

Per Anhalter durch die Nanotechnologie



In diesem Kapitel

- ▶ Was ist Nanotechnologie?
- ▶ Wie wird die Nanotechnologie die Welt verändern?
- ▶ Welche Unterschiede gibt es zwischen der Wissenschaft und Science-Fiction?
- ▶ Wie investiert man in die Nanotechnologie, ohne Haus und Hof zu verlieren?

Die Notwendigkeit ist die Mutter der Erfindung.

Platon, Der Staat (ca. 370 v. Chr.)

Willkommen in der Welt der Nanotechnologie, einer Technologie, die in der Zukunft (beinahe) alle Ihre Wünsche erfüllen wird. Da Sie dieses Buch gekauft haben, wissen Sie wahrscheinlich schon etwas über dieses Thema. Aber sicherlich haben Sie noch eine ganze Reihe von offenen Fragen. Vielleicht haben Sie von der Nanotechnologie in den Nachrichten gehört, wo sie als »nächste industrielle Revolution« bezeichnet wurde, gefolgt von einigen Börsenkommentaren. Vielleicht sind Sie auch ein Will-Smith-Fan und haben seinen Film *I, Robot* aus dem Jahr 2004 gesehen, in dem »Nanite« die Rettung herbeiführen, indem sie den Hauptcomputer von innen her zerstören. Lassen wir einmal Börsenaspekte und interessante Drehbücher beiseite: Was ist Nanotechnologie genau? Brauchen Sie die Nanotechnologie wirklich? Kann man mit der Nanotechnologie wirklich Geld verdienen oder wird man wie mit all den »Dotcoms« sein letztes Hemd verlieren? Dies sind berechtigte Fragen, die wir in diesem Kapitel zu beantworten versuchen.

Das Wesen der Nanotechnologie

Wir beginnen dieses Kapitel mit einer Definition der Nanotechnologie. Danach zeigen wir auf, dass diese Technologie nicht nur wünschenswert, sondern unvermeidlich ist. Danach erklären wir im Einzelnen so kurz und knapp wie möglich, was in Zukunft von der Nanotechnologie zu erwarten ist.

Was ist Nanotechnologie?

Nano, das griechische Wort für »Zwerg«, steht für »ein Milliardstel«. Längen in diesem Bereich werden in Nanometern (abgekürzt nm) angegeben, was ein milliardstel Meter bedeutet. Um einen Vergleich zu geben: Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von etwa 75.000 nm. Schaut man aus der anderen Richtung, so ergeben zehn Wasserstoffatome, aneinander aufgereiht, gerade 1 nm. Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die Größen von Objekten, beginnend mit einem Durchschnittsmenschen und endend mit einem Wasserstoffatom.

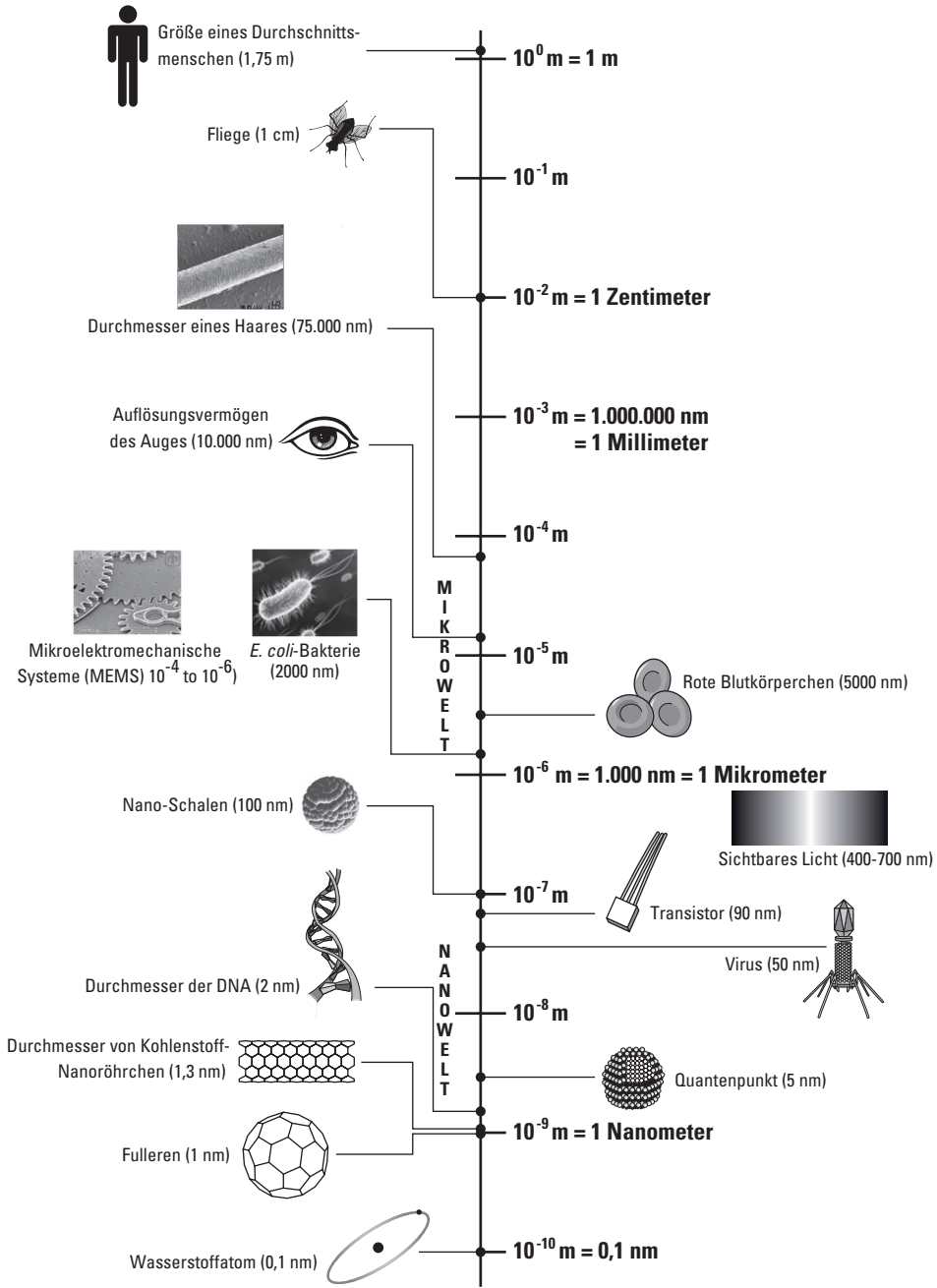


Abbildung 1.1: Größenvergleich vom Menschen (1,75 m) bis hinunter zum Wasserstoffatom (0,1 nm)

Definition

Es ist nicht ganz einfach, die Nanotechnologie zu definieren und abzugrenzen, zumal das Gebiet der Nanowissenschaften nicht neu ist. Chemiker werden beispielsweise sagen, dass sie bereits seit Hunderten von Jahren eine Nanowissenschaft betreiben. Farbige Fenster, wie man sie in mittelalterlichen Kirchen findet, enthalten Gold-Nanoteilchen verschiedener Größe, die in das Glas eingebettet sind; die Größe dieser Teilchen bestimmt die Farbe des Glases: Orange, Purpur, Rot oder Grün. In seiner Doktorarbeit berechnet Einstein die Größe eines Zuckermoleküls als ein Nanometer. Man kann also sowohl die mittelalterlichen Glashersteller als auch Einstein zu Recht als Nanowissenschaftler bezeichnen. Neu an der gegenwärtigen Nanowissenschaft sind die energische Ausrichtung auf die gerade entstehende anwendungsorientierte Technologie und die Entwicklung der dazu erforderlichen Werkzeuge.

Begegnet man einem unklaren Begriff, der für verschiedene Leute verschiedene Bedeutungen haben kann, ist es manchmal sinnvoll, einen Ausschuss einzusetzen und ihn mit der Entwicklung einer Arbeitsdefinition zu beauftragen. Einen solchen Ausschuss hat es tatsächlich gegeben (die amerikanische »National Nanotechnology Initiative«), der die Nanotechnologie wie folgt definiert hat:

1. Die Nanotechnologie beinhaltet Forschung und technologische Entwicklung im Bereich von 1 nm bis 100 nm.
2. Die Nanotechnologie erzeugt und bedient sich Strukturen, die aufgrund ihrer Größe völlig neue Eigenschaften aufweisen.
3. Die Nanotechnologie beruht auf der Fähigkeit, im atomaren Maßstab zu kontrollieren und zu manipulieren.

Die Punkte 1 und 3 sind relativ klar, aber der Ausdruck »völlig neue Eigenschaften« im zweiten Punkt mag verwundern. Im Nanometerbereich führen die Wechselwirkungen der Atome und die zugrunde liegende Physik zu exotischen Eigenschaften, die im makroskopischen Bereich nicht auftreten. »Wie exotisch?«, mögen Sie fragen. Im atomaren Bereich verlassen wir das Reich der klassischen Physik und begeben uns in die Welt der Quantenmechanik. David Rothman zitiert in seinem Artikel »Will the Real Nanotech Please Stand Up«, veröffentlicht im März/April 1999 in der *Technological Review*, in diesem Zusammenhang Mark Reed, einen Nanoelektroniker der Yale University:

Die physikalische Intuition versagt in der Nanowelt kläglich. ... man beobachtet eine Anzahl ungewöhnlicher Effekte. Beispielsweise verhalten sich ganz gewöhnliche Elektronen in der Nanowelt seltsam: Es ist, als ob man Tennisbälle gegen eine geschlossene Garagentür wirft, und der Ball kommt auf der anderen Seite heraus.

Um noch ein weiteres Beispiel zu geben: Gold-Nanoteilchen besitzen in der Tat Farben, Schmelzpunkte und chemische Eigenschaften, die sich deutlich von denen der makroskopischen Goldbarren unterscheiden, die sich im Keller der Deutschen Bank befinden. In diesen großen Barren gleichen sich die Wechselwirkungen der Goldatome im Mittel aus, wodurch sich die allgemeinen Eigenschaften und das Aussehen verändern. Ein einzelnes Gold-Nanoteilchen besitzt andererseits seine individuelle Besonderheit; es stellt ein winziges Objekt dar, das frei von ausgleichenden Effekten unzähliger anderer Goldatome ist.

Entwicklung in der Nanotechnologie

Wenn wir die Welt um uns herum betrachten, stellen wir fest, dass auch die Natur selbst auf der molekularen Ebene arbeitet. Die Nanotechnologie versucht, die Natur nachzuahmen und die Vorteile der einzigartigen Eigenschaften von Nanomaterialien auszunutzen, indem sie wirksamere Methoden zur Kontrolle und Manipulation von Molekülen entwickelt. Allgemein folgt die Technologie dem Prinzip: je kleiner, desto besser. Betrachtet man die technologische Entwicklung, so beobachtet man eine fortlaufende Verkleinerung. Computer, die in den 1950er Jahren ganze Räume füllten, passen nun auf den Schoß; Handys, die in den 1980er Jahren noch Ziegelsteingröße hatten, passen nun in eine Hemdtasche. Die Bequemlichkeit der Verbraucher, der wirtschaftliche Umgang mit Ressourcen, der Wettbewerb und die Vorteile einer schnelleren Verarbeitung, eine höhere Produktivität sowie eine verbesserte Qualität tragen alle zum Drang zur Verkleinerung bei.

Allerdings wird die Technologie nicht nur immer kleiner, sie entwickelt sich auch immer schneller. Jede neue technologische Generation baut auf bereits vorhandenem Wissen auf. Auch dank des Internets nimmt dieser Wissensschatz – und mit ihm der Austausch von Information – immer schneller zu. Zur Veranschaulichung dieses Fortschritts der Technologie mag ein Blick auf die Entwicklung elektronischer Bauelemente von der Vakuumröhre über den Festkörpertransistor bis hin zum Nanoröhrchen-Feldeffekttransistor nützlich sein.

- ✓ **Vakuumröhre (1877):** Die Vakuumröhre ist die Vorläuferin des Transistors. Sie hat Ähnlichkeiten mit einer Glühbirne, besitzt aber drei anstatt nur zwei Anschlüsse. Sie war groß, heiß und neigte zum Durchbrennen.
- ✓ **Festkörpertransistor (1947):** Statt eines feinen Drahtes (Filaments) nutzt der Festkörpertransistor die Wirkung verschiedener Materialien (Halbleiter und Metalle) aus, um zwischen den Zuständen Ein und Aus hin- und herzuschalten. Er ist dadurch wesentlich kleiner, gibt weniger Wärme ab und ist deutlich standfester.
- ✓ **Transistor aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen (1997):** Ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen (siehe Abbildung 1.1) besteht aus einer Graphit-Ebene, die zu einem Röhrchen aufgerollt ist. Es gibt zwei Grundtypen von Nanoröhrchen, metallische und halbleitende. Sie wurden 1991 entdeckt; nach nur sieben Jahren konnte man sie für den Transport von Elektronen zwischen zwei Elektroden ausnutzen. Nanoröhrchen-Transistoren sind nicht nur unvorstellbar klein (eben nano!), sie verbrauchen auch weniger Energie und geben weniger Wärme ab, da nur wenige Elektronen nötig sind, um festzulegen, ob der Transistor an oder aus ist. Kohlenstoff-Nanoröhrchen werden in Kapitel 4 ausführlich vorgestellt.

Es dauerte 50 Jahre, um von der Vakuumröhre zum ersten Festkörpertransistor zu gelangen, und weitere 50 Jahre beständiger Verbesserung, um diesen zu perfektionieren. Nachdem aber die notwendigen Verfahren und das dazugehörige Wissen einmal entwickelt waren, reichten sieben Jahre von der Entdeckung der Kohlenstoff-Nanoröhrchen bis zur Verwirklichung des vielleicht ultimativen Transistors.

Anwendungen

Die Nanotechnologie ist ihrem Wesen nach interdisziplinär. Wenn man zum Beispiel nur die Chemie benutzt, um die Eigenschaften von Atomen im Nanometermaßstab zu verstehen, wird man allenfalls die halbe Wahrheit erfahren. Mit Hilfe der Physik und der Quantenmechanik ergibt sich ein weitaus genaueres Bild. Chemiker, Physiker und Mediziner arbeiten zusammen mit Ingenieuren, Biologen und Computerwissenschaftlern, um die Richtung, Entwicklung und Anwendung der Nanotechnologie zu bestimmen. Die Nanotechnologie besteht in der Tat aus vielen Disziplinen, die voneinander profitieren. Verschiedene Zweige, wie etwa Materialerzeuger, Computerhersteller oder die Gesundheitsindustrie tragen das Ihre dazu bei, dass alle ihren Nutzen ziehen, entweder direkt durch eigene Fortschritte in der Nanotechnologie oder indirekt durch die Fortschritte anderer im Nanobereich. Man denke in diesem Zusammenhang zum Beispiel an Quantencomputer, die die Wirksamkeit neuer Medikamente auf Nanobasis simulieren.

Es gibt zwei grundlegende Ansätze zur Herstellung auf der Nanometerebene: *Top-down* und *Bottom-up*. Ein *Top-down*-Ansatz (von oben nach unten) lässt sich mit einem Bildhauer vergleichen, der etwas aus einem Marmorblock herausarbeitet; man arbeitet zunächst im makroskopischen Bereich und schneidet dann so lange weg, bis das Nano-Erzeugnis zurückbleibt. Die Computerindustrie beispielsweise nutzt diesen Weg zur Herstellung von Mikroprozessoren. Der zweite Ansatz ist die *Bottom-up*-Herstellung (von unten nach oben), in der die Produkte Atom für Atom aufgebaut werden. Das kann sehr zeitaufwändig sein, sodass man vielfach die so genannte *Spontan-Aggregation* (self-assembly) einsetzt, bei der sich unter gewissen Bedingungen Atome und Moleküle eigenständig und spontan zum gewünschten Produkt zusammenfügen (die Spontan-Aggregation wird in Kapitel 8 ausführlicher vorgestellt).

Eine Reihe von Sciencefiction-Geschichten dreht sich um diese Idee der Spontan-Aggregation: Sie sind voll von winzig kleinen, sich selbst vervielfältigenden Maschinen, die schließlich Amok laufen (der Kasten *Willkommen im Nano-Park* weiter unten beschäftigt sich näher mit solchen phantastischen Vorstellungen). Für die nähere Zukunft allerdings ist es wahrscheinlicher, dass sich der »Top-down«-Zugang durchsetzt, da er eine größere Kontrolle erlaubt und – was vielleicht noch wichtiger ist – da man auf die bewährten Methoden der Computerindustrie zurückgreifen kann. Wenn wir wetten müssten – was wir meiden, da wir als Wissenschaftler wissen, dass die Bank immer gewinnt –, würden wir unser Geld darauf setzen, dass der »Top-down«-Zugang zumindest für eine gewisse Zeit vorherrschen wird.

Geschichte

Das Wort »Nanotechnologie« wurde 1974 von Norio Taniguchi geprägt, um die Materialbearbeitung mit Toleranzen von weniger als einem Mikrometer zu beschreiben. Aber das ist nicht der wirkliche Anfang bezogen auf den eigentlichen Sinn des Wortes. Die Entwicklung wurde vielmehr durch drei Ereignisse bzw. Entdeckungen in Bewegung gesetzt, die alle von Nobelpreisträgern stammen (und wenn Nobelpreisgewinner etwas sagen, sollte man zuhören und zu verstehen versuchen):

- ✓ **Die Vision:** Im Jahr 1959 hielt der Physiker Richard Feynman seinen berühmten Vortrag *Am unteren Ende gibt es sehr viel Platz* (There's Plenty of Room at the Bottom), in dem

er die Möglichkeit einer Technologie auf atomarer Ebene diskutierte. (Den Vortrag finden Sie unter www.ist.caltech.edu/~feynman/plenty.html.)

- ✓ **Sehen im Nanometerbereich:** Im Jahr 1981 entwickelten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer vom Züricher Forschungsinstitut von IBM das Raster-Tunnel-Mikroskop (Scanning Tunneling Microscope STM), mit dem es zum ersten Mal möglich war, einzelne Atome sowohl zu sehen als auch zu manipulieren. (Mehr zum Raster-Tunnel-Mikroskop finden Sie in Kapitel 3.)
- ✓ **Nanostrukturen:** Im Jahr 1985 entdeckten Robert F. Curl Jr., Harold W. Kroto und Richard E. Smalley die so genannten Buckminster-Fullerene (Fullerene, Buckyballs, siehe Abbildung 1.1), fußballartige Moleküle aus Kohlenstoff mit einem Durchmesser von nur 0,7 nm. Fullerene werden in Kapitel 4 näher vorgestellt.

Nanotechnologie im täglichen Leben

Die Nanotechnologie wird unseren Lebensstandard verbessern – ohne Wenn und Aber. Richtig eingesetzt, wird sie unser Leben sicherer machen, die Gesundheitsversorgung verbessern und den Verbrauch begrenzter Ressourcen verringern. Sie betrifft also die Grundlagen unseres Lebens. Die Menschheit versucht seit Jahrtausenden, diese Ziele zu erreichen, weil sie sich bewusst ist, dass ihre Zukunft von ihnen abhängt. Wenn sich die Nanotechnologie so entwickelt, wie wir uns das vorstellen, werden wir dieser Zukunft einen Schritt näher kommen.

Sicherheit

»Sicherheit« ist ein weiter Begriff; er reicht von der Sicherheit unserer Grenzen über die Sicherheit unserer Infrastruktur bis hin zur Sicherheit von Computernetzwerken. Die folgende Liste gibt einige Beispiele, wie die Nanotechnologie das Gebiet der Sicherheit revolutionieren wird.

- ✓ **Verbesserte superleichte Materialien:** Man stelle sich Materialien vor, die zehnmal fester sind als Stahl, aber nur einen Bruchteil wiegen. Mit Hilfe derartiger Materialien könnte die Nanotechnologie Panzer, Flugzeugrümpfe, Raumfähren, Hubschrauber, Brücken und Bauwerke revolutionieren, um eine nie da gewesene Sicherheit zu gewährleisten. Nanoverbundstoffe könnten zum Beispiel eines Tages zu Flügeln mit variabler Form führen, die die heute üblichen mechanischen Klappen ablösen. Die heute für kugelsichere Westen verwendete Kevlar-Faser könnte durch Materialien ersetzt werden, die einen noch besseren Schutz bieten.
- ✓ **Verbesserte Computer:** Leistungsfähigere und kleinere Computer helfen uns, Daten zu verschlüsseln und so ihre Sicherheit zu gewährleisten. Die Quantenverschlüsselung, die auf den einzigartigen Eigenschaften der Quantenmechanik beruht, wird für absolute Datensicherheit in Industrie, Verwaltung und Militär sorgen. Auf der anderen Seite können wir die Quantenmechanik auch zum Aufbau von Quantencomputern nutzen, die fähig sind, die heute benutzten Verschlüsselungen zu entziffern, was für den Kampf gegen den Terrorismus von großem Vorteil wäre. Darüber hinaus sind Quantencomputer zur Durch-

führung von Simulationsrechnungen, etwa zur Vorhersage von Naturkatastrophen, und zur Erkennung von Mustern besonders geeignet. Letztere ist vor allem für die Biometrie von Bedeutung, der Identifizierung anhand persönlicher Merkmale, z.B. bei der Gesichtserkennung.

- ✓ **Verbesserte Situationsanalyse:** Chemische Sensoren auf der Basis der Nanotechnologie werden unglaublich empfindlich sein; sie können im Prinzip ein bestimmtes Molekül unter Milliarden anderer nachweisen. Solche preisgünstigen Einweg-Sensoren können zum Beispiel die Sicherheit von Flughäfen verbessern oder uns vor Briefen mit Milzbrand-erregern warnen. An Bord unbemannter Flugzeuge können Sensoren nicht nur Chemikalien aufspüren, sondern auch Bilder mit unglaublich hoher Auflösung liefern. Diese Photos können dann komprimiert und auf Energie sparenden, hochauflösenden Displays dargestellt werden, die der einzelne Soldat wie eine Armbanduhr tragen kann und ihm so eine Situationsanalyse in Echtzeit erlauben.
- ✓ **Verbesserte Munition:** Nanometalle, also metallische Teilchen mit Nanometerabmessungen wie etwa Nanoaluminium, sind aufgrund ihrer geringen Größe, aber großen Oberfläche chemisch äußerst reaktiv. Variation der Größe dieser Nanometalle erlaubt eine Kontrolle ihrer Explosionskraft, wodurch man deren Wirkung eingrenzen kann. Der Einsatz von Nanometallen in Bomben und Treibsätzen erhöht die Geschwindigkeit, mit der Energie freigesetzt wird, wobei zugleich weniger Rohstoffe verbraucht werden.

Gesundheitswesen

Die äußere Sicherheit der Welt zu erhöhen ist ein wichtiges Ziel, aber wie steht es mit der *inneren Sicherheit* des Menschen? Mit Hilfe der Nanotechnologie wird uns unser Körper mehr zugänglich sein als jemals zuvor. Dies betrifft zum Beispiel die folgenden Aspekte:

- ✓ **Diagnose:** Krankenhäuser werden dank der Nanotechnologie über schnellere und preisgünstigere Diagnosegeräte verfügen. Das Scheckkartenlabor (Lab-on-a-Chip) steht bereits in den Startlöchern, um Erkrankungen eines Patienten ohne Verzögerungen zu entdecken und direkt an betroffenen Stellen zu testen und Medikamente zu verabreichen, so dass man nicht länger auf Diagnosen anhand von Vermutungen angewiesen ist, mit denen die Medizin bis heute leben muss. Neue Kontrastmittel können im Blutkreislauf eingesetzt werden und Probleme wie etwa Tumore mit unglaublicher Sicherheit anzeigen. Die Nanotechnologie wird aber die Diagnoseausrüstung nicht nur verbessern, sondern auch transportierbar machen, sodass sie Zeit gewinnend in Krankenwagen eingesetzt werden kann. Zudem kann man die DNA neugeborener Kinder sehr schnell analysieren, um mögliche Erbkrankheiten zu entdecken, sodass man sie bekämpfen kann, bevor sie akut werden.
- ✓ **Neue Medikamente:** Die Nanotechnologie wird dazu beitragen, dass man die richtige Dosis von Medikamenten genau an der Stelle im Körper verabreicht, an der sie benötigt wird. Nanoshells mit einem Durchmesser von etwa 100 nm werden durch den Körper schwimmen und sich nur an Krebszellen anlagern. Wenn man sie mit einem Laser bestrahlt, werden sie Wärme abgeben und so den Tumor »kochen«, das heißt ihn zerstören. Die Nanotechnologie wird die Herstellung biokompatibler Gelenk- und Gefäßprothesen ermöglichen, die ein Leben lang halten und nicht nach wenigen Jahren ersetzt werden müssen.

Ressourcen

Menschen gehören heute schon zu den wenigen Dingen, an denen kein Mangel herrscht, und es sieht nicht so aus, als sollte sich das so bald ändern. Wenn wir überhaupt überleben wollen – geschweige denn gut leben –, müssen wir Wege finden, die Reichtümer dieser Welt effizienter zu nutzen. Dazu kann die Nanotechnologie beitragen:

- ✓ **Energie:** Die Nanotechnologie wird mit neuen Methoden dafür sorgen, dass wir die gegenwärtigen Energievorräte effektiver nutzen; gleichzeitig wird sie aber auch neue Alternativen aufzeigen. Autos werden leichtere und festere Motorblöcke und Karosserien besitzen; neue Zusätze werden den Benzinverbrauch verringern. Die Beleuchtung in Häusern wird auf Quantenpunkten (Quantum Dots) beruhen, Nanokristalliten von 5 nm Durchmesser, die elektrische Leistung vollständig in Licht umwandeln und sie nicht in Form von Wärme verschwenden. Solarzellen werden endlich wirklich kostengünstig arbeiten, während Wasserstoff-Brennstoffzellen aufgrund von Nanomaterialien und Nanoverbundstoffen einen Aufschwung erleben werden. Eines der wichtigsten Ziele sind wiederverwendbare Katalysatoren, die unter Bestrahlung mit Sonnenlicht Wasser sehr schnell zersetzen können, sodass die lang ersehnte Wasserstofftechnologie auf ökonomische Weise verwirklicht werden kann. Wie immer dieser Katalysator auch aussehen mag, er wird mit den Mitteln der Nanotechnologie hergestellt werden.
- ✓ **Wasser:** Die Nanotechnologie wird wirksame Methoden zur Reinigung von Wasser zur Verfügung stellen, die den Ländern der Dritten Welt Zugang zu sauberem Wasser ermöglicht. Wenn wir die damit verbundenen Energieprobleme lösen, wird die Entsalzung von Meerwasser aus den Ozeanen nicht nur genug Trinkwasser liefern, sondern auch ausreichend Wasser für die Bewässerung von Feldern.

Du sagst, du willst 'ne Revolution

Wir sagen voraus, dass uns in den nächsten 50 Jahren eine Reihe gravierender Umwälzungen überrollen wird, Revolutionen, die einen großen Einfluss sowohl auf unser tägliches Leben als auch auf die Weltwirtschaft haben werden und die auf den Gebieten der Nanotechnologie, der Energietechnik und der Robotik beruhen werden. Im Folgenden werden wir diese Umwälzungen im Einzelnen betrachten und dabei auch Vorhersagen auf die Jahre wagen, in denen sie jeweils ihre Höhepunkte – sowohl technologisch als auch finanziell – haben werden. Natürlich besitzen wir keine Zeitmaschine, um unsere Vorhersagen zu prüfen; sie basieren auf dem »Bauchgefühl« der Autoren sowie auf der Beobachtung der gegenwärtigen Trends. Wir erzählen allerdings keine Märchen. Im Februar 2005 fragte die Internetzeitschrift *Business Week Online* ihre Leser, zu welchem Zeitpunkt sie einen Einfluss der Nanotechnologie auf ihr Leben erwarteten. 34 Prozent antworteten 2007, weitere 51 Prozent 2015. Es geht also nicht mehr um die Frage »ob«, sondern nur noch um das »wann«; ansonsten ist die Entwicklung so unausweichlich wie der Tod.

- ✓ **Nanotechnologie:** Wir sind davon überzeugt, dass etwa im Jahr **2012** bedeutende revolutionäre Produkte auf den Markt kommen werden; zugleich wird es gesunde Industriefirmen in diesem Bereich geben. Eine Nanotechnologie-Spekulationsblase wird sich etwa 2010

ausbilden, die aber wohl nicht das Ausmaß der Internet-Blase haben wird (vergleichen Sie den Abschnitt *Schneiden Sie sich selbst eine (kleine) Scheibe von der Nanowelt ab* weiter unten in diesem Kapitel). Zu den ersten Produkten (schon vor 2010) werden Energie sparende Computerspeicher mit hoher Packungsdichte, langlebige Batterien sowie eine Reihe von medizinischen Anwendungen z.B. für die Krebsdiagnose und -therapie gehören.

Als Nächstes werden Fortschritte in der Computertechnologie (2015) sowie neue Materialien und Verbundstoffe (bis 2020) folgen. Die Entwicklungen in den Bereichen Computer und Medizin werden dabei denen im Materialbereich vorausgehen, wobei es zwar Überschneidungen geben wird, aber auch die genannten jeweiligen Höhepunkte.

- ✓ **Energie:** Unsere Kristallkugel sagt voraus, dass **2025** das Energie-Jahr der Nanotechnologie sein wird. Da der Energiebedarf vor allem in Schwellenländern wie China und Indien ständig steigt, wird Erdöl ein weiterhin heiß begehrter Rohstoff sein. Der Ölpreis und der wirtschaftliche Ertrag hängen invers voneinander ab; je höher der Ölpreis, desto geringer der Ertrag. Die Firma Goldman Sachs hat im April 2005 vermutet, dass uns eine Zeit mit Spitzenpreisen für Erdöl bevorsteht, die bei 105 Dollar pro Barrel liegen werden, beinahe das Doppelte des heutigen Preises. Unglücklicherweise steigt die Erdöl-Förderkapazität langsamer als die Nachfrage, was die Lage nicht besser macht.

Die Nanotechnologie wird dabei eine effizientere Nutzung der gegenwärtigen Energiequellen mit der Suche nach alternativen Quellen verbinden. Die Nanomaterialien, die im Jahr 2020 zum Beispiel für Fahrzeuge zur Verfügung stehen werden, werden nicht nur leichter und fester sein, sondern auch für eine effizientere Gewinnung, Speicherung und Verteilung von Energie sorgen. Dabei trägt sie zum Übergang vom Öl hin zu Solarenergie, Wasserstoffspeicherung und vielleicht sogar zu erneuerbaren Biobrennstoffen bei (zum Beispiel Rapsöl und Bioalkohole wie Ethanol und Methanol).

- ✓ **Robotik:** Hier wird **2045** der entscheidende Höhepunkt sein. Dies mag natürlich etwas phantastisch klingen, weil Sie vielleicht etwas mit der Persönlichkeit von C-3PO und der Macht der Jedi-Ritter erwarten und man heutzutage allenfalls R2-D2 bekommen kann – nur Schnickschnack. Es gibt jedoch auch Kräfte, die darauf drängen, dass die Robotik wirtschaftlich angewendet werden kann: das Militär, die Raumfahrt und die Arbeitswelt. Schon in nächster Zukunft werden unbemannte Flugzeuge (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) kontinuierlich unsere Grenzen überwachen, während Roboter zur Räumung von Landminen eingesetzt werden. Auch die Raumfahrt wird auf Roboter zurückgreifen, um das Risiko für Menschen zu verringern und uns gleichzeitig zu erlauben, weiter vorzudringen als jemals zuvor.

Sobald die Nanotechnologie bessere Sensoren und Prozessoren entwickelt hat und die Revolution im Energiebereich ausreichend preiswerte Energie bereitstellt, werden Roboter eingesetzt, um einfache manuelle Tätigkeiten zu übernehmen und so den allgemeinen Lebensstandard zu heben. Dies wird sich nicht auf Spielzeugroboter und Staubsauger beschränken, sondern bis hin zu voll-automatisierten Fertigungsanlagen reichen, die den westlichen Staaten Geld einbringen werden. Vielleicht wird es ein »Roboter-Rüstungsrennen« geben, in dem es nicht um Militärmacht, sondern um Produktionsmittel geht: Jeder Staat wird versuchen, so schnell wie möglich preisgünstige Konsumgüter herzustellen.

All dies wird in den nächsten Jahrzehnten langsam zu wachsen beginnen; sobald aber etwa 2030 die erforderlichen Maschinen zur Verfügung stehen, werden die entsprechenden Programme und die künstliche Intelligenz rasch folgen.

Einige dieser prognostizierten Ziele scheinen in der fernen Zukunft zu liegen, aber die Änderungen werden schneller einsetzen, als man denkt. Wenn Sie jetzt Ihr Studium beginnen, werden Sie all das voraussichtlich noch erleben.

Was können wir erwarten (und was nicht)?

Aller Zukunftseuphorie zum Trotz sollten unsere Erwartungen an die Nanotechnologie realistisch sein; wir müssen geduldig sein, da nicht alle Fortschritte der Nanotechnologie von heute auf morgen erreicht werden. Die Nanotechnologie ist kein Allheilmittel. Obwohl es mit Sicherheit phantastische Fortschritte geben wird, werden nicht alle unsere Vorstellungen verwirklicht werden können. Auf der anderen Seite wird die Nanotechnologie auch Entwicklungen mit sich bringen, an die wir heute überhaupt nicht denken und die vielleicht die Welt verändern könnten.

Auch die Nanowissenschaft ist nicht grenzenlos, sie beruht natürlich auf den naturwissenschaftlichen Gesetzen. Wir werden niemals in der Lage sein, etwas herzustellen, das im molekularen Maßstab chemisch völlig instabil ist. Wissenschaftler kennen diese physikalischen und chemischen Gesetze, aber es hat auch immer wieder Überraschungen gegeben. Wir werden daher im Laufe der Entwicklung auch dazulernen. Es scheint hier der geeignete Ort zu sein, anhand einiger Beispiele festzustellen, wo die Nanotechnologie heute steht, wo Verbesserungen zu erwarten sind, welche neuen Entwicklungen eintreten werden und was mit ziemlicher Sicherheit unerreichbar sein wird.

Stand der Nanotechnologie

Eine Reihe von Anwendungen der Nanotechnologie gibt es bereits in so unterschiedlichen Bereichen wie der Computertechnologie, der Verkehrssicherheit und der Medizin. Im Vergleich mit zukünftigen Entwicklungen mögen sie unscheinbar sein, aber sie nutzen kleine Dinge für große Effekte. Drei Beispiele mögen den heutigen Stand illustrieren:

- ✓ Transistoren der heutigen Prozesstechnologie haben die 100-nm-Schwelle unterschritten, das heißt, Transistoren sind nun »offizielle« Nanostrukturen. Die Geräte, in denen sie eingesetzt werden, werden immer kleiner und gleichermaßen immer leistungsfähiger (für Geräte, die so klein sind wie Handys).
- ✓ Sensoren für Airbags werden heutzutage in fast allen Autos eingesetzt und helfen, Leben zu retten. Sie besitzen zwar Mikrometerabmessungen und sind daher nicht wirklich »nano«, aber sie werden in Zukunft noch kleiner werden, zugleich aber noch leistungsfähiger und präziser.
- ✓ Zumindest ein Schwangerschaftstest (»First Response« von Carter-Wallace) verwendet sowohl Gold-Nanopartikel als auch Latex-Teilchen mit Mikrometerabmessungen auf einem Einweg-Teststreifen. Dabei wird die unterschiedliche Reflektivität von Gold-Nano-

teilchen verschiedener Größe ausgenutzt. Wenn eine Frau schwanger ist, gibt es ein bestimmtes Hormon, das dafür sorgt, dass die Gold- und die Latex-Teilchen zusammenklumpen. Die so entstandenen größeren Teilchen reflektieren eine andere Farbe; das führt dazu, dass ein pinkfarbener Fleck auf dem Teststreifen erscheint. Ohne Schwangerschaft ist das Hormon nicht vorhanden, die Teilchen verklumpen nicht, und der pinkfarbene Fleck erscheint nicht.

Voraussichtliche Verbesserungen

Die Nanotechnologie wird nicht nur neue Produkte und Verfahren hervorbringen, sondern auch bestehende weiterentwickeln. Im Januar 2005 veröffentlichte das Lemelson-Programm des Massachusetts Institute of Technology eine Liste der 25 wichtigsten Entwicklungen der letzten 25 Jahre. Die Nanotechnologie steht auf Platz 21. Wichtiger als die Position ist die Tatsache, dass die anderen 24 durch die Nanotechnologie beeinflusst und verbessert werden. Hier sind einige Beispiele:

- ✓ Handys mit langlebigeren Batterien
- ✓ Schnellere und genauere GPS-Systeme (Global Positioning System)
- ✓ Schnellere und kleinere Computer
- ✓ Datenspeichersysteme mit höherer Packungsdichte und geringerem Energieverbrauch
- ✓ Schnellere und genauere DNA-Tests

Man hätte auch neue Ansätze, die für eine effizientere Nutzung von Erdöl sorgen oder neue Verfahren zur medizinischen Diagnose und zur Verabreichung von Medikamenten auf diese Liste setzen können oder sogar attraktivere Sonnenschutzmittel. Die meisten Sonnenschutzmittel bestehen aus einer weißen, dicken, klebrigen Creme. Nanophase Technologies hat ein Mittel entwickelt, das transparent ist. Der wichtigste Bestandteil ist ein Material mit Nanometerabmessungen, das aufgrund der geringen Größe das sichtbare Licht nicht streut. Dies macht deutlich, dass die Nanotechnologie in allen möglichen Produkten auftauchen kann, selbst wenn – oder gerade wenn – es nicht offensichtlich ist.

Neue Entwicklungen

Die Nanotechnologie verspricht, ein Füllhorn voller Wunder zu werden. Sie wird unsere Gesundheit verbessern, den Verbrauch an Ressourcen zu optimieren helfen und den Lebensstandard erhöhen. Die Diagnose von Krankheiten auf molekularer Ebene wird zu neuen Behandlungsmethoden führen. Die Entwicklung von Materialien, die zehnmal fester sind als Stahl, aber nur ein Zehntel so viel wiegen, wird unser Transportwesen schneller und effizienter machen. Man stelle sich zum Beispiel vor, wie sich der Luftverkehr ändern wird, wenn die Flugzeugrümpfe leichter und fester werden, die Turbinen weniger Treibstoff verbrauchen und Sensoren und »intelligente« Materialien automatisch die Form der Flügel ändern, um den Luftwiderstand zu verringern. Neue Farben und Schutzschichten auf Basis der Nanotechnologie werden verhindern, dass Schmutz und Wasser auf Oberflächen von Arbeitsplatten

in der Küche, Autos und Fenstern haften bleiben. Man stelle sich Autos vor, die nicht mehr gewaschen werden müssen, weil Schmutz und Wasser vollständig abgewiesen werden; selbst Scheibenwischer sind dann überflüssig.

In Zusammenhang mit der Sauberkeit muss auch das desinfizierende Reinigungsmittel EcoTru von EnviroSystems genannt werden. Es ist das einzige Desinfektionsmittel, das bei der amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA in der Schädlichkeitsklasse IV eingeordnet wurde, das heißt, es schädigt weder Haut noch Augen und Lunge; es kann sogar gefahrlos verschluckt werden. Konventionelle Desinfektionsmittel enthalten Lösungsmittel; sie überschwemmen die Organismen mit giftigen Chemikalien, was für den Menschen genauso schädlich ist wie für kleine Lebewesen. EcoTru benutzt Nanokugeln aus elektrisch geladenen Öltröpfen, die in Wasser gelöst sind, um die Wirkstoffe zu transportieren, die schließlich die Membranen von Mikroorganismen durchdringen. Dieses Mittel ist so gut, dass es von »Ärzte ohne Grenzen« zur Keimtötung im Operationsaal verwendet wurde, als ihnen ihr übliches Antiseptikum ausging. Von den 500 Patienten, bei denen EcoTru eingesetzt wurde, bekam niemand eine Infektion. EcoTru wird heute bereits als Desinfektionsmittel in Flugzeugen, auf Kreuzfahrtschiffen und in Gesundheitseinrichtungen eingesetzt; der Erfahrung von »Ärzte ohne Grenzen« zufolge mag es zukünftig auch als Antiseptikum dienen.

Unerreichbare Ziele

Science-Fiction-Autoren beschreiben gerne Schwärme von Robotern mit Molekülgröße, die durch den menschlichen Körper schwimmen, die Arterien reinigen und Krebszellen erschließen. Weitere Schwärme von »Nanobotern« (Nanoroboter) bauen Atom für Atom die Welt um uns herum auf. Diese Szenarien sind äußerst unwahrscheinlich, wenn nicht sogar unmöglich. Sollten sie doch realisiert werden, wird es viele Dekaden, wenn nicht sogar Jahrhunderte dauern.

So wunderbar diese Vorstellung von Schwärmen von Nanobotern, die einen Körper heilen oder unbelebte Objekte mit rasender Geschwindigkeit auf- und wieder abbauen, auch sein mag: Diese Methode ist mit ziemlicher Sicherheit nicht der wirkungsvollste Ansatz. Die beste Medizin ist immer noch, den Körper zu unterstützen, sich selbst zu helfen. Der Aufbau unbelebter Objekte, mag es sich auch um etwas so Einfaches wie einen Stuhl handeln, Atom für Atom ist keinesfalls schnell zu bewerkstelligen. Es gibt wahrscheinlich einen besseren und einfallreichereren Weg, Dinge auf der Nanometerebene zusammenzubauen, indem man die Möglichkeiten ausnutzt, die die Chemie und die Wechselwirkungen von Molekülen miteinander bieten. Diese Möglichkeiten sind natürlich bei weitem nicht so spektakulär wie die Phantasien in der Sciencefiction-Literatur.

Deren dramatische Erzeugung und Verwendung makroskopischer Objekte (durch Nanoboter) sorgt zwar für spektakuläre Unterhaltung, ist aber nicht sehr wissenschaftlich. Das hat folgende Gründe: Die Chemie ist sehr kompliziert und verlangt die Kontrolle von Atomen in allen drei Dimensionen. Die an einer Reaktion beteiligten Atome spüren den Einfluss aller Nachbaratome. Um »mechanische« Arbeiten auf dieser Ebene durchzuführen (genau das wird von den Nanobotern erwartet), muss man die Bewegung jedes einzelnen Atoms kontrollieren – eine sehr schwierige Jongliererei.

Willkommen im Nanopark

Im Jahr 2003 veröffentlichte Michael Crichton, der Autor von *Jurassic Park*, mit *Beute* (Prey) ein weiteres Science-Fiction-Weltuntergangsbuch. Crichton führt uns in die geheimen Forschungslabore von Xymos Technologies, in dem sich selbst vervielfältigende mikroskopisch kleine Maschinen über die Wissenschaftler herfallen. Am Ende behalten die Menschen die Oberhand (entschuldigen Sie, dass wir das Ende verraten haben, aber muss es nicht immer einen Überlebenden geben, der das Buch kaufen kann?). Dieses Buch und zahllose weitere in der großen Tradition der Hightech-Katastrophenfilme bauen auf die augenscheinlich aufregendsten Aspekte einer sich entwickelnden Technologie und erfinden dann ein Worst-Case-Szenarium dessen, was alles schief gehen kann. Ohne einen Konflikt (Amok laufende Nanoboter) gibt es keine Lösung (die Menschen gewinnen) und damit auch keine Geschichte. Unglücklicherweise vermischt Crichton in seinen Bemühungen, die Geschichte glaubhaft zu machen, Fiktion und Wirklichkeit zu sehr; selbst der Firmenname Xymos ähnelt dem Namen einer tatsächlich existierenden Nanotechnologie-Firma (Zyvox). Hier eine kleine Liste der vielen Mängel:

- ✓ Crichton wirft zwei grundlegende Werkzeuge der Nanotechnologie, das Raster-Sonden-Mikroskop und das Elektronen-Mikroskop durcheinander. (Beide Verfahren werden in Kapitel 3 vorgestellt.)
- ✓ Die Beschreibung der Nanoboter ist ein bisschen übertrieben: »Eine Länge von einem Zehnmilliardstel eines Zentimeters«. Das ist nicht einmal die Größe eines Atoms, geschweige denn eines gesamten Roboters.
- ✓ Nanoboter sind zu groß, um in Synapsen eindringen und so Menschen kontrollieren zu können. Synapsen, die Verbindungen zwischen den Neuronen des zentralen Nervensystems, sind nur wenige Atome weit, während Nanoboter zumindest hundertmal größer sind. Hier kommt Crichton allerdings sein Fehler in Bezug auf die Größe der Nanoboter zu Hilfe, so dass er hier konsistent ist. Allerdings würden Nanoboter, die nur aus wenigen Atomen bestehen, niemals die Rechenfähigkeiten besitzen, die ihnen das Buch zuschreibt.

Derartige Bücher mögen von Nutzen sein, indem sie Interesse am Thema erwecken und die Menschen zur Wissenschaft bringen. Unglücklicherweise können sie aber auch in unserer Gesellschaft unnötige Ängste und Furcht in Bezug auf sich entwickelnde Technologien erwecken.

Diese nano-fixierte Science-Fiction begann im Jahr 1986 mit der Veröffentlichung von *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* von K. Eric Drexler, dem Gründer des Foresight Institute, einer gemeinnützigen Organisation zur Aufklärung der Öffentlichkeit über die Nanotechnologie. In dem Buch beschreibt er sich selbst vervielfältigende »Nanomonteur«, die Objekte Atom für Atom zusammenbauen. Er beschreibt auch ein Weltuntergangsszenarium, das »Grauer Leim« genannt wird: Myriaden sich selbst vervielfältigender Nanoboter stellen unzählige Kopien ihrer selbst her und verschlingen dabei die Erde. Das »Grau« deutet darauf hin, dass es sich um Maschinen handelt, die so klein sind, dass sie wie eine zähe Flüssigkeit

aussehen, eben »Leim«. Wissenschaftler haben seitdem spöttelnd auf diese Vision Drexlers herabgesehen; auch Drexler selbst sagte 2004, dass eine aus dem Ruder laufende Selbstvervielfältigung unwahrscheinlich sei.

In der Ausgabe der *Chemical & Engineering News* vom 1. Dezember 2003 bezogen Eric Drexler und Richard Smalley, Nobelpreisträger und Mitentdecker der Fullerene, Stellung und diskutierten das Für und Wider einer molekularen Herstellung. Der Artikel bestand aus einer Serie von Briefen zwischen beiden, in denen Drexler weiterhin sein Modell einer »mechanischen« Herstellung auf molekularer Ebene verteidigte, während Smalley es mit dem Argument ablehnte, selbst auf der Nano-Ebene sei »Chemie« absolut notwendig. Ein Streitpunkt war natürlich das »Grauer Leim«-Szenarium. Drexler verteidigte es als Warnung, die Kontrolle über die Nanotechnologie nicht zu verlieren, während Smalley es als unnötige Panikmache betrachtete, da es a) äußerst unwahrscheinlich sei und b) durch die Betonung des Negativen potenzielle öffentliche Unterstützung abschrecke. Am Ende konnten sich beide bezüglich der molekularen Herstellung nicht einigen; beide wollen aber fortfahren, die Möglichkeiten der Nanotechnologie zu fördern.

Schneiden Sie sich selbst eine (kleine) Scheibe von der Nanowelt ab

Die Nanotechnologie ist dabei, sich ihren Weg in die Weltwirtschaft zu bahnen, den wir uns wahrscheinlich in den kühnsten Träumen nicht vorstellen können. Aufgrund ihrer alles umfassenden Natur wird sie schwerlich einen genau begrenzten Industriezweig bilden, sie wird vielmehr eine ganze Reihe von Industrien betreffen. Vertraute Produkte wie Kleidung, Kosmetika und neue Industriefarben werden zu den ersten gehören, die von der Nanotechnologie verbessert werden. Wenn deren Herstellung beherrscht wird, werden neue innovative Produkte auf den Markt kommen. Die Geschäfte werden zunehmen, wobei all die Firmen verdrängt werden, die sich an die sich ändernden Bedingungen nicht anpassen. Wenn Sie daran interessiert sind, schnell Geld zu verdienen, und bereit sind, dafür in die Nanowelt der Atome und Moleküle hinabzusteigen, wird der Rest dieses Kapitels Ihren Appetit zügeln und versuchen, ein unserer Ansicht nach realistisches Bild der gegenwärtigen Industrie zu zeichnen – und wie man von ihr profitieren kann.

Die Nanotech-Industrie

Die National Science Foundation (die amerikanische Forschungsgesellschaft) rechnet damit, dass sich die Nanotechnologie bis zum Jahr 2015 zu einer Billionen-Dollar-Industrie entwickeln wird. Das sind zehn Prozent des heutigen Bruttoinlandprodukts der USA. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die amerikanische National Nanotechnology Initiative die Bundesmittel zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Nanotechnologie von 464 Millionen Dollar im Jahr 2001 auf 982 Millionen Dollar im Jahr 2005 erhöht hat. In Deutschland stieg die gesamte Förderung des Bundes (aufgeteilt zwischen Forschungsministerium, Wirtschaftsministerium und verschiedenen institutionellen Forschungseinrichtungen)

von 238 Millionen Euro im Jahr 2002 auf 298 Millionen Euro im Jahr 2005 an (Abbildung 1.2). Weltweit erreichte die staatliche Förderung der Forschung im Nanotechnologiebereich 4 Milliarden Dollar.

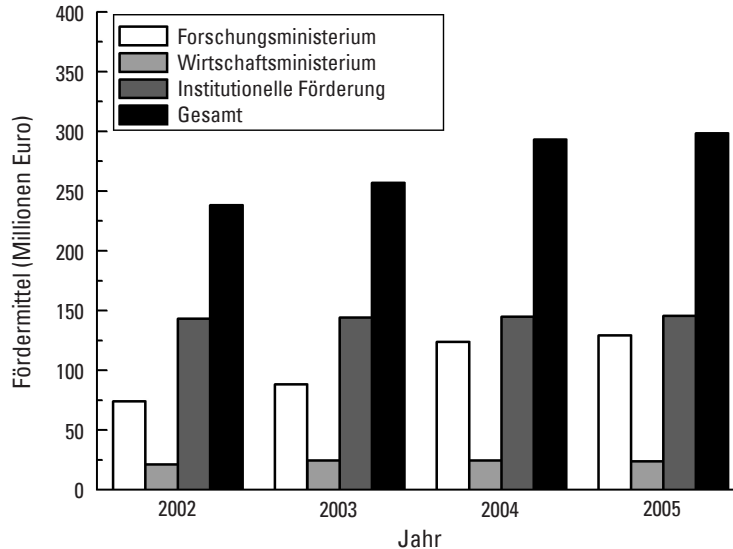


Abbildung 1.2: Entwicklung der Bundes-Fördermittel für die Nanotechnologie in den Jahren 2002 bis 2005

Lux Research Inc. zufolge betrug allerdings 2005 der Umsatz mit Produkten der Nanotechnologie nur 13 Milliarden Dollar, was, verglichen mit dem Gesamtvolumen, nicht sehr viel ist. Da die Nanotechnologie sehr vielschichtig ist und viele verschiedene Industrien berührt, wird sie in den nächsten Jahrzehnten nur sehr langsam wachsen. Daher sollte man geduldig sein und nicht erwarten, dass auf einen Schlag unzählige neue Produkte auf den Markt kommen werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt betreiben die Nanotech-Firmen entweder Forschung, um ihre Kenntnisse zu verbessern, oder sie produzieren für die Forschung. Die Entwicklung der Nanotechnologie wird von drei verschiedenen Gruppen getragen: von öffentlichen Einrichtungen (Universitäten und Forschungsinstituten), von großen Firmen und Firmen-Neugründungen. Für jede dieser Gruppen gibt es wiederum drei Möglichkeiten: Sie produzieren selbst, sie vergeben Lizenzen oder sie verkaufen die Rechte von vornherein. Dabei stellen Lizenzen eine ausgezeichnete Möglichkeit dar; sie garantieren Einnahmen bei nur geringen Betriebskosten.

Aufgrund ihrer bereits vorhandenen Möglichkeiten und ihrer Mittel zum Kauf von hoch entwickelten Ausrüstungen haben große Firmen gewisse Vorteile. Einige große Industrieunternehmen wie etwa aus der Pharmazie und Mikrochip-Produzenten können die Nanotechnologie leicht integrieren, da sie bereits über Prozesse und Fabrikationsanlagen verfügen, um ihre Produkte herzustellen. Diese Möglichkeiten bieten sich neu gegründeten Firmen nicht.

Dadurch sollten sich die kleinen Firmen nicht entmutigen lassen, denn sie sind flexibel genug, um sich anzupassen. Kleine Firmen sind bestens geeignet, Produkte, Prozesse und geistiges

Eigentum zu entwickeln, wodurch sie attraktive Übernahmekandidaten für große Gesellschaften werden. Bei einem solchen Ablauf gibt es nur Gewinner: Die Investoren verdienen Geld, die kleinen Firmen entwickeln rasch und effizient ihre Produkte, und die großen Gesellschaften produzieren die Endprodukte und verkaufen sie an die Verbraucher. Als Folge des großen Umfangs der Nanotechnologie müssen sich sowohl große als auch kleine Firmen auf Partnerschaften und Kooperationen einlassen, nicht nur zwischen verschiedenen Industriezweigen, sondern auch zwischen verschiedenen Firmen, Universitäten und Forschungsinstituten. Dabei werden nicht nur Forschungsergebnisse ausgetauscht, sondern vor allem auch Ausrüstungen geteilt. Um ein Beispiel zu geben: Die Rice University in Houston, Texas, hat eine Partnerschaft mit dem Texas Medical Center aufgebaut, der größten medizinischen Einrichtung der Welt. Darüber hinaus erwirbt die Rice University, wie auch andere Universitäten in den Vereinigten Staaten, durch ein spezielles Programm zusätzliche finanzielle Mittel. Dieses Programm beinhaltet die Ausbildung von Mitarbeitern in teuren und komplizierten Messverfahren und deren spätere Nutzung. Wenn man zum Beispiel lernen möchte, mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop zu arbeiten, so kostet das 200 Dollar für die Ausbildung, während jede weitere Stunde der Benutzung 20 Dollar kostet. Das ist unglaublich preiswert, zieht man die Gerätekosten von 500.000 Dollar und die Betriebskosten von 40.000 Dollar pro Jahr in Betracht.

Der Kampf der Spekulationsblasen: Nanotechnologie gegen Internet

Jede Industrie weist ihre eigene wirtschaftliche Spekulationsblase auf, d.h. eine Spekulation auf ihre Produkte, die zum Anstieg der Preise führt, was vermehrte Spekulation zur Folge hat, und damit einen weiteren Preisanstieg, bis die Preise zu einem gewissen Zeitpunkt ein absurdes Niveau erreichen, woraufhin die Blase platzt und die Preise plötzlich zusammenbrechen. Derartige Blasen sind schlecht, denn sie ermutigen die Leute, Geld ohne produktives Ergebnis in Dinge zu stecken, die sich nicht auszahlen. Darüber hinaus kann der folgende Crash wirtschaftliche Probleme hervorrufen. Auf der anderen Seite hat eine solche Blase auch ihre Vorteile, wenn man vermeiden kann, von ihr fortgespült zu werden – sie lässt Geld in eine neue Industrie fließen und unterstützt so ihr Wachstum. Aber allzu blinder Enthusiasmus wird allzu bald in sein Gegenteil umschlagen, wenn die Kräfte des Marktes Firmen ruinieren, die nicht in kurzer Zeit hohe Profite abwerfen.

Viele Industrien haben ihre Spekulationsblase gehabt: Die Eisenbahnindustrie, die Automobilindustrie; selbst die Tulpenindustrie hatte ihre wirtschaftliche Blase. Das jüngste Beispiel ist die Internet-Blase in den späten 1990er Jahren. Alan Greenspan, bis Januar 2006 Chef der amerikanischen Notenbank, hatte bereits 1996 davor gewarnt, indem er die Spekulation der Investoren »irrational überschwänglich« nannte. Das hätte zur Abschreckung eigentlich ausreichen sollen, aber dennoch haben bald darauf viele Leute viel Geld verloren.

Ist es also töricht, heute in die Nanotechnologie zu investieren? Nicht unbedingt. Ohne Zweifel wird es eine Nanotechnologie-Blase geben, wahrscheinlich in den nächsten fünf Jahren. Es ist aber zu erwarten, dass sie zwar »überschwänglich«, nicht aber »irrational« sein wird. In diesem Zusammenhang muss man daran erinnern, dass während der Internet-Blase Firmen mit einem Eigenkapital von 5.000 Dollar durch Rechtsanwälte und Marketingfachleute gegründet wurden,

hinter denen zwar eine Idee stand, aber nicht unbedingt ein Produkt. Niemand wusste, wie man die Idee auch anwenden konnte. Die wissenschaftlichen Grundlagen konnte jeder technische Assistent nach einigen Monaten Einarbeitung verstehen. Nanotechnologie und nanowissenschaftliche Forschung stehen dagegen auf einem anderen Blatt. Sie erfordern vertiefte naturwissenschaftliche Kenntnisse und zumeist einen Doktorgrad. Derartige vertiefte Erkenntnisse sind die Grundvoraussetzung für jede Firmengründung im Nanotechnologiebereich, wodurch sichergestellt ist, dass nicht jeder Möchtegern in diesem Bereich Erfolg hat.

Dieser Bedarf an technischem Wissen auf hohem Niveau verlangsamt natürlich das Wachstum der Nanotechnologie. Es mangelt an geeigneten Mitarbeitern; die Anzahl geeigneter Wissenschaftler ist geringer als die wachsende Nachfrage. Darüber hinaus ist die Zeit, die ein Produkt von der Forschung bis zur Marktreife benötigt, relativ lang. Auf der Haben-Seite der Nanotechnologie steht, dass es weniger Hindernisse auf dem Weg der Vermarktung gibt als im Falle des Internets. Damit Online-Firmen erfolgreich sein konnten, mussten Kunden über eigene Computer und Internetverbindungen verfügen und zudem Vertrauen in Online-Geschäfte entwickeln. Die Nanotechnologie wird dagegen zunächst in bereits bestehende Produkte integriert, so dass kein massiver Anpassungsprozess erforderlich sein wird.

Der größte Vorteil der Nanotechnologie gegenüber dem Internet als »nächste große Entwicklung« (und das, obwohl sie doch eigentlich »klein« ist) ist die große Menge an patentierbarem geistigen Eigentum. Innovationen für das Internet lassen sich nur schwer patentieren, so dass Wettbewerber ein Produkt innerhalb weniger Monate nachahmen und übernehmen können. Das geistige Eigentum im Bereich der Nanotechnologie stellt eine hohe Zugangsbarriere dar, sodass es nahezu unmöglich ist, Patente zu umgehen. Für einen solchen Versuch müssen Jahre veranschlagt werden, weshalb es für einen Wettbewerber einfacher ist, entweder einen völlig eigenständigen Ansatz zu entwickeln oder aber in Lizenz zu produzieren. Diese hohe Barriere ist *die* Chance für kleine Firmen; sie gibt ihnen Zeit zur Weiterentwicklung, ohne dass sie fürchten müssen, von den großen sofort geschluckt zu werden.

Caveat Emptor - Der Käufer muss Acht geben

Wenn man die jüngste Geschichte als Beispiel nimmt, könnte die kommende Spekulationsblase mit der Nanotechnologie ebenfalls ausufern und in wilden Aktienkäufen enden. Im folgenden Abschnitt versuchen wir, diese Spekulation in Grenzen zu halten und ein realistisches Bild zu zeichnen. Zum jetzigen Zeitpunkt sind nur wenige Nanotech-Firmen an der Börse vertreten; ihre Kursverläufe ähneln dabei mehr einem Elektrokardiogramm als einem stetigen Anstieg. Dies hat einige Firmen nicht davon abgehalten, die »Nano«-Karte zu spielen: 19 der 30 im Dow-Jones-Index vertretenen Gesellschaften haben Arbeiten im Nanobereich gestartet. Der folgende Abschnitt betrachtet zunächst beispielhaft zwei Firmen und stellt dann einige Indices vor, die für Sie von Vorteil sein könnten.

Nanosys

Im April 2004 beantragte Nanosys den Börsengang bei der amerikanischen Börsenaufsicht SEC, um Aktien im Wert von 115 Millionen Dollar aufzulegen. Nanosys verfügt über mehr als

200 Patente, kann aber bislang leider keine Produkte vorzeigen. Dies besagt natürlich nicht, dass sie niemals Gewinn machen wird; es handelt sich um eine Firma, deren Forschung durchaus einiges verspricht, und man kann davon ausgehen, dass sie eines Tages ihre Forschung über Lizenzen Gewinn bringend verkaufen wird.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Firma eher vorsichtig. In ihrem Antrag auf Börsenzulassung hob sie hervor, dass »bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht ein einziges kommerziell erhältliches Produkt entwickelt werden konnte. Darüber hinaus werden erste kommerzielle Produkte, wenn überhaupt, voraussichtlich auch in den nächsten Jahren nicht zu erwarten sein.« (»Wenn überhaupt« ist natürlich kein Kaufanreiz!) Unter Hinweis auf die »Launenhaftigkeit des Kapitalmarkts« zog Nanosys den Antrag auf Börsenzulassung im August 2004 wieder zurück. Aber Nanosys hat sich in diesem Prozess vorbildlich verhalten; man kann die Firma nur loben, dass sie nicht eine wilde Blase in Bewegung gesetzt hat, bevor die Nano-Industrie dafür reif ist.

Namen sind Schall und Rauch

Nanosoft, Nanosonic, Nano Inside: Dies sind nur einige wenige Namen, die als Warenzeichen beim amerikanischen Amt für Patent und Warenzeichen beantragt wurden. Ob sie dabei alle erfolgreich waren, wissen wir nicht. »Nano« ist in letzter Zeit ein Synonym für »High Tech« geworden und hat dabei die in den letzten Jahrzehnten üblichen Bezeichnungen wie »Virtuell« und »Holo« abgelöst.

Einige Firmen, die bereits den Namen Nano tragen, haben in der Tat Produkte entwickelt, die entfernt mit Nano zu tun haben. U.S. Global Aerospace zum Beispiel benutzt eine Nanofaser-Technologie, um Türen für Flugzeugkanzeln herzustellen. Der Name wurde vor kurzem in U.S. Global *Nanospace* geändert, was einer Reduzierung um 14 Größenordnungen entspricht! Die Firma Nanogen stellt *Mikrochips* für genetische Untersuchungen her. Ihre NanoChip-Anordnung besteht aus Testfeldern von 80 µm im Durchmesser, die 200 µm voneinander entfernt sind. Das ist bei weitem noch nicht Nano, aber es geht wenigstens in die richtige Richtung.

All diese mit »Nano« gebildeten Namen könnten sogar einen ungewollten Vorteil haben: Sie machen Investoren misstrauisch und bringen sie dazu, die jeweilige Werbung zu hinterfragen und den wirklichen »Nano«-Charakter der entsprechenden Firmen zu erkunden. Daher sollte es für eine Firma nicht ausreichen, das Wort »Nano« zum Namen hinzuzufügen. Man kann aber davon ausgehen, dass dies trotzdem versucht wird.

Altair Nanotechnologies Inc.

Am 10. Februar 2005 kündigte Altair Nanotechnologies Inc. einen Durchbruch beim Elektrodenmaterial ihrer Lithiumionen-Batterien an. Dieses neue Nanomaterial, das aus Lithiumtitanoxid-Nanoteilchen besteht, hat folgende Vorteile konventionellen wiederaufladbaren Batterien gegenüber:

- ✓ **Erhöhte Leistung:** Diese Batterien liefern dreimal mehr Leistung als herkömmliche Lithiumbatterien.

- ✓ **Kürzere Aufladungszeiten:** Die Aufladezeiten liegen im Bereich von einigen Minuten anstelle von mehreren Stunden.
- ✓ **Längere Lebensdauern:** Das Material erlaubt nicht nur einige hundert, sondern mehrere tausend Auflade/Entlade-Zyklen.

Als Folge dieser Ankündigung schoss der Kurs in die Höhe, wie die folgende Aufstellung zeigt:

- ✓ **Am Tag zuvor** schloss der Kurs bei 2,08 Dollar bei einem Handelsvolumen von 500.000 Aktien.
- ✓ **Am Tag der Bekanntgabe** schloss der Kurs bei 4,77 Dollar, was einem Anstieg von 123,9 Prozent entspricht, bei einem Handelsvolumen von 56,6 Millionen.
- ✓ **Am Tag danach** erreichte der Kurs 6,52 Dollar (ein Anstieg um weitere 36,6 Prozent) bei einem Volumen von 104,6 Millionen.

Das ist nicht schlecht für zwei Tage Arbeit. Mitte April hatte Altair ein Fünfzig-Tage-Mittel von 3,80 Dollar bei einem mittleren Handelsvolumen von zehn Millionen Stück. Am 19. April 2005 wurden erste Lieferungen des Nanomaterials zu Testzwecken an eine Partnerfirma, Advanced Batteries Technologies, bekannt gegeben. Dort wird das Material in Polymer-Lithiumionen-Batterien (PLI) verwendet, die für elektrische Fahrzeuge erprobt werden.

Tipps und Strategien für Anleger

Ob nun Altair Nanotechnologies, Nanosys oder eine andere Firma – oder niemand – die Rolle übernehmen wird, die ehemals eBay einnahm, steht natürlich in den Sternen. Zieht man die Unbeständigkeit der einzelnen Aktien im Nanotechnologiebereich in Betracht, so mag es vielleicht klüger sein, nicht alles auf eine Firma zu setzen und stattdessen in börsengehandelte Indexfonds oder in Investmentfonds zu investieren. Leider gibt es beide Arten von Fonds im Bereich der Nanotechnologie noch nicht. In den USA kommt die im NASDAQ gehandelte Firma Harris & Harris, eine Risikokapitalgesellschaft, die sich auf Nanotechnologiefirmen spezialisiert hat, dem noch am nächsten.

Ebenfalls in den USA hat Merrill Lynch ausgerechnet am 1. April 2004 (aber garantiert kein Aprilscherz) einen »Nanotech-Index« eingeführt, der aus 22 kleinen Firmen besteht, deren zukünftige Geschäftsziele alle auf der Nanotechnologie beruhen. Die Firma Lux Research Inc. beschäftigt sich mit Forschung und Beratung, wobei sie vor allem auf den wirtschaftlichen Einfluss des Nanotech-Geschäfts zielt. Der Lux-Nanotech-Index folgt 26 öffentlich gehandelten Nanotech-Firmen. Der Merrill-Lynch-Index wird öffentlich gehandelt, der Lux-Index hingegen nicht.

Am klügsten ist es, seine Habgier zu zügeln, aber auch seine Ängste zu unterdrücken. Zudem sollten Sie folgende allgemeine Regeln und Hinweise beachten:

- ✓ **Folgen Sie dem Geld:** Es wird ohne Zweifel riesige Investitionen im Bereich der Nanotechnologie geben. Achten Sie auf Verschiebungen großer Aktienpakete, die auf Investitionen großer Anleger hindeuten.

- ✓ **Folgen Sie dem Trend:** 75 Prozent aller Aktien folgen dem DAX oder in den USA dem Dow Jones. Dies gilt auch für Nanotech-Aktien. Wenn die Kurse anziehen, kaufen Sie; wenn sie fallen, verkaufen Sie! Mit anderen Worten: Kaufen Sie niedrig und verkaufen Sie hoch.
- ✓ **Hören Sie nicht auf Tippgeber:** Tippgeber werden mit ziemlicher Sicherheit wenig Ahnung von der Nanotechnologie haben. Geschäftsanalysten sind immer noch auf Wissenschaftler angewiesen, um herauszufinden, was glaubhaft und realistisch ist. Sie sollten Ihre eigenen Nachforschungen anstellen und Ihre Entscheidungen und die Kontrolle über Ihr Geld nicht von aufregend klingenden Neuigkeiten beeinflussen lassen.
- ✓ **Setzen Sie eine Verlustgrenze fest:** Sie sollten mit Ihrer Bank eine Grenze vereinbaren. Diese sollte bei etwa sieben Prozent des Kaufpreises liegen; wenn die Preise steigen, sollten Sie die Grenze erhöhen. So vermeiden Sie das Schicksal all derer, die beim Internet-Crash der 1990er Jahre verloren haben.

Aufteilung der Nanowelt

Aufgrund ihrer wissenschaftlichen Komplexität bedarf die Nanotechnologie großer Mengen an Vorschusskapital und zudem beträchtlicher öffentlicher Unterstützung. Im Jahr 2003 stammten 52 Prozent der 5,5 Milliarden Dollar, die weltweit in die Nanotechnologie investiert wurden, von öffentlichen Händen. Die folgende Tabelle enthält eine Aufschlüsselung dieser Investitionen von Venture Analytics:

Land	Nanotech-Investitionen 2003 in Millionen Dollar	Regierungsanteil in Prozent
Japan	1,610	50
USA	1,524	51
China	480	58
Südkorea	280	71
Deutschland	218	54
Australien	193	48
Großbritannien	160	56
insgesamt	5,544	52

Diese Tabelle mag etwas irreführend sein, da große Unterschiede in Bezug auf die Finanzierung nicht notwendigerweise große Unterschiede bzgl. der Arbeitskraft bedeuten. Die Vereinigten Staaten und Japan geben zwar viel mehr Geld aus als etwa China; andererseits verdienen chinesische Ingenieure und Wissenschaftler nur ein Zehntel bis ein Sechstel dessen, was ihre amerikanischen Kollegen erhalten. Die USA geben fünfmal so viel Geld aus wie China, verfügen aber nur über die Hälfte an Forschern (1,3 Millionen Chinesen gegenüber 734.000 Amerikanern). Darüber hinaus bildeten chinesische Universitäten und Berufsschulen in diesem Jahr 325.000 Ingenieure aus, fünfmal mehr als in den Vereinigten Staaten.