabe)
978-3-602-45450-1 (PDF)

Der Autor

Dr. rer. soc. **Bernd Meier**, geboren 1944 in Thorn; Studium der Sozialwissenschaften an den Universitäten Bochum und Göttingen, Promotion in Bochum; seit 1979 im Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Arbeitsbereich Sozialer und technischer Wandel innerhalb des Wissenschaftsbereichs Wirtschaftspolitik und Sozialpolitik.

Herausgegeben vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln

© 2009 Deutscher Instituts-Verlag GmbH
Gustav-Heinemann-Ufer 84–88, 50968 Köln
Postfach 51 06 70, 50942 Köln
Telefon 0221 4981-452
Fax 0221 4981-445
div@iwkoeln.de
www.divkoeln.de

Druck: Hundt Druck GmbH, Köln

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Die Bedeutung von Innovationen für die sozioökonomische Evolution	6
2.1	Neue Technologien und wirtschaftliche Entwicklung	6
2.2	Nanotechnik als schlüsseltechnologische Innovation	12
2.3	Was bedeutet und charakterisiert die Nanotechnik?	15
3	Die internationale Rivalität um die Nanotechnik	25
3.1	FuE-Investitionen als Innovationstreiber	26
3.2	Entwicklung des internationalen Nanopatent- und Publikationsaufkommens	34
4	Sozioökonomische Entwicklungsimpulse der Nanotechnik	39
4.1	Unternehmensgründungsdimension	40
4.2	Anwendungsdimension	43
4.3	Marktpotenzialdimension	47
4.4	Arbeitsplatzdimension	52
4.5	Qualifizierungsdimension	54
5	Soziale Akzeptanz, Chancen und Risiken der Nanotechnik	58
6	Zusammenfassung	74
	Literatur	77
	Kurzdarstellung / Abstract	88

1

Einleitung

Der technische Fortschritt zählt in der Volkswirtschaftslehre zu den entscheidenden Determinanten langfristigen Wirtschaftswachstums moderner Gesellschaften (Solow, 1956 und 1957). Nach der Hypothese des „Technology Gap“ (Posner, 1961) können technologische Vorsprünge Volkswirtschaften und Unternehmen temporäre Wettbewerbsvorteile sowie einen leichteren Eintritt in Auslandsmärkte ermöglichen (komparative Vorteile). Dies gilt besonders für die Beherrschung sogenannter Schlüsseltechnologien und daraus resultierender Basisinnovationen.¹ Mitte der 1970er Jahre wurde die wirtschaftliche Stagnation sogar auf einen Mangel an „Basisinnovationen“ zurückgeführt (Mensch, 1975).

Es ist deshalb evident, dass besonders im Zuge der Globalisierung der Wirtschaft die Unterstützung einer raschen Entwicklung und Umsetzung technologischer Inventionen in Innovationen gefordert wird. Dies trifft in erster Linie auf solche Techniken zu, aus denen sich neue Basisinnovationen entwickeln könnten. Die Chancen Deutschlands werden daher auch besonders in der Entwicklung von spitzentechnologischen Gütern² gesehen; doch Deutschland ist bei ihrer Umsetzung in marktfähige Produkte international oft noch Mittellaß, so die Expertenkommission für Forschung und Innovation (EFI) in ihrem Bericht für die Bundesregierung (EFI, 2008, 68).

Zu den erfolgversprechenden neuen Spitzentechnologien im Hinblick auf Wachstum und Wohlstand wird heute unter anderem die Nanotechnologie (-technik) gezählt, um die gegen Ende der 1990er Jahre nicht nur ein internationaler Förder- und Innovationswettbewerb, sondern auch ein intensiver Dialog über Chancen und Risiken eingesetzt hat. Hierbei handelt es sich um einen Sammelbegriff für Techniken, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der sogenannten Nanometerskala (< 100 Nanometer) beschäftigen.

Zur Novität der Nanotechnik und ihrer ökonomischen Bedeutung gibt es differenzierte Einschätzungen: „Dennoch scheint mir auch in Deutschland insbesondere die öffentliche Präsentation und Wahrnehmung der Nanotechnologie vor

¹ Im Folgenden werden der Einfachheit halber die Begriffe Schlüsseltechnologien und schlüsseltechnologische Innovationen synonym verwendet. Das Gleiche gilt für die Begriffe Technik und Technologie. Die im Rahmen dieses Beitrags ferner dargelegten technisch-naturwissenschaftlichen Sachverhalte erheben nicht den Anspruch auf technisch-naturwissenschaftliche Genauigkeit und Vollständigkeit.

² Hierunter werden FuE-intensive Waren verstanden, „bei deren Herstellung jahresdurchschnittlich mehr als 7 Prozent des Umsatzes für Forschung und Entwicklung aufgewendet werden“ (EFI, 2008, 19); davon zu unterscheiden sind Waren der „hochwertigen“ Technologie, die mehr als 2,5 bis zu 7 Prozent des Umsatzes für FuE beinhalten.

allem durch ein Übermaß an Popularisierung und eine zu starke Betonung der großen ökonomischen Chancen bestimmt zu sein“ (Woyke, 2007, 336). Nach Hartmann (2006, 7) handelt es sich in diesem Zusammenhang nicht „um eine abrupt durch einen Technologiesprung entstandene neue Miniaturisierungsmöglichkeit“; ihre faktische Bedeutung werde häufig sowohl über- wie auch teilweise unterschätzt.

Gegenstand des vorliegenden Beitrags – im Sinne einer innovationsunterstützenden Kommunikation – ist die Frage, ob die Nanotechnik nur als eine kurzfristige Mode zu begreifen ist oder es sich hierbei letztlich um einen weiteren Technologie Kandidaten im Sinne einer Schlüsseltechnologischen Invention mit basisinnovatorischem Potenzial zur Stützung einer „langen Welle“ (Kondratieffzyklus) handelt. Inzwischen hat sie unbemerkt bereits vielfach Einzug in den Alltag gehalten. Als Beispiel sei hier nur der Lotus-Blüten-Effekt bei Beschichtungen genannt.

Um die verschiedenen Dimensionen der Nanotechnik aufzuzeigen, gliedert sich dieser Beitrag in die folgenden Kapitel:

Kapitel 2 zeigt einleitend die Grundidee „langer Wellen“ nach Nikolai D. Kondratieff und Joseph A. Schumpeter und damit die Bedeutung von Innovationen für die ökonomische Entwicklung auf. Es geht ferner auf gegenwärtige Einschätzungen der Nanotechnik ein. Darüber hinaus werden ihre real-technische Genese wie auch die zivilisatorischen und ökonomischen Implikationen als einer weiteren Etappe des technischen Fortschritts im Sinne neuer (technischer) Machbarkeiten dargelegt, die ihre Schlüsseltechnologischen Wirkungen ausmachen können.

Kapitel 3 befasst sich mit Indikatoren ihrer (internationalen) Förderung und Entwicklung (öffentliches und privates Förderaufkommen, Patentierung) in Form eines gestrafften Überblicks, um die internationale Rivalität bezüglich dieser Technologie zu untersuchen.

Kapitel 4 beschäftigt sich beispielhaft mit der Gründungsdimension, den pluralen Anwendungsdimensionen, den Markt- und Arbeitsplatzperspektiven und der Qualifizierungsdimension, welche mit der Nanotechnologie verbunden werden und die auf ihren Schlüsseltechnologischen Charakter für eine lange Welle hindeuten könnten.

Kapitel 5 untersucht Bekanntheit und soziale Akzeptanz dieser Technik und beschäftigt sich in gebotener Kürze mit der Nanotechnik als Gegenstand der modernen Ethik- und Risikodebatte.

Kapitel 6 unternimmt in Form einer Zusammenfassung den Versuch, die Ausgangsfrage – kurzfristige Mode oder Schlüsseltechnologie? – zu beantworten.

2

Die Bedeutung von Innovationen für die sozioökonomische Evolution

Auf die häufig gestellte Frage, wovon Wirtschaft und Gesellschaft morgen leben werden, lässt sich vielfältig antworten. Ganz generell gehören dazu im technischen Zeitalter vor allem weitere technische Inventionen und Innovationen. Welche dann wirklich zum Durchbruch kommen und die wirtschaftliche Entwicklung vorantreiben, ist jedoch kaum vorhersehbar. Prognosen zu Technologien, welche die Zukunft bestimmen werden, sind meist mit großen Unsicherheiten behaftet: Überprüfungen ergaben dabei eine Treffsicherheit von etwa 30 Prozent (Ulrich, 1980).

Dies trifft auch auf die Voraussage sogenannter Schlüsseltechnologien oder Basisinnovationen zu. Gerade sie gelten aber als wichtige Treiber für die gesamtwirtschaftliche und -gesellschaftliche Entwicklung. Umso nützlicher wäre es, ex ante bereits sagen zu können, welche Erfindungen sich einmal zu sozioökonomisch entscheidenden Innovationen entwickeln und der modernen Gesellschaft weitere Lebensgrundlagen bieten könnten. Schon oft in der Technikgeschichte lagen aber (zumindest populäre) Technikvoraussagen daneben, denn die Zukunft ist keine lineare und strukturelle Fortschreibung der Vergangenheit. So wird berichtet, dass der ehemalige IBM-Chef Thomas Watson 1943 geglaubt haben soll, weltweit werde es nur einen Bedarf an vielleicht fünf Computern geben. Vom Physiker Lord Kelvin wurde 1895 die Möglichkeit des Fliegens mit Maschinen, die schwerer als Luft sind, ebenso verneint wie von anderen die Zukunft des Radios, des Fernsehens, der Compact Disc (CD); die Mondlandung oder auch die Entwicklung der Kernenergie wurden angezweifelt. Selbst der Erfolg des Automobils oder gar des Telefons wurde zunächst alles andere als aussichtsreich eingestuft. Doch all die einst in ihrer Bedeutung bezweifelten Innovationen sollten später Wirtschaft und Gesellschaft in ihrer Entwicklung entscheidend beeinflussen. Aus der Sicht übergreifender Wirkungen vieler technologischer Innovationen wurde die menschliche Geschichte auch als eine „Geschichte des technischen Fortschritts“ (Popitz, 1995) aufgefasst. In Anlehnung an Schumpeter ließe sie sich letztlich als Prozess „kreativer Zerstörung“ auffassen.

2.1 Neue Technologien und wirtschaftliche Entwicklung

So werden langfristige wirtschaftliche Wachstums- und Entwicklungszyklen („lange Wellen“) häufig mit entscheidenden (technischen) Innovationen, sogenannten Basisinnovationen, in Verbindung gebracht. Was sind Basisinnovationen?

Der Innovationsforscher Gerhard Mensch (1975, 54 ff.) unterscheidet Basisinnovationen von Verbesserungsinnovationen: Basisinnovationen führen zur Eröffnung eines neuen Weges, einer neuen Arbeitsweise oder Technologie, also eines neuen Tätigkeitsbereichs, der für eine große Gruppe von Menschen Beschäftigung schafft. „Eine solche richtungsändernde Abweichung von der bisher üblichen Praxis nenne ich eine Basisinnovation“ (Mensch, 1975, 54). Bei Weiterentwicklungen auf bestehenden Gebieten handele es sich dagegen um „Verbesserungsinnovationen“; hierzu gehören „die Einführungen neuer Produkte, die den älteren ‚Jahrgängen‘ an Qualität, Verlässlichkeit, Konsumentenfreundlichkeit, Umweltschonung, Rohstoffverbrauch, Lohnkosten usw. überlegen sind. Und es sind die Anwendungen neuer Produktionsverfahren, die es gestatten, alte oder neue Produkte hochwertiger, verlässlicher, billiger oder einfach in größerer Menge herzustellen“ (Mensch, 1975, 55). Bei näherer Beschäftigung mit der Nanotechnik wird deutlich, dass zwischen Basisinnovation und Verbesserungsinnovation nicht klar unterschieden werden kann, sondern diese einander bedingen; denn es werden sowohl gänzlich neue als auch substituierbare Märkte durch Verbesserung des Bestehenden geschaffen. Die Nanotechnologie schafft als „neues“ Gebiet neue Investitionsmöglichkeiten und hungrige Märkte mit zunächst noch geringer Konkurrenz (siehe hierzu im Grundsätzlichen auch Mensch, 1975, 57).

Der Zukunftsforscher Leo A. Nefiodow (2001, 16 f.) versteht in Anlehnung an Schumpeter unter Basisinnovationen technische Neuerungen, die

1. aus vernetzten Technologien bestehen und in der Lage sind, Tempo und Richtung des Innovationsgeschehens für mehrere Jahrzehnte zu bestimmen,
2. das Wachstum der Weltwirtschaft aufgrund großer Knappheiten über mehrere Jahrzehnte entscheidend beeinflussen und
3. zu einer weitreichenden Reorganisation der Gesellschaft führen.

Mit ihnen gehen also erhebliche Umsätze, die Schaffung Millionen neuer Arbeitsplätze, große Produktivitätsverbesserungen und sozioökonomische Modernisierungsimpulse einher. „Innovationen, die diese umfassenden Wirkungen auslösen, werden ... Basisinnovationen genannt“ (Nefiodow, 2001, 15). Sie sind jedoch ebenso auf eine „Gründerwelle“ (Röpke, 2000) wie auch auf qualifiziertes Humankapital und gesellschaftliche Akzeptanz angewiesen.

Kondratieff war der bekannteste Ökonom, der in der Wirtschaftsgeschichte (1780 bis 1925) sogenannte lange Wellen der Konjunktur mit einer Zeitdauer zwischen 45 und 60 Jahren anhand der Überprüfung langer Reihen verschiedener ökonomischer Indizes (Preise und Produktionsziffern) aus mehreren Ländern ausmachte und die kapitalistische Dynamik unter anderem mit technischen Neuerungen in Verbindung brachte. Sie treten meist erst dann auf, wenn die Konjunktur

tur nachlässt (Kondratieff, 1926, 591) und bilden die Basis für einen neuen Aufschwung. Für Kondratieff als Nationalökonom (nicht als Innovationsforscher) lagen die Ursachen langer Wellen weniger in technischen Neuerungen als im evolutionären Wesen des marktwirtschaftlich organisierten Kapitalismus selbst begründet (Kondratieff, 1926, 599). Die Beobachtungen Kondratieffs wurden vielfach statistisch-methodisch kritisiert (zum Beispiel Weinstock, 1964).

Der Evolutionsökonom Schumpeter (1961) nahm diese Beobachtung Kondratieffs auf und verknüpfte die langen Wellen der Konjunktur in besonderer Weise mit neu aufkommenden Technologien (Innovationen).³ Er untermauerte sie damit empirisch stärker, führte sie aber (wie Kondratieff) auf den evolutionären Charakter des Kapitalismus (Kapitalismus als „Form oder Methode der ökonomischen Veränderung“, Schumpeter, 1950, 136) und auf die Rolle risikotüchtiger Pionierunternehmer sowie auf die dann massenhaft auftretenden Folgeunternehmer zurück. Sie müssen auf Veränderungen investiv reagieren und lösen dadurch einen hohen Kapitalbedarf aus, um sich genügend anzupassen (Finanzierung zur Durchsetzung von Innovationen durch Kreditschöpfung).

Schumpeter (1961, 91) unterschied Innovationen von Erfindungen und sah in Innovationen „jedes ‚Andersmachen‘ im Gesamtbereich des Wirtschaftslebens“. „Technologische Veränderungen in der Produktion von Gütern, die schon auf dem Markt sind, die Erschließung neuer Märkte oder neuer Hilfsquellen, Taylorisierung der Arbeit, verbesserte Materialbehandlung, die Einrichtung neuer Geschäftsorganisationen wie etwa von Warenhäusern ... das alles sind Beispiele dessen, was wir Innovation nennen wollen“ (Schumpeter, 1961, 91). Für ihn verändern Innovationen die Produktionsfunktion und führen die Wirtschaft aus dem Gleichgewichtszustand heraus, sobald ausreichend Folgeunternehmer aktiv sind. Das Ergebnis ist eine Wellenbewegung der wirtschaftlichen Entwicklung. Eine Innovation umfasst dabei eine neue Ware, die Erschließung neuer Märkte und auch neue Organisationsformen; dabei unterbrechen Innovationen Ricardos' Gesetz abnehmender Erträge (Schumpeter, 1961, 95) und wirken so schwindenden Investitionschancen im Kapitalismus entgegen.

Das Innovationstheorem Schumpeters betont in seiner Präzisierung Kondratieffs die Evolution der Wirtschaft (was die Negierung eines wirtschaftlichen Gleichgewichtszustands bedeutet) durch Innovationen: „Der fundamentale Antrieb, der die kapitalistische Maschine in Bewegung setzt und hält, kommt von den neuen Konsumgütern, den neuen Produktions- oder Transportmethoden, den

³ Schumpeter benutzte den Begriff Basisinnovation noch nicht; er fand erst später durch Mensch (1975) Eingang in die Debatte.

neuen Märkten, den neuen Formen der industriellen Organisation, welche die kapitalistische Unternehmung schafft. Dieser Prozess der ‚schöpferischen Zerstörung‘ ist das für den Kapitalismus wesentliche Faktum“ (Schumpeter, 1950, 137 f.). Konjunkturschwankungen entsprechen also dem Entwicklungsgesetz einer kapitalistischen Wirtschaft.⁴ Langfristiges Wachstum bedeutet aber nicht nur lineare Vermehrung, sondern auch Entwicklung und Strukturwandel. Innovationen gelten daher eher als Mittel und weniger als Ursache der wirtschaftlichen Dynamik, die im Wesen des Kapitalismus selbst liegt.

Diese Sichtweise impliziert quasi einen naturgesetzlichen Untergang und eine Neugeburt von Unternehmen. „Im Laufe eines Kondratieff wird eine Unternehmung im Durchschnitt zweimal ausgelöscht. Und mit ihr gehen Wertschöpfung, Arbeitsplätze und Steuereinnahmen verloren. Trotz hochentwickelter Management-Skills und Supercontrolling leben Unternehmen nicht länger, vielmehr kürzer“ (Röpke, 2000, 8 f.). Dann stellen sich folgende Fragen: „Wer ersetzt die sterbenden Unternehmen? Woher kommen die neuen Arbeitsplätze? Wer kreiert Pionierinnovationen?“ (Röpke, 2000, 9). Eine Antwort auf diese Fragen kann sein: Vom technischen Fortschritt – von technischen Innovationen, die in soziale Innovationen eingebettet sind – und vom (neuen) risikoreichen Unternehmertum. Die Beziehung zwischen technischen Basisinnovationen und wirtschaftlicher Entwicklung ist im Grunde zu einfach. Sie vernachlässigt soziale und inkrementale Innovationen, die gleichfalls in ihrer kausalen Bedeutung für eine lange Welle gewürdigt werden sollten sowie den immanenten evolutionären Charakter des Kapitalismus selbst.

Bedeutung kommt in diesem Prozess des Wandels auch der Qualität als Wettbewerbsfaktor zu: „In der kapitalistischen Wirtschaft jedoch, im Unterschied zu ihrem Bild in den Lehrbüchern, zählt ... die Konkurrenz der neuen Ware, der neuen Technik, der neuen Versorgungsquelle, des neuen Organisationstyps (...) – jene Konkurrenz, die über einen entscheidenden Kosten- und Qualitätsvorteil gebietet und die bestehenden Firmen nicht an den Profit- und Produktionsgrenzen, sondern in ihren Grundlagen, ihrem eigentlichen Lebensmark trifft“ (Schumpeter, 1950, 140). Schumpeter ging es mithin auch um die Qualitätskonkurrenz, die den Prozess der ‚schöpferischen Zerstörung‘ als ein Faktum des Kapitalismus bewirkt. Der Aufschwung kommt dann zum Ende, wenn dank der durch Innovationen verbesserten Technik ein Warenüberschuss und ein Preisverfall einsetzen.

Für die Vergangenheit wurden von Schumpeter zunächst drei lange Wellen (mit jeweiliger Prosperitäts-, Rezessions-, Depressions- und Aufschwungsphase)

⁴ Es wird bezweifelt, dass die Zyklen extrapolierbar sind und einem Automatismus folgen; eine Rolle spielen dabei die beeinflussbaren Rahmenbedingungen (Stolper, 1982, 253 f.).

diagnostiziert. In Fortführung der wirtschaftshistorischen Forschungen Schumpeters (1961) wurden zwei weitere Wellen angefügt und eine sechste lange Welle in Aussicht gestellt (Nefiodow, 2001). Mit dem jeweiligen Zyklus werden mehr Wohlstand und neue Arbeitsplätze verbunden.⁵

Eine erste lange Welle wird auf die Zeit vom Ausgang des 18. Jahrhunderts bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts datiert (Abbildung 1). Sie beruhte auf der Antriebskraft der stationären Dampfkraft und -maschine. Durch die Mechanisierung der Produktion kam es zur sogenannten ersten industriellen Revolution.

Das Charakteristikum einer zweiten langen Welle, die bis Ende des 19. Jahrhunderts dauerte, war der Bau von Eisenbahnen und Schiffen, mit deren Hilfe man sich durch neue Infrastrukturen neue Räume erschloss.

Eine dritte lange Welle setzte zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein, die bis zum Ausbruch des Zweiten Weltkriegs andauerte. Sie basierte wesentlich auf der Elektrizität und der Chemie. Elektromotor, Radio, Energienetze und Telefon kamen zum Tragen, allmählich aber auch das Auto und ein weiterer Ausbau der Grundstoff- und Stahlindustrie. Es entstanden Großkonzerne, Monopole und Kartelle. Die Massenproduktion beherrschte den Markt und eine Konzentration von Menschen und Maschinen begann.

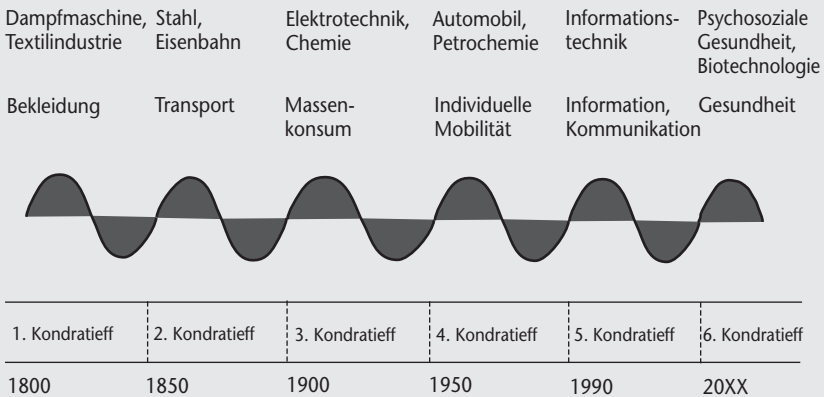
Für die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg wird eine vierte lange Welle angenommen, die etwa bis zur Mitte der 1980er Jahre reichte (Nefiodow, 2001, 6 f.). Die Petrochemie galt als ihre bedeutendste Basisinnovation; Antriebsstoffe für Autos, Flugzeuge und Schiffe wurden preiswert und eine Reihe von Folgeinnovationen (Kunststoffe, Textilfaser, Kosmetika, Farben, Düngemittel) entstanden. Es entfaltete sich die Automobilwirtschaft mit einer Vielzahl von Zulieferern und Händlern. Noch nicht ganz zum Zuge kamen bedeutende Entwicklungen wie die integrierte Schaltung und der Computer.

In Wirtschaft und Gesellschaft wurde von Nefiodow eine fünfte Welle konstatiert, deren maßgebliche Basisinnovation vor allem in der Marktdurchdringung mit Produkten der Informationstechnik gesehen wird (Nefiodow, 2001, 8 f.). Offensichtlich ist, dass sie inzwischen die meisten Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft erfasst hat (Informatisierung) und zu neuen, dezentralen Formen von Unternehmen, der Arbeit und der Arbeitsinhalte (zum Beispiel virtuelle

⁵ Allerdings sind gegenüber den positiven Beschäftigungspotenzialen von Basisinnovationen auf der Grundlage der Informationstechnik aus heutiger Sicht auch Vorbehalte nicht unbegründet: Sättigungsercheinungen, nur inkrementale Verbesserungen und zögerliche Akzeptanz tatsächlich neuer Produkte wie Teleshopping und Telebanking können einer durchschlagenden Beschäftigungswirkung im Sinne von Basisinnovationen entgegenstehen (Scherrer, 1996, 139). Dies zeigt, wie sehr die prospektive Einschätzung einer Innovation als tragende Basisinnovation erschwert ist; vieles hängt von einer breiten Marktakzeptanz der Innovationen sowie vom Verhältnis zwischen Freisetzungseffekten (durch Rationalisierungsinvestitionen) und neu geschaffenen Arbeitsplätzen (durch Erweiterungsinvestitionen) sowie von den zur Verfügung stehenden Qualifikationen ab.

Basisinnovationen, lange Wellen und ihre wichtigsten Anwendungsfelder

Abbildung 1



Quelle: Nefiodow, 2001, 133

Unternehmen und Telearbeit) führt. Im Faktor Information wird der wichtigste Produktionsfaktor gesehen, der die Innovationsprozesse beherrscht; die Informationswirtschaft und -gesellschaft festigt sich. Ihr wirtschaftliches Wachstum ist zunehmend informations- und wissensbasiert (vgl. schon Touraine, 1969).

In diesem Sinne repräsentierten bereits die Mikroelektronik und die moderne Kommunikationstechnik entscheidende Schlüsseltechnologischer Innovationen aus der Informationstechnik, die Wirtschaft und Gesellschaft vielfach grundlegend veränderten, indem quasi an jedem Ort auf dem Computer Informationen zur jeder Zeit verfügbar werden konnten. Länder, welche die modernen IuK-Techniken weniger einsetzten als andere, mussten denn auch geringere Produktivitätszuwächse und Wachstum hinnehmen als andere (Ark, 2004, 3). Beispielsweise nahm die Arbeitsproduktivität im Euro-Währungsgebiet zwischen 1991 und 1998 nach einer Untersuchung der Europäischen Zentralbank (EZB) bei Informations- und Kommunikationstechnologie nutzenden Bereichen um 3,9 Prozent zu, während sie im Verarbeitenden Gewerbe insgesamt nur um 3,3 Prozent wuchs (EZB, 2001, 47).

Für das 21. Jahrhundert wird ein sechster langer Zyklus für möglich gehalten (vgl. Nefiodow, 2001, 95 ff.); hier sollen besonders die zwischenmenschlichen Beziehungen im Mittelpunkt stehen. Es kommt unter anderem auf die psychosoziale Gesundheit im weitesten Sinne an; der Gesundheits- und der Wellness-Sektor werden zu herausragenden Produktivitätsfaktoren und Wirtschaftsbe-

reichen. An die Stelle bisheriger Industrien treten in großen Teilen die „grüne Industrie“ (Biotechnologie, Umwelttechnik) sowie die „weiße Dienstleistung“ (Unternehmensberatung, der Gesundheits- und Wellness-Bereich). Im Mittelpunkt steht die Optimierung der zwischenmenschlichen Kommunikation. Insgesamt soll dieser Zyklus von fünf sogenannten Kandidaten getragen werden (Nefiodow, 2001, 98): Information, Umwelt, Biotechnologie, optische Technologien und Gesundheit(sdienstleistungen).

Die Nanotechnologie wird von Nefiodow zwar noch nicht als eine eigenständige Schlüsseltechnologie mit basisinnovatorischem Potenzial behandelt. Doch wie sich später zeigen wird, kann sie die von Nefiodow genannten Kandidaten zumindest unterstützen, auf diesen Feldern die Märkte durch Inventionen und Innovationen beflügeln sowie Wirtschaft und Gesellschaft in ihren Strukturen im Ganzen verändern.

2.2 Nanotechnik als schlüsseltechnologischer Innovation

Inzwischen wird der Nanotechnik die Eigenschaft einer Schlüsseltechnologie mit weitreichenden sozioökonomischen Implikationen zugeschrieben (Paschen et al., 2003, 64). Von Wirtschaftswissenschaftlern (Röpke/Kozlova, 2004) wird sie als eine weitere, vermutlich bedeutende neue, einen wirtschaftlichen Strukturwandel und Aufschwung mitstützende Innovation mit großen zivilisatorischen Folgen angesehen. Sie wird bereits im Vorfeld ihrer breiten Umsetzung als eine ganz und gar typische schumpeterianische Innovation betrachtet, die in der Lage sein soll, Wirtschaft und Gesellschaft ein neues Gesicht zu verleihen: „Wir erschließen mit der Nanotechnologie vollständig neuartige Welten der Neukombination. Wir können damit vollständig neuartige Produkte und Prozesse entwickeln. ... Die Anschlußfähigkeit des revolutionär Andersartigen an das Bestehende ist beschränkt. Politik, Recht, Wirtschaft sind überfordert. Wissenschaftliche und unternehmerische Pioniere müssen uns die Nanowelt erschließen. Beobachter vergleichen den Eintritt in das Zeitalter der Nanotechnik mit einem Umbruch der menschlichen Entwicklung“ (Röpke/Kozlova, 2004, 2). Als möglicherweise radikale Innovation, kann sie völlig neue Geschäftsfelder erschließen und eine große „schöpferische Zerstörung“ verursachen. Sie bewirkt bei ihren Anwendern aber nicht nur die Entwicklung neuer, sondern auch die Verbesserung bestehender Produkte (Verbesserungs- und Folgeinnovationen).

Hullmann (2001, 156) sieht die Bedeutung der Nanotechnologie vor allem in ihrem Einfluss auf die Erweiterung des menschlichen Wissens sowie auf die wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Entwicklung. Möglicherweise in Kombination mit der Biotechnologie wird diese Technik als ein weiterer tech-

nischer Kandidat für eine nächste Kondratieff-Welle betrachtet (Hullmann, 2006b, 7). Ähnlich wird diese Technik auch von Stiller als eine Basisinnovation behandelt: Sie besteht aus einem Technologiebündel, vom Nanokosmos gehen erhebliche volkswirtschaftliche Impulse aus und sie führt zu Reorganisationen in Wirtschaft und Gesellschaft (Stiller, 2005, 287 f.).

Von der Politik wird die Nanotechnik denn auch als die „chancenreichste Querschnittstechnologie der Welt“ verstanden; deshalb startete die Bundesregierung die „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ (BMBF, 2006c). Im Bundesbericht Forschung von 2006 wurde sie als „eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts“ bezeichnet (BMBF, 2006a, 301).

Ob dies tatsächlich so ist, wird von Woyke (2007, 343) indes bezweifelt: „Zweifelloso gibt es mittlerweile eine ganze Reihe innovativer nanotechnologischer Produkte und Verfahren, aber sie rechtfertigen in keiner Weise die Rede von einer neuen ‚industriellen Revolution‘ und die Stilisierung der Nanotechnologie zur ‚Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts‘.“ Woyke schlägt daher vor, sich „von allen überzogenen Erwartungshaltungen an eine vermeintlich gänzlich neue Schlüsseltechnologie zu distanzieren“. Dies besonders deshalb, weil es sich hier um kein neues Technologiefeld, sondern um eine Fortentwicklung in den Feldern angewandter Chemie handele (Woyke, 2007, 331; ähnlich auch Hartmann, 2006, 7). In Ableitung aus der Argumentation Woykes' würde es sich bei der Nanotechnologie weniger um eine grundlegend neue Basisinnovation als eher um eine Verbesserungsinnovation auf dem Gebiet der Kolloidchemie (ein Teilgebiet der Chemie, das sich mit fein verteilten Stoffen in Größenordnungen zwischen einem Millionstel und einigen tausendstel Millimetern beschäftigt) handeln. Gleichwohl wurde sie vom BMBF im Rahmen der Hightech-Strategie als eine von 17 Technologien als förderungswürdig angesehen (BMBF, 2006b). Darüber hinaus findet sie im Rahmen verschiedener staatlicher Programme Unterstützung.

Positive Einschätzungen finden sich auch in einer Studie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) (Luther et al., 2004). Einer Umfrage des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) aus dem Jahr 2007 zufolge sahen 60,3 Prozent der Führungskräfte aus Mitgliedsunternehmen in der Mikrosystem- und Nanotechnik unter insgesamt acht Technologien für Deutschland und Europa die stärksten Innovationsimpulse der Zukunft (VDE, 2007). Im Rahmen einer Untersuchung der IW Consult GmbH (2007) zu den Zukunftsbranchen Deutschlands bewerteten bei einer Expertenbefragung (knapp 70 Experten aus den Bereichen Wissenschaft, Bank und Unternehmensberatung) 75,5 Prozent der Befragten die Potenziale der Nanotechnologie für Deutschland als „hoch“ (weltweit: 92,2 Prozent).

Solche Einschätzungen gelten auch für viele andere Länder, welche die Nanotechnik ebenfalls als ein wichtiges Forschungsgebiet einstufen. Die weltweiten Aufwendungen staatlicher Mittel für die Förderung der Nanotechnik sprechen dafür, dass ihr eine große sozioökonomische Bedeutung beigemessen wird. In einer Befragung von VDE-Mitgliedsunternehmen im Jahr 2007 wurde deutlich, dass 49 Prozent der Führungskräfte bei der Mikro- und Nanotechnik derzeit die USA in der Führungsrolle sehen (Europa: 33,7, Asien: 16,3 Prozent); bis 2015 werde sich die Innovationsstärke jedoch erheblich zugunsten Asiens verschieben (VDE, 2007).

Noch steht die breite Bewährung der Nanotechnologie als Basisinnovation aus. Viele Markteinschätzungen werden bislang noch von Erwartungen getragen, nur wenige Unternehmen widmen sich ihr; auf dem Markt sind europaweit rund 500 bis 600 Nanoprodukte erhältlich (vzby, 2008). Denn Entwicklung sowie Diffusionsgeschwindigkeit und -breite einer (schlüsseltechnologischen) Innovation werden nicht allein von den Möglichkeiten der unternehmerischen Krediterschöpfung, sondern auch von weiteren Faktoren und deren Zusammenspiel innerhalb nationaler Innovationssysteme (institutionelle Rahmenbedingungen des Handlungsspielraums) bestimmt: der wirtschaftlichen Gesamtsituation, den technischen Schwierigkeiten und der Einpassung an vorhandene Techniken, der Verfügbarkeit geeigneter Unternehmer, Wissenschaftler, Forscher und Arbeitskräfte, der Haltung diverser Interessengruppen, der soziokulturellen Akzeptanz, den institutionellen Regelungen wie Gesetzen, Gewohnheiten, Regeln oder Standards, den Transferbedingungen von Wissen, dem Kapitalzugang, der öffentlichen Forschungsförderung, den Netzwerken usw.

Eine bedeutende Rolle kommt bei der Diffusion einer Innovation im Globalisierungsprozess und einer international arbeitsteiligen Wirtschaft der Normung und Standardisierung von Produkten und Prozessen zu. Normen sind nicht nur ein weiterer Output-Indikator für den technischen Fortschritt, sondern führen für die Volkswirtschaften wie auch für einzelne Unternehmen zu einer Reihe von Vorteilen (Swann, 2000; Blind, 2006): Hierzu gehören unter anderem der Abbau von Handelshemmnissen, der leichtere Technologietransfer, geringere Transaktionskosten sowie die (kostengünstige) Entwicklung marktfähiger wie sicherheitstechnisch zuverlässiger Produkte; für das wirtschaftliche Wachstum gelten Normen als ebenso wichtig wie Forschung und Entwicklung (FuE) sowie Patente. Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) wertet die Normung als „ein Instrument, um neue Technologien umzusetzen und Innovationen zu fördern“ (BDI, 2008, 7). Eine offene Normen-Infrastruktur trägt den Charakter eines öffentlichen Gutes (Swann, 2000, V) und stützt als solches die Wirkung nationaler

Innovationssysteme sowie die ihrer Agenten. In Bezug auf die Nanotechnologie hat 2005 – mit der Gründung des internationalen Gremiums ISO/TC 229 ‚Nanotechnologies‘ (London) – ein international koordinierter Normungsprozess begonnen, was deren internationalen Diffusionsprozess (und damit die Entwicklung von Märkten) unterstützt. Deutschland erhielt 2006 von der internationalen Normungsorganisation IEC (International Electrotechnical Commission) den Zuschlag für die Führung des IEC-Komitees „Nanotechnologie“ (IEC/TC 113), das sich mit der Normung elektrischer und elektronischer Produkte und Systeme auf dem Gebiet der Nanotechnologie befasst. Zum internationalen Stand der Normungsarbeit in der Nanotechnologie informiert auch die Hessen Agentur GmbH (HA, 2007).

2.3 Was bedeutet und charakterisiert die Nanotechnik?

Die Vorsilbe „Nano“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie Zwerg. Die Nanotechnik selbst ist im Prinzip durch die Natur bekannt. Schon seit langem war empirisch nachgewiesen, dass ausreichend kleine Teilchen eines Materials teilweise erheblich andere Eigenschaften aufweisen, als sie vom Massivmaterial bekannt sind (Hartmann, 2006, 11 f.). So nutzten bereits die Römer feinste Goldpartikel, um Gläsern bestimmte Farbeffekte zu verleihen. Hierbei handelte es sich natürlich noch nicht um den gezielten Einsatz von Nanotechnik, zumal die kausalen Zusammenhänge zwischen Größe und Farbverhalten noch nicht bekannt sein konnten. Dies wurde erst mit der weiteren Verwissenschaftlichung des technischen Fortschritts sowie der Industrialisierung und Informatisierung im technischen Zeitalter möglich.

Welche real-technischen, kulturell-zivilisatorischen und ökonomischen Merkmale besitzt nun die moderne Nanotechnik als ein weiterer Miniaturisierungsschritt? Was gibt Anlass, sie nicht nur als eine Mode, sondern als eine erfolgversprechende Schlüsseltechnologie oder Basisinnovation anzusehen, die Wirtschaft und Gesellschaft verändert?

Die real-technischen Merkmale

Mit Nanotechnologie als Sammelbegriff wird eine breite Auswahl von Technologien subsummiert, die sich der Erforschung und Herstellung von Gegenständen und Strukturen widmen, die kleiner sind als 100 Nanometer; ein Nanometer entspricht einem Milliardstel Meter (10^{-9} m).⁶ Er beschreibt jenen Grenzbereich, in dem die Eigenschaften der Oberfläche gegenüber den Eigenschaften des

⁶ Im Allgemeinen bedeutet „Nano“ ein Milliardstel eines Ganzen und „Micro“ ein Millionstel eines Ganzen.

Volumens von Materialien eine immer größere Rolle spielen, und in dem zunehmend quantenphysikalische Effekte auftreten (Paschen et al., 2003, 37 ff.).

Dementsprechend gibt es im Prinzip zwei wesentliche Kriterien, die unterschiedlich angewendet werden können: Ein „geometrisches Maß“ (Strukturgröße), welches nur die reine Größenordnung von Objekten berücksichtigt, und die „phänomenologische Betrachtungsweise“ (Funktion), bei der neue Effekte und Eigenschaftsqualitäten wie zum Beispiel Antireflexionsvermögen, neue Farbigkeiten oder die Kratzfestigkeit im Vordergrund stehen (Luther et al., 2004, 16 f.). Ausdehnung und Funktionalität hängen also zusammen: Hartmann (2006, 8) hat folgende Definition vorgenommen: „In der Nanotechnologie erzielt man spezifische Funktionalitäten durch einen kausalen Zusammenhang zwischen der jeweiligen Funktionalität und der Verkleinerung auf charakteristische strukturelle Abmessungen, die in mindestens zwei Dimensionen 100 nm unterschreiten.“ Hartmann hat vorgeschlagen, den Nanobereich auf das Intervall 1 bis 100 Nanometer festzulegen, da hier eine Vielzahl völlig neuer größeninduzierter Funktionalitäten durch quantenmechanische Effekte auftreten. Ähnlich wird die Nanotechnologie im Rahmen der National Nanotechnology Initiative (NNI) der USA beschrieben (National Science and Technology Council, 2007, 3). Im Bericht des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) wird die Nanotechnik wie folgt umrissen (Paschen et al., 2003, 39 f.):

- Strukturen, die in wenigstens einer Dimension kleiner als 100 Nanometer sind (also einschließlich des Bereichs dünner Schichten sowie der Beschichtungstechnik),
- Nutzung bestimmter Eigenschaften, die im Übergang zwischen atomarer und mesoskopischer⁷ Ebene auftreten (zum Beispiel zählt dann die Herstellung von DNA-Chips im engeren Sinne nicht zur Nanotechnik),
- gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen (Aktivitäten, die sich natürliche Lebensvorgänge im Nanomaßstab zunutze machen, werden nicht dazu gezählt).

Die heutige Nanotechnologie ergibt sich Experten zufolge im Wesentlichen aus drei seit längerem angelegten Entwicklungstendenzen beziehungsweise -strategien (Luther et al., 2004, 17 f.) Dies sind die:

1. Technische Physik: Die Erzeugung immer komplexerer Schaltkreise durch immer kleinere Strukturen in der Mikroelektronik; dadurch Möglichkeit der Produktion schnellerer Prozessoren, kapazitätsreicherer Speicher und Festplatten

⁷ Mesoskopisch bedeutet einen Größenbereich, der zwischen dem makroskopischen (zum Beispiel Zelle) und dem mikroskopischen (zum Beispiel Atom) liegt.

(also sukzessive Verkleinerungen vom Makro- über den Mikro- bis zum Nanobereich – Top-down-Bestrebungen);

2. Chemie: Der gezielte Aufbau hochmolekularer funktionaler chemischer Verbindungen mit hohem Anwendungspotenzial in der Katalyse, Membrantechnik, Sensorik oder der Schichttechnologie (Bottom-up-Bestrebungen);

3. Biologie: Hier erweiterten sich die Kenntnisse über biologische Prozesse auf zellulärer und molekularer Ebene; zum Beispiel über die Abläufe der Selbstorganisation von Molekülverbänden oder über die Photosynthese. Man will biologische Funktionsprinzipien, die dem Bottom-up-Ansatz folgen, auf technische Systeme übertragen. Auch die Biotechnologie stellt immer mehr Möglichkeiten von Verfahren zur Schaffung funktionaler Moleküle bereit.

In der Nanowelt geht es um die folgenden drei Bereiche von Eigenschaftsveränderungen (Luther et al., 2004, 19), die ihren ubiquitären Charakter als Querschnittsinnovation begründen:

1. Quantenmechanisches Verhalten in Bezug auf Farbe und Transparenz, Härte, Magnetismus und elektrische Leitfähigkeit („neue“ technische Physik);

2. vergrößerte Oberfläche in Bezug auf Veränderungen von Schmelz- und Siedepunkt, chemische Reaktivität, katalytische Ausbeute („neue“ Chemieprozesse) und

3. molekulare Erkennung durch eine Kombination von Selbstorganisation, Reparaturfähigkeit, Adaptionfähigkeit und Erkennungsfähigkeit („neue“ Bioanwendungen).

Ein Beispiel zur Oberflächenvergrößerung

Übersicht 1

Ein Würfel aus einfachen Molekülen mit einer Kantenlänge aus zehn Molekülen (circa zehn Nanometern) beinhaltet insgesamt 1.000 Moleküle. Davon befinden sich 49 Prozent (488) an der Oberfläche und können mit ihrer Umgebung reagieren. Baut man aber aus den gleichen Molekülen einen Würfel mit einer Kantenlänge von einem Mikrometer (ein tausendstel Millimeter), dann ist er noch immer kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares, besteht aber aus einer Milliarde Molekülen. Davon befinden sich aber nur knapp sechs Millionen (0,6 Prozent) an der Oberfläche und 99,4 Prozent im Inneren des Würfels. Im Gegensatz zum Nanowürfel, bei dem 49 Prozent der Moleküle an der Oberfläche liegen, befinden sich hier also nur 0,6 Prozent aller Moleküle in einem direkten Kontakt zur Umgebung.

Quelle: BMBF, 2002, 4

In der Nanotechnologie geschieht eine bewusste Verknüpfung von struktureller Größe und Funktionalität, um Materialien oder Bauelemente mit anderen Eigenschaften zu schaffen (Übersicht 1). Solche Strategien, die auch der Entstehung natürlicher Nanostrukturen zugrunde liegen, will man nachahmen (Hartmann, 2006, 10). Es liegt in der Natur der Nanotechnologie, dass sie sich

durch eine hohe Interdisziplinarität, Wissens- und Wissenschaftsintensität auszeichnet; die Grenzen zwischen Physik, Chemie und Biologie verschwinden auf dieser Ebene immer mehr. Das Labor ist der Ort der Entdeckungen und der Wissenschaftler ist der zentrale Entdecker. Letztlich können sich aus diesem Kreis zudem potenzielle neue Unternehmer rekrutieren, die zur notwendigen Gründerwelle beitragen.

Seit der nanotechnologischen Vision bis zu ihrer verstärkten Entwicklung und Anwendung sowie einer auch staatlich intensiver geförderten Technologie für einen neuen Wirtschaftsaufschwung sind inzwischen rund 40 Jahre vergangen. Als geistiger Vater und Visionär der Nanotechnologie gilt der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman (ein Schüler John A. Wheelers) aufgrund seines 1959 vor der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft gehaltenen Vortrags „There’s Plenty of Room at the Bottom“ – ganz unten ist eine Menge Platz, der in einer Zeit, in der es noch um die Erschließung des Weltraums und des Makrokosmos ging, recht wirkungslos blieb (Feynman, o. J.). Er sprach zum ersten Mal von der Möglichkeit, Materie auf der atomaren Ebene zu formen beziehungsweise zu manipulieren und damit eine enorme Zahl neuer Anwendungen zu ermöglichen.⁸ Dabei beschrieb er nicht nur den Weg, die Dinge durch Verkleinerung (top down) zu verändern, sondern auch aus kleinsten Teilchen, den Atomen, neu aufzubauen (Bottom-up-Strategie), was erst knapp 20 Jahre später (1981) mit der Entwicklung des Rastertunnelmikroskops möglich wurde.⁹

Hieraus leitet sich heute praktisch die Konstruktion neuer Materialien oder Geräte aus einzelnen Atomen oder Molekülen ab: „In der Nanotechnologie nutzt man zum einen das Konstruieren mit den elementaren Einheiten der belebten und unbelebten Natur, nämlich die Atome und Moleküle, vergleichbar dem Basteln mit einem Lego-Baukasten. Zum anderen stellt man aber auch durch Verkleinerung Strukturen her, welche nur noch ein Tausendstel eines Haardurchmessers messen“ (Luther et al., 2004, 15). Den Begriff „Nanotechnology“ gebrauchte 1974 erstmals der japanische Ingenieur Norio Taniguchi (Universität Tokio), der mit Nanotechnologie die Veränderung von Materialien durch die Manipulation von Atomen oder Molekülen bezeichnete.

⁸ Ditzen (2006, 243 ff.) verweist darauf, dass Feynman’s Vision theologisch geprägt sei und es in der Geschichte der Mikroskopie seit langem auch darum gegangen sei, die Schrift Gottes in den Mikrokosmos zu übertragen; schon hier habe es sich um die Speicherung von Information auf kleinstem Raum mittels einer Nadel gehandelt.

⁹ Nach Nordmann (2006, 81 ff.) hatte der deutsche Materialwissenschaftler Herbert Gleiter einen entscheidenden Anteil bei der Begründung der Nanotechnologie; Gleiter habe 1981 eine „neue Klasse von Materialien“ angekündigt, die er „mikrokristallin“ genannt habe und die im „Nanometer Bereich legiert werden“ könnten (Gleiter, zitiert bei Nordmann, 2006, 84). „Herbert Gleiter (erscheint) als der möglicherweise erste produktiv arbeitende Nanoforscher, der sich selbst als ein solcher verstand“ (Nordmann, 2006, 87). Eine Definition des Begriffs „Rastertunnelmikroskop“ befindet sich in Fußnote 10.

Zeittafel zur modernen Nanotechnik

Übersicht 2

Grundsätzlich hat sich die Nanotechnik aus der Quantentheorie entwickelt. Als deren Geburtsstunde wird die Präsentation des Wirkungsquantums h durch Max Planck vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft im Jahr 1900 angesehen. Die Größe h dient als Proportionalfaktor zur Berechnung der Energiemenge E eines Lichtquants ($E = h \cdot \nu$), wobei ν die Lichtfrequenz darstellt; sie wird als Naturkonstante bezeichnet. Ohne diese Naturkonstante h funktioniert auch in der auf der atomaren Ebene wirkenden Nanotechnik nichts, sie ist für die quantenphysikalischen Effekte verantwortlich.

- 1931 Ernst Ruska, Technische Universität Berlin, erfindet das Elektronenmikroskop und eröffnet damit einen weiteren Blick in den Mikrokosmos; 1986 erhält er für seine Arbeiten den Nobelpreis für Physik.
- 1959 Richard Feynman, California Institute of Technology, Pasadena/California (USA), hält vor der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft seinen Vortrag „There's Plenty of Room at the Bottom“.
- 1974 Norio Taniguchi, Tokyo Science University, gebraucht als Erster den Begriff Nanotechnik.
- 1981 Herbert Gleiter, Universität des Saarlandes, verweist darauf, dass bei einer Verkleinerung der Korngrößen kristalliner Stoffe zunehmend die Grenzflächen für die Materialeigenschaften entscheidend werden.
- 1981 Gerd Binnig und Heinrich Rohrer vom IBM-Forschungslabor in Rüschlikon bei Zürich entwickeln das erste Rastertunnelmikroskop und machen damit über den Computer Atome „sichtbar“.
- 1985 Richard E. Smalley, Richard F. Curl (Rice-University Houston, USA) und Harold W. Kroto (University of Sussex, Brighton, England) entdecken eine bisher unbekannte Form des Kohlenstoffs: Ein fußballförmiges Molekül aus 60 Kohlenstoffatomen, das C₆₀-Molekül („Buckminsterfulleren“ [Buckyball]), benannt nach dem Architekten Buckminster Fuller, der für die Weltausstellung 1967 in Montreal die geodätische Kuppel entwarf). 1996 erhielten die Forscher für ihre Arbeit den Nobelpreis für Chemie. Diese Art der Moleküle sollte später für den Bau von Nanoröhrchen (Nanotubes) Bedeutung erhalten.
- 1985 Eric Drexler gründet das Foresight Institute in Palo Alto (Kalifornien).
- 1986 Rohrer und Binnig erhalten den Physik-Nobelpreis für das Rastertunnelmikroskop.
- 1986 Gerd Binnig, Christoph Gerber und Calvin Quate bauen das erste Rasterkraftmikroskop.
- 1986 Eric Drexler veröffentlicht sein Buch „Engines of Creation“.
- 1988 An der Stanford Universität wird von Eric Drexler zum ersten Mal offiziell ein Kurs „Nanotechnologie“ angeboten.
- 1989 Donald Eigler und Erhard Schweizer vom IBM Almaden Research Center, San Jose (Kalifornien), schreiben erstmals mit dem Rastertunnelmikroskop mit 35 Xenon-Atomen auf einer Nickeloberfläche den Schriftzug IBM.
- 1990 Die Nanotechnologie bekommt ein eigenes Fachjournal („Nanotechnology“). Es wird vom britischen Institute of Physics herausgegeben.
- 1991 Der japanische Forscher Sumio Iijima veröffentlicht die Entdeckung verschachtelter Nanotubes; wenige Nanometer große Röhrchen aus Kohlenstoff mit ungewöhnlichen Eigenschaften. Mehrere Unternehmen (wie etwa IBM) beginnen mit eigenen Forschungsprogrammen zur Nanotechnologie.
- 1991 Das Institut für Neue Materialien in Saarbrücken entwickelt die erste chemisch-nanotechnische Antihafbeschichtung, die transparent ist.
- 1991 Michael Grätzel (Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne) entwickelt eine Nanosolarzelle.

- 1992 Das Wissenschaftsmagazin „Nature“ veranstaltet in Tokio seine erste internationale Nanotechnologiekonferenz.
- 1994 Dieter Bimberg, Technische Universität Berlin, baut den ersten Quantenpunktlaser. Hierbei kann die Wellenlänge des Lichts genau bestimmt werden, was Laser bei geringer Energieaufnahme für unterschiedliche Anwendungen (zum Beispiel Laserfernsehen, Telekommunikation) nutzbar macht.
- 1998 Cees Dekker, Technische Universität Delft, baut erstmals einen Transistor (Halbleiter) aus Nanotubes. Sie gelten als Alternative zum Silizium für Transistoren, die nicht mehr verkleinert werden können.
- 1999 Mark Reed und James Tour, Yale University, entwickeln einen elektronischen Schalter aus nur einem organischen Molekül.
- 1999 In Deutschland werden unter Förderung des BMBF fünf neue Kompetenzzentren für Nanotechnologie eingerichtet.
- 2001 In den USA startet die „National Nanotechnology Initiative“.
- 2001 Es werden erste molekulare Schaltkreise gebaut.
- 2002 IBM-Forscher in Rüschlikon entwickeln eine neue Art der Datenspeicherung, den „Milliped“ (Tausendfüßler). Hiermit können eine Billion Bits (1Tbit) auf einer Fläche von einem Quadratzoll untergebracht werden (1 Quadrat mit einer Kantenlänge von 2,54 cm).
- 2003 Forscher der Universität Berkeley bauen den ersten Schaltkreis aus Nanotubes.
- 2004 In Dresden (Infineon) wird der bislang kleinste Nanotube-Transistor mit einer Kanallänge von nur 18 Nanometern gebaut.
- 2005 Am IBM-Forschungszentrum Almanden, Silicon Valley, werden erstmals mithilfe des Rastertunnelmikroskops Atome nicht nur verschoben, sondern auch aufgegriffen und transportiert.
- 2006 Amerikanische Forscher (Thomas H. LaBean und andere) in Durham, North Carolina, nutzen die Fähigkeit der DNS zur Selbstorganisation für die Herstellung nanoskaliger Strukturen in Form eines Rasters, auf dem Molekülmuster festgelegt werden können. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, elektronische und optische Schaltkreise in Serie zehnmal kleiner als bislang üblich herzustellen. Hierbei werden also nicht Siliziumkristalle, sondern DNS-Stränge für die Strukturierung genutzt.

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Ergänzungen aus unterschiedlichen Quellen, insbesondere aus BSI, 2007, 17 ff. und Boeing, 2006, 198 f.

Als ein technischer Meilenstein bei der Entstehung der Nanotechnologie gilt die Erfindung des Rastertunnelmikroskops¹⁰ durch Gerd Binnig und Heinrich Rohrer beim IBM-Forschungslabor in Rüschlikon (Schweiz) im Jahre 1981; sie erhielten dafür 1986 (gemeinsam mit Ernst Ruska) den Nobelpreis für Physik. Erstmals wurde es dadurch möglich, nicht nur Kollektive von periodisch ange-

¹⁰ Mit dem Rastertunnelmikroskop – RTM – (englisch: Scanning Tunneling Microscope, STM) werden elektrisch leitfähige Materialien (hauptsächlich Metalle, Halbleiter) mikroskopisch untersucht. Eine sehr spitze Nadel (Sonde) rastert in geringem Abstand (wenige Atomdurchmesser, ein Atom entspricht etwa einem Milliardstel Meter) die Oberfläche einer Probe ab. Nach Anlegen einer Spannung fließt ohne Berührung ein schwacher Strom (Tunnelstrom). Dieser Strom reagiert sehr sensibel, wenn sich der Abstand zwischen Sonde und Probe minimal verändert. Das RTM gibt wieder, wie viel Elektronen einer bestimmten Energie auf einem winzigen Ausschnitt der Probe zu finden sind. Es erfasst aber nicht die atomare Topografie, sondern die elektronischen Eigenschaften einer Oberfläche. Man kann von elektronischen Zuständen auf diverse Materialeigenschaften schließen (elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit oder Magnetismus). Das RTM kann Atome verschieben, aufheben oder absetzen (atomares Schreiben). Daher lassen sich neue Moleküle bauen (Welt der Physik, 2005a).

ordneten Atomen, sondern einzelne Atome abzubilden und zu bewegen (vgl. Übersicht 2). Woyke (2007, 334) relativiert den Einfluss dieser Erfindung jedoch folgendermaßen: „Von einer technologischen Erschließung eines neuen Forschungsfeldes oder gar der experimentellen Begründung eines neuen Wissenschaftszweiges, wie man sie im Verhältnis der Mikrobiologie zur Einführung des Lichtmikroskops sehen kann, lässt sich aber im Blick auf die Arbeiten von Binnig und Rohrer nicht legitim sprechen.“ Hinter der Nanotechnologie als einer Innovation steht die Weiterentwicklung einer neuen mikroskopischen Technik. Später, durch die Fortentwicklung zum Rasterkraftmikroskop,¹¹ konnten auch einzelne nicht metallische Atome von einem zum anderen Ort bewegt werden.

Die kultur-zivilisatorischen Merkmale

In kultureller wie zivilisatorischer Hinsicht symbolisiert die Nanotechnik heute eine weitere bedeutende Etappe des technischen Fortschritts in der „technischen Zivilisation“, dessen Merkmal seit langem unter anderem das der „Machbarkeit der Sachen“ (Freyer, 1955) ist, bei welcher der Zweck die Mittel bestimmt und nicht mehr die zur Verfügung stehenden Mittel die Zwecke. Dies setzt eine Gesellschaft voraus, in der die Entwicklung und Umsetzung neuen Wissens zur dominanten Fortschrittsdeterminante geworden und die anthropogen kontrollierte Gestaltbarkeit des eigenen Lebens und der Umwelt über die bekannten biologischen Grenzen hinaus Leitschnur des Handelns ist.

Wie im Vorfeld gezeigt wurde, geht es auch bei der Nanotechnik um die vom Menschen zweckbestimmt herbeigeführte technische Manipulation solcher Strukturen, die kleiner als 100 Nanometer sind. Es handelt sich um eine weitere bewusste Neukonstruktion von Materie mit ex ante definierten Eigenschaften auf der atomaren und molekularen Ebene – ein typisches, vorerst letztes Produkt des die Natur um- und „neu“ gestaltenden „Mängelwesens“ Mensch (Gehlen), des „Homo faber“ (Frisch), der entdeckt, erfindet und konstruiert und auf diesem Wege technische Artefakte als eine „zweite Natur“ entwickelt. Zugleich wird

¹¹ Ein Rasterkraftmikroskop – RKM – (englisch: Atomic Force Microscope, AFM) kann auch elektrisch nicht leitfähige Materialien abbilden; es wurde von Gerd Binnig, Calvin F. Quate und Christoph Gerber 1986 entwickelt. Es eignet sich prinzipiell für jedes feste Material in unterschiedlichen Umgebungen (Luft, Gas, Flüssigkeiten) bei unterschiedlichen Temperaturen; es ist deshalb auch besonders für Anwendungen in der Biologie geeignet. Am Ende eines Federbalkens liegt die Sonde direkt auf der Probe (wie die Nadel eines Plattenspielers) und rastet das Oberflächenrelief ab, dabei werden die winzigen Auslenkungen des Federbalkens mit einem Laserstrahl detektiert und in mikroskopische Bilder umgesetzt. Durch Weiterentwicklungen ist auch ein Nicht-Kontakt-Modus möglich geworden. Das RKM bietet weiterhin die Möglichkeit, einzelne Moleküle zwischen Oberfläche und der Sonde des RKM zu festigen; es kann die Kraft bestimmt werden, die notwendig ist, um das Molekül zu zerreißen (Messung der chemischen Bindungsenergie). So können DNA-Moleküle gestreckt werden, bis sich die Doppelhelix entfaltet und in zwei Stränge auseinanderbricht. Auch können solche Mikroskope als Schreibwerkzeug dienen, sodass kleinste Strukturen in Oberflächen eingraviert werden. Dadurch ist die Herstellung großer Datenspeicher („Millipede“) möglich geworden (Welt der Physik, 2005b).

hiermit die Grenze des vom Menschen Machbaren um ein weiteres Stück nach vorne verschoben, was nicht erst nach der modernen Bio- und Gentechnik einen neuen technischen Entwicklungsstand menschlichen Könnens beschreibt, durch den der Mensch nicht nur einmal mehr zum „Objekt der Technik“ (Jonas, 1979, 47 ff.) wird, sondern zugleich auch eine neue Symbiose Mensch/Technik einzugehen vermag. Es handelt sich dabei um eine beträchtliche Erweiterung der Real-Techniken. Mit den neuen technischen Machbarkeiten in nahezu allen Bereichen sollen letztlich weiteres Wirtschaftswachstum, mehr Wohlstand sowie Gesundheit und neue Arbeitsplätze ermöglicht werden – entsprechend ambitioniert ist ihre internationale Förderung (vgl. Abschnitt 3.1).¹²

Insoweit handelt es sich bei der Nanotechnik um eine Form technischen Fortschritts (im Sinne einer Erweiterung manipulativer Freiheit des auf Emanzipation bedachten Menschen), die von erheblichem anthropologischen, zivilisatorischen, kulturellen wie letztlich auch sozioökonomischen Belang ist. Die Einsicht des Philosophen und Soziologen Hans Freyer, die sich auf die moderne Chemie bezog, trifft hier noch verstärkt zu: „Die Freiheit des Machens wird dadurch unerhört gesteigert“ (Freyer, 1955, 26). Diese Freiheit zeigt sich nun durch die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops auch in den Anwendungen der Nanotechnik in eindrucksvoller Weise. Wiederum relativiert Woyke (2007, 343), es handele sich bei der Nanotechnologie meist nicht um wirklich Neues, sondern um eine Fortsetzung und Erweiterung der chemischen Technologien des 18. Jahrhunderts; im Kern müsse die Nanotechnologie als angewandte Chemie begriffen werden. Dies ändert indes nichts an ihrem Schlüsseltechnologischen Wert.

Mit mikroskopischer Hilfe (und des Computers) wird es machbar, nahezu alle gewünschten Eigenschaften eines Stoffes willentlich zu erzeugen und sodann im Sinne technofuturistisch-transhumanistischen Denkens zu gestalten, das mit seiner Zielvorstellung machbarer Unsterblichkeit und Vollkommenheit des Menschen nahezu quasi religiöse Züge trägt (Transhumanismus als „technizistische Erlösungsreligion“, Schummer, 2006, 270). Die Wurzeln des Transhumanismus

¹² Weitgehend noch offen sind die weiteren technischen Fortschritte in der „Machbarkeit der Sachen“ durch die Quantenphysik, die über die Ebenen von Masse und Energie hinausgeht und die den die Materie beeinflussenden selbstständigen Faktor Information entdeckt hat. Der physikalisch-technische Fortschritt erschließt sich nach und nach auch die Welt der Information (beziehungsweise des Geistes), ohne die Wirklichkeit nicht möglich ist. Die Erkenntnisse der modernen Quantenphysik über die subatomare Ebene werden das noch weitgehend materialistisch orientierte naturwissenschaftliche Weltbild nachhaltig verändern (Bewusstseinsinnovation!), indem die Trennung zwischen Subjekt und Objekt aufgehoben wird. So der Physiker Anton Zeilinger, Universität Wien: „Es stellt sich letztlich heraus, dass Information ein wesentlicher Grundbaustein der Welt ist. Wir müssen uns wohl von dem naiven Realismus, nach dem die Welt an sich existiert, ohne unser Zutun und unabhängig von unserer Beobachtung, irgendwann verabschieden“ (Zeilinger, 2001, 3). Nach Zeilinger ist der Faktor Information (respektive Geist) also ein zentraler Baustein der als Realität erfahrbaren materiellen Welt. So eröffnet der wissenschaftlich-technische Fortschritt auf der materiellen Ebene auch den Zugang zur Welt des Nicht-Materiellen als eine die materielle Wirklichkeit prägende Kraft.

(ein Begriff, der 1975 von Julian Huxley geprägt wurde) als einer neuen Entwicklungsstufe liegen in den USA; seine Leitfigur ist heute Max T. O’Conner (alias Max More), geboren in Bristol, England.

Auf der Homepage der Deutschen Gesellschaft für Transhumanismus e. V. (URL: <http://www.transhumanismus.de/> [Stand: 2008-05-19]) heißt es unter anderem: „Transhumanismus propagiert nicht weniger als die mögliche totale Umgestaltung der menschlichen Art, die selbstgesteuerte Evolution. Natürlich gibt es viele Menschen, auf die diese Gedanken unnatürlich und erschreckend wirken. Meist basiert das auf (religiösen) Vorurteilen oder einseitig negativer Erwartungen bezüglich der Folgen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse.“ Und zur Nanotechnologie als Werkzeug: „Dank modernster physikalischer und chemischer Instrumentarien sind wir inzwischen in der Lage, einzelne Atome, die Bausteine der materiellen Welt, gezielt zu manipulieren. Dies eröffnet uns die grandiose Vision einer molekularen Nanotechnologie, durch die wir imstande sein werden, die Materie Atom für Atom mit Hilfe nanometergroßer Maschinen (sogenannte Assembler) nach unseren Vorstellungen umzubauen. Unser Leben wird sich dadurch grundlegend verändern, denn die Anwendungsmöglichkeiten sind zahllos: abfallfreie und wirklich umweltschonende Produktion aller nur denkbaren Güter und Materialien (mit heute unerreichbaren Eigenschaften), gezielte und wirkungsvolle Beseitigung von Abfällen und Umweltschäden der gegenwärtigen Industriegesellschaft, Einsatz in der Medizin zur Bekämpfung von Krankheiten und Verbesserung körperlicher Eigenschaften auf Zell- und Molekülebene(!) etc.“ Die Rolle des Transhumanismus als soziokulturelle Strömung in der Nano-Debatte stellt Coenen (2006, 195 ff.) dar. Gerd Binnig sagt dazu: „Der Mensch ist in diesem Moment Zeitzeuge und Gestalter einer zweiten Genesis, einer grundlegend neuen Evolution von materiellen Strukturen, die wir heute noch nicht einmal richtig benennen können“ (Binnig, 2006, 7). Auch in dieser Hinsicht gibt es zurückhaltende Äußerungen: „Die hochgradig überzogenen Visionen der ‚nanotechnologischen Revolution‘, welche von der universellen Gestaltung der Welt bis zur unbegrenzten Verlängerung des menschlichen Lebens reichen, lassen sich vor diesem Hintergrund als konsequenter Ausdruck eines selbstläufigen Machbarkeitswahns begreifen, für den die Bedeutungsunterschiede zwischen realitätsgebundener Technologie und magischen Allmachtsphantasien hinfällig geworden zu sein scheinen“ (Woyke, 2007, 341).

Gleichwohl ist sie aber eine konsequent evolutionäre und möglicherweise eigendynamische Technik, eine soziokulturelle Fortsetzung des Trends der „Machbarkeit der Sachen“ (Freyer, 1955, 15 f.) in der „technischen Zivilisation“, von dem man sich die Lösung vieler Probleme verspricht und der auf diese Weise die Geschichte und Entwicklung der Menschheit prägen wird.

Durch die ihr immanent omnipotenten Möglichkeiten des „perfekt“ Machbaren provoziert sie (nach der Gentechnik und im Zusammenspiel mit ihr) einen weiteren Schub an transhumanistischen Visionen (wie von der Schaffung maschineller Überintelligenz) und Rettungsutopien für eine defizitäre Welt (Coenen, 2006). Dies wird sodann als Fortschritt interpretiert, indem die gegebene organische Mängelhaftigkeit von Mensch und Natur durch Technik vollends überwindbar scheint, was als ein evolutionärer Trend angesehen werden kann, der im Menschen mit seinen „Organmängeln“ (Gehlen, 1957, 8) an sich angelegt zu sein scheint.

Die ökonomischen Merkmale

Was ist nun ökonomisch anders an dieser Machbarkeitstechnik? Relativ neu ist hieran, dass sich – ganz im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken – positive Skalenerträge nicht mehr durch eine Vergrößerung der Objekte, sondern durch deren Verkleinerung ergeben – die Leistungsfähigkeit steigt bei sinkenden Kosten: je kleiner desto wirtschaftlicher („Nanoökonomischer Skaleneffekt“ – Erber, 2007, 394). Dieser Prozess hat spätestens mit der Mikroelektronik begonnen, die sich heute zur Nanoelektronik entwickelt. „Die wirtschaftliche Nutzung der Nanotechnologie eröffnet vielfältige Möglichkeiten, die den bisherigen makroskopischen Verfahren hinsichtlich der funktionellen Eigenschaften überlegen sind. Es wird deshalb zu erheblichen wirtschaftlichen Vorteilen bei der Anwendung nanotechnologischer Verfahren insbesondere hinsichtlich der Herstellungskosten kommen“ (Erbert, 2007, 394). So handelt es sich hier um eine ressourcensparende technische Evolution, die es möglich macht, bei sinkendem Faktoreinsatz den Output überproportional zu steigern. Dieser Effekt wird durch die technisch-naturwissenschaftlichen Eigenschaften der Materie auf der Nanoebene bewirkt.

Die Nanotechnologie ist multidimensional angelegt: Sie spart im ökonomischen Sinne nicht nur Ressourcen und Raum und steigert gleichzeitig die Leistung, sondern sie ist auch von zivilisatorisch-anthropologischer sowie letztlich von transhumanistischer Bedeutung. Denn sie ist gleichzeitig (Gammel, 2007):

- eine interdisziplinäre Technik (Physik, Biologie, Chemie, Informatik),
- eine ermöglichende (enabling) Technik (zum Beispiel in der Biotechnologie),
- eine radikale, ersetzende (disruptive) Technik sowie
- eine konvergierende (verschmelzende) NBIC-Technik (Nano-Bio-Info-Cogno).¹³

Dies alles zusammen bewirkt, dass es mit der Anwendung der Nanotechnologie zu einer „kreativen Zerstörung“ auf vielen Ebenen kommt.

¹³ NBIC: Nanotechnologie, Biotechnologie, Informationstechnologie und Kognitionswissenschaft.

3

Die internationale Rivalität um die Nanotechnik

Ein bedeutender Treiber für eine neue technische (zivilisatorische) Nanoepoche ist der technologiegetriebene Wettbewerb. Entsprechend der Technology-Gap-Hypothese kommt es für Volkswirtschaften darauf an, die neuen Machbarkeiten durch die Nanotechnik so frühzeitig wie möglich zu beherrschen, um Lead-Märkte sowie neue Arbeitsplätze mit neuen Qualifikationserfordernissen zu schaffen. Die Nationen und Wirtschaftsräume (zum Beispiel EU/USA) befinden sich deshalb in einer rivalisierenden Situation um technisch-ökonomische Führungsrollen, bei denen es mitunter auch um geopolitische Hegemonie geht. Dies ungeachtet der Tatsache, dass bei staatlicher Förderung künftiger Techniken auch eine „Anmaßung von Wissen“ (Hayek) über eine unbekannte (technische) Zukunft naheliegt (Technologie-Push-Politik).

Im Frühstadium einer neuen Technologie kann der Staat als einer der Agenten in den Innovationssystemen mit seinen Anschubfinanzierungen eine mehr oder weniger große Rolle spielen. Seine Legitimation erfolgt meist auf mehreren Ebenen: Förderung des allgemeinen Wohlstands, Verbesserung internationaler Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen, frühzeitige Beherrschung von Schlüsseltechnologien, unzureichende privatwirtschaftliche Mittel, zu hohe Risiken neuer Technologien, hohe Kosten von Projekten, Subventionierung in anderen Ländern (Klodt, 1987, 3 f.). Insgesamt ist ihnen gemeinsam, dass der gesamtwirtschaftliche Nutzen neuer Technologien als größer eingeschätzt wird als der individuelle Nutzen für ein Unternehmen (wohlfahrtstheoretische Begründung). Blicke es also bei privatwirtschaftlicher Förderung, dann würde wegen unkalkulierbarer Unternehmensrisiken, Marktunsicherheiten und Finanzrestriktionen ein suboptimales privates FuE-Engagement unterstellt (Fier et al., 2005, 4). Begründet wird die staatliche Förderung von FuE und Innovationen auch mit ihren Wirkungen auf die gesamtwirtschaftlichen Ziele wie Vollbeschäftigung, Zahlungsbilanzausgleich, Wirtschaftswachstum und Preisniveaustabilität und damit insgesamt auf den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit (Sabisch et al., 1998, 27 f.).

Über die Notwendigkeit staatlicher Technologiepolitik besteht insofern kein Zweifel. Internationale Vergleiche des Maßes an finanzieller staatlicher FuE-Förderung verführen allerdings leicht dazu, in einen Subventionswettbewerb einzutreten. Ordnungspolitisch unbestritten ist eine staatliche Förderung vor allem dort, wo private und soziale Erträge der Forschung substantiell unterschiedlich sind; dies ist besonders bei der Grundlagenforschung der Fall (Klodt, 1987, 7).

Als wesentliche Triebkräfte von Innovationen gelten zum einen Marktanforderungen für neue Problemlösungen (market pull) sowie neue Technologieangebote (technology push); beide Triebkräfte können zusammenwirken. So schließen sich eine angebots- und nachfrageorientierte FuE-Politik nicht gegenseitig aus. Angebotsorientiert ist sie immer dann, wenn der Staat Technologiegebiete fördert, die als besonders zukunftsträchtig angesehen werden; hierzu zählt auch die Förderung von Forschungseinrichtungen sowie die der Forschungsinfrastruktur oder des Technologietransfers. Im Gegensatz zur angebotsorientierten kommt der nachfrageorientierten Förderung¹⁴ in Deutschland keine so große Rolle zu (Sabisch et al., 1998, 9). Zudem wird der öffentlichen Förderung eine Hebelwirkung für private Investitionen zugesprochen. Auch bei der Entwicklung der Nanotechnik zur Schlüsseltechnologischen Innovation spielt die staatliche Innovationspolitik eine zentrale Rolle. Weltweit erfährt die Nanotechnologie als ein Instrument neuer Machbarkeiten derweil von staatlicher (und privater) Seite eine erhebliche finanzielle Unterstützung.

3.1 FuE-Investitionen als Innovationstreiber

Auf dem Gebiet der Nanotechnologie wird im internationalen Vergleich die Ausgangsposition Deutschlands allgemein als gut bezeichnet. Dies gilt sowohl für die Investitionen in FuE und die Forschungsinfrastruktur (Input) als auch für Patentanmeldungen und Publikationsaktivitäten (Output). Doch die in der Nanotechnologie bislang führenden Länder wie USA, Japan, Deutschland sowie Südkorea werden zunehmend von Ländern wie China, Indien und Russland in ihrer Position bedrängt (Lux Research, 2007a und 2006).

Weltweit: Die öffentlichen und privaten Aufwendungen für die Nanotechnik sind seit Ende des 20. Jahrhunderts weltweit kräftig gestiegen. Etwa 30 Staaten haben bislang die Rivalität aufgenommen und nationale Förderprogramme für die Nanotechnologie entwickelt (BSI, 2007, 26). Die öffentlichen Aufwendungen für FuE in diese Technologie lagen in 14 Ländern 2006 insgesamt bei weit über 5 Milliarden US-Dollar (Tabelle 1); nahezu ebenso viel sollen die Unternehmen dieser Länder investiert haben (Lux Research, 2006, 8 f.). Über die meisten Forschungszentren für die Nanotechnologie verfügten 2006 die USA (144); erst mit Abstand folgte auf dem zweiten Platz Deutschland (58). Bei den Messungen

¹⁴ Als nachfrageorientierte Förderung gelten alle Maßnahmen, die über die Nachfragestimulation Innovationen anstoßen oder ihre Diffusion anregen: die staatliche Beschaffung; staatliche finanzielle Unterstützung privater Nachfrage nach Innovationen (Nachfragesubventionen, Steuererleichterungen); Bewusstseinsbildung, Kompetenzaufbau und Information; Regulationen zur Schaffung von Rechts- und Nutzungssicherheit (zum Beispiel Normung, Sicherheitsstandards, Preisregulierung); eine Kombination verschiedener Maßnahmen und/oder die Verknüpfung angebots- und nachfrageorientierter Maßnahmen (TAB, 2006, 1).

der nanotechnologischen Wettbewerbsfähigkeit unter 14 Ländern durch den US-Branchendienst anhand von acht unterschiedlich gewichteten Merkmalen erreichte die USA 2005 auf einer Skala zwischen 1 (= nicht wettbewerbsfähig) und 5 (= höchst wettbewerbsfähig) den Höchstwert von 5; es folgten Japan (4,8) und auf dem dritten Platz Deutschland (4,1) (Lux Research, 2006, 7). Dies deutet darauf hin, dass Deutschlands Innovationssystem in Bezug auf die Nanotechnologie relativ gute Rahmenbedingungen bieten dürfte.

USA: Weltweit gelten die USA als die stärkste Forschungsnation; gerechnet in

Kaufkraftparitäten entfielen 2006 rund 42 Prozent aller Bruttoinlandsausgaben für FuE in der OECD auf dieses Land. Sie gaben mehr für die Forschung aus als die EU-27-Länder zusammen. Dies spiegelt sich auch in den Pro-Kopf-Ausgaben wider, die 2006 mit 1.147 US-Dollar gut doppelt so hoch waren wie in der EU-27 mit 492 US-Dollar (OECD, 2008a, 18 f.). Entsprechend ambitioniert ist das US-Engagement für die Nanotechnologie: Im Jahr 2000 startete die National Nanotechnology Initiative (NNI), die von Präsident Clinton vorbereitet wurde. Während zwischen 1997 und 2000 die bundesstaatliche Förderung der Nanotechnologie von 116 auf 270 Millionen US-Dollar stieg (Paschen et al., 2003, 78), hat sie nach 2000 durch die Auflegung der NNI erheblich zugenommen (Tabelle 2). Sie erreichte 2005 einen Umfang von 1,2 Milliarden, betrug im Jahr 2007 knapp 1,43 und soll schließlich in 2009 eine Fördersumme von 1,53 Milliarden US-Dollar umfassen. Gegenüber dem Jahr 2000 stieg das NNI-Budget bis 2008 damit um 452 Prozent; 2008 entfiel etwa ein Drittel der NNI-Mittel (33 Prozent) auf den Verteidigungshaushalt. Derzeit sind 26 Bundeseinrichtungen in die Initiative

Förderung der Nanotechnologie Tabelle 1 im internationalen Vergleich

im Jahr 2006, in Millionen US-Dollar (zu Kaufkraftparitäten)

Land	Öffentliche Förderung	Förderung durch Unternehmen	Gesamt
USA	1.732	1.931	3.663
Japan	889	1.704	2.593
China	906	165	1.071
Deutschland	508	343	851
Südkorea	563	251	814
Frankreich	403	94	497
Vereinigtes Königreich	227	144	371
Taiwan	249	116	365
Indien	186	15	201
Russland	184	6	190
Israel	31	70	101
Kanada	56	26	82
Australien	45	28	73
Singapur	18	24	42
Insgesamt	5.997	4.917	10.914

Quellen: Lux Research, 2006, 9 f.; eigene Berechnungen

Förderung der Nanotechnologie in den USA

Tabelle 2

auf Bundesebene, in Millionen US-Dollar

Bundeseinrichtung	2000	2005	2007	2008 (geschätzt)	2009 (vorgeschlagen)
National Science Foundation (NSF)		335	389	389	397
Department of Defense (DOD)		352	450	487	431
Department of Energy (DOE)		208	236	251	311
Department of Health and Human Services (DHHS – NIH)		165	215	226	226
Department of Commerce (DOC – NIST)		79	88	89	110
Sonstige		58	47	49	52
Insgesamt	270	1.200	1.425	1.491	1.527

NIH: National Institutes of Health (eine Behörde des DHHS); NIST: National Institute of Standards and Technology (eine Behörde des DOC).

Quellen: National Nanotechnology Initiative, o. J., 2; National Science and Technology Council, 2006, 35; Paschen et al., 2003, 78; eigene Berechnungen

eingebunden, 13 von ihnen verfügen über eigene FuE-Mittel für die Nanotechnologie. Auf fünf Einrichtungen entfallen 96 Prozent der Mittel.

Wesentliche Ziele des US-Programms sind: Mit erstklassiger FuE sollen die ganzen Potenziale der Nanotechnologie erschlossen, neue Technologien für Wachstum, Arbeitsplätze und allgemeinen Wohlstand entwickelt, Bildung, Humankapital und Infrastrukturen für diese Technik gefördert und eine humanverträgliche, verantwortungsvolle Weiterentwicklung der Nanotechnologie unterstützt werden.

Europa: Innerhalb Europas will die Europäische Gemeinschaft im Wettbewerb der großen Weltregionen als Forschungs- und Wirtschaftsraum die leistungs- und wettbewerbsfähigste Region der Welt werden. Dem entspricht, dass neben anderen Technologien auch die Nanotechnologie überstaatlich öffentlich gefördert wird und gleichzeitig auf diesem Gebiet ein europäischer Forschungsraum geschaffen werden soll. Die EU strebt gezielte und koordinierte FuE-Programme an, denn der Wettbewerber USA finanziere zum Beispiel zwei Drittel seiner Mittel im Rahmen des nationalen Bundesprogramms der Nanotechnologie-Initiative (Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2004, 7 f.). Bei den öffentlichen Pro-Kopf-Ausgaben für die Nanotechnologie (gemessen in Kaufkraftparitäten) stand in Europa im Jahr 2004 mit 9,60 Euro Irland an der Spitze, gefolgt von Belgien (6,50 Euro) und Frankreich (4,10 Euro). Unter 20 europäischen Ländern belegte Deutschland mit 3,90 Euro den vierten Platz (Tabelle 3).

In einer Mitteilung der EU-Kommission heißt es: „Europa muss eine Wiederholung des europäischen ‚Paradoxons‘ vermeiden, das bei anderen Technologien beobachtet wurde, und seine FuE von Weltklasse auf dem Gebiet der N&N

(Nanowissenschaft und Nanotechnik, der Verfasser) in nützliche, Wohlstand schaffende Produkte umwandeln, im Einklang mit den Maßnahmen zur Förderung des Wachstums und der Schaffung von Arbeitsplätzen gemäß der ‚Lissabon Strategie‘ der Union“ (Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2005, 2).

Als das wichtigste Finanzierungsinstrument für Forschung und Entwicklung in der EU gilt das FuE-Rahmenprogramm (RP). Bis zum 6. Rahmenprogramm gab es noch keinen eigenen Schwerpunkt für die Nanotechnologie (vgl. hierzu und zum Folgenden Paschen et al., 2003, 77 f.). Im 4. Programm (1994 bis 1998) wurden rund 80 Nanoprojekte mit einem Volumen von 90 bis 95 Millionen Euro gefördert; das 5. Programm (1998 bis 2002) sah jährliche Förderungen der Nanotechnik von rund 45 Millionen Euro vor. Im 6. Programm (2002 bis 2006, insgesamt 17,5 Milliarden Euro) wurde sodann ein eigener Themenschwerpunkt Nanotechnologie gebildet, der mit 1,3 Milliarden Euro gefördert wurde, dies entsprach rund 7,5 Prozent der insgesamt im RP zur Verfügung stehenden Mittel. Aber auch in anderen Bereichen dürfte diese Technologie indirekt weiterhin gefördert worden sein.

Im 7. RP für den Zeitraum 2007 bis 2013 werden 3,5 Milliarden Euro in diese Technologie investiert (BMBF, 2007b, 26); gegenüber dem 6. RP ist dies ein Mittelzuwachs von knapp

Öffentliche Pro-Kopf-Ausgaben für die Nanotechnologie in Europa

Tabelle 3

im Jahr 2004, in Euro

Irland	9,60
Belgien	6,50
Frankreich	4,10
Deutschland	3,90
Niederlande	2,80
Finnland	2,80
Vereinigtes Königreich	2,20
Schweiz	2,00
Luxemburg	1,80
Österreich	1,80
Schweden	1,50
Dänemark	1,50
Norwegen	1,30
Italien	1,30
Litauen	0,70
Spanien	0,40
Rumänien	0,40
Slowenien	0,40
Griechenland	0,20
Lettland	0,20
Nachrichtlich: Nicht europäische Länder	
Israel	9,00
Australien	7,00
Taiwan	6,90
Südkorea	5,40
Japan	4,90
USA	4,30
Neuseeland	3,20
Singapur	2,10
Kanada	1,40
Malaysia	0,40
China	0,30
Indonesien	0,30
Thailand	0,20
Südafrika	0,20

In Kaufkraftparitäten; nur Länder mit öffentlichen Ausgaben ab 0,20 Euro pro Kopf.

Quelle: European Commission, 2005, 8

170 Prozent. Thematisch werden im 7. RP im Thema 4 seines spezifischen Programms „Zusammenarbeit“ die Bereiche Nanowissenschaften, -technologien sowie Werkstoffe, neue Produktionstechnologien und die Integration industrieller Anwendungen zusammengefasst. Insgesamt werden im 7. Rahmenprogramm insgesamt gut 53 Milliarden Euro zur Verfügung gestellt, knapp 7 Prozent davon entfallen auf die Nanotechnologie.

Japan: Als eines der führenden Länder auf dem Gebiet der Nanotechnologie gilt auch Japan (vgl. hierzu und zum Folgenden Wieczorek, 2007, 145 ff.; Uttich, 2004). Die Nanotechnologie wurde im FuE-Fünfjahresplan des Kabinetts von 2001 offiziell als Reaktion auf die National Nanotechnology Initiative in den USA als Schlüsseltechnologie anerkannt und seither auch verstärkt gefördert. Die Förderung floss vor allem in Industrien der Spitzentechnologien wie Brennstoffzellen, intelligente Haushaltsgeräte, Roboter und Software für Multimediaeräte sowie in neue Industrien in Wachstumsmärkten (Gesundheit/Medizintechnik, Umweltechnik und -dienstleistungen sowie betriebsunterstützende Dienstleistungen). Ein Ergebnis war in diesem Zusammenhang zum Beispiel, dass das Unternehmen Frontier Carbon (ein Joint Venture von Mitsubishi Chemical Group und Mitsubishi Corp.) im Jahr 2002 als erstes Unternehmen weltweit „Fullerene“ (künstlich erzeugte Kohlenstoffmoleküle) herstellen konnte, deren Anwendungsmöglichkeiten vielfältig sind – zum Beispiel Anti-Aging-Kosmetik, Medizin, Batterien (Uttich, 2004, 5).

Die staatliche Nanotechnologieförderung stieg in Japan zwischen 1997 und 2005 von 120 Millionen auf 950 Millionen Euro (Wieczorek, 2007, 148). Diese Technologie wird seit 2001 vom METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) sowie vom MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) institutionell wie projektbezogen gefördert. Im Jahr 2006 machte das japanische FuE-Budget der Regierung insgesamt 26,2 Milliarden Euro aus (3,6 Billionen Yen); 4,9 Prozent davon entfielen auf die Nanotechnologie (Schröder, 2006, 27).

Deutschland: Deutschlands Position im internationalen Technologiewettbewerb zeichnet sich bislang durch eine robuste Stellung bei „Medium-tech“-Industrien aus; auf die Spitzentechnologie ist man hierzulande bislang weniger spezialisiert (Werwatz et al., 2007, 60; EFI, 2008, 53). Auch wird konstatiert, dass sich Deutschlands weltwirtschaftlicher Beitrag für die Erweiterung technologischen Wissens halbiert habe (Legler et al., 2008, 1), was auf die Dringlichkeit der Umsetzung neuer Erfindungen hinweist. Kritisiert wird deshalb, dass in Deutschland nicht genug Forschungsergebnisse und neue Ideen am Markt erprobt werden (EFI, 2008, 25).

Für die relativ junge Nanotechnologie kommt es daher darauf an, eine rasche Umsetzung zu ermöglichen, zumal die deutsche FuE-Ausgangsposition auf diesem hochinnovativen Feld gut ist. „Um beispielsweise die Möglichkeiten der Nanotechnologie zu erschließen, bedarf es einer vorausschauenden F&I-Politik, welche die neue Technologie adäquat fördert, lange bevor diese für eine kommerzielle Nutzung reif ist“ (EFI, 2008, 16). Diese Notwendigkeit wurde in Deutschland offensichtlich erkannt:

Die staatliche Förderung der Nanotechnologie in Deutschland setzte bereits lange vor dem NNI-Projekt der USA im Rahmen der Programme „Materialforschung“ und „Physikalische Technologien“ seit Beginn der 1990er Jahre ein. 1998 erfolgte die Initiative zur Gründung von Kompetenzzentren (BMBF, 2002, 15).

In der internationalen Rivalität um die beste Position im Spitzenbereich der Nanotechnologie ist in Deutschland seit langem eine Reihe von Akteuren beteiligt (vgl. hierzu und zum Folgenden in erster Linie Luther et al., 2004; BMBF, 2006c). Eine wesentliche Rolle spielen neben den fast 700 Nanounternehmen (darunter über 500 kleine und mittlere Unternehmen – KMU), der Staat sowie die institutionelle Forschung und die Kompetenzzentren. Auffallend ist, dass der Staat als Moderator und Förderer von Netzwerken¹⁵ fungiert, um den Prozess nanowissenschaftlicher und -technologischer Neuerungen voranzutreiben. So wird nicht allein auf den Wettbewerb, sondern auch und besonders auf die Kooperation als „Entdeckungsverfahren“ gesetzt. Neben den vom BMBF seit längerem geförderten Kompetenznetzwerken, institutionellen Forschungseinrichtungen sowie universitären und sonstigen Einrichtungen sind als Akteure eine Vielzahl von Unternehmen in der Nanotechnologie engagiert.

Besonders die Kompetenzzentren unterstützen die deutsche Nanoforschung und bringen die industrielle Anwendung voran. Durch die Zusammenarbeit von Forschern, Entwicklern, Anwendern, Investoren und Spezialisten aus Lehre, Öffentlichkeitsarbeit und Marketing werden hier interdisziplinäre Brücken geschlagen und alle Bereiche der Wertschöpfung bis hin zur Herstellung und Vermarktung abgedeckt. Die Zahl der Einrichtungen, die sich mit der Nanotechnologie beschäftigen, fällt in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich aus (Tabelle 4).

Insgesamt gab es im Mai 2008 mehr als 1.100 Akteure in Deutschland. Mit 61,4 Prozent stellten Unternehmen die Hauptgruppe. Damit weist Deutschland eine relativ dichte Infrastruktur für die Entwicklung und Verwertung dieser Tech-

¹⁵ Kooperationsnetzwerke werden als Ausdruck neuer Innovationsregime verstanden (Biniok, 2005). Auch Heinze (2006) verdeutlicht am Beispiel der Nanotechnologie die Kooperationsbeziehungen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft.

Nanoakteure in Deutschland nach Bundesländern

Tabelle 4

Bundesland	Akteure insgesamt	Großunternehmen	KMU
Nordrhein-Westfalen	204	23	89
Bayern	166	30	76
Hessen	133	28	75
Baden-Württemberg	132	14	66
Sachsen	120	7	62
Berlin	64	2	38
Niedersachsen	63	9	22
Bremen	37	0	21
Hamburg	36	4	11
Thüringen	35	5	18
Saarland	35	3	22
Rheinland-Pfalz	33	5	19
Schleswig-Holstein	30	1	20
Sachsen-Anhalt	21	0	14
Mecklenburg-Vorpommern	15	0	10
Berlin-Brandenburg	14	0	5
Insgesamt	1.138	131	568

Stand: 14. Mai 2008; Nanoakteure: Unternehmen, Netzwerke, Forschungszentren, Universitätsinstitute, Technologietransfer- und Finanzierungseinrichtungen, Behörden/Vereine.

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach VDI Technologiezentrum, URL: <http://www.nano-map.de> [Stand: 2008-05-14]

nologie auf. Eine Förderung einzelner Projekte der Nanotechnologie durch die öffentliche Hand erfolgt seit Anfang der 1990er Jahre; sie stieg von 2001 bis 2007 von 210 auf 335 Millionen Euro, also um knapp 60 Prozent (Tabelle 5). Im Rahmen der interministeriellen Hightech-Strategie von 2006 erfuhr die Förderung der Nanotechnologie in Deutschland eine zusätzliche Bedeutung. In den Jahren 2006 bis 2009 wird sie als Querschnittstechnologie mit insgesamt 640 Millionen Euro unterstützt. Bezogen auf die Gesamtmittel in Höhe von 14,6 Milliarden Euro ist dies ein vergleichsweise geringer Anteil (4,4 Prozent). Im Gegensatz dazu entfallen in der Strategie-Initiative zum Beispiel auf die Raumfahrttechnologien 25 Prozent, auf die Energietechnologien 13,7 Prozent und auf die IuK-Technologien 8,1 Prozent der Mittel (BMBF, 2006b, 104).

Teil der Hightech-Strategie ist die „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ des BMBF (2006c). Ziele dieser Initiative sind: Beschleunigte Umsetzung von Forschungsergebnissen in Innovationen, Heranführung weiterer Branchen und Unternehmen an diese Technologie, frühzeitige Abstimmung verschiedener Politikfelder zur Beseitigung von Innovationshemmnissen sowie die Unterstützung eines

Staatliche Förderung der Nanotechnologie in Deutschland

Tabelle 5

in Millionen Euro

Jahr	Insgesamt	Darunter: institutionelle Förderung
2001	209,8	134,3
2002	239,4	144,4
2003	258,3	145,6
2004	273,0	153,0
2005	312,3	160,7
2006	322,3	162,3
2007	334,8	162,9
2008	317,7	164,4
Anstieg 2001–2008, in Prozent	51,4	22,4

Förderung: institutionelle Förderung (Bund und Länder) plus Projektförderung durch das BMBF und das BMWi; 2006 bis 2008: geplant.

Quellen: VDI Technologiezentrum, o. J. a; eigene Berechnungen

Dialogs mit der Öffentlichkeit über Chancen und Risiken. Die Mittel für die BMBF-Projektförderung stiegen zwischen 1998 und 2006 von 27,6 auf 134,4 Millionen Euro; für 2007 waren 146,5 Millionen Euro geplant (Deutscher Bundestag, 2006, 2; VDI Technologiezentrum, o. J. a). Diese Förderung erfolgt über eine Reihe von Fachprogrammen (zum Beispiel IT Forschung 2006, Förderprogramm Optische Technologien, Rahmenprogramm Biotechnologie). Ein großer Teil der Projektförderung zielt auf solche Leitinnovationen ab, denen eine beachtliche Hebelwirkung für Wachstum und Beschäftigung zuerkannt wird. Hierzu gehören beispielsweise (BMBF, 2006c, 17):

- **Automobilbau:** Leitinnovation „NanoMobil“ – Start 2005: 37 Millionen Euro,
- **Chemie:** Leitinnovation „NanoChem“ – Start 2005: 31 Millionen Euro,
- **Halbleitertechnik:** Leitinnovation „NanoFab“ – Start 2001: 323 Millionen Euro,
- **Medizin:** Leitinnovation „NanoforLife I“ – Start 2005: 24 Millionen Euro,
- **Lichttechnik:** Leitinnovation „NanoLux und OLED-Initiative – Start 2004: 10,6 Millionen Euro beziehungsweise 2005: 56 Millionen Euro,
- **Energie:** Start 2005: 20 Millionen Euro.

Weitere Leitinnovationen wurden von der Bundesregierung in den Bereichen Produktionstechnologie, Textil- und Bauindustrie, Medizin/Gesundheit, Umwelt, Messtechnik sowie im Maschinen- und Anlagenbau im Jahr 2006 angestoßen (BMBF, 2006c, 18 ff.).

Ein Großteil der Nanotechnologieförderung des Bundes erfolgt über die institutionelle Förderung der vier großen Forschungseinrichtungen Max-Planck-Gesellschaft (MPG), Fraunhofer-Gesellschaft (FhG), Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) und Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibnitz (WGL) sowie über die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Die institutionelle Nanotechnologieförderung insgesamt (Bund und Länder) stieg von 134,3 Millionen Euro (2001) auf 164,4 Millionen Euro in 2008 (Tabelle 5).

Die Bundesregierung hat im Rahmen ihrer Förderungen in der Nanoinitiative (BMBF, 2006c, 21 ff.) auch Maßnahmen zur Förderung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) ergriffen; sie sehen besonders den Zugang zum Kapitalmarkt, zu Marktinformationen und regionalen Kooperationspartnern als Innovationshürden an. Spezifische Fördermaßnahmen der Bundesregierung für KMU sind: NanoChance (zunächst 20 Millionen Euro), PRO INNO II (rund 15 Millionen Euro), INNO-WATT – neue Bundesländer und Berlin (3,5 Millionen Euro), IGF/Initiativprogramm ZUTECH (3 Millionen Euro); zur Unterstützung von Gründungen gibt es die Maßnahmen EXIST-SEED, den High-Tech Gründerfonds (zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft und der KfW-Bankengruppe 262 Millionen Euro) und Power für Gründerinnen.

3.2 Entwicklung des internationalen Nanopatent- und Publikationsaufkommens

In hochentwickelten Ländern ist langfristiges Wirtschaftswachstum vor allem durch die Fortentwicklung der Technik möglich. Potenzielle Erfinder werden diesen Fortschritt besonders dann unterstützen, wenn genügend Anreize bestehen, in FuE zu investieren. Also nur unter der Voraussetzung, dass ihr Wissen geschützt ist und sie die Früchte ihrer Arbeit ernten können, werden sie mehr Investitionen tätigen. Zumindest müssen die fixen sowie die Opportunitätskosten gedeckt sein und sich Risikoprämien erwirtschaften lassen. Um entsprechenden Schutz und somit Erlöse zu gewährleisten, bietet sich für die Erfinder neben einer Geheimhaltung auch der Patentschutz an. Ein gut ausgebauter Patentschutz wird die Ausgabenfreude im FuE-Bereich eher stärken. Mit einem Patent verliert die Erfindung zwar ihren Charakter als öffentliches Gut, aber zugleich wird durch die Veröffentlichung der Patentschrift das technische Wissen verbreitet und so der technische Fortschritt gestützt und transparent gemacht. Der weltweite Wettlauf um diese Technologie spiegelt sich daher in der Entwicklung des Patentaufkommens wider. Die Anzahl an Patentanmeldungen kann folglich als Maß für den Forschungsoutput ein brauchbarer Indikator für die künftige Bedeutung neuer Technologien sein, wenn man einmal von reinen Schutzpatenten absieht.

Der Verlauf der Patentanmeldungen signalisiert, ob und wo sich Wachstumschancen durch neue Märkte ergeben können beziehungsweise erwartet werden. Besonders für junge Unternehmen bilden Patente zudem eine wichtige Grundlage für die Kreditgewährung. Für Schumpeter gehörte die Kreditschöpfung bereits zu den Voraussetzungen unternehmerischer Innovationen. Bezogen auf die Nanotechnologie weist die Patentschutzdauer nun insofern eine Besonderheit auf, als dass die Entwicklungszeiten von einem nanotechnologischen Grundeffekt bis zur Anwendung in bestimmten Fällen so lang sein können, dass der Schutz bereits kurz nach der Produktreife ausgelaufen ist (Luther/Malanowski, 2004, 28).

Als Problem erweist sich hier die mangelnde Klarheit bezüglich der Definition dessen, was jeweils als Nanopatent gilt („Wo Nano drauf steht, muss nicht Nano drin sein“). Insofern stehen die folgenden Angaben der Anmeldungen aus verschiedenen Quellen nebeneinander.

- Einer Analyse der OECD (Igami/Okazaki, 2007, 13) zufolge wuchs die Zahl der EPA-Nano-Anmeldungen von 1996 bis 2002 um durchschnittlich 15 Prozent pro Jahr und erreichte 2002 nahezu 1.000 Meldungen (1984: circa 100). Eine erhebliche Zunahme der Anmeldungen war ab Mitte der 1990er Jahre zu verzeichnen. Zwischen 1978 und 2005 kamen 34,6 Prozent der Anmeldungen aus den USA, aus Europa 28,4 (Deutschland: 11,0) und aus Japan 29,2 Prozent (übrige Länder: 7,8); damit war Deutschland das drittgrößte Anmelde-land beim EPA (Igami/Okazaki, 2007,14).

- Nach weiteren OECD-Daten nahmen die PCT-Anmeldungen¹⁶ für die Nanotechnologie (nach der EPA-Klassifizierungsgruppe Y01N) in der Zeit zwischen 1995 bis 2004 weltweit um durchschnittlich 24,2 Prozent pro Jahr zu (PCT-Anmeldungen insgesamt: +12 Prozent). Mit einem PCT-Anmeldeanteil von 10 Prozent gehörte Deutschland im Jahr 2004 zu den drei stärksten Ländern (USA: 40,3; Japan: 19,0; EU: 26,4 Prozent). Auf dem vierten Platz folgte mit Abstand Großbritannien (4,0 Prozent) (OECD, 2007a, 21).

- Gemäß einer Studie der Boston Consulting Group (2006, 64 f.) stiegen die Patentanmeldungen weltweit zwischen 2000 und 2004 bei den Patentdatenbanken USPTO, EPA und WIPO¹⁷ um jahresdurchschnittlich 27 Prozent – „es handelt sich damit um das Technologiefeld mit der höchsten Zuwachsrates aller von uns unter-

¹⁶ Eine Anmeldung nach dem Patent Cooperation Treaty-Verfahren (PCT-Verfahren) ermöglicht es dem Anmelder, beim zuständigen Amt (in Deutschland ein Exemplar in deutscher Sprache an das nationale Patentamt, an ein Patentinformationszentrum oder an das EPA) mit einer einzigen internationalen Anmeldung in allen von ihm zu benennenden PCT-Bestimmungsländern Patentschutz zu erlangen. Nach einer Frist von 30 Monaten muss der Anmelder dann das Verfahren vor jedem einzelnen Bestimmungsland weiterführen (Eintritt in die nationale Phase). Im November 2007 waren 138 Staaten PCT-Mitglieder.

¹⁷ WIPO: World Intellectual Property Organisation; EPA: Europäisches Patentamt; USPTO: United States Patent and Trademark Office.

suchten Bereiche.“ Die BCG-Analyse zeigt, „dass Deutschland im internationalen Vergleich konkurrenzfähig und mit den USA und Japan an führender Stelle steht“.

- Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine Patentauswertung des VDI Technologie-zentrums für den Zeitraum 1983 bis 2001 im Jahr 2004 (Luther et al., 2004, 111): „Die ... Länderverteilungen zeigen, dass Deutschland in der Patentsituation der Nanotechnologie sehr gut aufgestellt ist – sowohl in der Nanotechnologie insgesamt als auch in dem zahlenmäßig wichtigsten Teilbereich der Chemie.“ Die Studie ließ erkennen, dass es derzeit noch keine allgemein akzeptierte Suchstrategie nach Nanotechnologiepatenten gibt (Luther et al., 2004, 90).
- Nach Berechnungen des Fraunhofer ISI wurden 2004 weltweit gut 6.700 transnationale Patente¹⁸ für die Nanotechnologie angemeldet. Hauptmelder waren 2004 die USA (46,5 Prozent) sowie Japan und Deutschland mit jeweils 12,6 Prozent (Tabelle 6). Damit hielten diese drei Länder 2004 gut 70 Prozent aller Patente; im Zeitraum 1991 bis 2004 waren es insgesamt gut 73 Prozent.

Transnationale Patentanmeldungen für die Nanotechnologie

Tabelle 6

Ausgewählte Erfinderlande

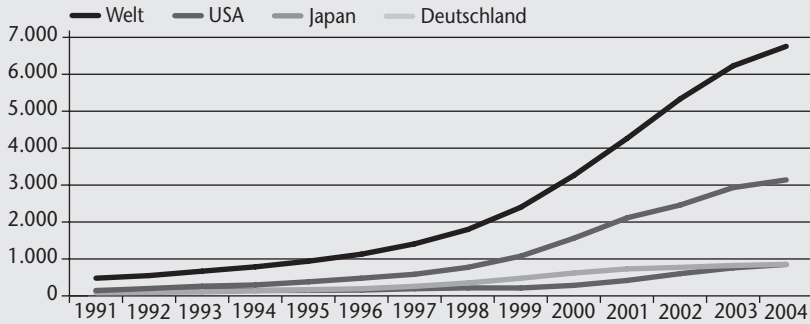
Jahr	Insgesamt	USA	Deutsch-land	Japan	Frank-reich	Vereinigtes Königreich	Süd-korea
		darunter: in Prozent					
1991	479	29,9	17,7	30,3	10,4	5,6	0,2
1992	549	36,4	17,1	25,1	9,7	4,7	0,2
1993	669	39,3	16,0	21,1	6,6	7,5	0,6
1994	786	37,7	17,3	18,8	8,9	7,5	0,6
1995	939	40,6	17,7	15,8	8,8	5,8	0,5
1996	1.129	42,4	17,2	13,9	7,8	6,8	0,7
1997	1.408	41,5	18,3	13,7	7,6	7,5	0,4
1998	1.796	43,0	19,5	12,0	8,0	6,0	1,1
1999	2.398	44,9	19,8	8,9	8,2	6,3	1,9
2000	3.260	47,9	19,0	8,7	7,5	5,1	2,4
2001	4.260	49,6	17,2	9,8	6,3	4,5	2,4
2002	5.330	46,1	14,5	11,3	5,9	4,9	2,9
2003	6.228	47,1	13,2	12,2	6,1	4,1	3,6
2004	6.757	46,5	12,6	12,6	6,3	4,1	4,1
1991–2004, in Prozent	100,0	45,6	15,7	12,3	6,9	5,0	2,6

Quellen: Berechnungen des Fraunhofer ISI (auf Anfrage); eigene Berechnungen

¹⁸ Patente, die „gleichzeitig mindestens eine Anmeldung bei der WIPO über das PCT-Verfahren sowie eine Anmeldung am Europäischen Patentamt (EPA) umfassen“ (Frietsch et al., 2008, 7).

Weltweite Entwicklung der Nanotechnologiepatente

Abbildung 2



Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI (auf Anfrage)

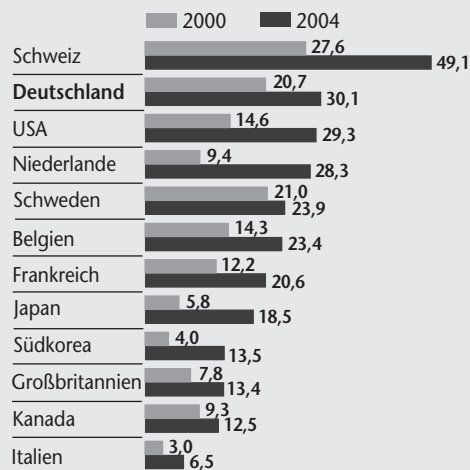
Die Entwicklung der weltweiten Patentanmeldungen zeigt, dass das Schutzinteresse an der Nanotechnologie erst gegen Ende der 1990er Jahre deutlich zugenommen hat (Abbildung 2). Deutschland steigerte seine Anmeldungen zwischen 1991 und 2004 um das Zehnfache (1991: 85, 2004: 853). Ähnlich verlief die Entwicklung in Japan (2004: 851).

Werden diese Anmeldungen auf je eine Million Vollzeitbeschäftigte bezogen, dann betrug die Anmeldedichte 2004 hierzulande 30,1 Meldungen. Deutschland steigerte seine Anmeldedichte zwischen 2000 und 2004 um gut 9 Punkte und lag 2004 damit – nach der Schweiz (49,1) und vor den USA (29,3) – auf dem zweiten Platz unter den international größten Anmeldern. Japan kam mit einer Meldedichte von 18,5 unter den hier betrachteten zwölf Ländern hingegen nur auf Platz acht (Abbildung 3).

Patentanmeldungen für die Nanotechnologie im Ländervergleich

Abbildung 3

je eine Million Vollzeitbeschäftigte

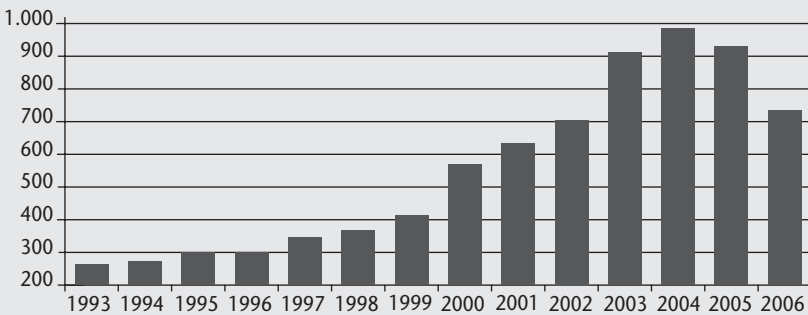


Quellen: Berechnungen des Fraunhofer ISI (auf Anfrage); OECD, 2008b; eigene Berechnungen

- Bei der weiteren exemplarischen Darlegung der Patentsituation für die Nanotechnologie – einschließlich der Meldungen über das PCT-Verfahren in der regionalen Phase – bezieht sich diese Analyse auf die Anmeldungen beim Europäischen Patentamt (EPA), das 2003 eine eigene Klassifizierung von Patenten im Nanotechnologiebereich (Gruppe: Y01N) vorgenommen hat. Dieser Bereich umfasst beim EPA sechs Patentklassen: Nanobiotechnologie, Nanoelektronik, Nanomaterialien, Nanodetektion, Nanooptik und Nanomagnetik. Dort gingen zwischen 1993 und 2006 gut 7.700 Patentanmeldungen im Bereich Nanotechnologie ein.

Patentanmeldungen für die Nanotechnologie beim Europäischen Patentamt

Abbildung 4



Quelle: Europäisches Patentamt (auf Anfrage)

Die Entwicklung der EPA-Anmeldungen für die Nanotechnologie zeigt etwa gegen Ende des Jahrzehnts einen steilen Anstieg (Abbildung 4): Die Zahl der Meldungen wuchs von 414 (1999) auf 985 im Jahr 2004. Bis 2006 fiel sie wieder auf 734. Pro Jahr gingen seit 1993 im Durchschnitt gut 550 Anmeldungen ein. Seit 1993 stieg die Zahl der jährlichen Anmeldungen damit um durchschnittlich rund 8 Prozent.

In der Zeit zwischen 1986 und 2006 gehörten die USA mit knapp 36 Prozent zu den häufigsten Anmeldern beim EPA (Japan: 29, Deutschland: 11 Prozent). Insgesamt gingen in dieser Zeit gut 9.000 Anmeldungen ein (Tabelle 7).

Zu den 20 häufigsten Firmenanmeldern im Sektor Nanotechnik beim EPA zählten in diesem Zeitraum zwölf japanische Firmen, aber nur drei US-amerikanische und ein deutsches Unternehmen. Die Meldungen dieser 20 Unternehmen repräsentierten 25 Prozent aller Anmeldungen in dieser Zeit.

Neben der Entwicklung der Patentanmeldungen spiegelt auch die der Nanopublikationen den wissenschaftlichen Boom in dieser Technik wider. Nach einer Analyse von Heinze (2006, 108 ff.) hat die weltweite Zahl der Publikationen seit

1992 (bis 2003) ein deutliches Wachstum zu verzeichnen; dies gilt auch für deutsche Veröffentlichungen. Das durchschnittliche jährliche Wachstum des Publikationsaufkommens betrug seither weltweit wie auch für Deutschland 20 Prozent. Nach einer Arbeit von Lux Research (2006, 11) wurden zwischen 1995 und 2006 in den USA 43.906 Fachzeitschriftenartikel zur Nanowissenschaft und -technik publiziert; die USA belegten damit unter 14 Ländern Platz eins. Es folgten China (25.698), Japan (19.396) und Deutschland (15.645) auf den weiteren Plätzen (Lux Research, 2006, 11).

Sowohl die staatlichen Förderungen, die Anmeldeentwicklung der Patente als auch der Publikationsverlauf sprechen dafür, dass in der Nanotechnologie erhebliche sozioökonomische Potenziale gesehen werden.

Patentanmeldungen für die Nanotechnologie beim Europäischen Patentamt nach Herkunftsländern

Tabelle 7

im Zeitraum 1986–2006

Herkunftsland	Anmeldungen	In Prozent
USA	3.241	35,7
Japan	2.593	28,5
Deutschland	1.007	11,1
Frankreich	537	6,0
Vereinigtes Königreich	388	4,3
Übrige EPC-Länder	759	8,3
Südkorea	212	2,3
Sonstige	352	3,9
Insgesamt	9.089	100,0

EPC: European Patent Convention (Europäisches Patentübereinkommen) von 1973.

Quellen: Europäisches Patentamt (auf Anfrage); eigene Berechnungen

4

Sozioökonomische Entwicklungsimpulse der Nanotechnik

Von einer tragenden Rolle bei der Entwicklung einer „langen Welle“ scheint die Nanotechnologie derzeit ein Stück weit entfernt zu sein, sie ist aber auch mehr als nur eine neue (mediale) Mode. Noch vorsichtig zur volkswirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie äußerte sich 2006 der Physiker Hartmann: „Unter Berücksichtigung der genannten Unsicherheiten lässt sich in jedem Fall feststellen, dass die Nanotechnologie heute zwar noch keine volkswirtschaftliche Bedeutung hat, die etwa mit derjenigen der Mikroelektronik oder der Stahltechnologie vergleichbar wäre, jedoch besteht in bestimmten industriellen Bereichen bereits eine beträchtliche Relevanz in Bezug auf Umsätze und Arbeitsplätze“ (Hartmann, 2006, 15). Ihre rasant steigende Bedeutung werde sich erst in zehn

Jahren zeigen, was dem Entwicklungszyklus von Hochtechnologieprodukten entspreche. Auch Heinze (2006, 127) verweist darauf, dass es bisher noch keine bahnbrechenden wirtschaftlichen Erfolge bei der Nanotechnologie gegeben habe. Nach einem neuen Bericht des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (Deutscher Bundestag, 2008, 10) befindet sich die Nanotechnik erst im Übergang von der Grundlagenforschung zur Anwendung. Die Diversität der Anwendungs- und Marktdimensionen verweist jedoch auf die Ubiquität dieser Technologie für Mensch und Natur, Wirtschaft und Gesellschaft sowie auf ihr Potenzial zur „schöpferischen Zerstörung“.

4.1 Unternehmensgründungsdimension

Für Schumpeter waren einerseits die Innovationen das treibende Mittel für die Unterbrechung des Gesetzes abnehmender Erträge (Schumpeter, 1961, 95) und der Motor der wirtschaftlichen Entwicklung sowie des technisch-organisatorischen Wandels. Andererseits braucht es aber dazu den risikotragenden Unternehmer, der innovative Entwicklungen durchsetzt. Generell wird in Deutschland eine tragfähige Gründerwelle angemahnt: „Wesentliche Träger radikal neuer Formen von Wertschöpfung sind neue Unternehmen. Deutschland lässt allerdings eine spürbare Gründungsdynamik in der Spitzentechnologie und bei wissensintensiven Dienstleistungen vermissen. Niedrige Gründungszahlen bergen die Gefahr, dass neue Technologien hierzulande nicht oder nicht schnell genug Fuß fassen können. Die Chance, im Wettbewerb mit anderen Standorten nachhaltige Arbeitsplatzeffekte zu erzeugen, sollte besser genutzt werden“ (EFI, 2008, 7).

In der Nanotechnologie zeichnete sich in der Vergangenheit bereits eine kleine Gründerwelle ab; es ist anzunehmen, dass dies erst der Anfang war. Wie hoch diese Welle letztlich aber sein muss, um eine Invention zu einer Basisinnovation werden zu lassen, kann nicht bestimmt werden. Sicher ist allgemein, dass gerade eine lange Welle auch an eine Gründerwelle geknüpft ist (Röpke, 2000). Diese kann aber nur dann stattfinden, wenn die durch die staatlichen Rahmenbedingungen gesetzten Gründerhemmnisse möglichst gering und die sozialen Akzeptanzbarrieren in der Gesellschaft niedrig sind. Die Industrielandschaft auf dem Sektor der Nanotechnik besteht in Deutschland aus rund 600 bis 700 Firmen; in Europa kommen weitere 500 bis 600 hinzu. In den USA sind rund 1.400 Firmen auf diesem Sektor tätig und in Südostasien etwa 2.000 (Bachmann, 2007). Die Zahlen zeigen, dass es sich noch um ein sehr junges Gebiet handelt. Im Folgenden sollen zentrale Befunde zweier Studien aus Deutschland zum Nanotech-Gründungsgeschehen dargelegt werden.

Befragung des Internationalen Fachverbands für Mikrotechnik, Nanotechnologie und Neue Materialien (IVAM)

Zwischen 1985 und 2005 wurden in Deutschland über 400 Mikro- und Nanotech-Unternehmen gegründet (IVAM Research, 2006). Nach dem Gründungsmonitor „Mikro- und Nanotechnik“ des IVAM wurden davon die meisten Gründungen in Nordrhein-Westfalen, Thüringen, Bayern und Baden-Württemberg getätigt. Aufgrund der IVAM-Unternehmensbefragung von 156 zwischen 2000 und 2005 gegründeten Unternehmen wurden die Gründungsmotive ermittelt (ausgewertete Antworten von 48 Unternehmen). An erster Stelle stand das Motiv, eine Geschäftsidee umzusetzen (71 Prozent), an zweiter Stelle gab es eine konkrete Nachfrage nach einem Angebot (60 Prozent) und an dritter Stelle stand der Wunsch, selbstständig und unabhängig zu arbeiten (58 Prozent). Im Zentrum der Gründungsmotive standen mithin intrinsische Motivationen (Tabelle 8).

Gründungsmotive und -barrieren von Mikro- und Nanotech-Unternehmen

Tabelle 8

in Prozent

Gründungsmotive		Gründungsbarrieren	
Umsetzung einer innovativen Geschäftsidee	70,8	Finanzierung	68,8
Konkrete Nachfrage nach Angebot	60,4	Geeignetes Personal	27,1
Selbstständig, unabhängig arbeiten	58,3	BWL-Kenntnisse	25,0
Erwartung hoher Umsätze und wachsende Zielmärkte	50,0	Behördliche Vorschriften	25,0
Nutzung von Marktnischen	37,5	Marketing/Vertrieb	22,9
Zusammenstellung eines eigenen Teams	27,1	Soziale Absicherung	16,7
Verbesserung von Karrieremöglichkeiten	6,3	Unternehmensrecht	10,4
Keine alternativen Erwerbsmöglichkeiten	6,3	Businessplan	6,3
Sonstige	6,3	Steuerfragen	4,2

Befragung von 156 Unternehmen, die zwischen 2000 und 2005 gegründet wurden (Mehrfachnennungen).
Quelle: IVAM Research, 2006 (auf Anfrage)

Die größte Barriere bei der Gründung war die „Finanzierung“. Etwa ein Drittel der kapitalintensiven Unternehmen war ausschließlich eigenfinanziert, also ohne Wagniskapital, Bankkredite oder eine öffentliche Förderung (IVAM Research, 2006, 2). Start-ups, die Risikokapital oder Fördermittel erhielten, entwickelten sich schneller als Unternehmen ohne diese Möglichkeiten. Dies zeigt, wie wichtig die Finanzierung im Sinne Schumpeters („Kreditschöpfung“) für neue Unternehmen ist, um Inventionen zu entwickeln und auf den Markt zu bringen.

Erst mit Abstand wurde der Faktor „geeignetes Personal“ genannt, gefolgt von mangelnden „BWL-Kenntnissen“ der Gründer und „behördlichen Vorschriften“.

Die Bürokratie war für ein Viertel der Hightech-Unternehmen in der Gründungsphase ein Problem. Fast so gravierend wie das Finden geeigneter Mitarbeiter stellte sich die mangelnde BWL-Vorbildung der Gründer heraus. Potenzielle Gründer sollten mithin während ihres Studiums die Möglichkeit haben, sich auf eine selbstständige Unternehmensführung vorzubereiten.

Bei der Wahl des Unternehmensstandorts zeigte sich eine oft geringe Flexibilität. Nur 46 Prozent der Gründer haben systematisch Standorte verglichen und analysiert. Standorte mit einer guten Infrastruktur und Dienstleistungen für Mikro- und Nanounternehmen ziehen erfolgreiche junge Unternehmen an. Besonders gefragt sind Standorte, an denen bereits mehrere Mikro- und Nanounternehmen angesiedelt sind. Bei der Auswahl spielen harte Faktoren eine besondere Rolle: der Zugang zu Forschung und Instituten sowie zu qualifizierten Mitarbeitern, die lokale Infrastruktur oder auch die Nähe zum Wohnort. Für etwa knapp ein Viertel der Unternehmen sind Förderprogramme für die Standortwahl wichtig. Unter 20 Prozent der Mehrfachnennungen entfielen jeweils auf: die Nähe zu Kapitalgebern, die Nähe zu Kunden, das Standortimage, die lokalen Personalkosten und lokale Marktchancen.

Befragung des VDI Technologiezentrums

2003 wurde vom VDI Technologiezentrum eine Unternehmensbefragung (Hersteller/Anwender) durchgeführt (Luther et al., 2004). Zur Auswertung kamen 105 ausgefüllte Fragebögen. Es zeigte sich, dass der häufigste Startpunkt für eine Beschäftigung der Unternehmen mit der Nanotechnologie in den Zeitraum zwischen 1996 und 2000 fiel.

Die Struktur der deutschen „Nanotechnologie-Industrie“ (2003) ist besonders durch kleine Unternehmen geprägt. Die eigentliche Gründerwelle setzte erst in den 1990er Jahren ein: Etwa zwei Drittel der Unternehmen wurden ab 1990 gegründet. Bei den vor 1990 gegründeten Firmen handelt es sich um eine Reihe von lange etablierten Großunternehmen, wie etwa die BASF oder die Firma Merck. Auffallend ist, dass Unternehmen mittlerer Größe bislang fehlen. Als Branchen mit den höchsten Anteilen an Nanotech-Unternehmen gelten die Chemische Industrie und die Herstellung von Mess-, Kontroll- und Navigationsgeräten. Es handelt sich dabei noch vorrangig um in speziellen Nischen tätige KMU (Luther et al., 2004, 217). Ein großer Teil der kleinen Unternehmen bis 20 Mitarbeiter ließ sich keiner NACE-Branche¹⁹ zuordnen.

¹⁹ NACE = Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne. Hierbei handelt es sich um die Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft.

Als Anwendungshürden für die Nanotechnologie stellten sich besonders die Investitionskosten sowie Finanzierung und Fördermittel heraus. „Sowohl die Investitionskosten wie auch die Finanzierung und Förderung entlang der Wertschöpfungskette bilden Hemmnisse, die alle anderen Hürden übertreffen“ (Luther et al., 2004, 148). Aber auch in dieser Untersuchung wurde der Gesetzgebung keine zentrale Rolle beigemessen. Besonders die KMU (38,6 Prozent) nahmen große Hürden bei der Finanzierung wahr; bei den Großunternehmen waren es dagegen nur 7,7 Prozent. Einen ähnlichen Unterschied gab es beim Zugang zu Marktinformationen: Dies sahen 21,3 Prozent der KMU und nur 3,7 Prozent der Großunternehmen als eine Hürde an. Hemmnisse sehen die KMU (22,2 Prozent) besonders bei der Verfügbarkeit von kompetenten regionalen Kooperationspartnern (Großunternehmen: 7,4 Prozent) (Luther et al., 2004, 220). Diese Ergebnisse bestätigen, wie bedeutsam die finanzielle Unterstützung von neuen Unternehmen bei der Einführung von Basisinnovationen ist. „Für die Innovationspolitik, die sich zum Ziel gesetzt hat, KMU zu stärken, bieten die Unterschiede aber einen Ansatzpunkt für zielorientierte Interventionen“ (Luther et al., 2004, 221). Inzwischen hat die Bundesregierung eine ganze Reihe von Fördermaßnahmen auch für die KMU vorgelegt und damit für diese die Rahmenbedingungen verbessert.

4.2 Anwendungsdimension

Heute zeigen sich sehr viele beachtliche Neuerungen, wie es Feynman schon 1959 voraussagte. Diese innovativen Anwendungen ergeben sich in erster Linie aus dem immanenten technischen Fortschritt in Gestalt sogenannter größeninduzierter Funktionalitäten, die ex ante festgelegt werden können und damit „machbar“ geworden sind. Sie lassen die innovatorischen Effekte dieser Technik erahnen, durch die sich die technologische Leistungsfähigkeit eines Landes insgesamt verbessern lässt. Für die Anwender wird dies zur Erhöhung ihrer Wettbewerbs- und Leistungskraft führen. Die verschiedenen Anwendungsfelder verweisen auf die unterstützende Wirkung, welche die Nanotechnik auch auf die fünf Kandidaten (Information, Umwelt, Biotechnologie, optische Technologie und Gesundheit) für einen neuen Kondratieffzyklus bei Nefiodow (2001, 98) haben kann. Als innovative Anwendungsschwerpunkte der Nanotechnik, die ihren Schlüsseltechnologischen Charakter für die Gesamtwirtschaft ausmachen, gelten (BSI, 2007, 35 f.):

Nanomechanik: Verbesserung der Speichertechnologie; es gelang eine Speicherdichte von einer Billion Bit (= 1 Terabit, von tera, griechisch = ungeheuer) pro Quadrat Zoll herzustellen. Mit tausenden von feinsten Spitzen wurden

winzige Vertiefungen, die einzelne Bits darstellen, auf einen Kunststofffilm geschrieben – quasi eine Lochkarte auf Nanometerebene. Die Bits lassen sich löschen und wieder überschreiben.

Nanoelektronik: Die physikalischen Grenzen der Transistortechnologie auf der Basis des Siliziumchips führen dazu, dass hier die Molekularelektronik mit Bausteinen aus kleinsten Partikeln oder Molekülen Abhilfe schaffen könnte (Nanotransistoren). Gesucht wird nach Konzepten für die Nutzung elektronischer Eigenschaften von Nanostrukturen auf dem Sektor der Informationstechnologie wie der Bau integrierter Schaltkreise mit Strukturbreiten von weit unter 100 nm. Ein wichtiger Entwicklungsschritt wäre der sogenannte Quantencomputer mit extremer Rechenleistung, was zu einer weiteren Rationalisierung der Arbeit beitragen würde.

Nanobiotechnologie: Sie bezieht sich einerseits auf die Nutzung biologischer Nanoobjekte in technischen Systemen, andererseits auf Verfahren zur Untersuchung und Beeinflussung biologischer Systeme. Profitieren wird die Medizintechnik und die molekulare Diagnostik; Fortschritte sind auch für die Pharmaforschung sowie für die Umwelt-, Sicherheits- und Produktionstechnik zu erwarten.

Nanomedizin: Zum Zwecke der medizinischen Nutzung werden Verfahren aus der Biotechnologie und Mikrosystemtechnik kombiniert; erwartet werden zum Beispiel neue Krebstherapien und biomedizinische Schnelltests.

Nanooptik: Hier kommen nanotechnologische Verfahren zur Herstellung optischer Geräte zur Anwendung; neuartige optische Sensoren sowie Laserlichtquellen werden entwickelt.

Nanomaterialien: Es geht hier um die Erforschung und Entwicklung neuer Werkstoffe und Materialsysteme auf der Basis nanoskaliger Partikel. Sie weisen eine riesige Oberfläche (im Vergleich zum Volumen) auf. Optische, elektrische und magnetische Eigenschaften und auch ihre Härte und Zähigkeit sowie ihr Schmelzverhalten unterscheiden sich deutlich von herkömmlichen Materialien (zum Beispiel: kratzfeste Lackierungen, wasserabweisende Beschichtungen [Lotuseffekt], UV-absorbierende Sonnencremes). Neue Beschichtungen machen chemische Reinigungsmittel vielfach entbehrlich (ökologische Effekte).

Nanochemie: Sie befasst sich mit der Erzeugung und Veränderung von chemischen Systemen, welche die stoffliche Grundlage für neue Materialien bilden. Die Schlüsselbranche für die Herstellung von Strukturen im Nanometerbereich ist die Chemie. Die Teilchen, die kleiner als zehn Nanometer sind, besitzen neue, außergewöhnliche Eigenschaften. Sie sind zum Beispiel kratzfest, entspiegelt sowie wasser- und schmutzabweisend.

Nanoanalytik: Sie liefert analytische Methoden und Werkzeuge zur Untersuchung und Erfassung grundlegender Eigenschaften kleinster Gebilde und Mengen und sorgt für die Qualitätssicherung nach internationalen und nationalen Normen.

Als mögliche wirtschaftliche Triebkräfte auf der materiellen Ebene werden gesehen (Bachmann, 1998, 129):

- In **Medizin, Pharmazie und Biotechnologie** zum Beispiel neuartige Wirkstoffe wie Lichtfiltersubstanzen, medizinische Klebeflächen (zum Beispiel allergiefreie Pflaster), Pharmaka, deren Wirkung vor Ort freigesetzt wird, biokompatible Implantatoberflächen und künstliche Haut;
- in der **Feinmechanik, Optik und Analytik** zum Beispiel Röntgenoptiken, Spiegel, reibminimierte Lagerschalen, Ultrapräzisionsmaschinen;
- in der **Chemie und neuen Materialien** leichtere, beständigere Keramiken, Pigmente, Pulver, Drähte, chlorfreie Klebtechnologien sowie neue Schweiß-techniken, neue Membranen zur Stofftrennung zum Beispiel in der Abwasserreinigung;
- in der **Elektronik und Informationstechnik** zum Beispiel hochdichte Datenspeicher und schnelle tragbare PCs sowie brillante Displays, neuartige Solarzellen, Batterien und Brennstoffzellen und
- in der **Automobiltechnik** zum Beispiel leichte Trag- und Strukturbauteile, neuartige Lackierungen mit Farbeffekten sowie Kratz- und Abriebfestigkeit, neue Haftvermittler für Klebe- und Fügeprozesse.

Markträchtige Produktperspektiven und Anwendungen – Beispiele

Übersicht 3

- Langzeitstabile Minidatenspeicher mit der Kapazität der deutschen Bibliothek,
- PCs mit der Leistungsfähigkeit eines heutigen Rechenzentrums,
- Mini-Chips, auf denen Spielfilme mit 1.000 Stunden Videozeit gespeichert sind,
- preiswerte Solarzellen, die sich das Prinzip der natürlichen Photosynthese zunutze machen,
- effiziente Wasserstoffspeicher für die regenerative Energiewirtschaft,
- selektierende Sensoren für Umweltgifte, Lebensmittelüberwachung, Kontrolle von Körperfunktionen,
- Diagnostikchips zur einfach handhabbaren medizinischen Früherkennung zuhause,
- langzeitdosierbare Pharmaka und Wirkstoffe für die orale Einnahme,
- rostfreie Leichtbaumaterialien mit hoher mechanischer Festigkeit und hoher Temperaturresistenz,
- leichte Kunststoff-Autoscheiben mit kratzfester und Hitze reflektierender Eigenschaft.

Quelle: BMBF, 2002, 9

Übersicht 3 stellt beispielhaft einige markträchtige Produkte und deren Anwendungen vor. Zwei konkrete Beispiele sollen darüber hinaus verdeutlichen, welche innovativen Effekte im Bereich neuer Materialien erwartet werden (Bachmann, 1998, 25 ff.):

1. Elektroautos sollen nach sehr optimistischen Berechnungen Reichweiten bis zu 8.000 km fahren können. Maßgeblich dafür sind Wasserstoffspeicher aus hohlen Nanofasern (Nanotubes), die bis zum Dreifachen ihres Eigengewichts speichern können; doch selbst Bruchteile davon wären von großem industriellem Interesse.

2. Bei der Nutzung der Sonnenenergie zur Stromerzeugung (Photovoltaik) könnten neuartige Beschichtungen mittels Halbleiter-Nanopartikeln 80 Prozent der Herstellungskosten photovoltaischer Elemente mit herkömmlichen Beschichtungen mithilfe der Silizium-Technologie einsparen. Der Strom aus Siliziumzellen ist – trotz geringeren Wirkungsgrads – pro kWh etwa doppelt so teuer wie der aus Nanozellen (Bachmann, 1998, 27).

Nach einer Befragung des VDI Technologiezentrums sahen die meisten Unternehmen folgende Anwendungsfelder als die vier wichtigsten an: Chemie/Werkstoffe/Verfahrenstechnik, Medizintechnik/Gesundheit, Information/Kommunikation und Messtechnik (Luther et al., 2004, 124).

Es wird erwartet, dass alsbald jeder Industriebereich durch die Nanotechnologie beeinflusst sein wird, woraus sich entsprechend große Hebeleffekte (wie schon durch die Mikroelektronik) für alle Anwenderbranchen ableiten. Deutlich wird dies am Einzelbeispiel der Materialeffizienz: Die Materialkosten in der Industrie liegen etwa bei 50 Prozent und steigen in der Maschinenbauindustrie mit schlanken Produktionsstrukturen und hohem Outsourcing bis auf 90 Prozent; bei nur 1 Prozent Materialeinsparung wird genauso viel Gewinn erwirtschaftet wie mit einer Umsatzsteigerung von etwa 20 Prozent (Haas, 2007, 54).

Als wichtige Wirtschaftszweige, auf welche die Nanotechnologie im Hinblick auf ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit Einfluss haben dürfte, gelten zum Beispiel im Verarbeitenden Gewerbe (Paschen et al., 2003; Luther et al., 2004; BMBF, 2006c):

- der Fahrzeugbau, einschließlich Luft- und Raumfahrt (zum Beispiel Anti-reflexionsbeschichtungen, nanotechnologiebasierte Werkstoffe),
- die Elektrotechnik/DV-Geräte usw. (zum Beispiel Supercomputer, miniaturisierte Datenspeicher, organische Leuchtdioden),
- die Chemie- und Pharmaindustrie (zum Beispiel nanoporöse Membranen bei Batterien und Brennstoffzellen sowie Filtrationstechniken, zielgenauer Transport medizinischer Wirkstoffe),
- die Ernährungsindustrie (zum Beispiel Nano-Biosensoren für die Lebensmittelproduktion) und
- die Textil- und Bekleidungsindustrie (zum Beispiel „intelligente Textilien“, nanostrukturierte Materialien) oder auch

- der Maschinenbau (zum Beispiel Nutzung verbesserter Leichtbaumaterialien, nanotechnologische Oberflächenbeschichtung zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit, Korrosionsschutz).

Bezogen auf diese sechs Wirtschaftszweige hat die Nanotechnik direkt oder indirekt einen Einfluss auf rund 3,5 Millionen Arbeitsplätze, auf einen Umsatz von knapp 1,1 Billionen Euro, auf eine Bruttolohn- und Gehaltssumme in Höhe von 153 Milliarden Euro und auf eine Bruttowertschöpfung von 300 Milliarden Euro (Tabelle 9).

Bedeutung der Nanotechnologie für das Verarbeitende Gewerbe in Deutschland

Tabelle 9

Nanotechnologie-relevante Wirtschaftszweige	Beschäftigte	Umsatz	Bruttolohn- und Gehaltssumme	Bruttowertschöpfung
	in 1.000	in Milliarden Euro		
Fahrzeugbau (einschließlich Luft- und Raumfahrt)	898,4	365,1	44,8	74,2
Elektrotechnik/DV-Geräte/Optik	757,1	186,8	33,5	67,2
Chemische Industrie (einschließlich Pharma)	418,7	166,8	20,3	47,4
Ernährung	428,4	130,5	12,1	35,3
Textil und Bekleidung	103,1	19,9	3,1	7,3
Maschinenbau	883,7	203,7	39,3	69,2
Sechs Branchen insgesamt	3.489,4	1.072,8	153,1	300,6
Verarbeitendes Gewerbe insgesamt	5.241,9	1.571,9	217,1	455,0
Sechs Branchen, in Prozent des Verarbeitenden Gewerbes	66,6	68,2	70,5	66,1

Stand: 2007; Betriebe mit 50 und mehr Beschäftigten; Bruttowertschöpfung: alle Betriebe.

Quellen: IW Köln, 2008b, Tabelle 3.7; Statistisches Bundesamt, 2008a und 2008b; eigene Berechnungen

Damit beeinflusste die Nanotechnik bei konsequenter Anwendung schon mit diesen sechs Branchen direkt oder indirekt jeweils über zwei Drittel der Beschäftigten, des Umsatzes, der Bruttolohn- und Gehaltssumme und der Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes.

Insgesamt gesehen wird durch diese Schlüsseltechnologie eine Reihe von neuen und verbesserten Produkten initiiert, welche die Märkte beleben und zu einem Wachstum der Wirtschaft führen können. Voraussetzung aber ist, dass die neuen Anwendungen von Unternehmen aufgegriffen werden.

4.3 Marktpotenzialdimension

Evident ist, dass der technische Fortschritt gerade in Form neuer, auf Hochtechnologie basierender Machbarkeiten einerseits ganz neue Märkte für bislang

noch nicht existente Produkte entstehen lässt, und andererseits auf schon vorhandenen Märkten durch Verbesserungen substitutiv wirkt. Beide Effekte können zu einem langen Wirtschaftszyklus beitragen; dies wird ja gerade in besonderer Weise von Schlüsseltechnologischen Innovationen erwartet. Allgemein betrachtet lässt sich mit der Nanotechnik zunächst der weltweit steigende Bedarf an ökologischer Nachhaltigkeit (Bütterlin, 2007) befriedigen. Es kommt zu größeren Einsparungen bei Gewicht, Volumen, Rohstoff- und Energieverbrauch sowie zu steigender Schnelligkeit (zum Beispiel bei Computern). Neue Märkte werden sich besonders diejenigen erschließen können, die Pioniere sind – sie nutzen die technologische Lücke aus und fahren Pioniergewinne ein.

Das Bewusstsein bezüglich der Erschließung neuer Märkte sowie der Stärkung ihrer Wettbewerbskraft ist in den Nanounternehmen gegeben: Mehr als 75 Prozent der Unternehmen sahen in der Befragung des VDI Technologiezentrums von 2003 die Chance, dass sich durch die Nanotechnik völlig neue Märkte erschließen lassen, und über 60 Prozent sahen in dieser Technik einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor beziehungsweise die Chance, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern (Luther et al., 2004, 129).

Eine Einschätzung des neuen (Welt)marktpotenzials für die Nanotechnik unterliegt allerdings vielen Einschränkungen, welche die Angabe genauerer Daten erschweren. Gerade die zu erwartenden Marktvolumina wären aber wichtige Kennzeichen für die Bedeutung einer Schlüsseltechnologie als Basisinnovation. Dies gilt in besonderer Weise für gänzlich neue Märkte, aber auch für vorhandene und zu substituierende Produktmärkte. Auch der BSI-Bericht macht darauf aufmerksam, dass es keinen klar definierten Nanotech-Markt gibt, sondern nur Teilmärkte (BSI, 2007, 26). Erschwert wird eine solche Präzisierung einheitlicher Marktdaten durch folgende Umstände (Luther et al., 2004, 39 ff.):

Da sich diese Technologie als Querschnittsdisziplin keinen klassischen Industriebranchen zuordnen lässt, werden auch keine Umsätze wirtschaftsstatistisch erfasst. Zudem beinhaltet sie ein breites Spektrum unterschiedlicher Technologie- und Forschungsfelder wie die Werkstofftechnik, die Schichttechnologie, die Nanostrukturierung, die Analytik und auch die Oberflächenbearbeitung. Ihre Produkte und Verfahren setzen meist am Beginn der Wertschöpfungskette an, beziehen sich auf Einzelkomponenten, deren Funktionalität verbessert wird. Dadurch kann der Anteil der Nanotechnik an der Wertschöpfung kaum oder nur sehr ungenau erfasst werden.

Marktprognosen stehen zusätzlich vor dem generellen Problem der Unvorhersagbarkeit des Wissens sowie der Nichtplanbarkeit und Nichtvoraussagbarkeit der Entwicklung (aufgrund unvollständiger Information) bei „komplexen Phä-

nomen“ (Hayek), wie es die Märkte als soziale Prozesse sind. Marktprognosen können deshalb lediglich konstruierte Wirklichkeiten sein.

Die im Folgenden dokumentierten Marktdaten basieren im Wesentlichen auf der Auswertung einer Studie des VDI Technologiezentrums (Luther et al., 2004) sowie auf einer aktuellen Internetrecherche.

Weltmarkterwartungen insgesamt

Trotz vieler Einschränkungen wird immer wieder versucht, Weltmärkte für diese Technologie abzugreifen. Je nach Quelle streuen die (Welt)Marktprognosen für die Nanotechnologie allerdings stark; alle Vorhersagen gehen aber von hohen Wachstumsraten aus (Hullmann, 2006b, 9): Unter den optimistischen Varianten fällt eine Marktschätzung von Lux Research (2004) in Höhe von 2,6 Billionen US-Dollar für das Jahr 2014 auf; moderate Schätzungen des Mitsubishi Institute prognostizierten 2002 für 2010 einen Weltmarkt von 150 Milliarden Dollar.

Unter den genannten Restriktionen ermittelte auch das VDI Technologiezentrum 2004 im Auftrag des BMBF mögliche Marktpotenziale anhand einer umfassenden Literaturanalyse. Danach wurde zum Beispiel von der National Science Foundation (2001) der Marktwert sämtlicher irgendwie nanotechnologisch beeinflussbarer Produkte bis 2015 auf ein Volumen von rund 1 Billion US-Dollar geschätzt (Luther et al., 2004, 40). Nach Einschätzungen des VDI Technologiezentrums beinhalten viele Marktdaten offensichtlich auch Doppelzählungen, was zu einer Überbewertung des Weltmarktvolumens führt.

Die Bundesregierung (Deutscher Bundestag, 2006, 4) geht im Anschluss an die Studie des VDI Technologiezentrums davon aus, dass die Nanotechnologie einen Weltmarkt von rund 100 Milliarden Euro beeinflusst (Luther et al., 2004, III); dieses (Nanotechnologie-)relevante Marktvolumen teilt sich in fünf wichtige Marktsegmente (Elektronik, Chemie, optische Industrie, Automobilbau, Lebenswissenschaften) auf. Damit sind von dieser Technologie wichtige Schlüsselbranchen für Deutschland betroffen, die durch nanotechnologische Anwendungen wettbewerbsfähiger werden können. Auf eine insgesamt ubiquitäre ökonomische Bedeutung dieser Technologie verwies 2003 auch schon der TAB-Bericht: „Angesichts des ausgeprägten Querschnittscharakters der Nanotechnologie dürfte es kaum einen Industriezweig geben, der künftig nicht durch Nanotechnologie basierte Innovationen beeinflusst wird“ (Paschen et al., 2003, 141).

Weltmarkt-Produktprognosen

Für einzelne Produktmärkte lassen sich erwartete – zum Teil substitutive – Weltmarktvolumina dokumentieren (Luther et al., 2004, 197 f.). Sie geben zu

erkennen, dass es sich je nach Produkt hier um Größenordnungen von bis zu zweistelligen Milliarden US-Dollar handelt. So wurde zum Beispiel im Sektor Elektronik vom VDI Technologiezentrum 2004 für die CMOS-Elektronik²⁰ <100 Nanometer für 2006 ein Weltmarktvolumen von 20 Milliarden US-Dollar geschätzt, indem hier ein Übergang von der Mikro- zur Nanoelektronik stattfindet (Luther et al., 2004, 194, 198). Bei MRAM-Speichern²¹ wurde in 2003 für das Jahr 2010 (als Ersatz für DRAM-Speicher) sogar ein Weltmarktvolumen von 30 bis 50 Milliarden US-Dollar prognostiziert.

Ein anderes Segment bilden die Lebenswissenschaften: Hier wurde zum Beispiel 2001 von der Business Communication Company (BCC) für den Gesamtmarkt Biochips/Schnelltests für 2010 ein Marktvolumen von 2 Milliarden US-Dollar geschätzt (Luther et al., 2004, 198) und für die Nanobiotechnologie in 2003 für 2007 ein Weltmarktvolumen von insgesamt 1.171 Millionen Dollar (2002: 269 Millionen Dollar). Schätzungen der Front Line Strategic Consulting veranschlagten 2003 den Life-Science-Markt für 2008 auf 3 Milliarden Dollar (einschließlich des Marktes für technische Anwendungen) (Luther et al., 2004, 76).

Einen weiteren Eindruck von den Weltmarktvolumina für Nanotech-Produkte vermitteln folgende Schätzungen (BSI, 2007, 26):

- So wird der Markt für die Nanoelektronik auf 10,8 Milliarden US-Dollar für 2007 geschätzt; bis 2011 soll sich der Umsatz auf diesem Markt auf 82,5 Milliarden US-Dollar erhöhen;
- der Markt für Nanospeicherprodukte soll von 8,6 Milliarden (2007) auf 65,7 Milliarden US-Dollar im Jahr 2011 steigen;
- für den Bereich der Nanosensoren in der Medizin und in der Raumfahrt wird für 2011 ein Volumen von 5,6 Milliarden Dollar erwartet (2007: 446 Millionen); der Markt für Displays mit nanotechnologischen Komponenten wird für 2011 auf 7,5 Milliarden Dollar geschätzt (2007: 1,6 Milliarden Dollar).

Die BioMarket Group AB, Stockholm (2007) prognostizierte in ihrer Studie „The World Nanotechnology Market (2006)“ unter anderem folgende Teilmarktentwicklungen:

- Für die Nanoelektronik wird ein Wachstum von 1,83 Millionen Dollar (2005) auf 4,2 Millionen Dollar in 2010 vorausgesagt;

²⁰ CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor (komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter); diese Technik hat nur einen geringen Leistungsbedarf.

²¹ MRAM = Magneto-resistive Random Access Memory (magnetoelektronischer Arbeitsspeicher): Es handelt sich im Gegensatz zu DRAM-Speichern um eine nicht flüchtige Speichertechnik. Das heißt, die Informationen werden nicht mit elektrischen, sondern mit magnetischen Ladungselementen gespeichert. Dadurch behalten die Chips auch nach Ausschalten der Energieversorgung ihre gespeicherten Daten, die Computer müssen ihre Daten dann nicht mehr von der Festplatte holen, zudem kann man sie beliebig oft beschreiben.

- für Nanolebensmittel wird zwischen 2006 und 2010 ein durchschnittliches Wachstum von knapp 31 Prozent auf 20,4 Milliarden Dollar erwartet.
- Der Markt für Nanotextilien sollte über 13,6 Milliarden US-Dollar (2007) bis 2012 ein Volumen von 115 Milliarden US-Dollar erreichen.
- Der „Nanotech-Tool“-Markt (Nanotechwerkzeuge, um auf der Nano-Skala zu arbeiten, zum Beispiel Mikroskope) wird für 2008 auf 900 Millionen und für 2013 auf 2,7 Milliarden Dollar veranschlagt.

Regionalmarktprognosen

Für (deutsche) Unternehmen dürften bei einer Schlüsseltechnologischen Innovation Teilmärkte der Zukunft auch in anderen Weltmarktregionen interessant werden. Ein Beispiel ist die Nachfrage nach nanotechnologischen Gesundheitsprodukten in den USA: Es wird geschätzt, dass das Marktvolumen hierfür insgesamt zwischen 2004 und 2020 von 906 Millionen auf 107 Milliarden US-Dollar zunehmen wird (Tabelle 10).

US-Markt für nanotechnologische Gesundheitsprodukte bis 2020

Tabelle 10

Produktgruppe	2004	2009	2020	Durchschnittliche Veränderung 2004–2009, in Prozent	Durchschnittliche Veränderung 2009–2020, in Prozent
	in Milliarden US-Dollar				
Nanotechnologische Erzeugnisse insgesamt	0,906	6,5	107,0	48,3	29,0
davon:					
Arzneimittel	0,406	3,0	79,0	49,2	34,6
Diagnoseprodukte	0,465	1,1	4,0	18,8	12,4
Verbrauchsmaterial und Geräte	0,035	2,4	24,0	133,0	23,3

Quellen: Freedonia Group Inc., nach bfaj, 2006a; eigene Berechnungen

Diese vom internationalen Marktforschungsinstitut Freedonia Group Inc. geschätzten künftigen Marktvolumina für den nanotechnologischen US-Gesundheitsmarkt weisen zweistellige durchschnittliche Zuwachsraten aus. Der US-Nachfrage nach „nanotechnologisch geprägten Produkten“ auf dem Medizinmarkt ist jüngst auch eine Studie der Unternehmensberatung Ernst & Young (2007) nachgegangen; danach zeigen sich bis 2021 die folgenden Entwicklungen:

- „Drug-Delivery-Bereich“ (Arzneimittel-Transport im Körper): 69,6 Milliarden Dollar (2006: 6,32 Milliarden),
- „Medizinische Materialien & Implantate“: 39 Milliarden Dollar (2006: 430 Millionen),

- „Diagnostika/analytische Instrumente“: 10 Milliarden Dollar bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (2006: 1,92 Milliarden US-Dollar).

Für den gesamten japanischen Nanotechnologiemarkt wurden vom Marktforschungsunternehmen Fuji Keizai insgesamt enorme Expansionen vorausgesagt (bfai, 2006b): Er soll umgerechnet von 24 Milliarden US-Dollar (2005) bis zum Jahr 2020 auf 115 und bis 2030 auf 226 Milliarden Dollar anwachsen. Das Nomura Research Institute sagte 2006 für den innerjapanischen Markt für Nanotechnologien von 2004 bis 2015 ein Wachstum um den Faktor 25 auf 23 Billionen Yen oder umgerechnet 213 Milliarden Dollar voraus (2004: 942 Milliarden Yen oder 8,7 Milliarden Dollar) (Nomura Research Institute, 2006).

Der Markt für Nanotechnologie in Südkorea soll nach Angaben des Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI) – umgerechnet – von 37 Milliarden US-Dollar (2005) auf 278 Milliarden im Jahr 2015 steigen (bfai, 2007). Die stärkste prozentuale Steigerung von über 700 Prozent wird demnach der Bereich Elektronik/Kommunikation aufweisen.

Der chinesische Nanotechnologiemarkt soll sich von 5,4 Milliarden US-Dollar bis 2015 auf 145 Milliarden erhöhen. Rund 70 Prozent des Umsatzes entfallen schon auf die Segmente Nanomaterialien, Nanoelektronik und Nanobio sowie auf die Lebenswissenschaften. Wie kaum ein anderes Land will China von der Konvergenz zwischen Nano-Bio-Cogno-Info profitieren (Nano-Bio-Cogno-Info: Nanotechnologie, Biotechnologie, neuronale Technologien und Informationstechnologie). Zudem gibt es in China kaum ethische Bedenken oder soziale Kontroversen über die Nanotechnologie (Helmut Kaiser Consultancy, 2005).

Insgesamt machen die Einzeldaten deutlich, dass die Nanotechnologie neue Märkte anstoßen kann, auf denen sich ein großes Umsatzvolumen durch neue Machbarkeiten mit der Nanotechnologie erschließen lässt und mit Recht von einer schlüsseltechnologischen Innovation gesprochen werden kann, die weitreichende Einflüsse hat. Sie hat aber auch ein enormes Potenzial, bestehende alte Märkte für sich zu erobern (Substitutionseffekt). Dabei lassen sich kaum Aussagen über das Verhältnis zwischen wirklich neuen Märkten und Substitutionsmärkten machen. Die erwarteten Marktpotenziale erklären die internationale Rivalität um die Nanotechnik.

4.4 Arbeitsplatzdimension

Der technische Fortschritt kann mit Blick auf die Beschäftigung arbeitsplatzfördernd, neutral oder auch arbeitsplatzvernichtend wirken. Er wird auch unter der Hypothese der Höherqualifizierung beziehungsweise der Dequalifikation diskutiert. Bei der Querschnittstechnologie der Nanotechnik können Beschäfti-

gungseffekte nur schwer direkt zugerechnet werden. Idealerweise sollte dabei zwischen dem Brutto- und Nettoeffekt unterschieden werden; beim Nettoeffekt wird berücksichtigt, dass an anderer Stelle durch den Ersatz von Techniken auch Arbeitsplätze entfallen (Luther et al., 2004, 223). Kontrovers wird bislang generell der Nettobeschäftigungseffekt von technischen Innovationen diskutiert; ein Beschäftigungsgewinn wird besonders mit der Phase des Kondratieff-Aufschwungs verbunden. Mit zunehmender Ausbreitung werde der Beschäftigungszuwachs aber geringer (Scherrer, 1996, 6 f.).

Auch mit dem technischen Fortschritt in Gestalt der Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie verbinden sich große Erwartungen auf mehr neue, anspruchsvolle Arbeitsplätze („Job Knüller“-Effekt). Bislang steht eine bilanzierende Analyse quantitativer wie qualitativer Wirkungen dieser Technologie aber noch aus. Vorliegende Studien beleuchten in erster Linie mögliche arbeitsplatzschaffende Effekte dieser neuen Technologie, was aber eine entsprechende Diffusion voraussetzt. Für einen solchen Blickwinkel im Sinne der Fortschrittshypothese können folgende Argumente sprechen:

- Durch die Umsetzung dieser Technologie entstehen teilweise neue Produktmärkte, welche die Endnachfrage erweitern und die Beschäftigung steigern.
- Zur Entwicklung nanotechnologischer Produkte werden mehr Fachkräfte für neue anspruchsvolle Betätigungsfelder gebraucht.
- Hierfür spricht ferner, dass durch Ressourcenschonung und Kostensenkung Realeinkommenssteigerungen stattfinden können, die ebenfalls die Gesamtnachfrage anregen.

Mihael C. Roco, National Science Foundation (NSF), der Architekt der amerikanischen National Nanotechnology Initiative, schätzte aufgrund bisheriger Erfahrungen mit der Informationstechnologie, dass die Nanotechnologie das Potenzial habe, weltweit bis 2015 etwa sieben Millionen neue Arbeitsplätze zu schaffen. Ihr wird ein mindestens ähnlicher Produktivitätsschub zugetraut, wie er in den USA durch die Informationstechnologie in Höhe von mehr als 1 Prozent pro Jahr in den 1990er Jahren erfolgte (Roco, 2003, 182). Nach diesen Schätzungen der National Science Foundation werden im Einzelnen weltweit bis 2015 rund zwei Millionen Fachkräfte für die Nanotechnologie gesucht (Hullmann, 2006b, 17). Davon 0,8 bis 0,9 Millionen in den USA, 0,5 bis 0,6 Millionen in Japan, 0,3 bis 0,4 Millionen in Europa, etwa 0,2 Millionen in der asiatisch-pazifischen Region (außer Japan) und 0,1 Millionen in anderen Weltregionen; zusätzlich schafft jede Nanotech-Fachkraft weitere 2,5 Stellen im indirekten Bereich bei Anwendern – insgesamt rund fünf Millionen – sodass sie sich alles in allem auf die genannten sieben Millionen addieren.

Noch optimistischer fielen im Jahr 2004 Schätzungen von Lux Research aus: Hier wurde für 2014 weltweit ein Arbeitsplatzvolumen von rund zehn Millionen Stellen erwartet (Hullmann, 2006b, 17). Viele dieser neuen Arbeitsplätze entstehen in kleinen und mittleren Unternehmen. Lux Research (2007b) stellte bei einer nationalen Befragung von 26 US-Nanotech-Unternehmen fest, dass diese in 2006 rund 5.300 Nanotechnologieforscher beschäftigten; nach Hochrechnungen von Lux Research könnte sich ihre Zahl innerhalb von zwei Jahren auf 30.000 erhöhen.

Einer Hochrechnung des VDI Technologiezentrums zufolge (Luther et al., 2004, 222 ff. und 234) war aufgrund einer Unternehmensbefragung im Jahr 2003 (n = 450) ansatzweise eine Einschätzung der direkten und indirekten Beschäftigungseffekte der Nanotechnologie für Deutschland möglich. Bei einer Untergrenze von 20.000 bis 32.000 sowie einer Obergrenze von 114.000 Arbeitsplätzen, waren diese überwiegend in der Großindustrie angesiedelt. Hierin nicht enthalten sind die nicht industriellen Bereiche wie wissenschaftliche Einrichtungen und Hochschulen. Für 2006 ging das VDI Technologiezentrum von einem Beschäftigungszuwachs in einer Größenordnung von mindestens 10.000 bis 15.000 aus (Luther et al., 2004, 236). Nach einer neueren Schätzung des VDI hängen in deutschen Unternehmen wenigstens 50.000 Arbeitsplätze mit der Nanotechnik zusammen (VDI Technologiezentrum, 2007). Der gegenwärtige Fachkräftemangel drohe aber auch in diesem Bereich das Wachstum zu bremsen.

Eine Arbeit der Prognos AG (Pfirrmann, 2008, 51 ff.) im Auftrag der Hans Böckler Stiftung kommt aufgrund einer Literaturanalyse für den Kernbereich der Nanotechnik zu einem derzeitigen (2007) Beschäftigungskorridor von 35.000 bis 52.000 Personen und rechnet bis 2010 mit einem Zuwachs von 10.000 bis 15.000 Stellen.

Zusammenfassend betrachtet sind die bisher geschätzten positiven Arbeitplatzeffekte der Nanotechnologie eher als moderat zu bezeichnen; dies scheint auf das bisher noch „junge“ Themenfeld zurückzuführen zu sein. Mit jedem Produkt, das Marktreife bis hin zur Massenproduktion und Anwendung erlangt, werden sich jedoch nicht nur der Umsatz, sondern auch die direkten und indirekten Beschäftigungseffekte erhöhen.

4.5 Qualifizierungsdimension

Nach der neuen Wachstumstheorie ist das Wissen eine endogene Größe des vom technischen Fortschritt bestimmten Wachstums (Romer, 1990). Der demografische Wandel hat deshalb zu der Sorge Anlass gegeben, ob künftig zur Entwicklung und Umsetzung technischen Fortschritts ausreichend qualifizierte

Fachkräfte zur Verfügung stehen werden (Stichwort: Ingenieurmangel). So ist gerade die weitere Entwicklung und Anwendung der wissensintensiven Nanotechnologie von der Grundlagenforschung hin zu einer breiten, anwendungsorientierten Innovation (also ihrer Beherrschung) auf einen quantitativ wie qualitativ ausreichenden Nachwuchs angewiesen. Volkswirtschaften, die diese Technologie wegen mangelnder Qualifikationen nicht beherrschen, dürften zu den Verlierern im Innovationswettbewerb gehören. Nach einer Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (IW Köln, 2008a) in Kooperation mit dem VDI bestand 2007 bereits eine allgemeine Ingenieurslücke von knapp 100.000 Personen: 94.400 freien Stellen standen lediglich 24.800 arbeitslose Ingenieure gegenüber.

Doch können die Stärkung der Wettbewerbskraft und der Aufbau vieler weiterer neuer Arbeitsplätze nur dann gelingen, wenn ausreichend qualifiziertes Personal für FuE sowie die Weiterentwicklung und Anwendung der Nanotechnologie zur Verfügung stehen. Die Bereitstellung von Forschungspersonal und die Kontaktaufnahme zu Kooperationspartnern gehören nach Unternehmensbefragungen zu den wichtigsten Voraussetzungen, um neue Anwendungen der Nanotechnologie zu erschließen (Luther et al., 2004, 238).

In einer im Jahr 2004 in 32 Ländern durchgeführten Online-Befragung des europäischen Netzwerks zur Nanotechnologie („Nanoforum“) von 720 Personen aus den Bereichen FuE, Medien, Wissenschaft und Wirtschaft, erwarteten 75 Prozent der Befragten in den nächsten fünf bis zehn Jahren einen Mangel an qualifiziertem und interdisziplinär ausgebildetem Personal (Abicht et al., 2006, 33). In der gleichen Untersuchung sagten damals 64 Prozent der Befragten, es sei „unmöglich“ bis „schwierig“, qualifiziertes Personal zu finden (Abicht et al., 2006, 39). Umso bedeutender ist, dass sich die wissenschaftlichen Bildungsangebote frühzeitig diesem Bedarf stellen, aber auch, dass Wissenschaft und Wirtschaft kooperieren (zum Beispiel Personalaustausch).

In Deutschland wurden – etwa zeitgleich mit dem Einsetzen des NNI-Programms in den USA – die ersten Nanostudiengänge bereits im Studienjahr 2000/2001 angeboten; zu den Vorreitern zählten die Universität Würzburg (Studiengang: Nanostrukturtechnik) und die Universität des Saarlandes (Studiengang: Mikro- und Nanostrukturen). Das Thema Nanotechnologie spielt zudem in zahlreichen konventionellen technisch-naturwissenschaftlichen Studiengängen eine Rolle (Luther et al., 2004, 237). Der Bildungsstandort Deutschland scheint also für die Nanotechnologie gerüstet zu sein. Schon 2004 stellte man zusammenfassend fest (Luther et al., 2004, 241):

- Das Qualifizierungsangebot entspricht weitgehend den Erfordernissen der Industrie.

- Dem Bedarf an Interdisziplinarität der Ausbildung wird Rechnung getragen.
- Erforderlich ist weiterhin die Grundlagenausbildung in den klassischen Naturwissenschaften.

Eine Befragung von Lehrenden an Hochschulen im Jahr 2005 (Auswertung von 210 Antwortbögen) bestätigt den Eindruck, dass es in Deutschland bereits ein umfassendes Hochschulangebot im Bereich Nanotechnologie gibt (Cebulla et al., 2006). Zum Zeitpunkt der Umfrage waren die Lehraktivitäten an den Universitäten mit 75,8 Prozent allerdings weitaus stärker ausgeprägt als an den Fachhochschulen (22,5 Prozent); 1,7 Prozent entfielen auf hochschulnahe Einrichtungen. 72,5 Prozent der derzeitigen Aktivitäten fanden in Form von einzelnen Vorlesungen/Seminaren statt; jeder vierte Lehrende gab an, dass die Nanotechnologie im Hauptstudium einen Schwerpunkt bildete. Einen eigenen Studiengang meldeten 12,6 Prozent. Als Veranstaltungstyp dominierte mit Abstand die „Vorlesung“ (93,7 Prozent); sie wurde häufig begleitet vom „Labor/Praktikum“ (66,9 Prozent) und vom „Seminar“ (65,7 Prozent). Bei 39,6 Prozent der Befragten waren in den nächsten drei Jahren eigene Studiengänge mit nanotechnologischen Inhalten geplant. Für externe Teilnehmer (zum Beispiel aus Unternehmen) boten nur 29,2 Prozent Weiterbildungen an, aber 46,5 Prozent planten dies. Das bisherige Angebot zur offenen Weiterbildung war mit 86,0 Prozent überwiegend bei den Universitäten zu finden (Fachhochschulen: 10,5 Prozent). Betrachtet man die Verteilung der Lehraktivitäten nach Bundesländern, stand 2005 mit 23,6 Prozent Nordrhein-Westfalen an der Spitze. Gemäß dieser Befragung konzentrierten sich sieben von zehn Lehraktivitäten auf fünf Bundesländer (Nordrhein-Westfalen, Hessen, Sachsen, Baden-Württemberg, Bayern).

Eine Auswertung der Einträge von Bildungseinrichtungen beim VDI-TechPortal Nanotechnologie ergab im Dezember 2008 für Deutschland 267 Bildungsangebote (Tabelle 11). Die meisten Einträge erfolgten dabei für das Bundesland Nordrhein-Westfalen.

Der breite Einsatz der Nanotechnologie erfordert auch auf dem Sektor der „mittleren Qualifikationen“ (Facharbeiter, Techniker) gut ausgebildetes Personal. Hier wird derzeit jedoch noch ein rasch wachsender Nachhol- und auch Weiterbildungsbedarf konstatiert (Deutscher Bundestag, 2008, 121). Karriere machen im Bereich Nanotechnologie können neben einer Reihe klassischer Techniker vor allem auch Biologielaboranten, biologisch-technische Assistenten, Chemikanten, Chemielaboranten, chemisch-technische Assistenten, Elektroniker in der Automatisierungstechnik, Informationselektroniker, Mechatroniker, Mikrotechnologen, physikalisch-technische Assistenten und Physikalaboranten. Das Institut für Strukturpolitik und Wirtschaftsförderung entwickelte 2005 im Auftrag des BMBF

Die Nano-Bildungslandschaft in Deutschland

Tabelle 11

Bundesländer	Uni-Institute	FH-Institute	Nano-Studiengänge	Weiterbildungsträger	Insgesamt
Nordrhein-Westfalen	43	12	5	5	65
Bayern	20	8	5	2	35
Sachsen	27	2	3	1	33
Hessen	22	5	1	1	29
Baden-Württemberg	18	6	2	3	29
Niedersachsen	17	5	3	0	25
Saarland	5	1	1	7	14
Schleswig-Holstein	11	1	0	0	12
Hamburg	7	2	0	0	9
Berlin	8	5	0	1	9
Rheinland-Pfalz	4	1	1	2	8
Bremen	4	2	1	0	7
Brandenburg	1	0	0	0	6
Thüringen	5	0	1	0	6
Sachsen-Anhalt	1	2	0	2	5
Mecklenburg-Vorpommern	0	1	0	0	1
Deutschland	173	49	23	22	267

Hochschulinstitutionen mit einschlägigen Vorlesungen und Seminaren, eigenständige Nano-Studiengänge sowie Weiterbildungsträger mit Nano-Angeboten.

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach URL: <http://www.nano-bildungslandschaften.de> [Stand: 2008-12-23]

(Abicht et al., 2005) für die Aus- und Weiterbildung 14 clusterspezifische und vier clusterübergreifende Qualifikationsprofile.

Für einen Innovations- und Produktivitätsschub durch die Nanotechnologie sind neue Organisationsstrukturen und Ausbildungsgänge nötig, „die weniger starr an überkommenen disziplinären Grenzen orientiert sind, sondern den multi- oder interdisziplinären Charakter der Nanotechnologie berücksichtigen“ und sich in der Ausbildung auch nach den Bedürfnissen der KMU richten (Deutscher Bundestag, 2008, 121). Für die Etablierung einer Basisinnovation wäre dies eine grundlegende Voraussetzung.

Insgesamt ist Deutschlands Bildungslandschaft in Bezug auf diese Schlüsseltechnologie mit ihren qualitativen Herausforderungen breit aufgestellt. Anlass zur Sorge bietet indes der Mangel an naturwissenschaftlich-technischem Nachwuchs. Bleibt er bestehen, ist zu befürchten, dass sich dies negativ auf den möglichen Beitrag der Nanotechnik für das langfristige Wirtschaftswachstum in Deutschland auswirkt.

5

Soziale Akzeptanz, Chancen und Risiken der Nanotechnik

Neu aufkommende Techniken bieten immer wieder die Chance, grundsätzlich über Sinn, Ziele, Chancen und Risiken des Fortschritts für eine Gesellschaft nachzudenken. Es ist dabei unbestritten, dass eine Invention erst dann zur Schlüsseltechnologischen Innovation mit ihren positiven volkswirtschaftlichen Wirkungen heranreifen kann, wenn sie auch in der Bevölkerung auf eine ausreichende Bekanntheit und Akzeptanz trifft und Vertrauen in ihre relative Sicherheit besteht. Sie durchläuft mithin einen sozialen Diskurs-, Vertrauens- und Akzeptanzprozess, dessen Ausgang für ihre Ausgestaltung selbst wie auch für ihre sozioökonomischen Wirkungen mit entscheidend ist. Dies zeigten bereits die Debatten um die Mikroelektronik, die moderne Bio- und Gentechnik sowie die Kernkraft. Moderne Gesellschaften sind allerdings unter den Bedingungen hochkomplexer Techniken (zum Beispiel infolge von Störfällen wie etwa in Tschernobyl 1986) für ihre sogenannten Nebenfolgen mehr oder weniger hoch sensibilisiert.

So sind große Neuerungen in der Technikgeschichte stets von Akzeptanzdebatten und von Auseinandersetzungen über deren Nutzen oder Schaden begleitet gewesen. Technik beziehungsweise technischer Fortschritt als „Fluch“ oder „Segen“ der Menschheit wird als Globalfrage in der Demoskopie oft bemüht, um die Technikakzeptanz an sich zu testen. Oftmals wird dann in der allgemeinen oder auch speziellen Technikfeindlichkeit der Bevölkerung ein Hemmnis für Innovationen gesehen. Besonders für Deutschland ist die „Technikfeindlichkeitsdebatte“ symptomatisch und immer wieder wird die Frage nach der Technikakzeptanz, der Vertrauenswürdigkeit von Wissenschaft und Technik sowie dem Technikinteresse gestellt. Gemäß den Ergebnissen des Eurobarometers gibt es in Deutschland im internationalen Vergleich jedoch keine ausgesprochene Technikfeindlichkeit (Rosenblatt et al., 2007, 674). Von einem grundsätzlichen allgemeinen Fortschrittsoptimismus kann in Deutschland trotz oder gerade wegen nahezu unendlicher Möglichkeiten durch die Technik allerdings kaum mehr gesprochen werden:

- 2006 interessierten sich in Deutschland nur 32 Prozent der Befragten „sehr stark“ bis „stark“ für Wissenschaft und Technik; 35 Prozent „mittelstark“ und 34 Prozent „weniger“ bis „gar nicht“ (Rosenblatt et al., 2006, 7). Das Interesse für diese Bereiche war mithin nur schwach ausgeprägt und dabei sehr bildungs-, aber weniger altersabhängig.

- Überwiegend herrschte die Meinung (41 Prozent) vor, dass Wissenschaft und Technik in der Zukunft weder Probleme lösen, noch neue schaffen. Für 38 Prozent lösen sie jedoch eher die Probleme der Zukunft.

Von der Nanotechnologie wird oft vermutet, dass sie zwar manche Probleme (zum Beispiel Minderung des Ressourcenverbrauchs) lösen, doch auch neue (zum Beispiel Gesundheitsgefahren durch Einatmen künstlich erzeugter giftiger Nanopartikel) schaffen kann. Wie jede Technik ist auch sie in ihren Wirkungen ambivalent. Von hohem Interesse ist daher – nicht zuletzt nachfragepolitisch – ihre Akzeptanz in der Bevölkerung, wobei berücksichtigt werden muss, dass diese die Chancen und Risiken einer solch hochkomplexen neuen Technologie nur schwerlich einschätzen kann. Da es den meisten hierzu an den notwendigen Grundkenntnissen und Erfahrungen fehlt, geht es eher um die „gefühlten“ Chancen und Risiken. Entsprechend hoch ist der Anteil der Kategorie „keine Antwort“.

Im Folgenden soll untersucht werden, wie die Bevölkerung Deutschlands zur Nanotechnik (im Vergleich zu anderen Ländern) steht. Nationale wie internationale Umfragen werden zeigen, dass es sich bei der Nanotechnik mitunter noch um eine „kontroverse Technologie“ handelt. Hierunter werden solche Technologien verstanden, bei denen in der Öffentlichkeit noch Unsicherheit über deren Sicherheit und Nutzen besteht (Werwatz et al., 2007, 98). Stets stellt sich nicht nur die Frage, ob die Chancen oder die Risiken überwiegen, sondern auch, ob wegen etwaiger Risiken auf die Chancen verzichtet werden soll, indem die neue Technologie ganz aufgegeben wird.

Deutsche Umfragen zur Nanotechnologie

Um die Nachfrage und das Verständnis zu fördern, schickt das BMBF gemeinsam mit der Initiative Wissenschaft im Dialog (WiD) seit 2004 den sogenannten „nanoTruck“ auf seine Fahrt durch Deutschland. Er soll die Öffentlichkeit über die komplexe Nanowelt aufklären. Denn bislang herrscht in der Bevölkerung Deutschlands über die Nanotechnologie noch vielfach Unkenntnis.

Soweit ersichtlich, wurde in Deutschland die erste repräsentative Umfrage zur Nanotechnik im September 2004 von der Düsseldorfer Kommunikationsagentur komm.passion GmbH (2004) durchgeführt. Zielgruppe war die deutschsprachige Wohnbevölkerung in Privathaushalten ab 14 Jahren (n = 1.019). Als zentrales Ergebnis musste festgestellt werden, dass fast die Hälfte der Befragten (48 Prozent) mit dem Begriff nichts anfangen konnte; 30 Prozent sagten, sie hätten davon bereits gehört und nur 15 Prozent waren in der Lage, hierzu etwas Genaueres zu sagen; interessanterweise wurden keine negativen Aspekte angeführt. Den „Maß-

stab“ benannten 12 Prozent, mit Zukunft und Forschung verbunden den Begriff 3 Prozent und 6 Prozent konnten Anwendungsgebiete und -beispiele nennen (Mehrfachnennungen).

Im Vergleich zu anderen Technologien fühlten sich die Deutschen über die Nanotechnologie am schlechtesten informiert: Auf einer Antwortskala zwischen 1 (= gar nicht informiert) bis 10 (= sehr gut informiert) stuften 74 Prozent ihren subjektiven Informationsstand über die Nanotechnologie bei 1 bis 3 ein. Deutlich weniger fühlten sich bei der Verbrennungstechnologie (32 Prozent), bei der Kernenergie (34 Prozent) und bei der Gentechnik (44 Prozent) schlecht informiert (komm.passion GmbH, 2004, 15).

Etwas anders fiel die Risikowahrnehmung – ebenfalls gemessen auf einer Skala von 1 (= gar kein Risiko) bis 10 (= sehr großes Risiko) – aus: Bei der Kernenergie (47 Prozent: 7,0) und der Gentechnik (39 Prozent: 6,8) wurde das Risiko von vielen sehr viel stärker wahrgenommen als bei der Verbrennungstechnologie (11 Prozent: 4,9) und der Nanotechnologie (10 Prozent: 4,9). 34 Prozent konnten bezüglich der Risikoeinschätzung der Nanotechnologie keine Angaben machen. Dabei wurde deutlich, dass der Grad der Risikoeinschätzung bei der Nanotechnik mit steigendem Informationsstand abnahm.

Ein weiteres interessantes Ergebnis der Befragung war, dass viele (60 Prozent) wissen wollten, ob sie Produkte bekommen, in denen Nanotechnologie steckt. Für 53 Prozent war es wichtig, dass vor der Markteinführung die Nebenwirkungen bekannt sein sollten. Sie sprachen sich zu 69 Prozent dafür aus, dass die Regierung dafür sorgen müsse, dass sich eine unabhängige Grundlagenforschung zur Nanotechnologie auch mit deren Gefahren und Risiken zu befassen hätte. 64 Prozent stimmten denn auch für stärkere staatliche Kontrollen der Nanotechnologie. 63 Prozent waren der Auffassung, dass man nicht auf die Nanotechnologie verzichten könne, wenn dadurch das Wirtschaftswachstum gefördert werde.

Hinsichtlich des Bekanntheitsgrads der Nanotechnologie hat sich seit der Studie von 2004 nichts verändert – dies zeigt eine neuere repräsentative Bevölkerungsbefragung im Rahmen des SOEP (n = 1.063) des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) und von tns-infratest (Rosenblatt et al., 2006) vom Sommer 2006: 47,7 Prozent der Befragten war dieser Begriff zum Zeitpunkt der Umfrage noch nicht bekannt; allerdings gaben zugleich 51,6 Prozent an, schon davon gehört zu haben (Tabelle 12). Ein deutlicher Unterschied zeigte sich in diesem Zusammenhang hinsichtlich der Geschlechterdifferenzierung: Bei Frauen war die Technologie mit 41,5 Prozent wesentlich weniger bekannt als unter Männern (64,3 Prozent).

Bekanntheitsgrad des Begriffs „Nanotechnologie“ Tabelle 12

Antworten auf die Frage: „In letzter Zeit taucht der Begriff Nanotechnologie immer häufiger auf. Haben Sie davon schon gehört?“, in Prozent

Antworten	Insgesamt	Alter in Jahren			
		16–29	30–49	50–65	über 65
Ja	51,6	55,0	54,9	57,7	39,7
Nein	47,7	44,5	44,5	41,8	59,6
Keine Angabe	0,7	0,5	0,6	0,7	0,7

Stand: 2006.

Quelle: Rosenblatt et al., 2006, Tabellenanhang

Der Bekanntheitsgrad stieg zudem deutlich mit der Höhe des Schulabschlusses; dies gilt auch für die Wahrnehmung der Chancen gegenüber den Risiken (Tabelle 13).

Von denjenigen, die von diesem Begriff schon gehört hatten, konnten 64 Prozent jedoch keine näheren Angaben dazu machen und von denjenigen, die wiederum Angaben machen konnten, hatten 21 Prozent ein „vages“ und gerade 14 Prozent ein „fundiertes Wissen“.

Zur Frage, ob bei der Nanotechnologie die „Chancen“ oder die „Risiken“ überwiegen, konnten knapp 40 Prozent keine Aussage machen. Für 26 Prozent überwiegen weder Chancen noch Risiken, für 26,2 Prozent die Chancen und für 8,4 Prozent die Risiken (Tabelle 13).

Gemäß einer Befragung im Auftrag des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) im Herbst 2007 versprachen sich 66 Prozent der Befragten von der Nanotechnologie eher einen Nutzen als Risiken (BfR, 2008a, 33). Eine bedeutende

Bildungsgrad und Chancenwahrnehmung Tabelle 13

Antworten auf die Frage: „Manche halten es für fraglich, ob bei der Nanotechnologie die Chancen oder die Risiken überwiegen. Wie ist Ihre persönliche Meinung dazu? Wo auf dieser Skala würden Sie Ihre Meinung dazu einstufen?“, in Prozent

Wahrnehmung	Schulabschluss				Insgesamt
	Volksschul-/Hauptschulabschluss	Mittlere Reife, Realschulabschluss	Fachschule, Abitur	Sonstige	
Chancen überwiegen (1 + 2)	14,2	26,9	46,3	18,4	26,2
Weder noch (3)	26,8	28,2	22,0	26,3	26,0
Risiken überwiegen (4 + 5)	8,9	10,2	6,6	6,6	8,4
Keine Angabe	50,0	34,7	25,1	48,7	39,5

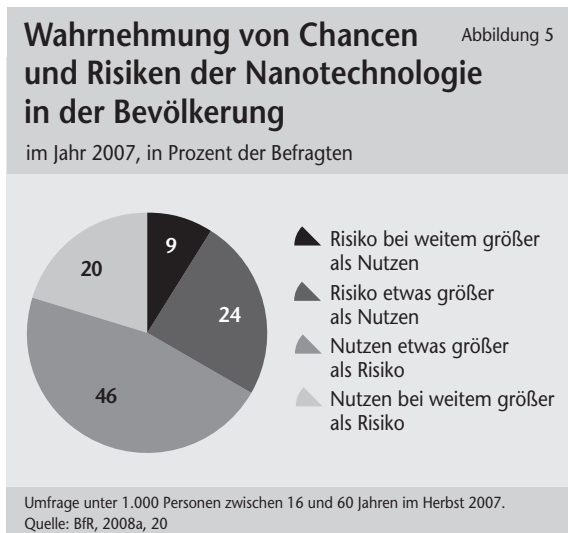
Beurteilung auf einer Skala zwischen 1 (= Chancen überwiegen) und 5 (= Risiken überwiegen).

Quelle: Rosenblatt et al., 2006, Tabellenanhang

Rolle spielten eher die „gefühlten Risiken“ als die Fakten. Allerdings hat diese Technologie mit ihrer Spezifizierung in den vergangenen Jahren an Bekanntheit gewonnen: 2004 kannten erst 15 Prozent den Begriff und 2007 bereits 52 Prozent (BfR, 2008a, 14).

Die in der Bevölkerung positive Einschätzung zeigte sich in der BfR-Befragung (2008a, 29 ff.) darin, dass hier 72 Prozent der Befragten voll und ganz der Meinung waren, dass man die Nanotechnologie zwar voranbringen, aber auch eventuelle Risiken im Blick behalten sollte. 66 Prozent schätzten ihr Risiko geringer als ihren Nutzen ein und 77 Prozent hatten ein sehr gutes bis gutes Gefühl bei der Nanotechnologie. Nur 33 Prozent wurde „angst und bange“, wenn man bedenke, wie viele Nanoprodukte es bereits geben sollte. Im Hinblick auf Verbraucherprodukte war die Akzeptanz besonders im Bereich der Oberflächenversiegelung groß. Doch je näher Nanoprodukte mit dem Körper in Berührung kommen (Textilien, Kosmetika) oder in den Körper gelangen (Lebensmittel), desto geringer wurde sie, wobei sich im medizinischen Bereich sowie bei Umwelt-, Schutz- und Sicherheitstechniken wiederum eine hohe Akzeptanz zeigte.

Die überwiegende Mehrzahl der Befragten vertraute bei Informationen über die Nanotechnologie (absolutes bis etwas Vertrauen) den Verbraucherorganisationen und den Wissenschaftlern (jeweils 92 Prozent) sowie den Ärzten (84 Prozent) und den Gesundheitsschutz- und Arbeitsschutzbehörden (82 Prozent). Das geringste Vertrauen wurde Führungskräften der Wirtschaft (32 Prozent) und Regierungsvertretern (23 Prozent) entgegengebracht (BfR, 2008a, 27).



Auch in der Berichterstattung der Medien wurde die Nanotechnik bislang eher als Chance gesehen (BfR, 2008b). Dies geht aus einer Medienanalyse in den Jahren 2000 bis 2007 bei neun Zeitschriften und Zeitungen (insgesamt 1.696 Artikel) hervor (Abbildung 6): 74,5 Prozent der Artikel waren in diesem Zeitraum chancenorientiert, 11,6 Prozent neutral und nur 3,7

Prozent risikoorientiert (mehr Chancen als Risiken: 5,1, ausgewogen: 4,0, mehr Risiken als Chancen: 1,2 Prozent) (BfR, 2008b, 77). Die Nutzenerkennung (bei insgesamt 2.076 Nutzenerkennungen) konzentrierte sich vor allem auf drei Bereiche: den ökonomischen Nutzen mit 36,8 Prozent, den wissenschaftlichen Nutzen mit 20,6 und den medizinischen Nutzen mit ebenfalls 20,6 Prozent (BfR, 2008b, 67). Die

Analyse zeigt, dass es in den Medien in keinem Jahr zu einem ausgesprochenen Risikodiskurs gekommen war.

Insgesamt gesehen ist die Nanotechnologie bei vielen zwar noch wenig bekannt, aber dennoch ist ihr Image und ihre Akzeptanz in der Bevölkerung und auch in den Medien gut (Abbildungen 5 und 6). Für Wirtschaft und Politik in Deutschland wird es darauf ankommen, noch mehr als bislang das Vertrauen in der Bevölkerung zu stärken.

Die Nanotechnologie in EU-Umfragen

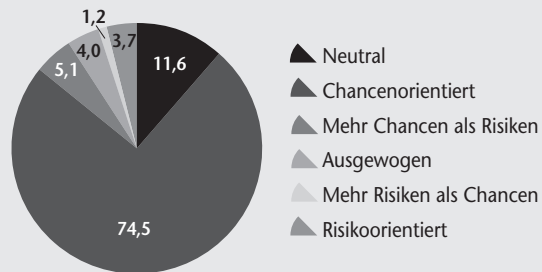
Demoskopische Aufmerksamkeit wurde der Nanotechnologie auch im Rahmen des Eurobarometers der Europäischen Kommission (Nr. 64.3) geschenkt (Gaskell et al., 2006, Anhang 2). Die Umfrage im Jahr 2005 in den Bevölkerungen der EU-25-Länder (n = 24.583) deckte neben der Biotechnologie als Hauptthema zusätzlich Meinungen zu anderen Technikgebieten ab, darunter auch die zur Nanotechnologie.

Zum Zeitpunkt der Umfrage hatte in der EU-25 gut jeder Zweite (56 Prozent) von der Nanotechnologie noch nichts gehört, 44 Prozent gaben aber an, dass sie ihnen bekannt sei. Einen hohen Bekanntheitsgrad von über 60 Prozent wiesen die kleineren nordischen Länder auf. Deutschland lag mit einem Bekanntheitsgrad von knapp 50 Prozent auf dem neunten Platz (Tabelle 14).

Wahrnehmung von Chancen und Risiken der Nanotechnologie in den Medien

Abbildung 6

Artikelorientierung in den Medien, im Zeitraum 2000–2007, in Prozent



Medienauswertung: 1.696 Artikel zur Chancen- und Risikobewertung aus neun Zeitschriften und Zeitungen zwischen Januar 2000 und Dezember 2007. Quelle: BfR, 2008b, 77

Bekanntheit des Begriffs „Nanotechnologie“ in der EU Tabelle 14

Antworten auf die Frage: „Haben Sie schon von der Nanotechnologie gehört?“, in Prozent

Land	Davon gehört	Davon nicht gehört
Dänemark	68,8	31,2
Luxemburg	62,6	37,4
Finnland	61,4	38,6
Schweden	61,2	38,8
Niederlande	60,9	39,1
Österreich	55,9	44,1
Frankreich	54,5	45,5
Tschechien	51,0	49,0
Deutschland	49,5	50,5
Belgien	49,4	50,6
Ungarn	46,3	53,7
Zypern	46,0	54,0
Vereinigtes Königreich	43,6	56,4
Slowakei	40,8	59,2
Italien	40,0	60,0
Estland	35,9	64,1
Spanien	32,5	67,5
Slowenien	29,7	70,3
Portugal	28,8	71,2
Malta	28,2	71,8
Griechenland	28,1	71,9
Polen	28,0	72,0
Lettland	27,9	72,1
Litauen	27,8	72,2
Irland	25,7	74,3
EU-15	45,8	54,2
EU-25	44,0	56,0

Stand: 2005.

Quelle: Gaskell et al., 2006, 17 (Anhang 2)

Relativ unbekannt war die Technologie (mit einem Bekanntheitsgrad von unter 30 Prozent) in acht von 25 EU-Ländern.

Angesichts des hohen sozioökonomischen Veränderungspotenzials der Nanotechnik für viele Wirtschafts- und Lebensbereiche ist auch für die EU die Frage nach der Akzeptanz durch die Bevölkerung von Bedeutung. Die EU-Umfrage zeigt, dass die Nanotechnik – trotz relativ großer Unbekanntheit – in Europa im Allgemeinen und in Deutschland im Besonderen von der Mehrzahl der Befragten akzeptiert wird (Tabelle 15).

Im Vergleich zur EU ist die Einschätzung der Nanotechnologie als ein Risiko für die Gesellschaft in Deutschland geringer verbreitet: Wenig mehr als jeder fünfte Deutsche war 2005 der Meinung, sie sei für die Gesellschaft ein Risiko; in Europa insgesamt dagegen gut jeder Vierte.

Knapp 60 Prozent der Deutschen (59,7 Prozent) wie auch der Europäer (EU-25: 57,6 Prozent; EU-15: 58,9 Prozent) würden der Nanotechnik unter den Bedingungen mehr oder weniger strenger rechtlicher Regelungen zustimmen (Gaskell et al., 2006, 18; Anhang 2).

Im Vergleich zu anderen Technologien wird dieser Technik allerdings in Europa mit das geringste Lebensverbesserungspotenzial zugetraut. Deutschlands Bevölkerung ist hier nicht hoffnungsvoller gestimmt als der Durchschnitt der Europäer

Bewertung der Nanotechnologie durch die EU-Bevölkerung

Tabelle 15

Die Nanotechnologie ist ... (Angaben in Prozent)

Region/Land	... ethisch akzeptabel	... nützlich für die Gesellschaft	... gefährlich für die Gesellschaft
EU-25	59,8	62,1	25,2
EU-15	61,1	63,3	25,7
Deutschland	63,5	64,9	22,6

Stand: 2005; jeweils zustimmende Antworten; Rest zu 100 Prozent: nicht zustimmend beziehungsweise weiß nicht.
Quelle: Gaskell et al., 2006, 17 (Anhang 2)

(Tabelle 16). Jedoch trauen hierzulande noch weniger Befragte der Gentechnik, der Raumfahrt und der Kernenergie einen positiven Einfluss auf das Leben zu.

An eine Verbesserung des Lebens durch die Nanotechnologie glaubten in der EU-25 nur 40 Prozent und in Deutschland ebenfalls nicht viel mehr Menschen. Ein jeweils hoher Anteil konnte sich hierzu nicht äußern (EU-25: 42, Deutschland: 26 Prozent). Mit Abstand nahm die Kernenergie den untersten Platz ein, dies gilt in besonderer Weise für Deutschland. Im Vergleich dazu wurde der Nanotechnologie noch ein wesentlich höheres Potenzial zur Verbesserung des Lebens zuerkannt.

Lebensverbesserung durch Technik?

Tabelle 16

Das Leben in den kommenden 20 Jahren werde sich durch diese Techniken verbessern, sagten ... Prozent der Befragten

Techniken	EU-25	EU-15	Deutschland
Computer und Informationstechnik	79	78	67
Sonnenenergie	78	79	66
Windenergie	74	73	54
Mobiltelefon	58	55	44
Biotechnik	56	56	54
Gentechnik	49	48	33
Raumforschung	44	43	36
Nanotechnik	40	42	41
Kernenergie	32	31	18

Stand: 2005.
Quelle: Gaskell et al., 2006, 17 ff. (Anhang 2)

Die Wahrnehmung der Nanotechnologie in den USA

Die USA gelten in der Nanotechnologie als weltweit führend. Nicht zuletzt wegen der hohen Finanzsummen, die in die Forschung fließen, ist anzunehmen, dass diese Technologie weiten Teilen der Bevölkerung bekannt und auch akzeptiert ist. Inwieweit dies zutrifft, soll im Folgenden dargelegt werden.

Gemäß einer telefonischen Bevölkerungsumfrage der North Carolina State University aus dem Jahr 2004 (n = 1.536) (Cobb/Macoubrie, o. J.) war mehr als jedem zweiten US-Bürger (51,8 Prozent) der Begriff nicht bekannt, 31,8 Prozent

hatten davon erst wenig und 16,4 Prozent schon etwas oder eine Menge gehört. Die meisten Befragten verfügten dabei nur über wenig Wissen hinsichtlich dieser Technologie. Dabei schätzten 38,3 Prozent die Risiken gleich hoch wie die Chancen ein, und für 39,8 Prozent war der Nutzen höher als die Risiken. Je höher das Wissen über die Technik ausfiel, desto eher wurden auch die Chancen über die Risiken gestellt.

57,2 Prozent sahen das Chancenpotenzial in neuen Wegen der Entdeckung und Behandlung von menschlichen Krankheiten. Vermieden werden sollten nach Meinung von 31,9 Prozent ein Verlust der Privatsphäre und für 23,8 Prozent ein Wettrüsten, 18,6 Prozent befürchteten das Einatmen von Nanopartikeln. Vor unkontrollierter Verbreitung von sogenannten Nanorobotern warnten 12 Prozent der Befragten.

Zuversichtlich bezüglich der Nanotechnologie äußerten sich 70,1 Prozent, beunruhigt dagegen nur 15,5 Prozent (Tabelle 17).

Zuversicht und Beunruhigung durch die Nanotechnologie in den USA

Tabelle 17

in Prozent

Grad der Zuversicht		Grad der Beunruhigung	
Nicht zuversichtlich	21,2	Nicht beunruhigt	80,3
Nur wenig zuversichtlich	8,7	Nur wenig beunruhigt	4,2
Eher zuversichtlich	36,3	Eher beunruhigt	9,6
Sehr zuversichtlich	33,8	Sehr beunruhigt	5,9

Telefonische Umfrage unter 1.536 US-Bürgern ab 18 Jahren im Frühjahr 2004.

Quelle: Cobb/Macoubrie, o. J., 22

Nur eine Minderheit in den USA zeigte sich über die Nanotechnologie beunruhigt. Dies verweist auf die grundsätzlich positive Aufgeschlossenheit der amerikanischen Gesellschaft gegenüber dieser Technik – trotz ihres relativ geringen Bekanntheitsgrads und mancher Negativ-Szenarien. Ob die Wirtschaft beziehungsweise das Unternehmensmanagement schließlich die Risiken der Nanotechnologie minimiere, daran glaubte die Mehrzahl allerdings weniger (60,4 Prozent); 39,6 Prozent waren hiervon etwas bis viel überzeugt. Vertrauen gegenüber der Wirtschaft ist damit in dieser Angelegenheit nur bei vier von zehn Befragten gegeben.

Die Wahrnehmung einzelner Risiken durch die amerikanische Bevölkerung ab 18 Jahren (n = 1.015) einerseits und Nanoexperten (n = 363) andererseits wurde im Sommer 2007 von der University of Wisconsin-Madison untersucht (Scheufele et al., 2007). Hierbei zeigte sich, dass der Anteil der Wissenschaftler,

die Risiken für die Umweltverschmutzung und Gesundheitsgefahren sahen, jeweils höher war als der in der Bevölkerung; bei den übrigen Risikofeldern (Verlust der Privatheit, terroristischer Missbrauch, Wettrüsten, Verlust von Arbeitsplätzen, sich selbst replizierende Nanoroboter) war es jeweils ein größerer Anteil in der Bevölkerung als unter den Wissenschaftlern, der solche Risiken befürchtete.

Insgesamt machen die internationalen Umfragen deutlich: Sowohl in der EU als auch in Deutschland und in den USA war die Nanotechnologie zum Zeitpunkt der Umfragen bei vielen Menschen nicht bekannt. Dabei scheint die Chancenwahrnehmung in Europa ähnlich ausgeprägt zu sein wie in den USA. Die Toxikologen Krug/Fleischer (2007, 49) kommen für Deutschland aber zu dem Schluss, „dass die überwiegende Mehrheit der allgemeinen Öffentlichkeit gegenwärtig nicht an Nanotechnologie interessiert ist oder sie ignoriert.“

Nanotechnikfolgen: vielfältige Dimensionen

Seit den US-Publikationen von Drexler (1986) und Joy (2000) bewegen vielfach unrealistische Horrorvisionen – zum Beispiel sich selbst organisierende und unkontrolliert replizierende Nanoroboter (Assembler), welche die Welt durch Zermahlung ihrer Biosphäre zu grauem Schleim („grey goo“) unbewohnbar machen könnten – die Gemüter. Der US-Informatiker Joy (2000, 49) führte zum Beispiel aus: „Wie die Kerntechnik, so lässt sich leider auch die Nanotechnologie leichter für zerstörerische als für konstruktive Zwecke nutzen. Die Nanotechnologie bietet leicht erkennbare militärische und terroristische Anwendungsmöglichkeiten, und man braucht nicht einmal ein Selbstmörder zu sein, um destruktive nanotechnische Instrumente massiv einzusetzen, denn diese Instrumente lassen sich so konstruieren, dass sie ihre Zerstörungskraft selektiv entfalten und zum Beispiel nur bestimmte Regionen oder bestimmte Menschen mit spezifischen genetischen Merkmalen treffen.“ Die kanadische Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC-Group) forderte deshalb ein sofortiges Moratorium für die kommerzielle Produktion neuer nanoskaliger Materialien und eine weltweite Förderung der wissenschaftlichen Bewertung der sozialen, gesundheitlichen und ökologischen Implikationen der Nanotechnologie (Baumgartner, 2004, 41). Baumgartner (2004, 41) stellte vor diesem Hintergrund fest: „Der weltweiten nahezu exponentiellen Zunahme natur- und ingenieurwissenschaftlicher Publikationen zur Nanotechnologie steht eine verschwindend geringe Anzahl von Veröffentlichungen gegenüber, in denen die ethischen Aspekte der Nanotechnologie thematisiert werden“. Durchforstet man die Suchmaschine „Google“, so tauchen bei Eingabe der deutschen Begriffe „Ethik“ und „Nanotechnologie“ 198.000 Hinweise auf, bei den Begriffen „Ökonomie“ und „Nano-

technologie“ 64.000 und im Zusammenhang mit dem Begriff „Wirtschaft“ etwa 1.030.000 Hinweise; bei Eingabe der englischen Begriffe „Nanotechnology“ und „Ethics“ allerdings rund 1.190.000 Dokumentenhinweise [Stand: 2008-07-09].

Wegen ihres großen Querschnitts- und Anwendungspotenzials wird im Bereich der Lebenswissenschaften sowie der Einwirkungen auf die Umwelt und möglicher militärischer Anwendungen derzeit eine Nanoethik als „Bereichsethik“ vorgeschlagen (Gammel, 2007). Als auch aus anderen Technikanwendungen bekannte ethische Dimensionen werden für die Nanotechnik etwa folgende Bereiche genannt: Risikoethik, Verteilungsgerechtigkeit, Schutz der Privatsphäre, medizinethische Aspekte, militärische Nutzung und anthropologische Aspekte („Citizen Cyborg“, eine Verschmelzung zwischen Mensch und Technik) (Gammel, 2007, 16; vgl. auch Stöber/Türk, 2006 und Schummer, 2006). Nach Auffassung von Schummer sind Nano-Prophezeihungen wie zum Beispiel die Drexlers (goldenes Zeitalter oder Untergang der Welt) eng mit dem christlichen Fundamentalismus in den USA verknüpft, bei dem es um Endzeitstimmung oder um Erlösung gehe (Schummer, 2006, 269 ff.). Besonders unter den Transhumanisten, welche die Erschaffung einer besseren menschlichen Existenz durch Technik befürworten, hätten Drexlers Ansichten viele Anhänger gefunden.

In diesem Ethik- und Risikodiskurs spielt in Anbetracht der Ambivalenz der Wirkungen der (Nano)technik als Argumentation vor allem das Vorsorgeprinzip eine Rolle, das wiederum dem Verantwortungsprinzip (auch gegenüber der Nachwelt) geschuldet ist („Verantwortungs-“ statt „Gesinnungsethik“). Grunwald (2004), Leiter des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruhe, vertritt die Auffassung, dass es keiner speziellen Nanoethik bedürfe, da viele ethische Fragen bereits aus anderen Kontexten bekannt seien. Gefragt sei die Bereitschaft der Ethiker, sich offen mit den ethischen Aspekten der Nanotechnologie über die „Bindestrich-Ethiken“ hinweg zu befassen. Angesichts der langen Tradition allgemeiner und grundsätzlicher ethischer Technikdiskurse (in Deutschland) scheint diese Einschätzung zuzutreffen (vgl. zum Beispiel Jonas, 1979; Lenk/Ropohl, 1987). Dabei werden Technikreflexionen als die Technikentwicklung begleitende soziale Prozesse aufgefasst; dies gilt auch für die Nanotechnik (Grunwald, 2004).

Gerade auch die „gefühlten“ Risiken in der Bevölkerung sind für Wissenschaft und Politik Anlass, sich mit Risiken und Chancen auseinanderzusetzen (vgl. zum Beispiel BMBF, 2008). Ein wichtiges Argument für das staatliche Interesse an der Aufklärung von Technikfolgen ist dabei nicht nur die Vermeidung einer Fehlallokation staatlicher Mittel in (ökologisch und gesundheitlich) möglicherweise risikoreiche Techniken, sondern auch das Bemühen um mehr Akzeptanz

und Akzeptabilität²² und damit um Vertrauen zur Vermeidung zu heftiger gesellschaftlicher Technikkonflikte. Mit der verstärkten öffentlich geförderten Nanotechnologieforschung setzte deshalb zu Beginn des neuen Jahrhunderts eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit möglichen Nanotech-Folgen (Innovations- und Technikanalyse, ITA, siehe unter Literatur bei Fleischer et al., 2004), aber auch die Suche nach rechtlichen Regelungen ein. So wird wie in den USA (Davies, o. J.) und auch in Deutschland nach rechtlichen Regelungen für die Anwendung der Nanotechnologie gesucht. Vom Umweltbundesamt wurde 2006 ein Rechtsgutachten zur Einschätzung des bestehenden Rechtsrahmens zur Nanotechnologie, des Regulierungsbedarfs und der Regulierungsmöglichkeiten vorgelegt (Führ et al., 2006). Eindeutige rechtliche Regelungen im Umgang mit der Technik wirken sich stärkend auf die Nachfrage aus. Solche Regelungen müssen jedoch auf sorgfältigen Risikoeinschätzungen beruhen. Nicht zuletzt vonseiten der EU-Kommission (Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2008b) wurde in einer Mitteilung an das Europäische Parlament auf die Bedeutung der Anpassung rechtlicher Regelungen hingewiesen; nach Einschätzung der Kommission geht es dabei in erster Linie um eine Verbesserung der Umsetzung bestehender Bestimmungen und eine Vertiefung des Wissens um mögliche Gefahren und Risiken.

Die EU-Kommission (Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2008a) verabschiedete für Universitäten, Forschungsinstitute und Unternehmen einen Verhaltenskodex, um eine verantwortungsvolle und sichere Entwicklung und Anwendung der Nanotechnik im Sinne einer „Kultur der Verantwortung“ zu unterstützen. Dabei ist die EU bestrebt, diese Empfehlungen weiter zu verbreiten. Der Kodex soll alle zwei Jahre überprüft und der Entwicklung angepasst werden. Seine verschiedenen Grundsätze sind: verständliche Darlegung der Forschung für die Öffentlichkeit und Wahrung ihrer Grundrechte, Berücksichtigung des Prinzips der Nachhaltigkeit, Berücksichtigung potenzieller Folgen, die Integration aller Akteure und ihr freier Informationszugang, Berücksichtigung des höchsten wissenschaftlichen Forschungsstandards, Unterstützung von Kreativität und Flexibilität sowie eine Rechenschaftspflicht der Forschungseinrichtungen hinsichtlich möglicher Folgen für heutige und künftige Generationen. Das bedeutet eventuell, dass die Forscher zur Rechenschaft über die – sogar nicht beabsichtigten – künftigen Folgen ihrer Tätigkeit gezogen werden können.

²² Akzeptanz stellt einen empirischen Wert über die subjektive Akzeptanz einer Technik in der Gesellschaft dar; Akzeptabilität fragt danach, unter welchen normativen Bedingungen aus der Sicht der Ethik Technikakzeptanz erwartet werden kann (Grunwald, 2005).

So bedeutsam die Empfehlungen sind, so schwierig wird es sein, sie einzuhalten, dies besonders vor dem Hintergrund der oft kritisch diskutierten Techniksteuerung in einer freien und offenen Gesellschaft. Ein risikofreier Umgang mit neuen Technologien – Vermeidung negativer (Neben)folgen – erscheint zudem angesichts ihres komplexen Potenzials unwahrscheinlich; oft kann erst ein breites Erfahrungswissen Risiken freilegen, um dann die Technik zu verbessern. Eine Rechenschaftspflicht der Forschung ist verantwortungsethisch wünschenswert, sie impliziert aber die Tendenz zur Forschungszurückhaltung.

In Deutschland legte das Umweltbundesamt 2006 ein Hintergrundpapier zu den Chancen und Risiken der Nanotechnik für Mensch und Umwelt vor und wies unter anderem darauf hin, dass etwa bei Nanopartikeln noch viele Fragen offen seien, zum Beispiel die nach der Stabilität und Langlebigkeit, dem Zerfall oder der Agglomeration (Zusammenballung), der Wasserlöslichkeit oder der Wechselwirkung mit anderen Materialien (Umweltbundesamt, 2006, 12). Mögliche Umweltentlastungspotenziale werden in folgenden Punkten gesehen: Einsparung von Rohstoffen durch Miniaturisierung, Einsparung von Energie durch Gewichtsreduktion oder Funktionsoptimierung, Verbesserung der Reinigungsleistung von Filtersystemen oder eine Verminderung des Einsatzes oder des Ersatzes gefährlicher Stoffe (Umweltbundesamt, 2006, 8 ff.).

Das Umweltbundesamt warnte vor Nanomaterialien, „die als freie Partikel in Produkten enthalten sind, zum Beispiel in Kosmetika. Solange Nanopartikel fest in Materialien eingebunden sind, ist eine Gefährdung kaum zu erwarten“ (Umweltbundesamt, 2006, 12). Es wies ebenso darauf hin, dass noch erhebliche Informationslücken und daher ein hoher Forschungsbedarf bestehe.²³

Insgesamt betonen die Toxikologen Krug und Fleischer (2007, 50) angesichts der steigenden Marktbedeutung von Nanomaterialien: „Nanomaterialien sollten ... weiterhin eingehend auf ihre möglichen negativen Folgen für Mensch und Umwelt untersucht werden, um abschließende Risikobewertungen nach hergebrachten Mustern und Verfahren durchführen zu können, wie wir sie heute bereits von Chemikalien kennen.“ Auch in der BSI-Studie heißt es: „Der Stand der Forschung im Hinblick auf potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte sollte weiter verbessert werden. Die dafür notwendigen Forschungsanstrengungen sind dringend erforderlich, da sich aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen Hemmnisse für die Markteinführung von nanoskalaren Produkten ergeben könnten“ (BSI,

²³ Eine Studie im Auftrag der EU im Projekt „Nanoderm“ (Butz et al., 2007) kam derweil zu dem Ergebnis, dass Nanopartikel in Sonnenschutzcremes keine schädigenden Wirkungen haben, da sie in den obersten Hautschichten stecken bleiben.

2007, 167). Allerdings gibt es auch Nanopartikel, die seit langem schon auf den Menschen einwirken. Sie entstehen bei Vulkanausbrüchen, beim Rauchen, durch Laserdrucker, brennende Kerzen, Motoren (Feinstaub) oder den Abrieb von Autoreifen. Die Nanoforschung ermöglicht es, diese Wirkung auf den Menschen besser zu untersuchen. Mitentscheidend für die gesundheitlichen Folgen sind – wie auch in anderen Bereichen – Dosis und Konzentration.

Besonders im Hinblick auf mögliche Gefahren durch technische Nanopartikel wird oft an die Asbestdiskussion erinnert (BSI, 2007). Der BSI-Bericht führt dazu aus: „Im Jahre 1898 warnte die britische Fabrikinspektorin Lucy Deane vor den schädlichen Wirkungen von Asbeststaub. In den Jahren 1998–1999 wurden von der EU alle Formen von Asbest verboten“ (BSI, 2007, 166). Zwischen Warnung und endgültigem Verbot lagen damit genau 100 Jahre.

So geht es im Gesundheitsbereich vor allem um Nanoteilchen, die über das Einatmen oder Verletzungen der Haut in den Körper gelangen und sich über die Blutbahn oder das Lymphsystem ausbreiten können. Befürchtet wird, „dass Nanoteilchen in der Luft nach dem Einatmen direkt von der Nase ins Gehirn gelangen können“ (BSI, 2007, 165). Noch wenig bekannt sind die Auswirkungen dieser Teilchen auf Umwelt und Tierwelt. Nach Presseberichten haben Forscher an der Universität Edingburgh an Mäusen nachgewiesen, dass lange, dünne Kohlenstoff-Nanoröhrchen im Körper ähnliche lungenschädigende Wirkungen entfalten könnten wie lange Asbestfasern und empfehlen weitere aufklärende Studien (SPIEGEL ONLINE, 2008).

Die Sicherheit im Umgang mit der Nanotechnologie in einer Innovationsgesellschaft wie Deutschland ist für die Bundesregierung und für die Wirtschaft ein ernstes Anliegen, mögliche Chancen und Risiken (Übersicht 4) gilt es zu erforschen. Dies betrifft speziell die Versicherungswirtschaft in Bezug auf Haftpflichtfälle aus den Bereichen Berufswelt, Transportwesen und Umwelt sowie die Produkthaftung (vgl. hierzu zum Beispiel Münchener Rück, 2002; Swiss Re, 2004; Allianz Group/OECD, 2005). So wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin vom Verband der Chemischen Industrie (baua/VCI, 2007) ein Leitfaden für Arbeitnehmer zum sicheren Umgang mit Nanomaterialien entwickelt. Hierin werden sowohl organisatorische Maßnahmen im Herstellungsprozess als auch persönliche Schutzmaßnahmen (Atemfilter, Schutzkleidung) und besonders die Vermeidung von Partikelemissionen an der Entstehungsquelle, zum Beispiel durch geschlossene Reaktoren oder Absaugeinrichtungen oder das weitestgehende Vermeiden von Stäuben, erläutert.

Besonders eine Risikokommunikation, die Vertrauen in diese neue Schlüssel-technologische Innovation schafft und alle Beteiligten (Wissenschaft, Politik,

Chancen und Risiken der Nanotechnologie

Übersicht 4

Ausgewählte Beispiele

Chancen	Risiken
Umweltschutz	
<ul style="list-style-type: none">• Innovationen im Bereich Energietechnik (zum Beispiel Photovoltaik, Speichermedien, Brennstoffzellen)• Effizientere Prozessgestaltung und so Einsparung von Stoff- und Energieströmen entlang des Lebenszyklus	<ul style="list-style-type: none">• Mobilisierung von Schadstoffen nach der Freisetzung von Nanomaterialien in die Umwelt• Unsicherheit über das Langfristverhalten in der Umwelt (zum Beispiel Anreicherung in der Nahrungskette, Beeinträchtigung des ökologischen Gleichgewichts)
Menschliche Gesundheit	
<ul style="list-style-type: none">• Gezieltere Medikamentenapplikation und so geringere Nebenwirkungen• Neue Therapiemethoden für bislang unheilbare Krankheiten	<ul style="list-style-type: none">• Exposition der Arbeitnehmer bei industriellen Prozessen• Gefährdung der Verbraucher durch unzureichend geprüfte Produkte
Unternehmen	
<ul style="list-style-type: none">• Kosteneinsparung durch effizientere Prozessgestaltung• Erschließung neuer Märkte, Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit	<ul style="list-style-type: none">• Wandel des bislang positiven öffentlichen Meinungsbilds bei Negativschlagzeilen• Keine Versicherbarkeit der Risiken

Quelle: Hermann et al., 2007, 3

Wirtschaft und Öffentlichkeit) einbezieht, ist für ihre Diffusion und damit für deren Nutzen unerlässlich. Dies gilt auch für den Arbeitsschutz in Nanotech-Unternehmen, in denen etwa die Gefahr des Einatmens von Nanopartikeln gegeben sein kann. Gefahren gehen dabei etwa von ungebundenen synthetischen Nanopartikeln oder von freigesetzten Partikeln aus, die in den Organismus gelangen.

Die Vereinten Nationen schätzen, dass 2005 im Bereich der Nanotechnik weltweit knapp 8 Milliarden Euro für die angewandte Entwicklungsforschung, aber nur 30 Millionen Euro für die Forschung von Wirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt aufgewendet wurden (Schnappauf, 2007, 2). Im Rahmen des 5. und 6. Rahmenprogramms der Europäischen Kommission wurden für Projekte, die sich auf Umwelt- und Gesundheitsaspekte der Nanotechnologie bezogen, rund 28 Millionen Euro ausgegeben (Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2007, 4).

In Deutschland stellte das BMBF 2006 im Projekt NanoCare²⁴ für drei Jahre 5 Millionen Euro zur Verfügung. Die Industrie erhöhte diese Summe auf

²⁴ NanoCare – Gesundheitsrelevante Aspekte synthetischer Nanopartikel: Schaffung einer allgemeinen Informations- und Wissensbasis als Grundlage für eine innovative Materialforschung.

7,6 Millionen Euro (BMBF, 2006d). Inhalt dieses Projekts ist es, die Wirkung von Nanopartikeln auf Umwelt und Gesundheit zu erforschen. Beteiligt sind 13 Partner unter anderem aus Industrie und Wissenschaft. Ergänzt wird das NanoCare-Projekt von zwei weiteren Projektverbänden (INOS²⁵, TRACER²⁶) mit staatlicher und industrieller Unterstützung von insgesamt gut 4 Millionen Euro.²⁷ Um die Risikodebatte mit der Öffentlichkeit aktiv zu führen, hat die Bundesregierung Ende 2006 eine Kommission mit dem Schwerpunkt Nanomaterialien eingesetzt. An der Kommission beteiligt sind Unternehmen, Behörden, Verbände, Gewerkschaften und die Wissenschaft (Catenhusen, o. J.).

Im Rahmen der NNI in den USA wurden für die Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsforschung zwischen 2005 und 2007 umgerechnet mehr als 77 Millionen Euro ausgegeben; 2007 waren es schätzungsweise 31 Millionen Euro (2006: 24,2 Millionen); für 2008 wurden 33,7 Millionen beantragt (National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, 2007, 5 und 11). Bezogen auf das NNI-Budget für 2008 in Höhe von insgesamt 960 Millionen Euro waren dies aber nur knapp 4 Prozent. Auch andere Länder wie etwa Großbritannien, Japan oder die Schweiz unternehmen in der Risikoforschung große Anstrengungen (Krug/Fleischer, 2007, 48).

Es ist bislang unbestritten, dass die Nanotechnologie (besonders manche Nanoröhrchen) neben vielen Chancen auch Risikopotenziale birgt. Dies rechtfertigt eine angemessene Risikoforschung, bevor Akzeptanzprobleme massiv manifest werden, damit aus dieser Technologie eine sozioökonomisch wirkungsvolle Basisinnovation wird. Eine vorbeugende Risikoforschung dient daher der Marktdiffusion einer neuen Technologie als einer der tragenden Faktoren einer neuen langen Welle.

Deutschland ist inzwischen weltweit Vorreiter im zertifizierten Risikomanagement bei der Nanotechnologie. So bietet der TÜV Süd in Zusammenarbeit mit der Innovationsgesellschaft mbH, St. Gallen, seit 2007 das weltweit erste zertifizierbare Risikomanagement- und Monitoringsystem für die Nanotechnologie an. Mit dem branchenunabhängigen System sollen potenzielle Risiken und Chancen der Nanotechnologie und deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt schnell und umfassend identifiziert, analysiert und bewertet werden (TÜV Süd,

²⁵ INOS – Identifizierung und Bewertung von Gesundheits- und Umweltauswirkungen von technischen nanoskaligen Partikeln.

²⁶ TRACER – Toxikologische Bewertung und Funktionalisierung von Kohlenstoff-Nanomaterialien.

²⁷ Im Auftrag des BMBF (Farkas et al., 2004) wurde zudem 2002 an ein Konsortium eine Innovations- und Technikanalyse zum Thema „Nanotechnologie pro Gesundheit“ vergeben.

o. J.). Doch auch eine noch so gründliche Risikoforschung vermag es nicht, eine vollkommene Sicherheit bei neuen Technologien im Allgemeinen und der Nanotechnik im Besonderen zu schaffen. Gleichwohl ist eine intensive und unbürokratische Beschäftigung mit den Folgen neuer Technologien im Sinne einer Technikverbesserung notwendig. Zwar sollten Wissenschaft und Technik in einer freien Gesellschaft nicht gesteuert werden, sich wohl aber an konsensfähigen Leitbildern (zum Beispiel Nachhaltigkeit) orientieren. So gilt auch im Umgang mit der Nanotechnik für eine freie Gesellschaft die folgende Einsicht von Hayeks (1981, 236): „Der Mensch ist und wird niemals der Herr seines Schicksals sein. Gerade seine Vernunft schreitet immer weiter voran und führt ihn ins Unbekannte und Unvorhergesehene, wo er neue Dinge lernt.“ Der technische Fortschritt in Form der Nanotechnik ist ein Beleg dafür.

6

Zusammenfassung

Einleitend knüpft der Beitrag an das Konzept langer Wellen der Wirtschaftsentwicklung von Kondratieff und Schumpeter an. Danach gelten (technische) Innovationen als Mittel der Wirtschaft im Wettbewerb, um die Depression zu überwinden, was im Prozess der „schöpferischen Zerstörung“ zur Evolution führt. Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sehen heute in der Nanotechnik im Zusammenspiel mit der Bio- und Gentechnik sowie der Informationstechnik eine weitere Schlüsseltechnologie, die einen nächsten Kondratieffzyklus mit einer Dauer von 45 bis 60 Jahren unterstützen könnte: Es entstehen neue Märkte, neue Arbeitsplätze und Einkommen, neue Unternehmen und alte Industrien werden durch Produktverbesserungen gestärkt – die Wirtschaft verändert sich und kann wachsen.

Die nähere Ausleuchtung sozioökonomischer Dimensionen der Nanotechnik hat gezeigt, dass sie das Potenzial birgt, zu einer solchen langen Welle mit tragenden schlüsseltechnologischen Innovationen heranzureifen und mehr als eine Modeerscheinung zu sein. Dies ergibt sich aus ihren real-technischen, ökonomischen und zivilisatorisch-kulturellen Implikationen:

- Ihr **real-technisches** Potenzial als ein technisches Querschnittsgebiet fußt zum einen auf der Tatsache der auf quantenphysikalischer Ebene andersartigen Eigenschaften der Materie und zum anderen auf der Möglichkeit einer gezielten Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen und damit der „Pro-

duktion“ neuer Stoffe, woraus sich gänzlich neue und/oder verbesserte Produkte ergeben. Dabei ist sie eher eine logische Fortsetzung des evolutionären Machbarkeits- und Miniaturisierungstrends als eine neue technische Revolution.

- Das **ökonomisch** Interessante an ihr ist, dass die Leistungsfähigkeit bei abnehmender Größe und sinkendem Ressourcenverbrauch steigt („nanoökonomischer Skaleneffekt“). Es ist möglich, bei sinkendem Faktoreinsatz den Output überproportional zu steigern. Entsprechend groß ist ihr Anwendungsspektrum: Es reicht von Produkten der Feinmechanik/Optik usw. über die der Chemie, Pharmazie und Medizin sowie der Ernährung, denen der EDV-Geräte/Elektrotechnik und denen des Fahrzeug- und Maschinenbaus, des Textilwesens, des Bauwesens, der Umwelt- und Energietechnik usw. bis hin zu neuen Materialien für viele Branchen. Sie tangiert im Anwendungsbereich damit in gewisser Weise immer mehr Industriebereiche. So schickt sie sich an – wie schon die Mikroelektronik – quasi „ubiquitär“ zu werden, das heißt sie durchdringt – besonders mit Verbesserungsinnovationen auch für „alte Industrien“ – nach und nach das gesamte Wirtschaftsleben. Damit erfahren die Leistungsgesellschaft und ihre Strukturen neue expansive Entwicklungsimpulse, um Lähmungen zu überwinden.

Betrachtet man als wichtige Hersteller- und/oder Anwenderbranchen der Nanotechnik im deutschen Verarbeitenden Gewerbe nur die Wirtschaftszweige des Fahrzeugbaus, der Elektrotechnik/Elektronik/Optik usw., die Chemische Industrie und die Pharmaindustrie, die Textilwirtschaft, die Ernährung und den Maschinenbau, so hätte sie bei konsequenter Umsetzung direkt oder indirekt Einfluss auf jeweils über zwei Drittel der Beschäftigten, des Umsatzes, der Entgelte und der Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes.

Obwohl sich das Weltmarktpotenzial der Nanotechnik nicht genau abschätzen lässt und Voraussagen einer hohen Unsicherheit unterliegen, weisen Schätzungen für Teilmärkte in mancher Hinsicht auf erhebliche Marktchancen hin. Mit prognostizierten bis zu zehn Millionen Arbeitsplätzen weltweit im Jahr 2014 gehen damit große Erwartungen einher.

- Zugleich beinhaltet die Nanotechnik aber auch ein großes **zivilisatorisch-kulturelles** Potenzial an Fortentwicklungen: Das Zeitalter der technischen Zivilisation erhält einen weiteren Schub an neuen Machbarkeiten. Verbunden damit sind nicht selten Fortschrittvisionen transhumanistischer Art, die mithilfe dieser Technik die organische Mängelhaftigkeit (und die damit verbundene Leistungsbegrenzung) des Menschen durch weitere Eingriffe in biologische Prozesse endgültig überwunden sehen wollen. Damit symbolisiert diese Technik die Fortsetzung des wohl anthropologisch angelegten menschlichen Triebs, seine Grenzen

zu überschreiten, sich selbst als Mensch und seine Lebensbedingungen zu verbessern (Human Enhancement). Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels wie des verschärften globalen Wettbewerbs scheint sich denn auch eine verstärkte Marktnachfrage nach solchen leistungssteigernden neuen Techniken zu entwickeln, die dieses Ziel auch ökonomisch lohnenswert erscheinen lassen.

Wo steht Deutschland bei dieser ubiquitären Technik? Heute steht es in der internationalen Nanoforschung mit in der ersten Reihe; manche deutsche Wissenschaftler waren und sind ihr Wegbereiter. Nach wie vor wird Deutschlands Ausgangsposition (FuE-Aufwendungen, Patentanmeldungen, Publikationen) bei der internationalen Rivalität um die sozioökonomisch leistungssteigernde Nanotechnik als erfolgreich eingestuft. Auch Deutschlands Nano-Bildungslandschaft bietet gute Voraussetzungen. Positiv anzumerken ist weiterhin, dass schon vor beziehungsweise etwa zeitgleich mit dem Beginn des amerikanischen NNI-Programms Ende der 1990er Jahre auch hierzulande die Nanotechnik nicht nur in einzelnen Fachprogrammen gefördert, sondern zusätzlich mit der Gründung von Nano-Kompetenzzentren sowie mit der Einrichtung von speziellen Studiengängen begonnen wurde.

In näherer Zukunft wird es für Deutschland nicht nur auf eine Stärkung der Marktprozesse und auf eine weitere Gründerwelle auf dem Sektor der Nanotechnik ankommen, sondern vor allem auch darauf, bei der Vermarktung nanotechnologischer Inventionen erfolgreich zu sein. Hilfreich dabei ist der international eingesetzte Normungsprozess bei der Nanotechnologie, an dem die deutsche Wirtschaft entscheidend mitwirkt. Allerdings ist der momentane Ingenieurmangel in Deutschland im Hinblick auf Weiterentwicklungen und Anwendungen mit Sorge zu betrachten.

Literatur

Abicht, Lothar / Schlicht, Ekkehard / Schumann, Uwe, 2005, Trendqualifikationen in der Nanotechnologie, Halle, URL: http://www.isw-institut.de/nano/dokumente/KURZE_FASSUNG.pdf [Stand: 2008-06-18]

Abicht, Lothar / Freikamp, Henriette / Schumann, Uwe, 2006, Ermittlung von Qualifikationserfordernissen in der Nanotechnologie, Thessaloniki, URL: http://www.training-village.gr/etv/Upload/Information_resources/Bookshop/426/5170_de.pdf [Stand: 2008-03-07]

Allianz Group / OECD, 2005, Small sizes that matter: Opportunities and risks of Nanotechnologies, URL: http://www.allianz.com/migration/images/pdf/saobj_796424_allianz_study_nanotechnology_engl.pdf [Stand: 2008-04-28]

Ark, Bart van, 2004, Global trends in Productivity: What makes the difference? Does the European Union Need to Revive Productivity Growth?, Vortrag vom 1. Dezember, München, URL: http://www.roman-herzog-institut.de/CMM/Publicationen/files/Download1_075.pdf [Stand: 2008-02-25]

Bachmann, Gerd, 1998, Innovationsschub aus dem Nanokosmos, Düsseldorf, URL: http://www.upob.de/deutsch/nanotech/VDI_nanokosmos.pdf [Stand: 2008-08-21]

Bachmann, Gerd, 2007, Nanotechnologie – Forschung von heute für Produkte von morgen, Vortrag vom 7. Dezember, Lüneburg, URL: http://www.suederelbe.info/download/Vortrag_Gerd_Bachmann_VDI_TZ_07112007.pdf [Stand: 2007-12-10]

baua – Bundesanstalt für Arbeitsschutz / **VCI** – Verband der Chemischen Industrie, 2007, Leitfaden für Tätigkeiten mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz, Berlin u. a. O., URL: http://www.baua.de/nn_44628/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/pdf/Leitfaden-Nanomaterialien.pdf [Stand: 2008-09-26]

Baumgartner, Christoph, 2004, Ethische Aspekte nanotechnologischer Forschung und Entwicklung in der Medizin, in: Aus Politik und Zeitgeschichte, Beilage zur Wochenzeitung „Das Parlament“, 1. Juni, S. 39–46

BDI – Bundesverband der Deutschen Industrie (Hrsg.), 2008, Normung zukunftsfähig gestalten: Positionspapier, Berlin

bfai – Bundesagentur für Außenwirtschaft, 2006a, Nanotechnologie heilt immer mehr US-Patienten, 11. Juli, URL: http://www.bfai.de/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?fiIdent=MKT20060710104425 [Stand: 2007-11-23]

bfai, 2006b, „Japan erwartet gute nanotechnologische Marktentwicklung“, 13. Juni, URL: http://www.bfai.de/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?fiIdent=MKT20060612104455&source=DBNL&sourcetype=NL [Stand: 2007-11-23]

bfai, 2007, Korea (Rep.) hofft auf großes Geschäft mit Kleinststrukturen, 7. September, URL: https://www.bfai.de/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?fiIdent=MKT200709068002 [Stand: 2007-12-14]

BfR – Bundesinstitut für Risikobewertung, 2008a, Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung, Zimmer, René / Hertel, Rolf / Böhl, Gaby-Fleur (Hrsg.), Berlin, URL: http://www.bfr.bund.de/cm/238/wahrnehmung_der_nanotechnologie_in_der_bevoelkerung.pdf [Stand: 2008-12-11]

BfR, 2008b, Risikowahrnehmung beim Thema Nanotechnologie, Zimmer, René / Hertel, Rolf / Böhl, Gaby-Fleur (Hrsg.), Berlin, URL: http://www.bfr.bund.de/cm/238/risikowahrnehmung_beim_thema_nanotechnologie.pdf [Stand: 2008-12-11]

Biniok, Peter, 2005, Kooperationsnetz Nanotechnologie – Verkörperung eines neuen Innovationsregimes?, Technical University Technology Studies, Working Papers, No. TUTS-WP-/2005, URL: http://www2.tu-berlin.de/~soziologie/Tuts/Wp/TUTS_WP_7_2005.pdf [Stand: 2008-01-29]

Binnig, Gerd, 2006, Vorwort, in: Boeing, Niels, Alles Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts, Hamburg

BioMarket Group AB, 2007, The World Nanotechnology Market (2006), URL: http://bizwiz.biomarketgroup.com/bw/Archives/Files/TOC_IM060.pdf [Stand: 2007-12-20]

Blind, Knut, 2006, Deutsche Normen im internationalen Kontext, Studien zum deutschen Innovationssystem Nr.14, Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Berlin, URL: <http://www.bmbf.de/pub/sdi-14-06.pdf> [Stand: 2008-03-20]

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), 2002, Standortbestimmung: Nanotechnologie in Deutschland, Bonn

BMBF (Hrsg.), 2006a, Bundesbericht Forschung 2006, Bonn/Berlin

BMBF (Hrsg.), 2006b, Die Hightech-Strategie für Deutschland, Bonn/Berlin

BMBF (Hrsg.), 2006c, Nano-Initiative – Aktionsplan 2010, Bonn/Berlin

BMBF (Hrsg.), 2006d, Pressemitteilung vom 17. Februar, Nr. 026/2006, URL: <http://www.bmbf.de/press/1737.php> [Stand: 2008-02-21]

BMBF (Hrsg.), 2007a, Bericht zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands, Berlin

BMBF (Hrsg.), 2007b, Das 7. EU-Forschungsrahmenprogramm, Berlin

BMBF (Hrsg.), 2008, Nanopartikel – kleine Dinge, große Wirkung: Chancen und Risiken, Bonn

Boeing, Niels, 2006, Alles Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts, Hamburg

Boston Consulting Group, 2006, Innovationsstandort Deutschland – quo vadis?, München

BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2007, Nanotechnologie, Berlin, URL: <http://www.bsi.de/literat/studien/nanotech/Nanotechnologie.pdf> [Stand: 2007-07-16]

Bütterlin, Veit, 2007, Die Ökonomie der Nanotechnologie: Die Bedeutung des technischen Wandels für Wirtschaft Politik und Umwelt, Marburg

Butz, Tilman et al., 2007, NANODERM: Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles, Final Report, URL: http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/Downloads/Nanoderm_Final_Report.pdf [Stand: 2008-08-14]

Catenhusen, Wolf-Michael, o. J., Nanodialog – auf dem Weg zu einer neuen Technikkultur, URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanokomm_catenhusen.pdf [Stand: 2008-06-24]

Cebulla, Eva / **Malanowski**, Norbert / **Zweck**, Axel, 2006, Hochschulangebote im Bereich Nanotechnologie, Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) der VDI Technologiezentrum GmbH (Hrsg.), Düsseldorf, URL: <http://www.nanotruck.de/fileadmin/nanoTruck/redaktion/download/Hochschulangebote.pdf> [Stand: 2008-03-07]

Cobb, Michael D. / **Macoubrie**, Jane, o. J., Public Perceptions about Nanotechnology: Risks, Benefits and Trust, URL: <http://www2.chass.ncsu.edu/cobb/me/past%20articles%20and%20working%20papers/Public%20Perceptions%20about%20Nanotechnology%20-%20Risks,%20Benefits%20and%20Trust.pdf> [Stand: 2008-02-18]

Coenen, Christopher, 2006, Der posthumanistische Technofuturismus in den Debatten über Nanotechnologie und Converging Technologies, in: Nordmann, Alfred / Schummer, Joachim / Schwarz, Astrid (Hrsg.), Nanotechnologien im Kontext: Philosophische und gesellschaftliche Perspektiven, Berlin, S. 195–222

Davies, Clarence J., o. J., Managing the Effects of Nanotechnology, Bericht für das Woodrow Wilson Center for Scholars, URL: <http://www.innovationsgesellschaft.ch/images/publikationen/manangingeffects.pdf> [Stand: 2008-02-21]

Deutscher Bundestag, 2006, Potenziale und Risiken der Nanotechnologie, Drucksache 16/2322 vom 31. Juli, Berlin, URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/023/1602322.pdf> [Stand: 2008-02-19]

Deutscher Bundestag, 2007, Bericht der Bundesregierung zum Veränderungsbedarf des bestehenden Rechtsrahmens für Anwendungen der Nanotechnologie, Drucksache 16/6337 vom 30. August, URL: <http://dip.bundestag.de/btd/16/063/1606337.pdf> [Stand: 2008-02-21]

Deutscher Bundestag, 2008, TA-Zukunftsreport: Arbeiten in der Zukunft – Strukturen und Trends der Industriearbeit, Drucksache 16/7959 vom 30. Januar, URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/079/1607959.pdf> [Stand: 2008-03-11]

Ditzen, Stefan, 2006, Richard Feynmans Vision theologischer Prägung: Etappen einer Geschichte der Mikromanipulation, in: Nordmann, Alfred / Schummer, Joachim / Schwarz, Astrid (Hrsg.), Nanotechnologien im Kontext: Philosophische und gesellschaftliche Perspektiven, Berlin, S. 243–262

Drexler, K. Eric, 1986, Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology, New York

Edfjäll, Curt, 2007, Nanotechnologie und europäische Patente, Vortrag beim Forum für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz „Nanotechnologie im Fokus: Chancen, Risiken, Visionen“, vom 26. Februar, München, URL: http://www.stmugv.bayern.de/aktionen/forum/doc/nano_statement_edfj%C3%A4ll.pdf [Stand: 2008-01-21]

EFI – Experten Kommission Forschung und Innovation (Hrsg.), 2008, Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit, Berlin, URL: http://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten/Gutachten_Upload.pdf [Stand: 2008-03-17]

Enste, Dominik / Stettes, Oliver, 2006, Marktkonforme Innovationspolitik: Rahmenbedingungen für Innovationen, in: Institut der deutschen Wirtschaft Köln (Hrsg.), Wachstumsfaktor Innovation: Eine Analyse aus betriebs-, regional- und volkswirtschaftlicher Sicht, Köln, S. 47–76

Erber, Georg, 2007, Große Potenziale der Nanotechnologie in Deutschland, in: DIW-Wochenbericht, 74. Jg., Nr. 25, S. 393–396

Ernst & Young, 2007, Studie „Nanotechnologie in der Medizin“, URL: http://www.ey.com/Global/content.nsf/Germany/Presse_-_Pressemitteilungen_2007_-_Nanotechnologie [Stand: 2008-01-15]

European Commission, 2005, Some Figures about Nanotechnology R&D in Europe and Beyond, URL: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano_funding_data_08122005.pdf [Stand: 2007-08-31]

EZB – Monatsbericht der Europäischen Zentralbank, 2001, Neue Technologien und Produktivität im Euro-Währungsgebiet, Band II/1, Frankfurt am Main, S. 41–54

Farkas, Robert et al., 2004, Nanotechnologie pro Gesundheit: Chancen und Risiken, Studie im Auftrag des BMBF, URL: http://www.bmbf.de/pub/nano_pro_gesundheit_bericht.pdf [Stand: 2008-04-25]

Feynman, Richard P., o. J., Viel Spielraum nach unten: Eine Einladung in ein neues Gebiet der Physik, Deutsche Übersetzung des am 29. Dezember 1959 von Richard Feynman gehaltenen Vortrags auf der Jahresversammlung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft am California Institute of Technology (Caltech), abgedruckt erstmals in der Zeitschrift „Engineering and Science“ vom Februar 1960, S. 200 ff., URL: [http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2006/mst_t&p_00__plenty_of_room_at_the_bottom_\(feynman\).pdf](http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2006/mst_t&p_00__plenty_of_room_at_the_bottom_(feynman).pdf) [Stand: 2008-04-09]

Fier, Andreas / Heger, Diana / Hussinger, Katrin, 2005, Die Wirkungsanalyse staatlicher Förderungsprogramme durch den Einsatz von Matching- und Selektionsmodellen am Beispiel von Fertigungstechnik, ZEW Discussion Paper, No. 05-09, Mannheim, URL: <ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp0509.pdf> [Stand: 2007-08-27]

Fleischer, Torsten / Decker, Michael / Fiedeler, Ulrich, 2004, Große Aufmerksamkeit für kleine Welten – Nanotechnologie und ihre Folgen, in: Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis, 13. Jg., Nr. 2, S. 5–9, URL: <http://www.itas.fzk.de/tatup/042/flua04a.htm> [Stand: 2008-08-11]

Freyer, Hans, 1955, Theorie des gegenwärtigen Zeitalters, Stuttgart

Frietsch, Rainer / Köhler, Florian / Blind, Knut, 2008, Weltmarktpatente – Strukturen und deren Veränderungen, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 7, Expertenkommission Forschung und Innovation (Hrsg.), Berlin, URL: http://www.e-fi.de/fileadmin/StuDIS2008/StuDis_7_2008_Patente.pdf [Stand: 2008-03-17]

Führ, Martin et al., 2006, Rechtsgutachten Nano-Technologien – ReNaTe, Freiburg, URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/334/2006-022-de.pdf> [Stand: 2008-04-28]

- Gammel**, Stefan, 2007, Ethische Aspekte der Nanotechnologie, Tübingen, URL: <http://www.izew.uni-tuebingen.de/bib/thema-nanotech-dossier1.html> [Stand: 2008-04-10]
- Gaskell**, George et al., 2006, Europeans and Biotechnology in 2005: Patterns and Trends, Final report on Eurobarometer 64.3: A report to the European Commission's Directorate-General for Research, Anhang 2, URL: http://ec.europa.eu/research/biosociety/pdf/eb64_3_annex_2.pdf [Stand: 2008-02-15]
- Gehlen**, Arnold, 1957, Die Seele im technischen Zeitalter: Sozialpsychologische Probleme in der industriellen Gesellschaft, Hamburg
- Grunwald**, Armin, 2004, Ethische Aspekte der Nanotechnologie: Eine Felderkundung [1], in: Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis, 13. Jg., Nr. 2, S. 71–78, URL: <http://www.itas.fzk.de/tatup/042/grun04a.htm> [Stand: 2008-04-24]
- Grunwald**, Armin, 2005, Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten, in: Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis, 14. Jg., Nr. 3, S. 54–60, URL: <http://www.itas.fzk.de/tatup/053/grun05a.htm> [Stand: 2008-03-10]
- Grupp**, Hariolf, 1997, Messung und Erklärung des technischen Wandels: Grundzüge einer empirischen Innovationsökonomik, Heidelberg u. a. O.
- Haas**, Karl-Heinz, 2007, NanoProduktion: Innovationspotenziale für hessische Unternehmen durch Nanotechnologien in Produktionsprozessen, in: Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech, Band 6, Wiesbaden
- HA** – Hessen Agentur GmbH (Hrsg.), 2007, NanoNormung: Normung im Bereich der Nanotechnologien als Chance für hessische Unternehmen, Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech, Band 8, Wiesbaden
- Hartmann**, Uwe, 2006, Faszination Nanotechnologie, München
- Hayek**, Friedrich A. von, 1981, Recht, Gesetzgebung und Freiheit, Band 3: Die Verfassung der Freiheit einer Gesellschaft freier Menschen, Landsberg am Lech
- Heinze**, Thomas, 2006, Die Koppelung von Wissenschaft und Wirtschaft: Das Beispiel der Nanotechnologie, Frankfurt am Main/New York
- Helmut Kaiser Consultancy** (Hkc22.com), 2005, Nanotechnology in China, URL: <http://www.azonano.com/news.asp?newsID=1261> [Stand: 2008-02-26]
- Hermann**, Andreas et al., 2007, Chancen der Nanotechnologien nutzen! Risiken rechtzeitig erkennen und vermeiden!, Positionspapier des Öko-Instituts e. V., Freiburg/Darmstadt, URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/472/2007-077-de.pdf> [Stand: 2008-07-03]
- Holtmannspötter**, Dirk / **Rijkers-Defrasne**, Sylvie / **Glauner**, Christoph / **Korte**, Sabine / **Zweck**, Axel, 2006, Aktuelle Technologieprognosen im internationalen Vergleich: Übersichtsstudie, Düsseldorf
- Howaldt**, Jürgen / **Kopp**, Ralf / **Schwarz**, **Michael**, 2008, Innovationen (forschend) gestalten – Zur neuen Rolle der Sozialwissenschaften, in: WSI-Mitteilungen, 61. Jg., Nr. 2, S. 63–69
- Hullmann**, Angela, 2001, Internationaler Wissenstransfer und technischer Wandel: Bedeutung, Einflussfaktoren und Ausblick auf technologiepolitische Implikationen am Beispiel der Nanotechnologie in Deutschland, Göttingen

Hullmann, Angela, 2006a, Who is winning the global nanorace?, in: Nature Nanotechnology, Vol. 1, S. 81–83, URL: <http://www.nature.com/nnano/journal/v1/n2/full/nnano.2006.110.html> [Stand: 2007-08-29]

Hullmann, Angela, 2006b, The economic development of nanotechnology – An indicators bases analysis (Version: 28.11.) URL: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nanoarticle_hullmann_nov2006.pdf [Stand: 2007-08-29]

Igami, Masatsura / **Okazaki**, Teruo, 2007, Capturing Nanatechnology's Current of Development via Analysis of Patents, STI Working Paper, No. 2007/4, URL: <http://www.oecd.org/dataoecd/6/9/38780655.pdf> [Stand: 2007-08-28]

Ilfriich, Thomas, 2005, Nano A–Z: Glossar der Nanotechnologie, Norderstedt

IVAM Research, 2006, Gründungsmonitor Mikro-/Nanotechnik 2006: Erfolgsfaktoren für Mikro- und Nanotechnik Start-ups in Deutschland, URL: http://www.ivam-research.de/index.php?content=studien_details&id=3 [Stand: 2008-02-26]

IW Consult GmbH, 2007, Deutschlands Zukunftsbranchen: Empirische Bestandsaufnahme und Ableitung eines Rankings, Köln, URL: http://www.iwconsult.de/downloads/Bericht_Zukunftsbranchen_Deutschlands.pdf [Stand: 2008-11-18]

IW Köln – Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 2008a, Ingenieurücke in Deutschland – Ausmaß, Wertschöpfungsverluste und Strategien, Köln, URL: http://www.vdi.de/uploads/media/Studie_Ingenieuruecke_VDI-IW_02.pdf [Stand: 2008-11-18]

IW Köln (Hrsg.), 2008b, Deutschland in Zahlen 2008, Köln

Jonas, Hans, 1979, Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation, Frankfurt am Main

Joy, Bill, 2000, Warum die Zukunft uns nicht braucht, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, Nr. 130, 6. Juni, S. 49, URL: http://www.lifeinfo.de/inh2/Nanotechnologie/Nano_Versand.PDF/Pandora.PDF [Stand: 2008-07-08]

Klodt, Henning, 1987, Wettlauf um die Zukunft: Technologiepolitik im internationalen Vergleich, Tübingen

Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2004, Auf dem Weg zu einer europäischen Strategie für Nanotechnologie, Luxemburg, URL: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano_com_de_new.pdf [Stand: 2007-10-30]

Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2005, Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament und den Wirtschafts- und Sozialausschuss: Nanowissenschaften und Nanotechnologien. Aktionsplan für Europa 2005–2009, KOM (2005) 243, Brüssel

Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2007, Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament und den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss: Nanowissenschaften und Nanotechnologien. Aktionsplan für Europa 2005–2009, Erster Durchführungsbericht 2005–2007, KOM (2007) 505, Brüssel, URL: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/com_2007_0505_f_de.pdf [Stand: 2008-07-14]

- Kommission der Europäischen Gemeinschaften**, 2008a, Empfehlung der Kommission für einen Verhaltenskodex für verantwortliche Forschung im Bereich der Nanowissenschaften und -technologien, Brüssel, URL: http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/nanocode-rec_pe0894c_de.pdf [Stand: 2008-02-20]
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften**, 2008b, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss: Regelungsaspekte bei Nanomaterialien, SEK (2008) 2036, Brüssel, URL: http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/comm_2008_0366_de.pdf [Stand: 2008-09-04]
- komm.passion GmbH**, 2004, Wissen und Einstellungen zur Nanotechnologie, Berlin u. a. O., URL: http://www.komm-passion.de/fileadmin/bilder/themen/pdf/Nanostudie_kurz.pdf [Stand: 2008-02-14]
- Kondratieff**, Nikolai D., 1926, Die langen Wellen der Konjunktur, in: Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik, 56. Jg., Band 3, Berlin, S. 573–609
- Krug**, Harald F. / **Fleischer**, Torsten, 2007, Nanotechnologie – eine Bestandsaufnahme, in: umwelt medizin gesellschaft, Nr. 1, S. 44–50, URL: <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2007/krf07a.pdf> [Stand: 2008-02-21]
- Legler**, Harald / **Gehrke**, Birgit / **Belitz**, Heike / **Grenzmann**, Christoph, 2008, Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Deutschland im internationalen Vergleich, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 1, EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (Hrsg.), Berlin, URL: http://www.e-fi.de/fileadmin/StuDIS2008/StuDIS_1-2008_FuE_intern_Vergleich.pdf [Stand: 2008-03-17]
- Lenk**, Hans / **Ropohl**, Günter (Hrsg.), 1987, Technik und Ethik, Stuttgart
- Luther**, Wolfgang / **Malanowski**, Norbert, 2004, Das wirtschaftliche Potenzial der Nanotechnologie, in: Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis, 13. Jg., Nr. 2, S. 26–33
- Luther**, Wolfgang et al., 2004, Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt, Düsseldorf
- Luther**, Wolfgang et al., 2006, Kommerzialisierung der Nanotechnologie: Analyse der Erfolgsfaktoren und Rahmenbedingungen, Düsseldorf
- Lux Research Inc.**, 2006, Profiting from International Nanotechnology, New York
- Lux Research Inc.**, 2007a, Top Nations in Nanotech see their Lead Erode, Pressemitteilung vom 8. März, New York, URL: http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE_NationsRanking2007.pdf [Stand: 2007-08-29]
- Lux Research Inc.**, 2007b, Nanotech Hiring Continous to Climb, Pressemitteilung vom 7. Februar, New York, URL: http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE_Hiring-NanotechTalent.pdf [Stand: 2007-05-15]
- Mensch**, Gerhard, 1975, Das technologische Patt: Innovationen überwinden die Depression, Frankfurt am Main
- Münchener Rück**, 2002, Nanotechnologie – Was kommt auf uns zu?, München, URL: http://www.nanopartikel.info/uploads/media/nanotech_was_kommt_auf_uns_zu_03.pdf [Stand: 2008-04-28]

National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, 2006, The National Nanotechnology Initiative: Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry – Supplement to the President's 2007 Budget, URL: http://www.nano.gov/NNI_07Budget.pdf [Stand: 2007-08-31]

National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, 2007, The National Nanotechnology Initiative: Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry – Supplement to the President's 2008 Budget, URL: http://www.nano.gov/NNI_08Budget.pdf [Stand: 2007-08-31]

National Nanotechnology Initiative, o. J., National Nanotechnology Initiative FY 2009 Budget & Highlights, URL: http://www.nano.gov/NNI_FY09_budget_summary.pdf [Stand: 2008-02-25]

Nefiodow, Leo A., 2001, Der sechste Kondratieff: Wege zur Produktivität und Vollbeschäftigung im Zeitalter der Information, Sankt Augustin

Nomura Research Institute, 2006, Forecasting the Size of the Japanese Nanotechnology Product Market in 2010/2015, Pressemitteilung vom 20. Juli, o. O., URL: <http://www.nri.co.jp/english/news/2006/060720.html> [Stand: 2007-12-20]

Nordmann, Alfred / **Schummer**, Joachim / **Schwarz**, Astrid (Hrsg.), 2006, Nanotechnologien im Kontext: Philosophische und gesellschaftliche Perspektiven, Berlin

Nordmann, Alfred, 2006, Unsichtbare Ursprünge: Herbert Gleiter und der Beitrag der Materialwissenschaft, in: Nordmann, Alfred / Schummer, Joachim / Schwarz, Astrid (Hrsg.), Nanotechnologien im Kontext: Philosophische und gesellschaftliche Perspektiven, Berlin, S. 81–96

OECD – Organisation for Economic Cooperation and Development, 2007a, Compendium of Patent Statistics, Paris, URL: <http://www.oecd.org/dataoecd/5/19/37569377.pdf> [Stand: 2008-01-28]

OECD, 2007b, Science, Technology and Industry Scoreboard 2007, Paris, URL: <http://massetto.sourceoecd.org/vl=5846660/cl=20/nw=1/rpsv/sti2007/> [Stand: 2008-05-23]

OECD, 2008a, Main Science and Technology Indicators 2008 (1), Paris

OECD, 2008b, Stat. Extracts. Labour. Full-time Part-time Employment, URL: <http://webnet.oecd.org/wbos/index.aspx> [Stand: 2008-07-09]

Paschen, Herbert et al., 2003, TA-Projekt Nanotechnologie: Endbericht, Arbeitsbericht Nr. 92 des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin

Pfirrmann, Oliver, 2008, Stand und Perspektiven der Beschäftigung in der Nanotechnologie in Deutschland, Düsseldorf

Popitz, Heinrich, 1995, Der Aufbruch zur Artifizialen Gesellschaft: zur Anthropologie der Technik, Tübingen

Posner, Michael V., 1961, International Trade and Technical Change, in: Oxford Economic Papers, Vol. 13, No. 3, S. 323–341

- Research and Markets**, 2005, The World Nanotechnology Market, Dublin, URL: http://www.researchandmarkets.com/reportinfo.asp?report_id=307510 [Stand: 2007-11-14]
- Roco**, Mihail C., 2003, Broader societal issues of nanotechnology, URL: <http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/BroaderSocIssue.pdf> [Stand: 2007-12-06]
- Röpke**, Jochen, 2000, Ohne Gründerwelle keine lange Welle, URL: <http://www.wiwi.uni-marburg.de/Lehrstuehle/VWL/WITHEO3/documents/laotse.pdf> [Stand: 2008-03-04]
- Röpke**, Jochen / **Kozlova**, Elizaveta, 2004, Nanotechnologie als Basisinnovation, URL: <http://www.wiwi.uni-marburg.de/Lehrstuehle/VWL/WITHEO3/documents/nano2.doc> [Stand: 2007-07-02]
- Romer**, Paul, 1990, Endogenous Technological Change, in: *Journal of Political Economy*, Vol. 98, No. 5, S. 71–102
- Rosenblatt**, Bernhard / **Hufnagel**, Laura / **Wagner**, Gert G. / **Schupp**, Jürgen, 2006, Wissenschaftsdialog und Nanotechnologie: Repräsentative Bevölkerungsbefragung 2006 im Rahmen des Sozio-oekonomischen Panels (SOEP), unveröffentlichter Berichtsband
- Rosenblatt**, Bernhard / **Schupp**, Jürgen / **Wagner**, Gert G., 2007, Nanotechnologie in der Bevölkerung noch wenig bekannt, in: *DIW-Wochenbericht*, 74. Jg., Nr. 45, S. 673–677
- Sabisch**, Helmut / **Esswein**, Werner / **Meißner**, Dirk / **Wylegalla**, Jörg, 1998, Quantifizierung und Messung von Technologieförderprogrammen, Dresden
- Scherrer**, Walter, 1996, Lange Wellen, neue Technologien und Beschäftigung: Ein Überblick, in: *Wirtschaftspolitische Blätter*, 43. Jg., Nr. 2, S. 132–141, URL: http://www.sbg.ac.at/wiw/scherrer/langewellen_scherrer_96.pdf [Stand: 2008-03-10]
- Scheufele**, Dietram A. et al., 2007, Scientists worry about some risks more than the public, in: *nature nanotechnology*, Vol. 2, December, S. 732–734
- Schnappauf**, Werner, 2007, Nanotechnologie im Fokus: Chancen, Risiken, Visionen, Rede beim Europäischen Patentamt am 26. Februar, URL: <http://www.stmugv.bayern.de/aktuell/reden/detailansicht.htm?tid=11770> [Stand: 2007-07-09]
- Schröder**, Thomas, 2006, High-tech-Strategien Japans, URL: http://www.kooperation-international.de/fileadmin/redaktion/doc/JM052006_Hightech_Druckfassung_1266.pdf?PHPSESSID=c33269fafb89cb7622d0c5cb8c6a7 [Stand: 2008-11-19]
- Schummer**, Joachim, 2006, Nano-Erlösung oder Nano-Armageddon? Technikethik im christlichen Fundamentalismus, in: Nordmann, Alfred / Schummer, Joachim / Schwarz, Astrid (Hrsg.), *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische und gesellschaftliche Perspektiven*, Berlin, S. 242–262
- Schumpeter**, Joseph A., 1950, *Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie*, 2., erweiterte Auflage, München
- Schumpeter**, Joseph A., 1961, *Konjunkturzyklen: Eine theoretische, historische und statistische Analyse des kapitalistischen Prozesses*, Band 1, Göttingen
- Solow**, Robert M., 1956, A Contribution to the Theory of Economic Growth, in: *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70, No. 1, S. 65–94

Solow, Robert M., 1957, Technical Change and the Aggregate Production Function, in: Review of Economics and Statistics, Vol. 39, No. 3, S. 312–320

SPIEGEL ONLINE, 2008, Nanoröhrchen wirken ähnlich wie Asbest, 21. Mai, URL: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,554383,00.html> [Stand: 2008-5-21]

Statistisches Bundesamt (Hrsg.), 2008a, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Fachserie 18, Reihe 1.4, Wiesbaden

Statistisches Bundesamt (Hrsg.), 2008b, Produzierendes Gewerbe 2007, Fachserie 4, Reihe 4.1.1., Wiesbaden

Stiller, Olaf, 2005, Innovationsdynamik in der zweiten industriellen Revolution – Die Basisinnovation Nanotechnologie, Norderstedt

Stöber, Sören / **Türk**, Volker, 2006, Hoffnungsträger Nanotechnologie: Ein Dialog über gesellschaftliche und ethische Fragen einer neuen Technologie, in: zfwu, 7. Jg., Nr. 2, S. 277–291, URL: http://www.gruner-druck.de/hampp-verlag/frei/zfwu_2_2006_277 [Stand: 2008-04-28]

Stolper, Wolfgang F., 1982, Schumpeters Theorie der Innovation, in: ifo-Studien, 28. Jg., Nr. 4, S. 239–270

Swann, Peter G. M., 2000, Ökonomie der Normung: Abschlussbericht für die Direktion Normen und Technische Vorschriften – Department of Trade and Industry, Manchester, URL: <http://www.berr.gov.uk/files/file11315.pdf> [Stand: 2008-03-19]

Swiss Re, 2004, Nanotechnologie: Kleine Teile – große Zukunft?, Zürich, URL: http://www.swissre.com/resources/48c84780455c7a06b0d0ba80a45d76a0-Publ04_Nanotech_de.pdf [Stand: 2008-04-28]

TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag, 2006, Nachfrageorientierte Innovationspolitik, Zusammenfassung des TAB-Arbeitsberichts Nr. 99, Bonn, URL: <http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab99.htm> [Stand: 2008-03-05]

Technology Transfer Centre, 2007, Government Funding, Companies and Applications in Nanotechnology Worldwide 2007, URL: http://www.nano.org.uk/reports/nanofund_commerc.pdf [Stand: 2008-04-04]

Touraine, Alain, 1969, La Société post-industrielle, Paris

TÜV Süd, o. J., Nanotechnologie: Risiken erkennen, Sicherheit schaffen, URL: http://www.tuev-sued.de/technische_anlagen/risikomanagement/nanotechnologie [Stand: 2008-06-09]

Umweltbundesamt, 2006, Nanotechnik – Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt: Hintergrundpapier, URL: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/nanotechnik.pdf> [Stand: 2008-05-02]

Ulrich, Erhard, 1980, Technikprognosen, in: Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, Nr. 3, 13. Jg., hrsg. vom Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, Nürnberg, S. 409–425, Sonderdruck, URL: http://doku.iab.de/mittab/1980/1980_3_MittAB_Ulrich.pdf [Stand: 2009-04-24]

Uttich, Andrea, 2004, Nanotechnologie als Gegenstand japanischer Forschungspolitik, in: Deutsch-Japanischer Wirtschaftskreis (DJW), Arbeitsgruppe Bayern, AGB-News, Nr. IV, S. 3–6, URL: <http://www.djw.de/publikation/pdf/AGB0404.pdf> [Stand: 2008-04-10]

VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2007, VDE-Innovationsmonitor 2007: Trends in der Elektro-/Informationstechnik, Frankfurt am Main

VDI – Verein deutscher Ingenieure, 2008, Technikrat gegen Fachkräftemangel, Pressemitteilung vom 3. Mai, URL: [http://www.vdi.de/6390.0.html?&tx_ttnews\[tt_news\]=45078&tx_ttnews\[backPid\]=6385&cHash=533412ba08](http://www.vdi.de/6390.0.html?&tx_ttnews[tt_news]=45078&tx_ttnews[backPid]=6385&cHash=533412ba08) [Stand: 2008-03-05]

VDI Technologiezentrum, 2007, Qualifizierung in Nano-Unternehmen – Beispiele guter Praxis für Akademiker mit Zukunft, Pressemitteilung vom 14. März, URL: http://www.vditz.de/no_cache/home/presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen_detail/index.html?tx_vdiinfo_pi1%5BshowUid%5D=1622 [Stand: 2008-11-19]

VDI Technologiezentrum, o. J. a, TechPortal Nanotechnologie, URL: <http://www.techportal.de/de/192/2/static.public.static,1112/> [Stand: 2008-01-04]

VDI Technologiezentrum, o. J. b, TechPortal Nanotechnologie, URL: <http://www.techportal.de/techmap/index.php?content=map> [Stand: 2008-07-21]

vzbv – Verbraucherzentrale Bundesverband, 2008, Nanotechnologien: Im Reich des Winzigen und Unbekannten, Pressemitteilung vom 6. Mai., URL: <http://www.vzbv.de/go/presse/1006/> [Stand: 2008-07-10]

Weinstock, Ulrich, 1964, Das Problem der Kondratieff-Zyklen: Ein Beitrag zur Entwicklung einer Theorie der „langen Wellen“ und ihrer Bedeutung, in: Schriftenreihe des ifo-Instituts für Wirtschaftsforschung, Nr. 58, Berlin/München

Welt der Physik, 2005a, Stichwort: Rastertunnelmikroskope, URL: <http://www.weltderphysik.de/de/278.php> [Stand: 2007-07-20]

Welt der Physik, 2005b, Stichwort: Rasterkraftmikroskope, URL: <http://www.weltderphysik.de/de/279.php> [Stand: 2007-07-20]

Werwatz, Axel et al., 2007, Innovationsindikator 2007: Forschungsprojekt im Auftrag der Deutschen Telekom Stiftung und des Bundesverbandes der Deutschen Industrie, Berlin

Wieczorek, Iris, 2007, Der Nanotechnologiemarkt in Japan, in: Moerke, Andreas / Walke, Anja (Hrsg.), Japans Zukunftsindustrien, Berlin u. a. O., S. 145–167

Wissenschaftlicher Beirat des Bundeswirtschaftsministeriums, 2007, Patentschutz und Innovation, URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/G/gutachten-des-wissenschaftlichen-beirats-patentschutz-und-innovation,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf> [Stand: 2008-01-11]

Woyke, Andreas, 2007, „Nanotechnologie“ als neue „Schlüsseltechnologie“? – Versuch eines historischen und systematischen Vergleichs mit anderen Technologien, in: Journal for General Philosophy of Science, Vol. 38, No. 2, S. 329–345

Zeilinger, Anton, 2001, Interview mit der Zeitschrift „TELEPOLIS“, 7. Mai, URL: <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/7/7550/1.html> [Stand: 2007-12-21]

Kurzdarstellung

Der Beitrag befasst sich mit der Frage, welche Potenziale die Nanotechnologie für eine lange Welle des ökonomischen Fortschritts birgt. Nach Betrachtung ihrer verschiedenen sozioökonomischen Dimensionen kann festgehalten werden, dass die Nanotechnologie zu Recht als eine Schlüsselinnovation angesehen wird. Mit ihrer Hilfe lassen sich gänzlich neue Produkte herstellen und vorhandene erheblich verbessern. Das Anwendungsspektrum reicht dabei über wichtige Einsatzbereiche wie Feinmechanik/Optik, IuK-Technik, Chemie und Pharmazie, Fahrzeugbau oder Umwelt- und Energietechnik weit hinaus. Trotz hoher Prognoseunsicherheiten deuten Schätzungen auf ganz erhebliche Marktchancen der Nanotechnologie hin. Damit einher gehen Erwartungen von auf mittlere Sicht bis zu zehn Millionen neuen Arbeitsplätzen weltweit. Voraussetzung für deren Realisierung sind allerdings Unternehmen, welche diese Technik aufgreifen und am Markt durchsetzen. Deutschland steht in der internationalen Nanoforschung mit in der ersten Reihe: Renommiertere deutsche Wissenschaftler sind Wegbereiter der Nanotechnologie; die deutsche Ausgangsposition bei FuE-Aufwendungen, Patentanmeldungen und Publikationen kann als leistungsstark eingestuft werden; und auch die deutsche Nano-Bildungslandschaft bietet – mit der Einschränkung des nach wie vor herrschenden Ingenieurmangels – insgesamt gute Voraussetzungen.

Abstract

This article deals with the potential of nanotechnology to create a sustained surge of economic progress. A review of its various socioeconomic dimensions concludes that nanotechnology is rightly viewed as a key innovation. It can be used to manufacture completely new products and considerably improve existing ones. The range of applications stretches well beyond such important fields as precision engineering/optics, information and communication technology, chemistry and pharmaceuticals, vehicle manufacture and environmental and energy technology. Despite the high degree of uncertainty surrounding forecasts, estimates suggest a very considerable market potential with medium-term expectations of up to ten millions new jobs worldwide. Meeting these expectations, however, will require companies that can take up this technology and make a success of it in the marketplace. Germany is one of the countries in the forefront of nano research: well-known German scientists have pioneered the technology; Germany is already in a strong position in terms of R & D expenditures, patent registrations and publications; and on the whole, apart from the continuing lack of engineers, the Germany educational landscape also offers a good basis for the development of nanotechnology.