

Matthias Werner

## **Wirtschaftliche Perspektiven der Nanotechnologie**

Nanotechnologie hat sowohl in der Wissenschaft als auch im Finanzbereich erheblich an Bedeutung gewonnen. Etwa 4 Milliarden USD werden allein in diesem Jahr weltweit für die Nanotechnologieforschung ausgegeben. Verschiedene Publikationen weisen darauf hin, dass nahezu jede Branche in der Zukunft durch Nanotechnologie beeinflusst werden wird. Trotzdem sind derzeit nur äußerst begrenzte Informationen über die Märkte, die Marktgrößen, die Patentsituation und die Zeitspannen bis zur Kommerzialisierung verfügbar.

### **Nanotechnologiemärkte**

Weltweit gibt es keine einheitliche Definition des Begriffes Nanotechnologie. Markt voraussagen verschiedener Institutionen beruhen daher auf unterschiedlichen Voraussetzungen. Die meisten fundamentalen physikalischen und chemischen Eigenschaften ändern sich bei Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind. Durch Veränderung der Abmessungen solcher Strukturen, die Kontrolle der internen Chemie und Oberflächenchemie sowie durch die gezielte Beeinflussung der atomaren Anordnung ist es möglich, makroskopische Materialien mit völlig neuen Eigenschaften und Funktionalitäten zu erzeugen [1].

Ein Nanotechnologieprodukt hat wenigstens eine gezielt erzeugte Komponente, bei der mindestens eine Dimension unterhalb von 100 Nanometer liegt und damit funktionale physikalische, chemische oder biologische Effekte genutzt werden, die oberhalb jener Grenze nicht oder nur mit einer Performance-Einbuße erreicht werden können. Hinzu kommen Ausrüstungen und Messgeräte, die ein reproduzierbares Arbeiten in einem Maßstabsbereich unterhalb von 100 Nanometern erlauben. Da die Nanotechnologie ausschließlich über die Dimensionen der Strukturen und die damit verbundenen physikalischen, chemischen oder biologischen Effekte definiert ist, sind fast alle technischen Branchen davon betroffen. In diesem Zusammenhang ist es wenig ergiebig, allein von einem Marktvolumen der Nanotechnologie zu sprechen. Vielmehr ist es zweckmäßig, die Endprodukte, die durch die Nanotechnologie beeinflusst werden, sowie den durch die Nanotechnologie ausgelösten ökonomischen Effekt zu untersuchen. Daher soll hier als Nanotechnologieprodukt die kleinste verkaufbare Einheit mit mindestens einer funktionellen nanotechnologischen Komponente verstanden werden.

Nanotechnologische Erkenntnisse beeinflussen schon seit Jahren verkaufbare Produkte in den Bereichen Elektronik, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. Prozentual gesehen sind in den letzten Jahren nanotechnologische Erkenntnisse jedoch zunehmend stärker in die Bereiche der Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin eingeflossen. Die Addition der einzelnen Marktvolumina zeigt bereits heute ein Marktvolumen im knapp dreistelligen Milliardenbe-

reich durch von der Nanotechnologie beeinflusster Applikationsfelder. Die in Abbildung 1 dargestellten Marktprognosen verschiedener Institutionen weisen trotz unterschiedlicher Definitionen des Begriffs Nanotechnologie eine bemerkenswerte Übereinstimmung auf. Für das Jahr 2015 werden Marktvolumina von ca. 1000 Milliarden USD erwartet.

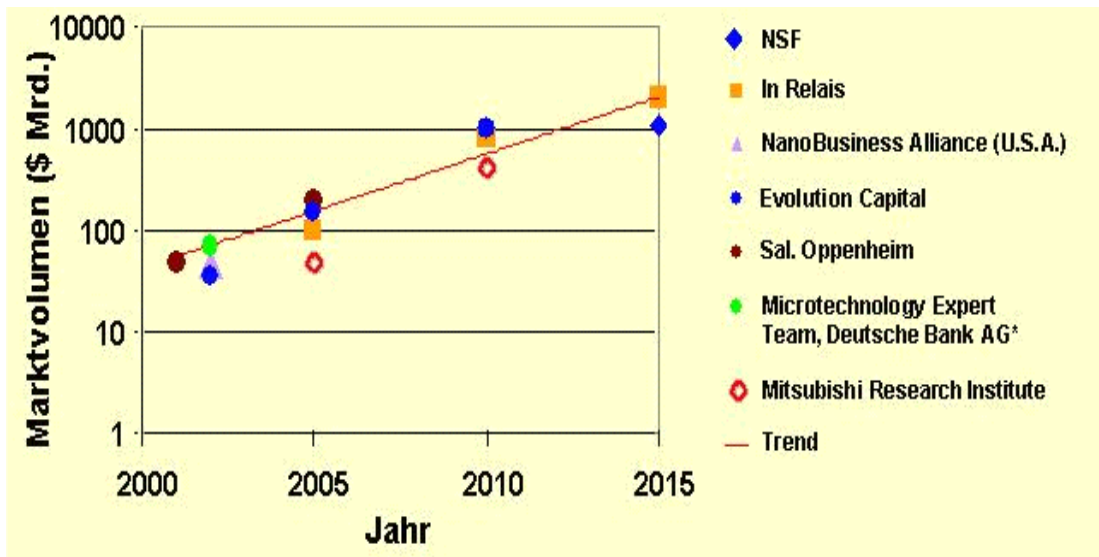


Abb. 1: Marktvolumen für den Nanotechnologie-Weltmarkt (nach verschiedenen Quellen)

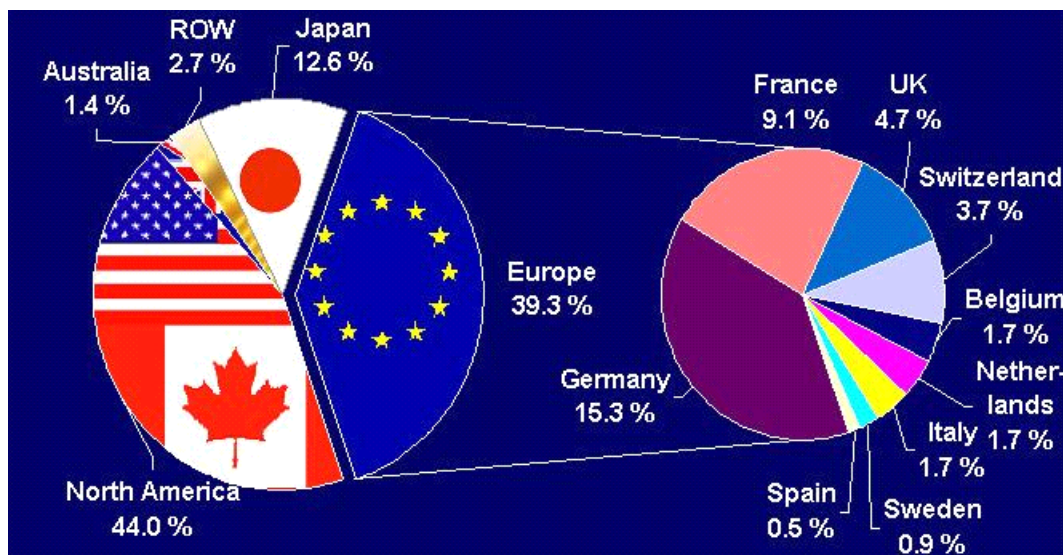


Abb. 2: Relative Anzahl von Patenten in der Nanotechnologie zwischen 1991 und 1999 [2]

Anhand dieser Voraussagen ist allerdings nicht festzustellen, welche Teilgebiete der Nanotechnologie sich zur Zeit am schnellsten entwickeln und welche Länder die größten Aktivitäten aufweisen. Compañó und Hullmann [2] verwendeten zwei Technologieindikatoren – die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen und die Anzahl von Patenten pro Land – um einen internationalen Vergleich der Nanotechnologieaktivitäten anzustellen. Bei den Publikationen führten die USA zwischen 1997 und 1999 mit etwa einem Viertel aller Publikationen, gefolgt von Japan und

Deutschland. Diese drei Länder vereinigen ca. 50% aller Publikationen auf sich. Ein vergleichbares Bild ergibt sich bei den Patenten im Zeitraum von 1991 und 1999 (Abbildung 2). Die USA, Deutschland und Japan hielten auf dem Gebiet der Nanotechnologie in dem Zeitraum von 1991 bis 1999 zusammen ca. 70 % der Patente.

Eine neuere Untersuchung des European Patent Office (EPO) lässt jedoch für das Jahr 2004 erkennen, dass sich seither die Situation in der Europäischen Union im internationalen Vergleich drastisch verschlechtert hat (Abbildung 3).

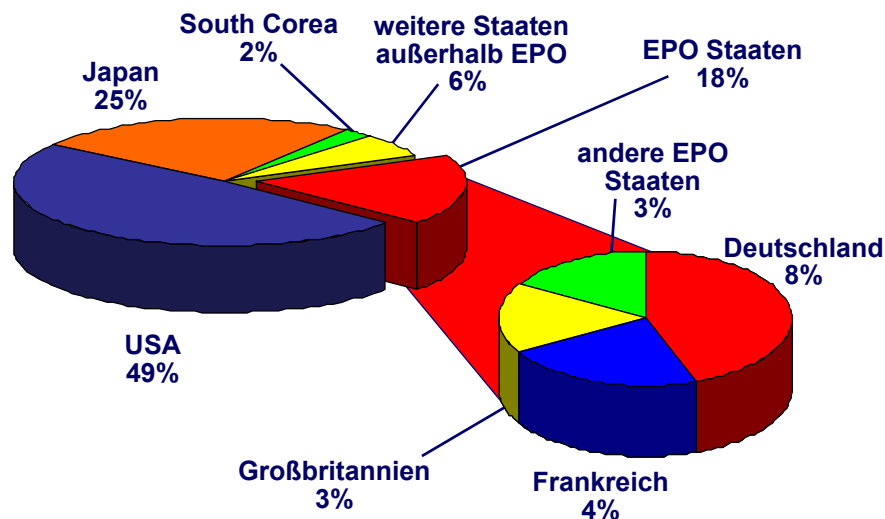


Abb. 3: Herkunft von Patenten auf dem Gebiet der Nanotechnologie, Stand Oktober 2004 [3]

In Europa hat Deutschland sicherlich die besten Voraussetzungen, mittel- und langfristig erfolgreich tätig zu sein. Dabei spielt die erfolgreiche Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen eine Schlüsselrolle.

Ein Beispiel dafür sind die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Magnetoelektronik aus dem Jahr 1988 von Peter Grünberg (Forschungszentrum Jülich) und Albert Fert (Universität Paris Sud), die zur Entdeckung des Giant Magnetoresistance (GMR)-Effekts führten. Bei Experimenten mit künstlich geschichteten magnetischen und nicht-magnetischen Materialien entdeckten beide im Jahr 2007 mit dem Nobelpreis geehrten Wissenschaftler die Abhängigkeit des Ladungstransports von der Spinrichtung der Elektronen. So stellen sich bei geeigneter Dicke der nicht-magnetischen Zwischenschicht (das sind z.B. bei Chrom acht Atomlagen) die Magnetisierungen benachbarter Eisenschichten durch quantenmechanische „Austauschwechselwirkung“ über die Zwischenschichten hinweg spontan zueinander antiparallel ein. Der GMR-Effekt beruht darauf, dass der Elektronenstrom, der durch das Schichtsystem fließt, je nach der Ausrichtung von den magnetischen Schichten einen unterschiedlich großen elektrischen Widerstand erfährt. Allein aufgrund der Schichtdicken ist dieser Effekt eindeutig der Nanotechnologie zuzurechnen. In nur 10 Jahren wurde der GMR-Effekt in praktisch jedem Lesekopf jeder Festplatte eingesetzt. Industrieller Vorreiter bei der kommerziellen Nutzung dieses nanotechnologischen Effekts war IBM. Die aus dieser Entdeckung resultierenden Märkte werden fast ausschließlich aus den USA und Asien bedient.

Traditionell nimmt Deutschland im Halbleiterequipment- und Analysebereich sowie im Bereich Chemie, Pharmazie und Materialbereich eine vordere Position ein. Eine weltweite Befragung [1] von Nanotechnologie-Spezialisten bescheinigt Deutschland fast durchweg einen zweiten Platz

hinter den USA und vor Japan sowie dem übrigen Europa. In dem mittel- und langfristig wahrscheinlich wichtigsten Bereich, der Elektronik, zeichnet sich Deutschland zwar nicht durch eine große Anzahl an Chipherstellern aus, weist aber im zukunftssträchtigen Fabrikationsequipment herausragende Aktivitäten auf.

Die Halbleiterindustrie benötigt ab Dimensionen unterhalb von 50 Nanometern ein neuartiges Lithographieverfahren, da Bauelemente mit derlei Abmessungen mit den gegenwärtig verfügbaren Verfahren nicht mehr hergestellt werden können. Ein aussichtsreiches Verfahren ist die EUV-Lithographie, die auf extremer UV-Strahlung basiert. Die technische Grenze dieser neuen Lithographie wird voraussichtlich unter 30 Nanometern liegen. An den EUV-Quellen und den neuen Optiken wird in Deutschland in verschiedenen Gruppen gearbeitet. Die in Deutschland entwickelten Quellen sind zwar weltweit führend. Bis zu den von der Halbleiterindustrie geforderten Leistungen ist jedoch in den nächsten Jahren noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand zu leisten. Abgesehen von den oben genannten Technologiefeldern zeigen verschiedene Technologieindikatoren und Studien [1], dass z.Zt. die Nanoanalytik und die Nanomaterialien zu den dynamischsten Entwicklungsfeldern gehören.

### Nanomaterialien und Applikationen

Nanomaterialien zeichnen sich durch strukturelle Baueinheiten im Nanometerbereich aus. Dies trifft für dünne Schichten, Multilagen, einzelne Teilchen und nanokristalline Strukturen zu. Der Anteil von Atomen an Oberflächen und in inneren Grenzflächen kann bei diesen Materialklassen bis zu 50% betragen. Dadurch werden die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften beeinflusst und es treten neue, größenabhängige Effekte auf. Die Synthese von Schichtsystemen und nanokristallinen Strukturen, die aus atomaren oder molekularen Bausteinen aufgebaut werden, bietet damit die Möglichkeiten zur gezielten Einstellung von Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen von Materialien. Grundlegende Effekte und Anwendungen von Nanomaterialien sind in Tabelle 1 dargestellt.

Effekt	Applikationen
Großes Oberflächen- zu Volumenverhältnis, erhöhte Reaktivität	Katalyse, Solarzellen, Batterien, Gassensoren
Geringe Perkolationsschwelle	(Elektrische) Leitfähigkeit von Materialien bei geringen Füllmengen
Zunehmende Härte mit abnehmender Korngröße – erhöhter Verschleißschutz	Hartstoffschichten, Verschleißschutzschichten, Werkzeuge
Abnehmender Bandabstand mit abnehmender Korngröße	Optoelektronik
Zunehmender spezifischer Widerstand mit abnehmender Korngröße	Elektronik
Geringere Schmelz- und Sintertemperaturen	Prozessierung und Sintern von Materialien
Verbesserte Transportkinetik	Batterien, Wasserstoffspeicherung

Tabelle 1: Effekte und Anwendungen von Nanomaterialien

Der Markt für Nanomaterialien wird derzeit durch klassische Materialien wie z.B. Carbon Black dominiert. Insgesamt beträgt das Marktvolumen etwa 21,8 Mrd. USD [1]. Lediglich wenige Prozent Marktanteil entfallen auf „neue Nanomaterialien“ wie Nanopartikel (z.B. Metalloxide wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  u. a.) oder Carbon Nanotubes (CNTs). Dafür lassen diese Materialien in den nächsten Jahren zum Teil dreistellige Wachstumsraten erwarten [1]. Aussichtsreiche Applikationen für Nanopartikel sind u.a. Kosmetika, UV-Schutzschichten, Suspensionen für das chemisch-mechanische Polieren (CMP) bei der Chipherstellung sowie Katalysatoren.

<b>Einsatzmöglichkeit von CNTs</b>	<b>Einsatzbarriere(n) oder Vorteil(e)</b>
Aktive elektronische Bauelemente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anordnung und Selektion der halbleitenden CNTs ist problematisch bzw. ungelöst</li> <li>• Molekulare Elektronik und Polymerelektronik stellen mögliche Konkurrenzentwicklungen dar</li> <li>• Sehr frühes, nicht produktionsreifes Technologiestadium</li> </ul>
Feldemissionsdisplays	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hervorragende Brillanz</li> <li>• Alternativtechnologien (z.B. organische Displays) sind teilweise in der Produktion (schneller Technologiewechsel erscheint unwahrscheinlich)</li> </ul>
Interconnects für hochintegrierte Schaltkreise	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz als CMOS-kompatible Technologie wurde (von Infineon) demonstriert</li> <li>• Wahrscheinlich kein Massenmarkt</li> </ul>
Wasserstoffspeicherung (z.B. für Brennstoffzellen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die von der Industrie geforderten Speichereigenschaften (von mehr als 6,5 Gew.%) konnten nicht erreicht werden</li> <li>• Alternativmaterialien zeigen höhere und reproduzierbare Ergebnisse im Vergleich zu CNTs</li> </ul>
SPM-Spitzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommerziell verfügbar</li> <li>• Nischenmarkt</li> </ul>
Polymer-Kompositmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Für die Herstellung leitender Kunststoffe sind nur geringe Füllgrade (ca. 1–5 %) notwendig</li> <li>• Hoher Preis im Vergleich zu anderen Füllstoffen</li> </ul>

Tabelle 2: Einsatzmöglichkeiten, -barrieren oder Vorteile von CNTs

Für Carbon Nanotubes werden von verschiedenen Quellen ebenfalls dreistellige Wachstumsraten prognostiziert. Die herausragenden physikalischen Eigenschaften von CNTs, wie die höchste bekannte Wärmeleitfähigkeit aller Materialien ( $>3000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), die hohe Stromtragfähigkeit ( $\sim 10^7 \text{ A cm}^{-2}$ ), der hohe Elastizitätsmodul ( $>1000 \text{ GPa}$ ) und die guten Feldemissionseigenschaften lassen eine Vielzahl von möglichen Anwendungen erwarten. Die meisten der diskutierten An-

wendungen berücksichtigen allerdings weder den hohen Preis von CNTs noch mögliche alternative Technologien. Einwandige CNTs kosten z.Zt. je nach Hersteller und Reinheit zwischen 1,5 und 1000 USD pro Gramm mit einem Durchschnittspreis von 180 USD pro Gramm. Mehrwandige Carbon Nanotubes kosten derzeit im Schnitt 40 USD pro Gramm. Im Vergleich dazu kostet – je nach Qualität – Carbon Black ca. 0,001 USD pro Gramm. Daraus resultiert, dass eine Vielzahl von möglichen Applikationen allein aufgrund des Preises nicht in Frage kommen werden. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung von möglichen Einsatzgebieten von Carbon Nanotubes und deren ökonomische bzw. physikalische Barrieren.

Den meisten möglichen Anwendungsfeldern für CNTs stehen entweder Konkurrenztechnologien gegenüber oder sie sind aufgrund des hohen Preises von CNTs unattraktiv. Neben bereits existierenden Nischenmärkten wie SPM-Spitzen (Scanning Probe Microscope-Spitzen) oder Tennisschlägern, die aufgrund verbesserter mechanischer Eigenschaften mit CNTs gefüllt sind, generieren gefüllte Polymerkomposite ein sich schnell entwickelndes Wachstumsfeld. Mögliche Anwendungen nutzen gleichzeitig die geringe Füllmenge mit CNTs sowie die elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Anwendungen sind hier z.B. beim elektrostatischen Lackieren von Autoteilen, die – aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von CNTs, verbunden mit den geringen Füllgraden – eine zusätzliche Beschichtung vor der Lackierung unnötig machen. Auch der Beginn der Massenproduktion von CNTs im Tonnenmaßstab lässt Fragen hinsichtlich möglicher Kilerapplikationen offen.

### **Situationsanalyse aus Sicht deutscher Unternehmen**

Im Rahmen einer Studie zum „wirtschaftlichen Potential der Nanotechnologie“ [4] wurde eine umfangreiche Fragebogenaktion bei deutschen Nanotechnologieunternehmen vorgenommen. Den Ergebnissen der schriftlichen Umfrage ist zu entnehmen, dass die befragten Unternehmen mehrheitlich der Nanotechnologie eine hohe Bedeutung beimessen. Hierbei wird deutlich, dass die Unternehmen in dieser Stichprobe der Nanotechnologie vor allem wirtschaftliche Chancen einräumen und sie weniger als technologische „Spielwiese“ betrachten. Über 75% der Unternehmen sehen die Chance, dass die Nanotechnologie ihnen neue Märkte erschließen kann. Über 60% der Unternehmen sehen in der Nanotechnologie einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor bzw. die Möglichkeit, ihre technologische Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

Demgegenüber lehnen die befragten Unternehmen die Aussagen, die Nanotechnologie bilde ein neues Experimentierfeld ebenso ab wie, in abgeschwächter Form, auch die Aussage, dass die Technologiekompetenz abgerundet würde. Dieses Ergebnis widerlegt eindeutig die vielfach verbreitete Aussage, dass Nanotechnologie lediglich einen „Hype“ darstellt. Derartige Behauptungen werden zum Teil von Institutionen der Finanzwirtschaft sowie der Presse aufgestellt, ohne dass diese i.d.R. fachübergreifend fundierte Kenntnisse, einen qualifizierten oder gar fachwissenschaftlichen Hintergrund verfügen. Da aber gerade die Finanzierungsproblematik eine der wichtigsten Innovationsbarrieren für die Nanotechnologie darstellt, ist die Zusammenarbeit dieser Bereiche eine wichtige Herausforderung für die Zukunft, die insbesondere in Deutschland ungelöst ist.

Eine wesentliche Variable für die Einschätzung des zukünftigen Marktes durch die Unternehmen bildet deren Umsatzeinschätzung. Hier zeigt sich, dass die befragten Unternehmen durchaus positiv gegenüber den Potentialen ihres Kernproduktes (das über die Gesamtheit der Befragten ein extrem breites Anwendungsspektrum darstellt) in der Nanotechnologie eingestellt sind. Mehr als 50% der Unternehmen sehen für ihr Produkt mit höchster Priorität für das Jahr 2006 ein globales

Umsatzvolumen von 250 Mio. € und mehr als realistisch an. Weitere 26,7% der Unternehmen erwarten immerhin noch ein weltweites Marktvolumen von 50–250 Mio. €. Dieses zeigt die durchaus beachtlichen Umsatzpotentiale, die die Unternehmen für ihre Nanotechnologieprodukte sehen.

Interessant in diesem Zusammenhang ist auch die Erwartung bezüglich des potentiellen Marktvolumens Deutschlands am Weltmarkt. Eine Marktprognose lässt sich hieraus allerdings nicht ableiten. Hier zeigt sich, dass Deutschlands Anteil am Weltmarkt im Jahr 2006 bei weitem nicht mit den Forschungspotentialen Deutschlands in der Nanotechnologie in der Gegenwart korrespondiert. Während die Forschungsleistung heute als überzeugend angesehen wird, liegen die Marktanteile vorwiegend im Mittel zwischen 11% und 25% – ein Beleg für das geringe Vertrauen deutscher Unternehmen in die Marktbildungsfähigkeit.

Die Ergebnisse der Unternehmensbefragung haben gezeigt, dass der Bereich Chemie (einschließlich Materialien) eindeutig an der Spitze der Nanotechnologiefirmen in Deutschland steht, gefolgt von den Bereichen Life Sciences (Medizintechnik/Gesundheit) sowie Information und Kommunikation. Die Stärke des Bereiches Chemie in Deutschland wird noch dadurch unterstrichen, dass die Mehrzahl der befragten Unternehmen in diesem Bereich die zentralen Konkurrenten in Deutschland und den USA sehen.

Im Bereich Chemie liegen die zentralen funktionalen Eigenschaften in den verbesserten Werkstoffeigenschaften und der Oberflächenfunktionalisierung, gefolgt von der Schutzfunktion sowie den optischen Effekten, also durchaus klassischen und anwendungsnahen Anforderungen. Offenbar befindet sich die deutsche Industrie im Bereich der Nanotechnologie in einer guten Marktposition.

### **Schlußfolgerung**

Produkte, die nanotechnologische Komponenten enthalten, sind bereits heute ein Alltagsgegenstand. Ein anschauliches Beispiel dafür sind Festplatten, die auf dem GMR-Effekt beruhen. Zahlreiche andere Produkte diffundieren langsam in den Markt. Optimistische Markteinschätzungen, wie sie offenbar in der Vergangenheit z.B. bei Carbon Nanotubes getroffen worden sind, bergen die Gefahr, Erwartungen zu wecken, die nicht erfüllt werden können. Der kritische Preisvergleich mit möglichen alternativen Technologien stellt einen Schlüssel dar, zukünftige Anwendungsfelder der Nanotechnologie kritisch zu untersuchen und das Potential korrekt einzuordnen.

### **Literatur**

- [1] H.-J. Fecht et al., Nanotechnology Market and Company Report „Finding Hidden Pearls“, WMTech – Universität Ulm, 2003
- [2] R. Compañó and A. Hullmann, „Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators,“ Nanotechnology, Vol. 13, pp. 243-247, 2002
- [3] Manfred Scheu, Project Leader Nanotechnology Working Group, „Nanotechnology patents at the EPO“, Oktober 2004, [http://academy.epo.org/schedule/2004/\\_pdf/scheu.pdf](http://academy.epo.org/schedule/2004/_pdf/scheu.pdf)
- [4] W. Luther et al., „Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt“, VDI-TZ GmbH, Düsseldorf, 2004

1. Fassung [14.11.07]  
hier: 2., aktualisierte Fassung [23.11.07]

**Anschrift des Autors:**

Dr. Mattias Werner  
NMTC – Nano- and Microtechnology Consulting  
www.nmtc.de  
Soorstr. 86  
D – 14050 Berlin