

Marco Beckmann, Philip Lenz

Profitieren von

**NANO**  
TECHNOLOGIE

Investment der Zukunft



FinanzBuch Verlag

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme  
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei  
der Deutschen Bibliothek erhältlich

Die Autoren freuen sich über Kritik, Anregungen und Fragen unter:

**E-MAIL: BECKMANN@FINANZBUCHVERLAG.DE**

Gesamtbearbeitung: Volkverlag, München  
Druck: Kösel Buch GmbH, Kempten

© 2002 BY FINANZBUCH VERLAG GMBH MÜNCHEN  
LANDSHUTER ALLEE 61 • 80637 MÜNCHEN  
TEL.: 0 89/65 12 85-0 • FAX: 0 89/65 20 96

Alle Rechte, einschließlich derjenigen des auszugsweisen Abdrucks sowie der photomechanischen Wiedergabe, vorbehalten.

Dieses Buch will keine spezifischen Anlageempfehlungen geben und enthält lediglich allgemeine Hinweise. Der Autor, der Verlag und die zitierten Quellen haften nicht für etwaige Verluste, die aufgrund der Umsetzung ihrer Gedanken und Ideen entstehen.

Alle im Rahmen des Werkes genannten und genutzten und ggf. durch Dritte geschützten Marken- und Warenzeichen unterliegen uneingeschränkt den Bestimmungen des jeweils gültigen Kennzeichenrechts und den Besitzrechten der jeweiligen eingetragenen Eigentümer. Allein aufgrund der Nennung ist nicht der Schluss zu ziehen, dass Markenzeichen nicht durch Rechte Dritter geschützt sind.

ISBN 3-89879-016-9

weitere Infos zum Thema

[www.finanzbuchverlag.de](http://www.finanzbuchverlag.de)

# Inhalt

>	<b>Vorwort</b>	<b>8</b>
>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
>	<b>1. Nanotechnologie</b>	<b>15</b>
	Was ist Nanotechnologie?	16
	Nanotech – eine neue Querschnittstechnologie	17
	Nanomaschinen seit Urzeiten	19
	Neue Konzepte in kleinsten Dimensionen	20
>	<b>2. Die Geschichte einer Revolution</b>	<b>23</b>
	Pionier der kleinen Welt	24
	Visionär des Nanokosmos	27
	Atome im Blick	30
	Materie bewegen – Atom für Atom	33
	Fullerene und Nanotubes – neue Möglichkeiten eines alten Elementes	34
	Nanotechnologie als Massenanwendung	38
>	<b>3. Nanotechnologie – Einblicke und Aussichten</b>	<b>40</b>
	Lotusblüten	41
	Optimierungen im Nanokosmos	42
	Neue Bilder aus der Nanowelt	44
	Kleinste Dimensionen – unbekannte Effekte	45
	Neue Konzepte	48
	Nanopulver	49
	Kolloidale Systeme	51
	Größte Präzision für hohe Leistung	52
	Nanonasen	53

	Mikroelektronik trifft Nanotech	55
	Computer der Zukunft	60
	Nanotech in der Medizin	64
	Grenzen der Definition	67
>	<b>4. Der Assembler – Materie kontrollieren?</b>	<b>69</b>
	Visionen	70
	Forschung	72
	Zukunft	74
>	<b>5. Nanotech – Gefahr oder Chance?</b>	<b>79</b>
>	<b>6. Die internationale Nanotech-Community</b>	<b>82</b>
	Nanotechnologie in den Vereinigten Staaten	84
	Nanotechnologie in Deutschland	87
	Nanotechnologie in Japan	92
>	<b>7. Investieren in die Nanotechnologie</b>	<b>95</b>
	Was sind Nanostocks?	97
	Nanostocks zwischen Hoffnung und Zweifeln	99
	Potenziale erkennen – Chancen nutzen	100
	Risikofaktor Nanostocks	102
	Nanotech-Fonds	103
>	<b>8. Nanostocks</b>	<b>105</b>
	Nanomaterialien und Anwender	105
	Degussa AG	106
	Nanophase Technologies Corporation	108
	Altair International Inc.	111
	AMCOL International Corporation	114
	Toray Industries	116
	Mitsui & Co., Ltd.	119
	BASF AG	121
	Henkel KGaA	123
	Masterflex AG	126
	Nano Life Science & Health Care	129
	Nanogen Inc.	130

Flamel Technologies	133
BioSante Pharmaceuticals Inc.	135
<b>Nanoausrüster</b>	<b>138</b>
Veeco Instruments Inc.	139
Jenoptik AG	143
Lambda Physik AG	145
<b>Nanoelektronik</b>	<b>149</b>
International Business Machines Corporation (IBM)	150
Hewlett Packard	160
Agilent Technologies	167
NEC Corporation	169
Lucent Technologies	171
NanoPierce Technologies Inc.	175
<b>Nano Pre-IPOs</b>	<b>179</b>
Carbon Nanotechnologies Inc.	180
NanoFocus AG	187
Omicron NanoTechnology GmbH	189
Nanogate Technologies GmbH	191
Quantum Dot Corporation	192
California Molecular Electronics Corporation	194
Argonide Corporation	196
Physical Sciences Inc.	197
Nanotherapeutics, Inc.	198
Nanofilm Technologie GmbH	199
Zyvex	200
 <b>Nachwort</b>	<b>205</b>
 <b>Danksagung</b>	<b>207</b>
 <b>Anhang</b>	
Lexikon für Nanotechnologie-Investoren	211
Verzeichnis der zitierten Literatur	247
Unternehmensindex	263

\*Hans-Olaf Henkel ist seit Juli 2001 Präsident der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz, einer von vier großen außeruniversitären Forschungsorganisationen in Deutschland. Die Leibniz-Institute, zu denen auch das Institut für Neue Materialien gehört, betreiben überwiegend anwendungsorientierte Grundlagenforschung. Zuvor amtierte Henkel sechs Jahre als Präsident des Bundesverbandes der Deutschen Industrie.



## »Orientierung in der Zwergenwelt«

Die Nanowelt steckt voller Wunder. Seit Beginn der achtziger Jahre haben Forscher und Ingenieure Schritt für Schritt gelernt, einige dieser Wunder nutzbar zu machen. So können heute einzelne Atome gezielt bewegt werden. Es wurden chemische Prozesse ergründet, in denen Nanopartikel mit neuartigen Eigenschaften aus wenigen Dutzend Atomen erzeugt werden können. Winzige Motoren und Getriebe dokumentieren nicht nur die hohe Ingenieurskunst ihrer Erbauer, sondern lassen die ersten Nanoroboter greifbar nah erscheinen.

Noch ist vieles Zukunftsmusik. Den Quantencomputer gibt es ebenso wenig wie die U-Boote, die durch die menschliche Blutbahn kreisen und Krankheitserreger beseitigen. Aber die »Goldgräber im Zwergenreich« (Franz Frisch) sind längst fündig geworden. Maßgeschneiderte Nanopartikel aus dem Leibniz-Institut für Neue Materialien machen die Oberfläche einer Kunststoff-CD so hart wie Glas. Aus Hanf und Stroh wird durch eine Beschichtung mit Nanopartikeln ein feuerfester Baustoff, so stabil wie ein Ziegelstein, aber leicht und mit exzellenter Wärmedämmung.

Wird die Nanotechnologie zur Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts? Marco Beckmann und Philip Lenz nehmen den Leser mit auf eine spannende Reise in den Nanokosmos. Sie stellen die Pioniere der kleinen Welt vor und erklären, was an der Nanotechnologie gegenwärtig noch Vision, was Wirklichkeit ist. Die Autoren beschreiben den Wettlauf der drei großen Industrienationen USA, Japan und Deutschland um die Technologieführerschaft. Und sie sagen, was bei Investitionen in die Nanotechnologie zu beachten ist. Das alles ist solide recherchiert und wird in einer wohlthuend klaren Sprache dargestellt. Wer gegenwärtig zwischen zwei Buchdeckeln Orientierung in der Nanowelt sucht, findet sie hier.

*Hans-Olaf Henkel\**





## Einleitung

---

»Wir wissen wohl, wer wir sind;  
aber nicht, was wir werden können.«

*William Shakespeare*

Der anhaltende technologische Fortschritt ist ein Merkmal des menschlichen Lebens. Überall und zu jeder Zeit versuchen Forscher und Wissenschaftler, mit neuen Innovationen das Mögliche in den unterschiedlichsten Disziplinen zu erweitern. Sie tasten sich über die Grenzen der technologischen Möglichkeiten hinaus, scheitern und beginnen wieder von neuem. Der technologische Fortschritt ist untrennbar mit der Entwicklung des menschlichen Lebens verbunden. Die Vielzahl der Erfindungen, die sich Menschen seit jeher haben einfallen lassen, bildet die Grundlage unserer Gesellschaft in ihrer heutigen Form.

Die Geschichte der menschlichen Innovationen hat ihren Ursprung in der ostafrikanischen Olduvai-Schlucht. Dort erschuf der »Homo erectus« mit der ältesten bekannten Herstellungstechnik das erste menschliche Werkzeug. Aus Kieselsteinen wurden mit Hilfe von anderen Steinen Schneidwerkzeuge hergestellt, mit denen das Fleisch kurz zuvor verendeter großer sowie selbst erlegter kleiner Tiere geteilt wurde. Mit diesen aus heutiger Sicht einfachen Werkzeugen wurde eine neue Phase der Evolution eingeleitet. Geschätzte zwei bis zweieinhalb Millionen Jahre sind seitdem vergangen.

Am Anfang des 21. Jahrhunderts steht die Menschheit erneut vor einer Entwicklung, die einen weiteren wichtigen Schritt in der menschlichen Evolution bedeuten könnte. Waren es gerade in den zurückliegenden Jahrhunderten Produkte wie Textil, Automobil bis hin zum Computer, die das menschliche Leben voranbrachten, so scheint in Zukunft weniger ein neues Produkt als vielmehr eine neue Herstellungstechnologie den entscheidenden Schub für die Entwicklung der Menschheit zu geben. Die »Nanotechnologie« taucht als grund-

gend neue Technologiestufe am Horizont auf und weckt bei Wissenschaft, Industrie und Investmentbranche gleichermaßen hohe Erwartungen.

Obwohl wir an der Schwelle des nanotechnologischen Zeitalters stehen, könnte man meinen, dass es noch viel zu früh ist, um sich beispielsweise als Investor mit diesem Thema auseinander zu setzen. Doch diese Bedenken sind unserer Meinung nach unbegründet, da nur ein umfassend und frühzeitig informierter Anleger erfolgreich handeln kann. Und zu einer umfangreichen und rechtzeitigen Information gehört auch die Auseinandersetzung mit Themen, die von der breiten Öffentlichkeit erst später als bedeutungsvoll erkannt werden. Natürlich bietet das tägliche Auf und Ab an den Finanzmärkten genug Möglichkeiten, sich Gedanken um seine Anlagestrategie zu machen. Doch wer sich heute noch über seine Biotech- und Internetinvestitionen aus den vergangenen Jahren ärgert, der muss sich nicht wundern, wenn eine der größten technologischen Revolutionen unserer Zeit, vielleicht sogar die größte aller Zeiten, an seinem Depot ungenutzt vorübergeht.

Nur wer sich schon jetzt mit den Entwicklungen der Nanotechnologie vertraut macht und den nanotechnologischen Fortschritt auch nach der Lektüre dieses Buches weiterverfolgt, wird die entstehenden Chancen erkennen und von ihnen profitieren.

Natürlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, sich einer neuen Technologie zu nähern. Mit dem vorliegenden Buch wenden wir uns an Technologiebegeisterte und Anleger, die wissen möchten, was sich wirklich hinter dem Begriff »Nanotechnologie« verbirgt. Da bislang kein anderes populärwissenschaftliches Buch mit einem vergleichbaren Inhalt existiert, profitieren gerade Anleger von einem Wissensvorsprung, der in dieser Form bisher weltweit einmalig ist.

»Eine hinreichend fortgeschrittene Technologie lässt sich nicht mehr von Zauberei unterscheiden«, wusste schon der britische Autor Arthur C. Clarke. Und genau so verhält es sich mit der Nanotechnologie. Mit diesem Buch machen wir einen Anfang, Sie über die Chancen und Möglichkeiten der Nanotechnologie zu informieren. Sie werden nicht alles über die Zukunft der Nanotechnologie erfahren, aber genug, um sich als Anleger erfolgreich zu positionieren. Sie werden nicht alle Un-

ternehmen der Nanotechnologie kennen lernen, aber die spannendsten und bedeutsamsten. Wenn wir mit dem vorliegenden Buch Ihr Interesse an einer vertieften Auseinandersetzung mit dieser grundlegend neuen Technologie wecken können, dann hat es seinen Zweck erfüllt.

Mit der Nanotechnologie kann eine neue Zeit für Aktien anbrechen. Sie machen einen guten Anfang, indem Sie sich die Zeit nehmen, dieses Buch zu lesen.

*Hofheim am Taunus, im April 2002*

*Marco Beckmann   Philip Lenz*



## 1 Nanotechnologie

---

»Es gibt noch viel Platz da unten.«

*Richard P. Feynman*

In jeder Sekunde nimmt die Erdbevölkerung netto um fast drei Menschen zu, drei Menschen werden mehr geboren als sterben; jedes Jahr kommen so in nächster Zeit wahrscheinlich weit über achtzig Millionen Menschen zusätzlich zur Welt; und es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis die Zehnmilliardengrenze überschritten wird. Um all diese Menschen in Zeiten von Tierseuchen und anderen Katastrophen ernähren zu können und ihnen einen auch weiter steigenden technologischen Standard, verbesserte und billigere Waren bieten zu können, wird eine neue Technologiestufe, die Nanotechnologie, als Technik des 21. Jahrhunderts eine entscheidende Rolle spielen.

Aber was kann man sich unter Nanotechnologie überhaupt vorstellen, welche Möglichkeiten können wir bereits heute nutzen, welche Ideen und Möglichkeiten liegen noch in der Forschung und welche Visionen werden der Welt einen neuen Weg in die Zukunft bereiten?

Viele der großen Visionen der Nanotechnologie werden erst in ferner Zukunft eintreten, vielleicht aber auch so, wie man es sich heute vorstellt, nie realisierbar werden. Eine Reihe von Innovationen wird bereits heute wirtschaftlich genutzt. Schon in den nächsten Jahren werden Mikroelektronik und Biotechnologie immer enger mit der Nanotechnologie verschmelzen und sich durch Entwicklungen in diesen Bereichen auch Fortschritte und innovative Möglichkeiten in vielen anderen Gebieten ergeben.

Obwohl heute manche Konzepte unwirklich erscheinen, wäre es eine Fehleinschätzung, alle Zukunftsvisionen einfach als Utopien abzutun. Die Welt der einzelnen Atome ermöglicht prinzipiell Unglaubliches; Visionen nehmen Gestalt an, die vor wenigen Jahren noch nicht einmal existierten. Und Erfolge der Forschung geben den Visionären der ersten Stunde durchaus Recht, da die Nanotechnologie Platz für neue Ideen bietet, die bisher undenkbar waren. Allerdings ist auch davon auszugehen, dass viele Visionen nie Realität werden. Konzepte

werden an der praktischen Umsetzbarkeit scheitern, da natürliche oder andere Hürden nicht zu überwinden sein werden. Doch das Forschen an diesen von vornherein als nahezu unmöglich wirkenden Visionen kann helfen, die Entwicklung in anderen Bereichen voranzubringen.

Wie bei jeder Technologie gibt es allerdings nicht nur die nützlichen und friedlichen Seiten, auch die Nanotechnologie kann eine »dunkle Seite« entwickeln. Allerdings werden sich die schlimmsten Schreckensvisionen wahrscheinlich ebenso wenig realisieren wie die größten Visionen. Mit übertriebenen Hoffnungen, aber auch mit unbegründeten Ängsten ist der Sache daher sicher nicht gedient. Der erste Schritt einer verantwortungsvollen Auseinandersetzung mit diesem Thema der Zukunft sollte eine umfangreiche Information über die Chancen und Möglichkeiten der Nanotechnologie sein. Nur so kann man die nanotechnologischen Ziele erkennen und ihre Bedeutung für unsere Zukunft verstehen.

## Was ist Nanotechnologie?

Nanotechnologie bedeutet das Vordringen in gigantisch kleine Welten. Allgemein werden künstlich geschaffene Systeme von atomarer Größenordnung bis rund einhundert Nanometer der Nanotechnologie zugeordnet. In der Physik beschreibt die Vorsilbe »nano« den milliardsten Bruchteil einer Einheit; ein Nanometer entspricht also  $10^{-9}$  Metern oder einem millionstel Millimeter. Auf diese Länge lassen sich ungefähr fünf bis zehn einzelne Atome nebeneinander unterbringen. Ein menschliches Haar ist um das Siebzigtausendfache dicker als ein Nanometer. Nanotechnologische Bauteile verhalten sich im Größenvergleich zu einem Fußball so, wie der Fußball zur Erde. Der Begriff Nanotechnologie wurde erstmals 1974 von Norio Taniguchi genannt, durch den er Herstellungsmethoden mit einer über den Mikrometerbereich hinausgehenden Präzision beschreiben wollte.

Das Größenverhältnis zeigt auch die Übersetzung des griechischen Wortes *nanos* ins Deutsche: Zwerg. Und in eben dieser Zwergenwelt werden viele Möglichkeiten unserer Zukunft liegen; bisher als unlösbar geltende Probleme könnten gelöst werden. Es wird sogar für möglich gehalten, dass die Nanotechnologie prinzipiell einen Lösungs-

ansatz für alle naturwissenschaftlichen Fragestellungen unserer Zeit bereithält.

Da die Nanotechnologie jedoch erst am Anfang einer Entwicklung mit teilweise fantastischen Aussichten steht, lassen sich noch keine klaren Grenzen ziehen. Prinzipiell können alle Systeme mit entsprechender Strukturgröße der Nanotechnologie zugeordnet werden, wie beispielsweise heute schon industriell eingesetzte Oberflächenbeschichtungen. Allerdings grenzt der oft als »Nanotech-Papst« bezeichnete Eric Drexler seine Vorstellung von Nanotechnologie weiter ein. Der von ihm eingeführte Begriff »molekulare Nanotechnologie« bezeichnete das gezielte Schaffen von Strukturen durch Kontrollieren und Manipulieren einzelner Atome. Hierbei können durchaus große Produkte entstehen, die allerdings aus nanoskopischen Strukturen durch geplantes Anordnen von Atomen entstanden sind. Auch völlig neue Materialien aus durchaus bekannten Stoffen könnten so geschaffen werden. Die neuen Fähigkeiten entstehen im Gegensatz zu bekannten Funktionen durch die atomare Präzision, die eine bloße Anhäufung klassischer Produktionsverfahren so nie leisten könnte. Bisher besteht diese perfektionierte Nanotechnologie nur in der Theorie.

## Nanotech – eine neue Querschnittstechnologie

Internet- und Biotechboom der vergangenen Jahre brachten neue Entwicklungen hervor. Allerdings waren diese Errungenschaften hauptsächlich nur eine Optimierung der bestehenden Märkte und beschränkten sich technologisch fast ausschließlich auf eine Branche. Das Internet ermöglichte es beispielsweise, Produkte besser und weltweit abzusetzen und durch neue Kommunikationsstrukturen geschäftliche Transaktionen und Informationen schneller zu übermitteln und daraus neue Gewinne zu erzielen.

Die Nanotechnologie beschränkt sich dagegen nicht nur auf einen Bereich; es finden sich überall Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie, sei es in der Energie- oder Umwelttechnik, der IT-Branche oder aber dem Gebiet der Biochemie und Gentechnik. Durch dieses interdisziplinäre Wirken der Nanotechnologie eröffnen sich vollkommen neue Perspektiven für einen technologischen Fortschritt, da das

Fachwissen aller Naturwissenschaften gebündelt die theoretischen Möglichkeiten der Nanotechnologie auch praktisch umsetzbar machen wird. Außerdem sind bei Entwicklungen auf atomarer Ebene oftmals die Grenzen zwischen der klassischen Physik, Chemie und Biologie verwischt, da Eingriffe der einen Wissenschaft in ein System unmittelbar die beiden anderen Bereiche beeinflussen. Und nicht zuletzt könnte sich unser Alltag in fernerer Zukunft grundlegend ändern, wenn die Nanotechnologie ihr volles Potenzial entfalten wird.

Die Nanotechnologie als neue Technologiestufe eröffnet weg von bisher bekannten technischen Anwendungen und Produkten völlig neue Konzepte, wobei die Natur die Nanotechnologie schon seit Jahr-millions beherrscht. Durch nanotechnologische Forschung können komplett neue Produkte geschaffen werden, die mit bisherigen Technologien so nicht realisierbar wären, genauso wie man bestehende Materialien optimieren oder mit neuen Eigenschaften versehen könnte. Auch völlig neue Prozessstrukturen zur Güterproduktion sollen durch die Nanotechnologie entwickelt werden.

Obwohl manche Ziele heute noch in unerreichbarer Ferne sind und einige Visionen vielleicht nie Realität werden können, gibt es bereits viele Projekte, die in näherer Zukunft umsetzbar sein werden.

Mit Hilfe der Nanotechnologie verbesserte Brennstoffzellen, Solarzellen oder Batterien ermöglichen das wesentlich effizientere Nutzen regenerativer Energien und könnten damit eine echte Alternative zu den begrenzten fossilen Rohstoffen bieten. Die Umwelt könnte nicht nur durch längere Materialkreisläufe entlastet werden, auch neuartige Stoffeigenschaften zeigen das riesige Potenzial der Nanotechnologie.

Im Bereich der Computerentwicklung wird die Nanotechnologie die Entwicklung von Speichermedien mit deutlich verbesserten Speicherdichten ermöglichen. Die Nanotechnologie eröffnet auch neue Fertigungsmöglichkeiten für bisher übliche Prozessoren. Nanoprozessoren, die mit wenigen oder gar einzelnen Elektronen rechnen und deren Transistoren aus einzelnen Molekülen bestehen können, stehen genauso auf den Arbeitsplänen der Forscher wie daraus resultierende, völlig neue Computersysteme. Der Quantencomputer kann in der makroskopischen Welt völlig unbekannte Effekte ausnutzen, um effektiver und damit deutlich schneller zu arbeiten als bisherige binäre Computer.

Das wohl in der breiten Öffentlichkeit bekannteste Ziel der Nano-

technologie ist zugleich auch eines der großen Fernziele, sollte es so jemals realisiert werden. Unvorstellbar kleine, U-Boot-ähnliche Roboter, sollen in den Körper eindringen und beispielsweise Krebszellen gezielt vernichten. Solche Nanobots könnten in der Medizin der Zukunft mit Sicherheit eine große Rolle bei der Bekämpfung von bisher als unheilbar erachteten Krankheiten spielen. Aber auch durch das Synthetisieren von natürlichen oder künstlichen Stoffen, die gezielt bestimmte schädliche Zelltypen abtöten, wird eine wesentlich effektivere Behandlung von Krankheiten ermöglicht. Und bisherige Medikamente können durch Carriers an ihren Wirkungsort gebracht werden und dort hoch dosiert ihre vollen Fähigkeiten gezielt entfalten.

## Nanomaschinen seit Urzeiten

Als Vorbild dieser neuen Technologie dient teilweise die Natur. Denn in allen organischen Zellen arbeiten schon seit Urzeiten Nanomaschinen. Zellen und ihre Organellen sind nicht nur in der Lage, sich selbst zu reproduzieren, sie synthetisieren auch die Grundstoffe unseres Lebens. Auch sind diese Nanomaschinen in der Lage, alle Vorgänge eines Körpers zu steuern. Ein Mensch kann nur das leisten, was seine Zellen, und damit auch die Zellbestandteile, zusammen leisten können. Dieses Beispiel zeigt auch, dass aus kleinsten Strukturen durch Zusammenwirken im Großen hochkomplexe Strukturen entstehen können. Schließlich ist momentan das menschliche Gehirn der wohl leistungsfähigste existierende »Computer«. Nicht zuletzt besitzt jede einzelne Zelle das wohl effektivste Speichersystem überhaupt, die DNA.

Mit Hilfe der Erbgutstrukturen ist es außerdem theoretisch möglich, über DNA-Bausteine einen für Siliziumcomputer sehr intensiven Rechengang parallel und damit schnell abzuarbeiten. Jede einzelne DNA-Sequenz stellt eine Recheneinheit dar, wodurch sich ein sehr hohes Leistungspotenzial entfaltet. Gerade bei komplexen mathematischen Problemen wie dem »Problem des Handlungsreisenden«, dem Travelling Salesman Problem (TSP), wird eine Lösung dieser mathematischen Aufgabenstellung erst überhaupt effektiv möglich, denn heutige Siliziumrechner wären mit einer solchen Aufgabenstellung über zu lange Zeiträume hinweg beschäftigt. Diese »nasse Seite der Nanotech-

nologie« (Prof. Richard Smalley) hat jedoch den Nachteil, dass sie eben keine elektrischen Ströme erlaubt; jeder Nanobot wäre sofort kurzgeschlossen.

Bis die gigantischen Leistungen der Natur auch für den Menschen kontrolliert in breiteren Anwendungen nutzbar sind, werden noch mehrere Jahrzehnte vergehen. Aber selbst die Anfänge der »trockenen« Nanotechnologie zeigen schon viele bemerkenswerte Möglichkeiten. Die Entwicklung wird mit Sicherheit im Laufe der Zeit auch die schon großen Erfolge der Mikroelektronik in den Schatten stellen. Und diese Erfolge verdeutlicht ein Vergleich, aufgestellt von Microsoftgründer Bill Gates im Jahr 1998 anlässlich der amerikanischen Computermesse Comdex: »Wenn GM eine ebenso schnelle technologische Entwicklung durchgemacht hätte wie die Mikroelektronik, würden wir heute 25-Dollar-Autos fahren, die nur einen Viertelliter Benzin auf einhundert Kilometer verbrauchen würden.«

## Neue Konzepte in kleinsten Dimensionen

Sollte der Eindruck entstehen, die Nanotechnologie wäre nur eine weitere Miniaturisierung der bisherigen Mikrotechnik, wäre das ein falsches Bild. Die Entwicklung des Lasers war auch mehr als nur eine Weiterentwicklung der Glühlampe. Hier wurden völlig neue und vorher unbekannte Eigenschaften von Lichtwellen entdeckt, die die Welt der Naturwissenschaften nicht unerheblich beeinflussten.

Genauso ist die Nanotechnologie auch mehr als nur eine Weiterführung und Verknüpfung bestehender Technologien. Sie unterscheidet sich in mehreren Bereichen deutlich von bisher bestehenden technologischen Möglichkeiten. Mit Hilfe eines Kraftmikroskops ist man heute schon in der Lage, Materialien in atomaren und molekularen Strukturen gezielt zu beeinflussen. So lassen sich Nanobauteile systematisch aus einzelnen Atomen aufbauen; mögliche Produkte dieser Technik wären zum Beispiel Nanotransistoren oder Nanolaser.

In diesen kleinen Dimensionen treten bisher unbekannte Effekte auf, die als die Regeln der Quantenmechanik zusammengefasst werden. Erwähnt sei zu Beginn nur die Fähigkeit von einzelnen Elektronen, sich an mehreren Orten gleichzeitig aufzuhalten, übergangslos zwischen

zwei Orten zu springen oder durch atomare Wände zu verschwinden: der so genannte Tunneleffekt.

Außerdem können Produkte der Nanotechnologie durch einen weiteren Effekt auf atomarer Ebene, die Selbstorganisation, entstehen. Hierdurch könnten enorme Qualitätssteigerungen ermöglicht werden, da Verunreinigungen von Werkstoffen nahezu auszuschließen sind. Eine optimale Anordnung der einzelnen Bestandteile kann so die makroskopischen Eignungen eines Fabrikats deutlich verbessern.

Die funktionale Komplexität verschiedener Produkte soll durch die Nanotechnologie deutlich verbessert werden; die einzelnen Einheiten einer Maschine werden mit größtmöglicher Präzision zusammenarbeiten und dadurch höhere Leistungen erbringen, die von herkömmlichen Produktionsverfahren so nicht erfüllbar wären. Intelligente Werkstoffe, die sich ihrer Funktion und Umgebung anpassen werden, sind ein mittelfristiges Ziel verschiedener Forschungsprojekte. Aber das theoretische Potenzial der Nanotechnologie wird sich trotz aller aktuellen Fortschritte erst in vielen Jahrzehnten voll entfalten, sollte es in seinen großen Visionen nicht für immer reine Theorie bleiben.

Die ersten spektakuläreren Durchbrüche sind in der IT-Branche und bei medizinischen Anwendungen zu erwarten. Heute beeinflusst die Nanotechnologie hauptsächlich Bereiche der bisherigen klassischen Technologiefelder. Es sind bereits verschiedene Produkte auf dem Markt, die vielleicht gar nicht der Nanotechnologie oder ihrem technologischen Einfluss zugeschrieben werden. Erwähnt seien hier nur Spiegel, die nicht beschlagen, oder mit Nanopartikeln beschichtete, selbstreinigende Glasscheiben.

Die nahe Zukunft wird von der Nanotechnologie ebenfalls mehr oder weniger sichtbar beeinflusst werden. In mehreren Jahren sollen nanotechnologische Entwicklungen Grenzen bisheriger Technologien überwinden. Die Leiterbahnstrukturen von Mikroprozessoren werden in absehbarer Zeit auf den Durchmesser von wenigen zehn Nanometern geschrumpft sein. Mit den bisher verwendeten Strukturierungssystemen ist ein Vorstoßen in diese Dimensionen nicht mehr möglich. Heutige Schaltkreise auf Prozessoren werden mit UV-Licht gefertigt, die so genannte Photolithographie. Natürliche Grenzen werden es dieser Technologie so nicht erlauben, weit unter die einhundert Nanometer Strukturgröße vorzudringen, wobei ein Vorstoßen in diese Dimensio-

nen für die Weiterentwicklung der Computerbranche essentiell werden wird. Kleinere Strukturen erlauben wesentlich schnellere Rechenvorgänge, bedeuten aber auch eine geringere Wärmeentwicklung – was nebenbei für Silizium als Halbleiter auch ein wesentliches Kriterium für höhere Taktfrequenzen ist – und benötigen logischerweise auch weniger Platz. Um weiterhin Kapazitätssteigerungen im bisherigen Maße zu erbringen, werden die bestehenden Fertigungsverfahren auf Optimierungen aus der Nanotechnologie zurückgreifen, um die nötige Präzision liefern zu können.

All diese Beispiele zeigen, dass die Nanotechnologie in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird. Daraus wird die Chance entstehen, an einer umfassenden technischen Revolution teilzuhaben, denn was die Nanotechnologie schon durch kleine Entdeckungen hervorbringen wird, kann der Grundstein vieler Anwendungen von morgen werden. Auf Grund der weiten technologischen Basis wird davon ausgegangen, dass die Nanotechnologie im Gegensatz zu dem Internetboom der Vergangenheit zu keinem kurzfristigen Trend wird. Manche Experten sprechen schon von der letzten industriellen Revolution der Menschheit.

## 2 Die Geschichte einer Revolution

---

»Nichts auf der Welt ist so mächtig wie eine Idee,  
deren Zeit gekommen ist.«

*Victor Hugo*

Die erste Nanomaschine erblickte vor mehr als drei Milliarden Jahren das Licht dieses Planeten. Zunächst einfache Zellen haben die für unser heutiges Leben damals feindliche Atmosphäre aus dem Wasser heraus grundlegend verändert. Die Prinzipien der damaligen Zellen stellen noch heute die Grundlage für jegliches biologische Leben auf der Welt dar.

»Nano« wurde in den letzten Jahren immer häufiger in Print-, Online- und anderen Medien erwähnt, wodurch der Eindruck entstehen könnte, das Gebiet der nanotechnologischen Forschung wäre erst in den letzten Jahren entstanden. Aber die Visionen der großen Möglichkeiten der verschwindend kleinen Strukturen gibt es bereits wesentlich länger. Eines der ersten Vorreiterpatente der Nanotechnologie wurde im Jahr 1939 unter dem Namen »Sol-Gel-Technik« angemeldet.

Eine Saarbrücker Forschergruppe hat diese vergessene Idee zu neuem Leben erweckt. Mit eigentlich makroskopischen Ausgangsstoffen, die in einer Flüssigkeit gelöst und mit chemischen Verfahren eingedickt werden, also vom Sol- in den Gelzustand übergehen, werden durch Kondensieren kristalline Nanopartikel in entsprechenden Größenordnungen geschaffen. Das so entstehende Produkt hat auf Grund dieser Partikel völlig neue Eigenschaften. Das entstandene Gel wird auf eine Oberfläche aufgetragen, überschüssiges Lösungsmittel verdampft. Zwischen zwei Glasscheiben kann diese Technik durch Anlegen einer elektrischen Spannung den Effekt einer Sonnenbrille haben. Das Nanogel zwischen den Scheiben ist stufenlos tönbar.

In den folgenden Kapiteln sollen die Nanotechnologie und durch sie resultierende Forschungsergebnisse und Anwendungen im zeitlichen Überblick aus der Vergangenheit heraus bis in die Zukunft der Zukunft dargestellt werden. Da wir jedoch immer noch am Anfang der Entwicklungen stehen, aber schon viele theoretische Visionen seit mehreren Jahren existieren, ist eine absolute Einteilung nicht ohne weiteres mög-

lich. Visionen der Vergangenheit werden durch fortschreitende Grundlagenforschung langsam Realität, auch wenn sie ihr volles Potenzial erst in der Zukunft entfalten, vielleicht auch nie Realität werden. Um bestehende Beziehungen nicht auseinander zu reißen, werden deshalb in jedem Teil Ereignisse auftauchen, die zeitlich anders eingeordnet werden müssten.

## Pionier der kleinen Welt

In naturwissenschaftlichen Kreisen gilt Richard Phillips Feynman, der 1965 den Nobelpreis für Physik erhielt, als Wegbereiter der Nanotechnologie und des Nanocomputers. Im Dezember 1959 hielt der Professor für theoretische Physik vor der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft einen Vortrag über die Manipulation und Steuerung von Materie in atomaren Maßstäben ebenso wie über Computer, die auf der Basis weniger Atome rechnen – Jahre vor den ersten kommerziellen Taschenrechnern und lange, bevor der Begriff Nanotechnologie eingeführt wurde.

Außerdem hatte er die Vorstellung von Maschinen und Stoffen, die ebenfalls auf molekularer Größe gefertigt werden: »Die Prinzipien der Physik, soweit ich sie übersehen kann, sprechen nicht gegen eine Steuerung der Materie Atom für Atom.«

Richard Phillips Feynman war amerikanischer Physiker und arbeitete sowohl am Manhattan Project als auch später am Los Alamos Laboratory an der Entwicklung der Atombombe mit. Den Nobelpreis für Physik erhielt Feynman für eine grundlegende Entdeckung in der Quantenelektrodynamik, genauer die Entdeckung der Umwandlung eines Photons in Materie und Antimaterie, also in ein Positron und ein Elektron, zusammen mit Julian S. Schwinger und Shin'ichiro Tomonaga. Außerdem gehörte er zu den führenden Personen der 1986 von Ronald Reagan eingesetzten Untersuchungskommission zur Aufklärung des Challenger-Desasters, wodurch Richard Phillips Feynman in eine breitere Öffentlichkeit rückte.

Aber die zukunftsweisendste Arbeit leistete Feynman wohl mit seiner Rede »There's plenty of room at the bottom«. Hier zeigt er, dass es nicht nur Platz nach unten gibt, sondern dass die Räume eben, zumin-

dest in der Theorie, gigantisch sind. Und um in diese Räume vorzudringen, hatte er eine ebenso simple wie geniale Idee. Man braucht keine neue Technik in diesen Dimensionen, man arbeitet genauso wie in unserer makroskopischen Welt. Angefangen von einer Maschine in unserer Größe stellen wir immer kleinere Systeme her, passen die Fehlertoleranz an die neuen Gegebenheiten an, und jede Maschine baut nicht nur ein kleineres Ebenbild, sondern hundert. Auf diesem Weg stößt man theoretisch in kleinste Dimensionen vor und hat mit einem geringeren Materialverbrauch der Systeme Produktionskapazitäten, die das Herstellen jedes denkbaren Produkts an jedem Ort ermöglichen. Heute wird für nanoskopische Roboter eher der Ansatz verfolgt, mit neuen Konzepten den Anforderungen der kleinsten Dimensionen gerecht zu werden, anstatt bestehende Systeme zu adaptieren. Aber auch das Speichern von Daten in einem unvorstellbar kleinen Maßstab mit einer enormen Datendichte war ein von Feynman gesehenes Anwendungsgebiet.

So hatte er schon damals eine Vision, wie man die Bücher der größten Bibliotheken der Welt – Ende der fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts immerhin vierundzwanzig Millionen Bände – in einem Würfel mit der Kantenlänge von 0,1 Millimeter als binäre Zeichen speichern könnte. Jeder Zustand, also 0 und 1, sollte von je einem Metallwürfel zu hundert Atomen dargestellt werden. Damit lassen sich in dem entstehenden Würfel ungefähr 115.000 Gigabyte speichern. Das sind rund 2.000 handelsübliche Festplatten. Zur Zeit dieser Vision war das Elektronenmikroskop technisch noch längst nicht in der Lage, codierte Zeichen dieser Größe zu lesen. Um einen solchen Datenspeicher überhaupt erst einmal herzustellen, blieben Feynman also zunächst nur theoretische Ansätze.

Diese auch heute noch unvorstellbare Datendichte wird von der Natur aber bereits seit Jahrmillionen übertroffen. Das Erbgut, die DNA, speichert mit gerade einmal der Hälfte an Atomen, die in Feynmans Vorschlag verwendet werden, ein Bit an Informationen über den menschlichen Körperbau.

Der technische Fortschritt der letzten Jahrzehnte hat es durch die Entwicklung neuer Mikroskopiemethoden wie Kraft- oder Rastersondenmikroskope ermöglicht, Daten in kleinsten Maßstäben zu speichern. So kann man heute im Prinzip alle Telefonbücher der Welt auf

einer Fläche von einem Quadratmillimeter speichern, bloß würde das Schreiben aller Daten noch mehrere zehntausend Jahre dauern. Durch weitere Fortschritte auf diesem Gebiet soll den beteiligten Forschern zufolge auch diese Hürde innerhalb der nächsten Jahre überwunden werden.

Feynman zeigte in seiner Rede nicht nur, dass es möglich sein wird, unvorstellbare Datenmengen zu speichern, sondern dass auch wesentlich leistungsfähigere Computer mit Hilfe der Nanotechnologie entstehen können. Das beste Beispiel hierfür ist das menschliche Gehirn. Jeder Mensch kann ein ihm bekanntes Gesicht sofort wieder identifizieren und ihm Namen und andere Daten zuordnen. Für die heutigen Gigahertzrechner ist das eine nur schwer zu bewältigende Aufgabe. Es gibt zahlreiche Risikofaktoren, die die Identifikation erschweren. Für das Gehirn sind sie aber kein Problem. Man kann einen Menschen in nahezu jeder Beleuchtung und jedem Blickwinkel, auch stark verändert, wieder erkennen. Zwar gibt es heute schon Fingerabdruck- oder Irisscanner und auch optische Erkennungssysteme, die Menschen relativ zweifelsfrei identifizieren können, aber kein binär denkendes System kann heute das Gleiche leisten wie die unzähligen »Schaltkreise« im Gehirn eines Menschen.

Feynman hatte nicht nur die Vision von Nanocomputern, auch Maschinen, die durch kontinuierliche Verkleinerung in nanoskalige Strukturen vordringen, waren Teil seiner Rede. Da in dieser Dimension durchaus Milliarden Maschinen parallel arbeiten und sich auch selbst reproduzieren können, wäre es denkbar, dass man keine Produkte mehr transportieren muss, sondern lediglich Baupläne durch Nanomaschinen umsetzen lässt, die das gewünschte Produkt dann vor Ort anfertigen.

In seiner Rede sah Feynman damals die Möglichkeit, durch gezielte Beeinflussung einzelner Atome jeden chemisch stabilen Stoff herzustellen, und zwar ohne giftige Zwischenverbindungen oder unnötige Energieaufwendung. Im Rahmen seines Vortrags schrieb Feynman damals zwei zu je tausend Dollar dotierte Preise aus. Der erste sollte denjenigen belohnen, der es schafft, eine Buchseite auf ein Fünfundzwanzigtausendstel ihrer ursprünglichen Größe zu schreiben, so dass sie nachher mit einem Elektronenmikroskop gelesen werden kann. Der andere Preis sollte an denjenigen gehen, der als Erster einen funktionstüchtigen

Elektromotor mit einer Kantenlänge von 0,4 Millimetern herstellt. Beide Aufgaben wurden längst gelöst; die erste Buchseite auf Stecknadelgröße wurde bereits 1964 »veröffentlicht«. Beide Wettbewerbsaufrufe stellen heute nur noch den Anfang eines immer tieferen Vordringens in die Welt der Quantenräume dar, das bereits im Jahr 1959 von einem genialen Wissenschaftler vorhergesehen wurde. Mit Richard Phillips Feynman starb am 15. Februar 1988 in Los Angeles der erste Pionier der Nanotechnologie.

Über seine Rede hinaus beschäftigte sich Feynman nicht gezielt mit weiteren Ideen zu seinem ersten Ansatz. Auch wenn aus heutiger Sicht manche der erwähnten Gedanken nicht mehr umsetzbar oder unrealistisch erscheinen sollten, leiteten diese Ideen doch grundsätzlich die heutige Nanotechnologie mit ihren Visionen und schon Realität gewordenen Produkten ein.

## Visionär des Nanokosmos

Während Richard Phillips Feynman als Urvater der Nanotechnologie gilt, führte K. Eric Drexler diese Vision weiter. Drexler, der heute oft als der Nanotech-Papst bezeichnet wird, prägte das Wort »Nanotechnologie«, das heute synonym zu »Molekulartechnologie« gebraucht wird. In Abgrenzung zur Nanotechnologie als lediglich in nanoskaligen Größenordnungen geschaffene Strukturen durch natürliche Effekte oder Ähnliches beschäftigt sich die »drexlersche Nanotechnologie« mit der Schaffung neuer komplexer Systeme aus wenigen Atomen und wird auch mit dem schon erwähnten Begriff der molekularen Nanotechnologie in Abgrenzung zur heute anwendbaren Nanotechnologie beschrieben.

Der erste Zeitungsartikel, der sich mit Nanotechnologie beschäftigte, erschien im Jahr 1981 in dem Journal Proceedings of the National Academy of Sciences USA. Eric Drexler beschäftigte sich hier erstmals öffentlich mit der Möglichkeit, Strukturen auf molekularer Ebene zu beeinflussen, und den dadurch entstehenden Möglichkeiten für neuartige Computer und den Chancen in der Biotechnologie. Dabei wollte er nicht nur die Zukunft beleuchten, sondern ging schon damals auf die aktuelle Forschung ein. Während dieser Artikel noch im Bereich

Chemie des Magazins erschien, ist der interdisziplinäre Charakter der Nanotechnologie heute schon deutlicher zu erkennen, und der Weg als Querschnittstechnologie wird immer weiter gebahnt.

Eric Drexler studierte am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und schrieb hier auch seine Dissertation über molekulare Maschinen und Herstellungsprozesse. Am MIT gründete Drexler eine Förderungs- und Forschungseinrichtung, um den Möglichkeiten und Gefahren der Nanotechnologie rechtzeitig gewachsen zu sein. Eric Drexler leitete im Jahr 1988 an der Stanford University die erste Vorlesung über Nanotechnologie sowie verschiedene Konferenzen des Foresight-Institutes, dessen Vorsitzender er bereits seit 1986 ist und das von ihm mitgegründet wurde. Für seine wissenschaftlichen Leistungen wurde Drexler 1991 der Preis für Forschung und Technik von der National Space Society verliehen.

In verschiedenen Zeitungsartikeln und mehreren Büchern beschäftigt er sich mit den entstehenden Techniken und den Möglichkeiten der Nanotechnologie. Die bekanntesten und wegweisendsten Bücher dürften wohl »Engines of Creation«, das bereits im Jahr 1986 erschien, und »Nanosystems« aus dem Jahr 1992 sein, das sich mit den elementarsten Gebieten wie Nanobots, nanotechnologischen Produktionsprozessen oder Anwendungen in der Datenverarbeitung beschäftigt. »Engines of Creation« als eher visionär zu verstehende Arbeit zeigt zwar Möglichkeiten der Nanotechnologie, allerdings ohne die beschriebenen Konzepte ausführlich wissenschaftlich abzuhandeln. Deshalb war Eric Drexler zunächst in Fachkreisen teilweise genauso umstritten wie seine Visionen. Mit »Nanosystems« untermauerte Drexler schließlich seine Konzepte, und die kritischen Auseinandersetzungen wurden sachlicher. Bis heute werden Drexlers Ideen jedoch teilweise heftig diskutiert.

Neben Nanobots beschäftigte sich Drexler auch mit der Erforschung molekularer Elektronik. Zu den interessantesten Ergebnissen zählt die Möglichkeit, Computer zu erschaffen, die kleiner sind als lebende Zellen. Außerdem erforschte er theoretische Möglichkeiten, defekte Erbgutinformationen in der DNA oder durch andere Einwirkungen zerstörte Zellen durch Nanobots wieder zu reparieren. Eine Weiterführung dieser Forschungsansätze wird es vielleicht in ferner Zukunft ermöglichen, den Tod sehr lange hinauszuzögern, ja eventuell sogar zu überwinden.

In seinen Ausführungen zeigt Drexler, dass bereits viele Ideen, die

von Richard P. Feynman vorhergesagt wurden, mit Hilfe der Mikrotechnologie bereits vollbracht wurden. Dabei wurde genau der Ansatz, wie ihn Feynman vorschlug, verfolgt: mit einer kontinuierlichen Verkleinerung der Strukturen. Die Einführung der 0,13-Mikrometerstrukturen für Serienprozessoren ist ein weiterer Schritt in dieser Richtung. Aus Sicht molekularer Nanotechnologie vergleicht man jedoch immer noch eine mehrspurige Autobahn mit einer Streichholzschachtel. Statt mit einzelnen Molekülen als Transistoren und einzelnen Elektronen als Bits zu rechnen, benutzen alle heute verfügbaren binären Computer immer noch rund hunderttausend Elektronen zur Informationsverarbeitung, was unnötige Zeit und Geschwindigkeitsverluste, Platz sowie Geld kostet.

Eric Drexler verfolgt als Ansatz für die Realisierung seiner Theorien eine andere Strategie als Richard P. Feynman in dessen Vision. Die kontinuierliche Verkleinerung, Top-down-Ansatz genannt, wird relativ bald an ihre Grenzen stoßen. So, wie es die momentane Forschung zeigt, steht man vor hohen Barrieren, durch weitere Verkleinerung mit herkömmlichen Methoden auf die atomare Ebene vorzustoßen. Mit aus dem Top-down-Ansatz entstandenen Techniken wie Kraftmikroskopen kann man heute schon Strukturen auf atomarer Ebene schaffen. Um jedoch das volle Potenzial der Nanotechnologie auszunutzen und gezielt auf atomarer Ebene nanotechnologische Produkte entstehen zu lassen, wollte Drexler von herkömmlichen Ansätzen weg eine neue Idee entwickeln. Die von ihm vertretene Bottom-up-Technologie verfolgt für diese Verwirklichung die genau entgegengesetzte Methode im Vergleich zu Feynmans Ansatz. Man baut kleine Systeme, so genannte Assembler, direkt auf atomarer Ebene, die danach in der Lage sind, sich selbst zu replizieren, andere Materialien oder Geräte zu erschaffen, und zwar im Idealfall durch das Zusammensetzen einzelner Atome. Mit diesem Vorschlag könnte ebenfalls, noch in Theorie und Grundlagenforschung, das Ziel verwirklicht werden, Materie, selbstverständlich innerhalb der Grenzen der Naturgesetze, zu steuern. Sollte der Assembler Wirklichkeit werden – wogegen außer einem enormen Forschungs- und Entwicklungsaufwand bis zur praktischen Nutzbarkeit nach Meinung forschender Experten keine theoretischen Grenzen sprechen –, könnte man durch ihn Stoffe mit nahezu perfekten Eigenschaften oder absolut identische Kopien von jeder Art von Materie herstellen.

Die technischen Aussichten, die ein Assembler umsetzen könnte, wären enorm. Aber die Wissenschaft steht mit diesem Konzept zunächst vor einer grundsätzlichen Anlaufschwierigkeit, dem so genannten Bootstrap-Problem. Diese Problemstellung beschreibt das grundlegendste Problem der Forschung, wie man den ersten funktionstüchtigen Assembler bauen kann.

Dabei muss auch das besondere Verhalten von Materie auf diesem Level berücksichtigt werden, das unseren klassischen Vorstellungen teilweise absolut zu widersprechen scheint. Genauso treten in diesen kleinsten Dimensionen zwischen den zu schaffenden Systemen und Assemblern bisher unbekannte Wechselwirkungen auf. Auch ist das Auswerten der Vor- und Nachteile einzelner Assemblerkonzepte oder alternativen Systemdesigns dermaßen komplex, dass die heutige Forschung sich auf eine simple Version eines Assemblers beschränkt, um nicht an Beweisszenarien für die Machbarkeit zu scheitern. Somit ist das erste Ziel ein Universalassembler, der als nichtspezialisierte Maschine alle denkbaren Aufgaben übernehmen kann; und diese Maschine könnte durchaus Realität werden, womit sich Eric Drexler in »Nanosystems« beschäftigt.

## Atome im Blick

Da die theoretische Nanotechnologie von Beginn an mit einzelnen Atomen und Molekülen arbeitet, war es für Jahrzehnte ein wichtiges Ziel der Forschung, überhaupt erst durch neue und verbesserte Mikroskopietechniken auch optisch in diese Welt einzudringen. Die ersten serienreifen Elektronenmikroskope, die Lichtmikroskope bei weitem übertrafen, gab es zwar bereits Ende der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts, allerdings war auch zu Richard P. Feynmans Vortrag 1959 die Welt der Atome für Menschen noch nicht sichtbar.

Erst 1981 gelang es Forschern bei IBM, mit der Entdeckung des Rastertunnelmikroskops (RTM) einzelne Atome sichtbar zu machen. Der Schweizer Forscher Heinrich Rohrer erhielt dafür zusammen mit dem Deutschen Gerd Binnig 1986 den Nobelpreis für Physik.

Diese auch als STM (Scanning Tunneling Microscope) bezeichnete Art der Mikroskopie unterscheidet sich komplett von der klassischen Lichtmikroskopie. Diese Technologie erlaubt heute ähnlich wie andere

Arten der Elektronen- oder Sondenmikroskopie hunderttausendfache Vergrößerungen bis hin zu Vergrößerungsfaktoren von einer Million. Das STM nutzt einen Quanteneffekt aus, um die Oberfläche einer Probe dreidimensional sichtbar zu machen. Dieser später noch ausführlicher diskutierte Tunneleffekt beschreibt hier ein Elektron, das sich an einem Platz befindet, den es nach Gesetzen der klassischen Physik gar nicht einnehmen dürfte. Eine Sonde, meistens eine extrem feine Metallspitze, tastet die leitende Probenoberfläche im Abstand von wenigen Nanometern ab, wobei zwischen Spitze und Probe eine schwache elektrische Spannung angelegt ist. Auf Grund des Tunneleffekts springen nun zwischen Probe und Spitze Elektronen durch den minimalen Abstand über; ein Strom fließt. Je nach Abstand zwischen Probe und Spitze ist dieser Strom stärker oder schwächer. Das Rastertunnelmikroskop ist so geregelt, dass die Spitze immer im gleichen Abstand über die Probe gleitet, ein stärkerer Strom bewirkt also eine Entfernung von der sich annähernden Probe auf den ursprünglichen Abstand.

Der so zeilenweise aufgebaute Datenstrom über die Sondenposition beziehungsweise deren Anpassungsbewegung wird mit Computerunterstützung in ein dreidimensionales Bild umgewandelt und so auch für den Menschen sichtbar. Allerdings muss man bei dieser Mikroskopieart mit der Einschränkung arbeiten, dass nur elektrisch leitende Proben untersucht werden können.

Zur Verbesserung der Auflösung ermöglichten weitere Forschungen an diesem Konzept schließlich 1996 den Einsatz von Kohlenstoffsonden, so genannten Nanotubes, deren Spitze im Idealfall aus nur einem entsprechenden Molekül besteht. Mittlerweile können durchaus Auflösungen von 0,1 Nanometern sowohl vertikal als auch lateral erreicht werden, wobei sich außerdem der Materialcharakter wie mechanische oder elektrische und magnetische Eigenschaften analysieren lässt.

Das Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope; SFM – Scanning Force Microscope; auch RKM) kann als Weiterentwicklung des Rastertunnelmikroskops auch nichtleitende Proben untersuchen. Diese Möglichkeit wurde 1986 von Gerd Binnig zusammen mit den Forschern Quate und Gerber entdeckt. Auch das AFM lässt durch zeilenweise Probenabtastung ein dreidimensionales Bild entstehen. Allerdings trägt der Tunneleffekt hier nicht zur Oberflächenanalyse bei. Die Abstoßungskräfte zwischen der negativ geladenen Metallspitze und den

Elektronenwolken der Atome der Probe bewirken hier eine mechanische Auslenkung der Sonde.

Diese Arten der Rastersondenmikroskopie haben den großen Vorteil, dass sie prinzipiell auch in normaler atmosphärischer Umgebung einsetzbar sind und die Proben nicht eventuell zunächst für das Hochvakuum präpariert werden müssen.

Besonders die Weiterentwicklung zum Rasterkraftmikroskop ermöglichte es der Forschung erstmals, auch Fragen von wirtschaftlicher Bedeutung weiter gehend zu klären. Durch die atomare Analyse von Oberflächen können die Forscher Effekte wie Reibung und damit Verschleiß von Bauteilen und deren Schmierung besser verstehen und optimieren. Auch Korrosion konnte jetzt atomar untersucht und der entsprechende Schutz verbessert werden. Oberflächenbeschichtungen konnten unter anderem für diese beiden Bereiche dadurch optimiert werden, und auch in Zukunft können Materialien unempfindlicher gegen Außeneinflüsse werden, wodurch enorme Aufwendungen für Instandhaltungsmaßnahmen eingespart werden können.

Das von Ernst Ruska zur Serienreife gebrachte Elektronenmikroskop als Durchstrahlungsmikroskop (TEM – Transmissionselektronenmikroskop) durchstrahlt die vorliegende und nur wenige Mikrometer dicke Probe im Gegensatz zum Lichtmikroskop mit einem Elektronenstrahl. Kondensatoren und andere elektrische Bauteile übernehmen hier die Funktion der optischen Elemente des Lichtmikroskops. Heute erlaubt das TEM Vergrößerungen bis um das Einmillionenfache, indem der Elektronenstrahl auf die Probe gelenkt wird und je nach Dicke der Probe unterschiedlich viele Elektronen durchdringen, die auf einem Fotoschirm so ein Abbild der Probe abgeben. Auch Isolatoren können mit Elektronenmikroskopen untersucht werden, da für das Durchdringen keine elektrische Leitfähigkeit benötigt wird. Allerdings müssen die Proben im Hochvakuum vorliegen, da ansonsten durch verdunstendes Wasser oder ähnliche Störfaktoren der Elektronenstrahl gestört würde und eine Analyse unmöglich wäre.

Im Gegensatz zu diesem Elektronendurchstrahlungsmikroskop arbeitet das Rasterelektronenmikroskop (REM) mit einem Elektronenstrahl, der die Oberfläche einer Probe wiederum zeilenweise abtastet. Die Probe muss hier nicht extrem dünn vorliegen, da ein stark gebündelter Elektronenstrahl Sekundärelektronen aus der Oberfläche löst

oder an ihr gestreut wird. Die von einem Kollektor eingefangenen Elektronen erlauben so Rückschlüsse auf die Probe und ermöglichen eine dreidimensionale Ansicht der Probe.

Eine Vermischung dieser beiden Mikroskopiearten erlaubt es heute genauso wie die Rastersondenmikroskopie, einzelne Atome oder Moleküle darzustellen.

Ein Vergleich der beiden Mikroskopiemethoden zeigt, dass die mechanische Abtastung durch eine Sonde wesentlich bessere Ergebnisse liefert als die Elektronenmikroskopie, die nicht in jedem Fall atomare Auflösungen erreichen kann. Gerd Binnig äußert sich dazu folgendermaßen: »Das Prinzip des Kraftmikroskops erinnert an einen normalen Plattenspieler. Dass das mit Mechanik besser funktioniert als mit einem Elektronenmikroskop, ist schon erstaunlich.«

Für die Forscher war dieser revolutionäre Durchbruch jedoch nur der Anfang. Das Betrachten von Atomen und deren Lage ermöglichte zwar die Weiterentwicklung von Theorien und auch durch besseres Verstehen von Zusammenhängen ein optimiertes nanotechnologisches Bild, aber gezieltes Beeinflussen auf atomarer Ebene im Sinne der molekularen Nanotechnologie war nach wie vor nicht möglich. Allerdings gab es durch die neuen Mikroskopiemethoden und deren Weiterentwicklung bereits eine Art Qualitätskontrolle für molekulare Eigenschaften synthetisierter Stoffe.

## Materie bewegen – Atom für Atom

Erst knapp zehn Jahre nach der Entwicklung des ersten Rastertunnelmikroskops wurde es erstmals möglich, Atome nicht nur zu betrachten, sondern auch zu beeinflussen. Genau wie 1981 die Entdeckung des STM gelang auch dieser technologische Durchbruch Forschern in den Schweizer Labors von IBM. Sie nutzten ein Rastersondenmikroskop, dessen Sonde die Oberfläche der Probe berührte. Dadurch bleibt im Idealfall ein einzelnes Atom an der Sonde hängen und kann später an anderer Stelle auf einer Oberfläche wieder abgesetzt werden. 1989 schafften es die Forscher um Donald M. Eigler, durch Ausnutzung dieses Effektes auf einer Nickeloberfläche das Firmenlogo »IBM« aus fünf- unddreißig Xenonatomen herzustellen. Dieses Experiment geschah

noch bei rund minus 273 Grad Celsius, also kurz vor dem absoluten Nullpunkt.

Weiterentwickelte Rasterkraftmikroskope spielen heute als Schnittstelle zwischen unserer makroskopischen Welt und dem »Nanokosmos« eine entscheidende Rolle. Diese Technologie wird in den nächsten Jahren für die molekulare Nanotechnologie das entscheidende Mittel bleiben, Forschungen voranzutreiben und kommerzielle Produkte herauszubringen. Während heutige AFM solche Ergebnisse noch nicht liefern können, da die Arbeitsgeschwindigkeit einfach zu gering ist, könnten die durch sie erzielten Forschungsergebnisse in mehreren Jahrzehnten auch die ersten großen Nanotech-Visionen umsetzen.

Aber auch nähere Ziele wie optimierte Lichtleiter sind geplant. Mit der Sonde des Mikroskops werden in Flüssigkristalle kleinste Linien gezogen, die so präpariert als Bausteine der Datenübermittlung der Zukunft dienen sollen. Und Millionen kleinster Rastersondenmikroskope auf einem Polymer sollen hier ähnlich wie im großen Maßstab durch Bewegen von einzelnen Atomen Daten schreiben und lesen können und so einen Datenspeicher der Zukunft schaffen.

Trotz der bahnbrechenden Erfolge der Forscher auf diesem Gebiet gibt es bei dieser Methode der molekularen Gestaltung noch viele Anlaufschwierigkeiten. Noch längst ist keine ausreichende Präzision erreicht, die es ermöglicht, jegliche Art von Atomen im dreidimensionalen Raum so anzuordnen, dass sie als stabile Bauelemente in der gewünschten Form entstehen. Nur mit bestimmten Atomen und Molekülen können bisher nur relativ einfache Schritte ausgeführt werden.

Die Weiterentwicklung dieser technologischen Errungenschaft wird in Zukunft auch solche Probleme lösen können und ein immer weiteres Vordringen in die Nanowelt ermöglichen, das als Grundlage für weitere nanotechnologische Anwendungen dienen wird.

## Fullerene und Nanotubes – neue Möglichkeiten eines alten Elements

Bereits ein Jahr vor der Entdeckung des Rasterkraftmikroskops, also im Jahr 1985, entdeckte Richard Smalley zusammen mit Robert F. Curl jr. an der Rice University in Houston sowie Sir Harold W. Kroto von der University of Sussex in Brighton eine neue Modifikation des Kohlenstoffs.

Bis zu dieser Entdeckung war Kohlenstoff nur als Bestandteil verschiedener Verbindungen wie Kohle, Erdöl oder Gas bekannt, die als Energieträger dienen. Außerdem kannte man Kohlenstoff in Mehrfachbindungen mit sich selbst modifiziert. Graphit ist die kaum brennbare und stabile, kristalline Modifikation des Kohlenstoffs. Anwendung findet Graphit unter anderem als Elektrode in Akkus oder auch als Moderator in Kernkraftwerken.

Die wertvollste Form des Kohlenstoffs stellt die kubische Anordnung der Atome dar, der Diamant, einer der härtesten Stoffe der Welt. Nur ungefähr 20 Prozent der gefundenen natürlichen Diamanten genügen den Ansprüchen für Schmuck, der Rest wird als Industriediamanten für Bohrsysteme oder als Schleifmaterial verwandt. Unter gigantischem technischem Aufwand werden unter dem Druck von mehreren tausend Atmosphären und bei mindestens 3000 Grad Celsius Industriediamanten gefertigt, deren Maximalgewicht bei 0,1 Karat liegt; der größte natürliche Diamant wiegt mehr als das Dreißigtausendfache.

Für die Entdeckung einer weiteren Modifikation des Kohlenstoffs erhielten die Forscher 1996 den Chemienobelpreis. Sie entdeckten die als Riesen- oder Fußballmoleküle bekannt gewordenen Fullerene; benannt nach dem amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller, wegen der Ähnlichkeit mit seinen geometrischen Bauten. Fullerene bestehen aus sechzig oder mehr Kohlenstoffatomen und sind unter anderem bei relativ hohen Temperaturen supraleitend, wegen ihrer guten Elektrolumineszenz im optischen Bereich einsetzbar und könnten als verbesserter Toner in Laserdruckern Anwendung finden. Außerdem wird es für möglich gehalten, in die elektrisch isolierenden Fullerene Metallatome einzusetzen, die dann einen isolierten Draht auf molekularer Ebene darstellen würden. Fullerene in größeren Mengen herzustellen gelang erstmals 1990 den Physikern Wolfgang Krätschmer und Donald Huffman im elektrischen Lichtbogen.

Mittlerweile haben die Fullerene an Bedeutung verloren. 1991 entdeckte der Japaner Sumio Iijima im Dienst des Elektronikkonzerns NEC Kohlenstoffatome als feinste Röhren angeordnet, die diesen Platz allmählich einnahmen. Die so genannten Nanotubes sind ähnlich aufgebaut wie die Fullerene. Die Nanotubes sind heute ein wichtiger Bestandteil nanotechnologischer Forschung geworden, da ihre außergewöhnlichen Eigenschaften von anderen Stoffen teilweise vollkommen unbe-

kannt sind. Sie haben eine Zugfestigkeit, die herkömmlichen Stahl bei einem Bruchteil des Gewichts bei weitem übertrifft und als die höchste aller bekannten Materialien überhaupt gilt. Allerdings werden neue Werkstoffe aus Nanotubes, die im Extremfall erdbebensichere Gebäude entstehen lassen sollen, von Experten als absolut unrealistisch eingestuft. Neben nach wie vor enormen Materialkosten spricht auch die extrem glatte Oberfläche gegen eine Verwendung in diesem Bereich. Die Wärme- und elektrische Leitfähigkeit macht die chemisch reaktionsträgen Nanotubes für eine Anwendung im Bereich der molekularen Elektronik interessant, zumal sie sich je nach Anordnung der Atome auch als Halbleiter verhalten können. So findet man in einer Stoffklasse alle Eigenschaften, die man für elektronische Anwendungen benötigt, könnte man das Potenzial vollständig und zu vertretbaren Preisen ausnutzen. Bisher kostet ein Gramm Nanotubes mehr als tausend Dollar, ungefähr das Hundertfache der gleichen Menge Gold.

Erste Produkte wie Dioden wurden bereits aus Nanotubes gefertigt. Auch als Nanodrähte könnten diese Kohlenstoffstrukturen eingesetzt werden und damit elektronische Bauteile wesentlich effektiver und platzsparender verbinden. Aber auch als elektronische Bauteile selbst könnten Nanotubes Anwendung finden. So gelang es Forschern des IBM-Forschungszentrums New York einen herkömmlichen Transistor aus Silizium als Nanotube-Transistor nachzubauen, der lediglich ein Fünfhundertstel der Dicke des üblichen Produkts besitzt. Auch als »kalte Elektronenquellen« sind Nanotubes denkbar. So könnten sie beispielsweise als hunderttausende kleiner »Bildröhren« in Flachbildschirmen den Stromverbrauch senken, gleichzeitig die Auflösung erhöhen und das bei denkbaren niedrigeren Preisen. So könnten auch andere Bauteile, die bisher mit Kathodenheizungen funktionieren, mit Nanotubes als Elektronenquelle preisgünstiger betrieben werden. Japanische und Schweizer Forscher haben in ersten Laborversuchen bereits praktisch gezeigt, dass solche kalten Elektronenquellen in Flachbildschirmen nicht nur denkbar sind, sondern dass diese Technik auch funktioniert.

Aber auch ihre Struktur lässt sie für neue Anwendungen ideal erscheinen. In ihren Hohlräumen können Nanotubes andere Stoffe aufnehmen und beispielsweise als neue Speicherform für Wasserstoff in Brennstoffzellenbetriebenen Autos dienen, die die bisherigen Systeme

bei weitem übertreffen könnten. Allerdings befinden sich die bisher erzielten Ergebnisse noch in einem sehr frühen Stadium, und erste Resultate konnten die hohen Erwartungen bisher nicht bestätigen. Im Gegensatz dazu ist ein in seiner Auflösung deutlich verbessertes Mikroskop mit einer durch Nanotubes optimierten Sonde bereits auf dem Markt erhältlich. Die Bilder einzelner Atome lassen sich hiermit deutlicher darstellen, da die Auflösung über den Faktor zehn hinaus gesteigert wurde. In der Sensorik sind Nanotubes als feinste und empfindlichste Sensoren bereits ebenfalls im Einsatz. Durch die Veränderung ihres elektrischen Widerstands zeigen Nanotubes die Existenz von Gasen auch bei Raumtemperatur an. Bisher ist das Verhalten allerdings noch nicht so weit kontrolliert, dass man einzelne Gase gezielt nachweisen kann. Weitere aus Nanotubes herstellbare Bauteile sind neben Gleitlagern und Federn mittlerweile nanoskalige Thermometer. Diese Entdeckung wurde von Wissenschaftlern am Nationalen Institut für Materialwissenschaften in Tsukuba/Japan gemacht. Eine mit flüssigem Gallium gefüllte Nanoröhre verhält sich ähnlich wie ein Quecksilberthermometer. Je nach Temperatur steigt oder fällt der Flüssigkeitsspiegel, der so die lokale Temperatur im Bereich von fünfzig bis fünfhundert Grad Celsius anzeigen kann. Abgelesen wird ein solches Thermometer mit einem Rasterelektronenmikroskop.

Allerdings besteht bei den Nanotubes im Gegensatz zu den Fullerenen das Problem, sie bisher nicht im industriellen Maßstab kostengünstig herstellen zu können. Bisherige Methoden wie Laserbeschuss zur Freisetzung einzelner Kohlenstoffatome, die sich unter Mitwirkung von Katalysatoren zu Nanotubes zusammensetzen, lassen verschiedene Röhrentypen entstehen. Für die gewollten Anwendungen wird jedoch immer nur eine Art benötigt, also müssen die Nanotubes erst mühsam und kostenintensiv getrennt werden. Neue Methoden bieten jedoch Aussichten auf eine sinnvolle industrielle Herstellung. Beispielsweise wird Kohlenmonoxidgas mit Hilfe eines Katalysators gespalten, und die frei gewordenen Kohlenstoffatome setzen sich zu Nanotubes zusammen, wobei die Röhrenlänge mit Hilfe des Gasdrucks geregelt werden kann.

Da sich die Forschung in diesem Bereich der Kohlenstoffchemie noch im Grundlagenbereich befindet, wird zunehmend ein Zusammenwirken von forschenden Instituten und der Wirtschaft wichtiger, um

auch kommerziell verwertbare Produkte herstellen zu können. Ansätze in diesem Bereich gibt es bereits, unter anderem durch das Zusammenwirken in den Kompetenzzentren. Für viele Unternehmen könnten solche Fortschritte enorm wichtig werden; es gibt bereits Ansichten, dass ab dem Jahr 2010 mit herkömmlichen Produktionstechniken keine neuen Durchbrüche mehr erzielt werden können. Gerade die Nanotubes können hier eine wichtige Rolle zum Überwinden dieses Punktes spielen.

## Nanotechnologie als Massen Anwendung

Heutige Festplatten verdanken ihre Geschwindigkeit und ihre Speicherkapazitäten zum großen Teil einer der Nanotechnologie zurechenbaren Entdeckung aus dem Jahr 1988. Ein Forscherteam am Forschungszentrum Jülich entdeckte den so genannten GMR-Effekt (Giant Magnetoresistance). Ein Widerstand eines Leiters ändert sich, wenn er in ein Magnetfeld eingebracht wird oder ein Magnetfeld angelegt wird. Dieser Magnetowiderstand genannte Effekt ist für herkömmliche Leiter relativ gering. Durch abwechselnde magnetische und nichtmagnetische Schichten mit einer Bauhöhe von weniger als einem Nanometer erhöht sich dieser Effekt bis um das Vierfache. Ein an solche Schichten angebrachter Sensor wird heute bei Festplattenlaufwerken beim Datenauslesen verwendet. Hierdurch kann auch eine nicht zu unterschätzende Steigerung der Informationsdichte der Datenträger erreicht werden. Dieser Bereich stellt eine der wenigen bisherigen industriell genutzten Massen Anwendungen dar. Das Prinzip des GMR-Effekts findet aber auch bei anderen bewegten Teilen Anwendung. Erwähnt seien nur ABS-Sensoren in der Automobilbranche oder anderen Bereichen der Robotik.

Auch in diesem Bereich findet ständig weitere Forschung statt. Durch Ausnutzen weiterer Effekte wird der Tunnel-Magnetowiderstandseffekt (TMR-Effekt) erforscht. Einerseits könnten hierdurch weitere Verbesserungen im Bereich Sensorik erreicht werden, andererseits zweifeln selbst Forscher, ob diese Technologie jemals einen Durchbruch erzielen wird. Allerdings wird dem GMR-Effekt noch ungenutztes Potenzial zugesprochen, das vermutlich leichter zu realisieren ist.

Weitere bereits kommerziell genutzte nanotechnologische Entwick-

lungen sind bereits teilweise unbemerkt ein Bestandteil industrieller Prozesse geworden. Beispielsweise in der Rohölverarbeitung werden langkettige Kohlenwasserstoffe bisher durch Hitze oder mit herkömmlichen Katalysatoren in kürzere Benzinmoleküle zerlegt, wobei diese Crackverfahren unter anderem relativ energieaufwendig sind. Alternativ können heute Minerale mit einer Porengröße unterhalb eines Nanometers als Katalysatoren eingesetzt werden, die die Benzinausbeute in der Verarbeitung um weit über zehn Prozent erhöhen.

Auch Medikamente können heute bereits von nanotechnologischen Konzepten profitieren. Gezieltes Wirken bestehender Medikamente oder eine optimierte Abgabedauer im Körper durch entsprechend gestaltete nanostrukturelle Hüllen als Drug-Delivery-Systeme ist bereits möglich. Eingesetzt wird eine solche Technologie bereits beispielsweise bei Aids-Medikamenten, die wesentlich effektiver wirken können, da sie durch eine entsprechende Ummantelung länger in der Blutbahn vorhanden sind und ihre Wirkung so erst voll entfalten können.

### 3 Nanotechnologie – Einblicke und Aussichten

»Die Neigung der Menschen, kleine Dinge für wichtig zu halten, hat sehr viel Großes hervorgebracht.«

*Georg Christoph Lichtenberg*

Die nanotechnologische Forschung kam in den letzten Jahren immer mehr in das Blickfeld der Öffentlichkeit und auch der nationalen Regierungen. Weltweit wurden in den vergangenen Jahren die Ausgaben für Forschungsprojekte, die im Zusammenhang mit Nanotechnologie stehen, massiv verstärkt. Als bestes Indiz kann man derzeit den US-Haushalt ansehen, der im Jahr 2001 mit 422 Millionen Dollar knapp 80 Prozent mehr finanzielle Mittel für nanotechnologische Forschungen bereitstellt als noch im Vorjahr. Für 2002 werden von allen Ressorts der US-Regierung insgesamt 579 Millionen US-Dollar für nanotechnologische Forschung in allen Bereichen bereitgestellt. In Europa wurde ein Vierjahresprogramm geschaffen, das mit über einer Milliarde Euro Nanotechnologie und neue Produktionsprozesse fördern soll.

Eine verstärkte Zusammenarbeit der weltweiten Hochschulen, die auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätig sind, hat nicht nur viele Durchbrüche im Forschungsbereich gebracht. Mittlerweile gibt es an vielen Universitäten spezielle Nanotech-Forschungsgruppen, und Studenten haben die Möglichkeit, den Abschluss ihres Studiengangs mit nanotechnologischem Schwerpunkt zu machen.

Auch die großen, weltweit operierenden Konzerne widmen sich mittlerweile stark der nanotechnologischen Forschung. Dabei werden mit immer mehr Erfolg zwei Strategien verfolgt. Zum einen werden kleine zukunftssträchtige Unternehmen beobachtet und bei Erfolg übernommen. Aber auch die eigene Forschung wird bei manchen Unternehmen mittlerweile mit bis zu einem Drittel des Forschungsbudgets im nanotechnologischen Bereich unterstützt.

Im Sinne molekularer Nanotechnologie ist das zu erreichende Ziel der Forschung die direkte Kontrolle einzelner Atome in einem Umfang, der auch sinnvoll kommerziell verwertbare Produkte hervorbringen

kann. Dieses Ziel ist allerdings weitestgehend immer noch eine Vision, die erst langsam in ihren Grundlagen Realität wird. Bereits heute bestehen jedoch schon überzeugende Konzepte nanotechnologischer Entwicklung, die auch als Produkte von Firmen im normalen Handel vertrieben werden. Manche solcher nanotechnologischen Produkte spielen eine größere Rolle, als man denken könnte, auch wenn sie in der Öffentlichkeit teilweise gar nicht der Nanotechnologie zugeordnet werden. Verschiedene funktionierende Systeme haben auch hier die Natur zum Vorbild.

Die Nanotechnologie ist mittlerweile zu so einem komplexen Forschungsfeld herangewachsen, dass ein kompletter Einblick auf wenigen Seiten nahezu unmöglich ist. Deshalb beschränken sich die folgenden Seiten auf ausgewählte Beispiele, deren öffentliche Präsenz nicht immer in gleichem Maße gegeben ist. Alle erwähnten Beispiele sind meistens nur ein Weg zum Ziel, zu dem es mehrere parallele Alternativen gibt. Mit den wichtigsten nanotechnologischen Ereignissen der jüngsten Vergangenheit und der Beschreibung einer möglichen Zukunft nanotechnologischer Forschung soll so ein Überblick über das weite Feld der Nanotechnologie gegeben werden.

## Lotusblüten

Das bekannteste natürliche Konzept, das einer nanotechnologischen Anwendung zu Grunde liegt, dürfte der Lotusblüteneffekt sein. Die Blätter der Lotuspflanze bieten mit der Struktur ihrer Oberfläche nur minimale Kontaktmöglichkeiten für Schmutz und Wasser. Deshalb perlt Wasser auf der Oberfläche ab und spült Schmutzpartikel von ihr herunter.

Dieser Effekt findet unter anderem bereits Anwendung bei selbstreinigenden Glasvordächern. Hier wird mit wenig Regen auch der härteste Schmutz weggespült; die Glasflächen sind mit Nanopartikeln beschichtet. Diese mit feinsten Noppen überzogene Oberfläche bietet Schmutz nur wenig Fläche zum Anhaften und ermöglicht es dem Wasser so, mit wenig Kraft den schwach haftenden Dreck wegzuspülen. Denkbar wäre eine solche Anwendung auch, um das Werk von unerwünschten Graffiti-Sprayern durch kurzes Besprühen mit Wasser verschwinden zu

lassen. Die Wasser und Schmutz abweisenden Oberflächen lassen sich aber noch weitreichender einsetzen. Man kann zum Beispiel Stoffe, also auch Jacken oder Pullover, gegen Schmutz imprägnieren, ohne dass man andere Materialzusammensetzungen benötigt. Flüssigkeiten perlen sofort von der Oberfläche ab, ohne Flecken zu hinterlassen, anstatt in das Gewebe einzuziehen. Sollte hartnäckigerer Schmutz an der Kleidung hängen bleiben, kann man ihn einfach mit Wasser abwaschen. Da die Beschichtung gleichzeitig Wasser abweisend sein kann, braucht das Kleidungsstück nicht einmal zu trocknen; der Tragekomfort wird durch die aufgebrauchte Oberflächenbeschichtung nicht beeinflusst.

## Optimierungen im Nanokosmos

Bestehende Produkte, die teilweise unsere Welt nicht unwesentlich beeinflussen, werden mit der für uns aus makroskopischer Sicht größtmöglichen Präzision gefertigt. Im Vergleich zu Produktionsverfahren vor mehreren Jahrzehnten führte eine solche Präzisionssteigerung oftmals auch zu einer nicht unwesentlichen Leistungssteigerung. Aber aus molekularer Sicht ist diese Präzision noch längst nicht in einem optimalen Stadium. Könnte man die Präzision in Produktionsprozessen weiter in diese Dimensionen hineinsteigern, besteht auch die Möglichkeit einer weiteren Leistungssteigerung.

So ist es französischen Forschern bereits im Labor gelungen, einen Lithiumakkumulator mit Metalloxidelektroden, deren Oberfläche aus Nanopartikeln besteht, in seiner Leistung wesentlich zu verbessern.

In ersten Testläufen konnte eine um das Sechsfache gesteigerte Leistungsabgabe verzeichnet werden. Allerdings hat dieses Labormodell bisher eine zu geringe Lebensdauer und zu schwache Spannung, um den Vergleich mit Serienakkus anzutreten. Sollten weitere Verbesserungen diese Mankos ausgleichen können, würden sich beim Erreichen der Serienreife zum Beispiel die im Moment noch sehr eingeschränkten Laufzeiten von Notebooks deutlich verbessern. Alle netzunabhängigen Geräte könnten von diesem Nanotechkonzept profitieren, entweder durch Steigerung der Betriebsdauer oder durch Gewichtreduzierung ohne Leistungseinbußen.

Auch andere, herkömmliche Stoffe können durch Nanopartikel völ-

lig neue Eigenschaften verliehen bekommen. So könnte man beispielsweise eine Seite dieses Buches beschichten und sie damit extrem reißfest machen, auch vertikal belastbar mit mehreren hundert Kilogramm. Deutsche Forscher haben bereits Nanobeschichtungen entwickelt, die zum Beispiel Möbeln ohne optische Einbußen eine sehr kratz feste Oberfläche verleihen, anwendbar beispielsweise um ein teures Sofa vor den scharfen Krallen eines Haustieres zu schützen. Nicht nur die gewöhnliche Couch kann so gegen mechanische Einflüsse unempfindlicher gemacht werden. Auch Lacke könnten mit Nanopartikeln als kratzunempfindliche Oberflächenversiegelungen hergestellt werden; ein Auto würde auch noch nach Jahren wie ein Neuwagen glänzen.

Elektrisch leitende Kleb- oder Kunststoffe sind ebenfalls für die Forscher von großem Interesse. Der im Jahr 2000 vergebene Chemienobelpreis widmete sich dem Thema elektrisch leitender Polymere. Zwar ist diese Forschungsarbeit nicht als reine nanotechnologische Entwicklung zu sehen, aber es zeigt sich durchaus, welches Potenzial mit der Beeinflussung von Materialien auf molekularer Ebene zu erreichen ist. Das näher liegende Ziel wird hier nicht die Tapete als Flachbildschirm aus einer dünnen Folie sein, sondern die elektrisch leitenden Polymere könnten relativ bald die Halbleiterindustrie bei Low-Performance-Anwendungen eher durch günstigere Produktionspreise aufrollen. Besonders interessant ist bei dieser Polymerelektronik, dass die Herstellung nicht in Reinräumen wie bei der siliziumbasierenden Chipherstellung geschehen muss. Als »Wegwerfelektronik« sollen die »Foliencomputer« bereits in fünf bis sechs Jahren Einzug in den Alltag halten und beispielsweise durch in die Verpackung integrierte Sensoren den Qualitätszustand von Lebensmitteln überprüfen. Aus nanotechnologischer Sicht ist ein verfolgter Weg zur massentauglichen Polymerelektronik interessant. Polymere sollen durch Selbstorganisation die entsprechenden Chipstrukturen auf Verpackungen oder in anderen Bereichen entstehen lassen. Auch Batterien und einfache Displays sollen auf diese Weise in vier bis sechs Jahren als vergleichsweise leicht zu entsorgende Systeme produziert werden.

Außerdem kann man bereits durch katalytische Wirkungen von künstlich hergestellten molekularen Substanzen unangenehm riechende Stoffe genauso wie toxische Verbindungen in neutrale Substanzen zerlegen lassen. Hier stellt auch wieder die Natur ein großes Vorbild

dar. Beispielsweise neutralisiert das Enzym Katalase das hochtoxische Zellgift Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff und erfüllt damit eine ähnliche Aufgabe wie die künstlichen Katalysatoren.

Noch als Laborexperiment sind bisher flexible und bruch sichere Keramiken geglückt, die auf Grund ihrer kleineren Grundpartikel höhere Kontaktraten untereinander haben und so zusätzlich biegsam werden wie Metalle, wodurch sich natürlich auch die Bruch sicherheit erhöht. Sobald die einzelnen Partikel kleiner sind als ein Zwanzigstel der Wellenlänge des Lichtes, werden Stoffe, wie hier die Keramik, durchsichtig. Daraus ergibt sich ein weiterer interessanter von den Forschern verfolgter Aspekt. Mit solch durchsichtiger Keramik könnte ein Glasersatz geschaffen werden, der das Zerschmettern eines Wasserglases am Boden verhindern oder extrem widerstandsfähige Fensterscheiben hervorbringen könnte, die unter anderem eine erhöhte Einbruchsicherheit bieten würden.

Aber auch nanokristalline Beschichtungen ermöglichen es schon heute, Brillengläser gegenüber Kratzern unempfindlich herzustellen, was natürlich bei normalem Fensterglas, aber auch medizinischen oder anderen optischen Instrumenten anwendbar ist. Eine so optimierte Oberfläche bietet Fremdkörpern keine Möglichkeit, in die molekulare Struktur des Stoffes einzudringen und so Furchen in die Oberfläche zu ziehen.

## Neue Bilder aus der Nanowelt

Neben den immer weiterentwickelten Mikroskopiemethoden gibt es auch andere kommerziell verfügbare Technologien. Als weiterer Einstieg in die Nanowelt kann die so genannte Photoelektronenspektroskopie verwendet werden. Im Gegensatz zum Elektronenmikroskop wird die Oberfläche hier mit einer Röntgenwelle abgetastet, deren Wechselwirkung mit dem Präparat die Oberflächenzusammensetzung und auch die Tiefenverteilung auf Grund herausgelöster Elektronen erlaubt. Diese Spektroskopiemethode kann in einem relativ großen Temperaturbereich von fast eintausend Grad Celsius durchgeführt werden. Allerdings liegt die Nachweisgrenze für chemische Bestandteile hier wesentlich höher als beim Elektronenmikroskop, was gerade die

Bestimmung der Zusammensetzung komplexer chemischer Strukturen beziehungsweise kleinster Verunreinigungen erschwert.

Eine weitere Methode zur Betrachtung nanoskaliger Strukturen ist die so genannte Ellipsometrie. Durch Wechselwirkung von ausgestrahltem, polarisiertem Licht mit der Oberfläche entstehen hier Veränderungen der Lichtwellen, die sich auswerten lassen und somit ein indirektes Bild des untersuchten Präparats zulassen. In einer weiteren Entwicklungsstufe werden diese Daten direkt durch einen CCD-Chip, dessen Fähigkeit auch Digitalkameras nutzen, ausgewertet. Dadurch wird mit der so genannten abbildenden Ellipsometrie die Möglichkeit geschaffen, Proben in Echtzeit direkt zu beobachten. Besonders bei der Produktion und Prüfung von Biochips wird eine der abbildenden Ellipsometrie verwandte Technologie eingesetzt, die auf Grund der gleichnamigen, ausgewerteten Reaktion Surface Plasmon Resonance genannt wird. Hierbei werden die Wechselwirkungen des einfallenden Lichts in bestimmten Einfallswinkeln ausgewertet, wobei die anfallenden Daten eine besonders hohe Auflösung und damit auch eine besonders empfindliche Messung der Probe ermöglichen.

## Kleinste Dimensionen – unbekannte Effekte

Ein immer weiteres Vordringen zur Grundlage der Materie lässt in der makroskopischen Welt völlig unbekannte Effekte auftreten. Teilchen können sich an mehreren Orten gleichzeitig aufhalten oder Energie aufnehmen oder abgeben. Solche fantastisch anmutenden Effekte sollen in Zukunft praktisch nutzbar gemacht werden. Diese Effekte werden in Abgrenzung zur klassischen Physik als »Quantenmechanik« bezeichnet.

Die Quantenmechanik ist zwar kein nanotechnologisches Forschungsfeld, allerdings treten in nanodimensionierten Größenordnungen Effekte auf, die durch die Quantenmechanik beschrieben werden.

Quantenmechanische Eigenschaften der Elektronen wollen Forscher in Quantencomputern umsetzen, die deutlich gesteigerte Rechenleistung erbringen werden. Aber auch andere Effekte im nanoskopischen Bereich sind aus der makroskopischen Welt völlig unbekannt. Kann man hier die Bewegung von einzelnen Körpern auf Grund der auf sie wirkenden

Kräfte vorhersagen, wird dies, quantenmechanisch betrachtet, unmöglich. Würde man zum Beispiel eine Gewehr­kugel als Einheit aus Billiard­en von einzelnen Metallatomen auffassen, wäre die Messgenauigkeit der klassischen Mechanik weit überfordert. Denn man kann den genauen Ort beziehungsweise die genaue Geschwindigkeit mehrerer Atome, isoliert betrachtet, nie gleichzeitig bestimmen. Die klassische Mechanik wird deshalb auch von Experten als Grenzfall der Quantenmechanik bezeichnet. Ein typisches Beispiel für die quantenmechanischen Effekte ist das Elektron. Es lässt sich weder klar als Teilchen, noch als Welle definieren. Je nachdem, was gesucht wird, zeigt sich das Elektron als Welle oder als Teilchen, was es jedoch wirklich ist, konnte bisher nicht geklärt werden. Und Elektronen können noch mehr; ein vorher nicht bestimmbarer Bruchteil eines kompletten Systems ist in der Lage, sich durch eine eigentlich undurchdringbare Wand mit Überlichtgeschwindigkeit zu bewegen, der so genannte Tunneleffekt. Allerdings kann man diesen eben nicht bestimm­baren Teil auch nicht nutzbar machen, zum Beispiel zu Datenübertragungszwecken, was der Einsteinschen Relativitätstheorie damit nicht widerspricht. Ebenso erstaunlich ist es, dass Teilchen wie Licht interferieren können, denn Materie in Form von Teilchen kann auch eine Welle sein.

Eine weitere interessante Erscheinung ist die Verschränkung von zwei Teilchen, beispielsweise zwei Photonen. Wird ein Photon durch einen Kristall geleitet, entstehen in einem gewissen Anteil zwei Photonen, die miteinander verschränkt sind. Das bedeutet, dass eine Zustandsänderung des einen Teilchens ebenfalls eine Zustandsänderung des anderen Teilchens hervorruft. Beispielsweise ist eine Polarisationsbestimmung eines Teilchens auch zwingend für das andere, welches die entgegengesetzte Polarisation erhält. Eine Zustandsänderung, auch Impuls eines Teilchens, funktioniert sowohl zeitgleich als auch unabhängig vom Abstand der beiden Teilchen. Nach seinen Entdeckern Albert Einstein, Boris Podolski und Nathan Rosen wird dieses Gedankenexperiment EPR-Paradoxon genannt, womit sie ein bis heute diskutiertes Argument gegen die Vollständigkeit der Quantenmechanik geschaffen haben.

Erwin Schrödinger hat mit einer Idee über den Zustand eines klassischen Teilchens ein interessantes und anschauliches theoretisches Beispiel für einen Bereich der Quantenmechanik geliefert. Die Schrödinger Katze sitzt in einer verschlossenen Kiste, und sobald ein Detek-

tor den Zerfall eines Atoms registriert, wird durch einen Hammer eine Giftflasche zerschlagen, wodurch die Katze getötet wird. Genauso wie ein Teilchen verschiedene Zustände besitzen kann, kann auch in diesem Fall die Katze in der verschlossenen Kiste noch leben, aber auch bereits tot sein. Nur ein Zustand ist zu jedem Zeitpunkt möglich, genauso wie bei einem Teilchen. Solange man den Zustand des Objekts nicht durch Messen herausgefunden hat, befindet es sich in der Superposition, einem Zwischenzustand, der bei der Katze erst durch das Öffnen des Deckels, also eine Messung, geklärt werden kann. Für das Teilchen ist eine Messung jegliche Interaktion mit der Umwelt, beispielsweise das Zusammentreffen mit einem anderen Stoff.

Die Quantenmechanik ist eine wichtige theoretische Grundlage für Forschungen auf molekularer Ebene, aber sie stellt nur eine statistische Theorie dar und ist auf Einzelsysteme nur bedingt anwendbar. Obwohl die Quantenmechanik bis heute durch keinerlei Experimente widerlegt wurde, steht sie immer noch nicht im Einklang mit der Relativitätstheorie. Es bleibt also nicht nur ein großer experimenteller Forschungsbedarf, um die Möglichkeiten der Nanotechnologie auszuschöpfen, auch die theoretischen Grundlagen dieser »anderen Welt« müssen weiter erforscht werden, denn trotz aller praxisorientierten Forschung kann man auf theoretische Grundlagen nicht verzichten.

Ein weiterer für die Nanotechnologie sehr nützlicher Effekt spielt besonders in der chemischen Nanotechnologie eine wichtige Rolle. Die Selbstorganisation von Atomen lässt durch gezielt eingeleitete Vorgänge bestimmte Reaktionen auf molekularem Maßstab erreichen. Stoffe haben die Eigenschaft, sowohl im energetisch günstigsten Zustand als auch im größtmöglichen Chaos, also mit einer hohen Entropie, vorzuliegen. So, wie sich ein Duftstoff im ganzen Raum ausbreitet, kann man auch eigentlich relativ große Molekülverbände beeinflussen. Eine Möglichkeit besteht zum Beispiel durch Erhitzen der mikroskopischen Ausgangsstoffe – denkbar durch einen Laser, auf mehrere tausend Grad –, die danach eigenständig zu kleinsten Kugeln kondensieren.

Ein weiteres Beispiel der Selbstorganisation sind die kolloidalen Systeme, die als molekulares System in der Lage sind, durch Selbstorganisation geforderte Aufgaben funktionell zu erfüllen. Es ist mittlerweile mit Hilfe gezielter Selbstorganisation von Nanopartikeln oder Polymeren durchaus möglich, beliebige Produkteigenschaften zu erzie-

len, beispielsweise transparente Leiter, oder auch optimalen und vor allem dauerhaften Korrosionsschutz, genauso wie andere intelligente Oberflächen, die sich durch extreme Gleitfähigkeit oder aber antibakterielle Eigenschaften auszeichnen. Auch kann man neue Polymerstrukturen erzeugen, die gegen Witterungs- oder mechanische Einflüsse unempfindlich sind.

## Neue Konzepte

Die Forscher denken bei nanotechnologischen Oberflächen an intelligente Systeme, die völlig neue Materialkonzepte ermöglichen sollen. Von schaltbaren Materialien, die durch elektromagnetische Impulse gesteuert werden sollen, könnte auch die Umwelt profitieren. Durch neuartige Kleber, die gezielt gesteuert und so von Haften auf Entkleben umprogrammiert werden könnten, wäre eine völlig neue Art des Recyclings möglich, da man Abfälle bis ins Kleinste auflösen und nachher die einzelnen Bestandteile wieder weiterverarbeiten könnte.

Aber auch durch gezieltere Nutzung von Stoffen lassen sich in industriellen Prozessen Ressourcen sparen. Durch den Einsatz von kleinsten Partikeln, die ein wesentlich höheres Leistungspotenzial bei weniger Material bieten, zum Beispiel auf Grund der vergrößerten Oberfläche – ein Gramm Nanopartikel hat eine Oberfläche von mehreren hundert Quadratmetern –, ihres hohen Reaktionspotenzials oder der extremen Mobilität, wird auch immer mehr die Umwelt von den fortgeschrittenen Industrieprodukten profitieren. Die benötigten Grundstoffe könnten mit solchen Konzepten wesentlich effektiver genutzt und auch in zahllosen Kreisläufen eingesetzt werden, sollte sich dieser Gedanke in Zukunft auch flächendeckend durchsetzen.

Wie bei nahezu allen nanotechnologischen Chancen befindet sich auch hier die Forschung in großen Teilen noch in sehr frühen Stadien. Sollten kommerziell verwertbare Produkte der relativ anspruchsvollen Nanotechnologie auch in den gerade erwähnten Bereichen marktfähig werden, müssen sie zum einen teilweise gegen bestehende Konzepte konkurrieren oder aber erst eine Infrastruktur, die neue Fähigkeiten auch ausnutzen kann, geschaffen werden. Außerdem ist es wie bei allen Produkten der Nanotechnologie noch nicht abzusehen, ob die entste-

henden Produkte wirklich die erhofften Qualitätsstandards erreichen werden beziehungsweise wann dies geschehen wird. Diese Aspekte stellen zusammen mit einem enormen Forschungsaufwand eine hohe Zukunftsunsicherheit dar, wobei die Realisierung der meisten seriösen Konzepte hauptsächlich durch die zeitliche Komponente und hohe Kosten hinausgezögert wird.

## Nanopulver

Reine nanotechnologische Produkte werden bisher kaum in industriellem Maßstab produziert. Nanopulver (im Englischen »nanopowder«) gehören in diese Gruppe. Verschiedene Firmen stellen weltweit solche Nanopulver mit Korngrößen bis einhundert Nanometer in verschiedenen Verfahren her. Solche Pulver finden ihre Hauptaufgaben bei der Verbesserung bestehender Produkte. Als speziell optimierte Zusätze werden so heute bereits am Markt erhältliche Produkte durch Nanotechnologie reformiert. In der Chemiebranche wird im Moment mit stark gesteigerten Forschungsetats die nanotechnologische Forschung forciert, so dass in nächster Zeit weiterhin neue Anwendungen zu erwarten sind.

Neben Möglichkeiten, nanokristalline Pulver als Beschichtungen, verbesserte Keramiken, medizinische Transportsysteme oder Katalysatoren einzusetzen, wollen die Hersteller das Anwendungsgebiet erweitern. Gedacht wird hier in absehbarer Zeit an die Mikroelektronik. Auch als Bestandteil einer neuartigen Unterhaltungselektronik sollen sich die Nanopulver einen Anwendungsbereich erschließen.

Die prinzipiellen Techniken für die Herstellung von Nanopartikeln sind teilweise schon sehr alt. Während das Verdampfen mittels eines Lasers zu den neueren Methoden gehört, ist die Herstellung durch einen zur Explosion gebrachten Draht schon seit dem Ende des 18. Jahrhunderts bekannt. Erstmals bewusst wurden Nanopartikel vor rund einhundert Jahren hergestellt, als Wissenschaftler diese in kolloidalen Suspensionen erzeugten, allerdings liegen hier noch in einer Flüssigkeit gelöste Partikel vor. Erstmals ein trockenes Nanopulver, das damals natürlich noch nicht so hieß, wurde im Jahr 1940 in Deutschland entwickelt. Der auch heute noch von der Degussa AG her-

gestellte Stoff Aerosil diente damals wegen der Ölknappheit als Grundmittel für Autoreifen anstatt des aus Erdöl gewonnenen Gummis.

Ein mit Hilfe des elektrischen Stroms zur Explosion gebrachter Draht ist eigentlich vom Prinzip her in jedem Haushalt vorhanden und stellt eine Art zur Herstellung eines Nanopulvers dar. Eine herkömmliche Glühbirne funktioniert nach demselben Prinzip, allerdings liegt der hier zugeführte Strom an der Grenze zur Explosion. Erst wenn die Glühbirne durchbrennt, entsteht hier unkontrolliert ein Nanopulver aus Metalloxid. Wird dieser Vorgang gezielt gesteuert und der Draht beispielsweise in einer reinen Sauerstoffumgebung zur Explosion gebracht, entstehen kleinste Metalloxidpartikel, die jedoch zunächst zusammenhaften. Mit Hilfe von speziellen Filtern werden die einzelnen Partikel aufgetrennt und liegen dann im gewünschten Maßstab vor. Diese Methode gehört als weitentwickelter Herstellungsprozess zu industriell nutzbaren Anwendungen, um große Mengen eines Pulvers herzustellen.

Nanoskalige Partikel in der Mikroelektronik sind beispielsweise interessant, um auf Grund der kleineren Strukturen eckigere Ecken bauen zu können, Platz besser auszunutzen und dadurch eine Leistungssteigerung zu erzielen. Genauso werden metallische Nanopulver dafür maßgeblich sein, elektrisch leitende Klebestreifen zu entwickeln, was ganz neue Arten von Verbindungen ermöglicht. Durch eine höhere Kontaktrate bei metallischen Verbindungen wird die Leitfähigkeit der Systeme erhöht, ein niedrigerer Widerstand muss überwunden werden und eine Steigerung der Übertragung beziehungsweise eine Verminderung der Verluste wird möglich. Denkbar wäre ein enormes Einsparpotenzial bei Tausende Kilometer langen Hochspannungsleitungen, aber auch in kleinsten Schaltungen. Keramische Nanoteilchen, die von einem Polymer umgeben werden, können optische Eigenschaften von Bauelementen verbessern und so deren Leistungsfähigkeit erhöhen. Beispielsweise lässt sich durch solche keramischen Nanopulver der Reflexionsgrad von Bauelementen deutlich steigern. Ein österreichisches Forschungsprojekt sieht durch die kleine Oberfläche der Nanopartikel auch eine Anwendung im Umweltschutz. In belastete Böden könnte ein solches Pulver deutlich leichter eingebracht werden. Auf keramischer Basis soll so ein Mittel zur Sanierung von kontaminierten Flächen entwickelt werden.

## Kolloidale Systeme

Weitere interessante nanotechnologische Produkte sollen in Zukunft die schon bei der Selbstorganisation erwähnten kolloiden Systeme hervorbringen. Diese Substanzen wurden schon von vielen Nobelpreisträgern, unter ihnen auch Albert Einstein, erforscht. Kolloide sind bereits seit fast einhundertfünfzig Jahren bekannt, aber über ihre Funktion und Struktur weiß man erst seit dem Einsatz neuer Mikroskopietechniken besser Bescheid. Dabei stellte sich heraus, dass Kolloide zweiphasige Systeme sind, deren Bestandteile auf molekularer Ebene verteilt vorliegen. Die Kolloidforschung und die Suche nach neuen Anwendungsgebieten gelten jedoch erst seit wenigen Jahren neben verbesserten Mikroskopiemethoden auch auf Grund neuer Möglichkeiten der Polymersynthese wieder als zukunftsträchtiges Gebiet, da sich der Wissenschaft jetzt die Perspektive bietet, ihre Produkte auf molekularer Ebene zu betrachten und die Systeme gezielter aufzubauen. Die heutige Kolloidforschung unterscheidet sich dahin gehend von früheren Forschungsansätzen, dass Dispersionskolloide nicht mehr ein so starkes Interesse wecken. Während bei diesen Kolloidsystemen eine Phase in einem Dispersionsmittel, der anderen Phase, feinst verteilt wird, entstehen die heute favorisierten Assoziationskolloide aus einem energiearmen Molekülverband gleichartiger Moleküle.

Aber auch Dispersionskolloide finden für nanotechnologische Produktverbesserungen bereits Anwendung, beispielsweise wirken viele Pflanzenschutzmittel nur dann besonders lange und in möglichst niedrigen Dosen, wenn sie als Dispersionskolloide verarbeitet werden. Die heute weit stärker forcierte Assoziationskolloidforschung findet unter anderem beim Schutz von Metallteilen durch Zerstörung von ausgefallenem Kalk Anwendung, beispielsweise in Heizsystemen. Hier fallen durch permanentes Erwärmen und Abkühlen die im Wasser vorhandenen Calciumionen als wasserunlöslicher Kalk aus. Riesige Elektrolitmoleküle, die so genannten Polyelektrolyte, als ein Beispiel für Assoziationskolloide, können als Bestandteil von Wasserkreisläufen die Calciumionen binden. Dadurch entstehen nicht wenige große, sondern kleine Kristalle, die sich nicht an Metallteilen ablagern können und dementsprechend nicht die Wärmeleitfähigkeit von Rohrsystemen und Heizschlangen verschlechtern, also unnötige Energie vergeuden. Bei

empfindlicheren Anwendungen lässt sich diese Schutzfunktion durch eine hochdisperse Lösung noch wesentlich steigern, da hier jegliche Kristallbildung schon im Ansatz verhindert wird.

Ein großer Beitrag zum Umweltschutz wäre die Ausnutzung des katalytischen Potenzials von Metallen, die als Syntheseprodukt der Kolloidsysteme entstehen. Die Anwendung von Platin im Autokatalysator wäre durch solche Metallkolloide wesentlich verbessert, da auf Grund der größeren Oberfläche Reaktionen schon bei geringeren Temperaturen und mit einer höheren Aktivität ablaufen können, was weniger Schadstoffe zur Folge hätte und auch bei großen umzusetzenden Mengen eine volle Funktion gewährt.

## Größte Präzision für hohe Leistung

Ultradünne Schichten werden von Experten innerhalb der Nanotechnologie als eigene Querschnittstechnologie gesehen, die eine wichtige Rolle in allen Forschungsbereichen darstellt. Anwendungen der dünnen funktionalen Schichten finden sich dementsprechend in vielen Bereichen, sei es bei Rastersondenmikroskopen, Oberflächenbehandlungen oder der Optik. So spielt die Forschung zur Abscheidung von Schichten im Bereich bis zu nur einem Nanometer mit gezielten Eigenschaften der Oberflächen auch bei dem schon in der Anwendung befindlichen GMR-Effekt eine große Rolle. Durch eine Verknüpfung der Biologie mit den Ingenieurwissenschaften wollen die Forscher hochkomplexe ultradünne Schichten synthetisieren, die die Natur schon seit Urzeiten kreiert. Anwendung könnten so generierte Schichten sowohl in der Medizin als auch in der Nanosensorik oder Mikroelektronik erhalten. Für zukünftige Lithographieverfahren in der Mikroprozessorherstellung durch Einsatz von Röntgenwellen ist eine hohe Präzision der eingesetzten Bauteile erforderlich. Beispielsweise durch Abscheidung der Flächen mittels eines Laserverfahrens können heute bereits solche Optiken mit hoher Präzision hergestellt werden. Erforscht werden derzeit die Fähigkeiten von präzisen, optisch aktiven Elementen oder aber optisch wirkenden einzelnen Molekülen als Teil eines kompletten Nanobaelements.

In der Medizin kann durch einen Überzug mit nanostrukturierten

Schichten eine höhere Akzeptanz von Implantaten erreicht werden. Außerdem können so langlebigere Komponenten verwendet werden, die die bisherigen Fähigkeiten optimieren. Reine und auch absolut glatte Oberflächen sind ein wichtiger Aspekt für die Weiterentwicklung von Hochleistungsprozessoren, da eine Präparation der Siliziumschichten sonst bei Strukturen von rund hundert Nanometer, die in absehbarer Zeit Serienreife erlangen werden, eine hohe Fehlerquote bergen würde, und als Folge würden Produktionsfehler auftreten, die verkleinerte Strukturen und damit eine Leistungssteigerung unverhältnismäßig verteuern würden. Eine Methode, die ultradünnen Siliziumschichten optimal zu glätten, besteht im »Schleifen« der Siliziumscheibe mit nanoskaligen, chemischen Partikeln. Solche molekular polierten Flächen sind neben der Waferproduktion auch für optische Bauelemente, beispielsweise Spiegel für Laser- oder Röntgenoptiken, von großem Interesse, da hierdurch eine wesentlich höhere Präzision erreicht werden kann.

Oberflächenveredlungen sind ein weiteres Teilgebiet der ultradünnen Schichten, das heute einen großen Bereich der Nanotechnologie ausmacht. Als Endprodukt entsteht durch verschiedene Herstellungsverfahren ein ultradünner Überzug eines bestehenden Produktes, der als Schutz vor externen Einflüssen dient.

## Nanonasen

Immer mehr mögliche Umwelteinflüsse durch technisch geschaffene Produkte stellen immer höhere Anforderungen an entsprechende Sensoren. Aber auch direkt in Produktionsprozessen ist eine schnelle und genaue Analyse oftmals von großer Bedeutung. Umso dichter ein Sensor an der entsprechenden Stelle sitzt, desto schneller kann eine Messung erfolgen. Und kleinere Sensoren erlauben eine höhere Genauigkeit durch eine verbesserte Auswertung.

Auch hier spielen ultradünne Schichten und verwandte Produkte eine wichtige Rolle. Umwelteinflüsse lassen sich durch diese Schichten beziehungsweise ihre Interaktionen mit der Umgebung messen. Neben einer solchen Biosensorik ist es auch in anderen Bereichen der Analyse wichtig, möglichst dünne Auswertungsschichten zu haben, da diese

näher am Präparat sitzen und eine höhere Messgenauigkeit ermöglichen.

Im Zusammenhang mit ultradünnen Schichten ist natürlich auch eine Qualitätssicherung von großem Interesse. Kriterien sind, je nach Anwendungsgebiet des Stoffes, Eigenschaften wie schon eingetretene Korrosion oder anderer Verschleiß, aber auch das Reibungsverhalten, Glätte der Oberfläche oder Position von Bauelementen. Um solche Eigenschaften direkt und in Echtzeit prüfen zu können, muss die Sensorik mit dem Produkt in direkter Wechselwirkung stehen, wie es beispielsweise bei der Rastersondenmikroskopie der Fall ist. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist hier auch, dass die anfallenden Daten auch Strukturen im dreidimensionalen Raum widerspiegeln, was gerade für die Chipproduktion von hohem Interesse ist.

Aber auch in herkömmlichen Gebieten können Nanosensoren eine ideale Unterstützung bieten. Land- und Seeminen können bisher nur mit einer relativ hohen Gefahr für eingesetzte Menschen und Maschinen aufgespürt werden. Besonders bei Seeminen könnte ein nanotechnologisches Konzept die Gefahr bei dieser Arbeit in Zukunft verringern. Von organischen Molekülen umgebene, verkettete Siliziumatome beginnen, unter der Einwirkung von ultraviolettem Licht grün zu leuchten. Diese elektrisch leitenden Nanodrähte, der Kunststoff wird Polysilol genannt, verlieren ihre Leuchtkraft, wenn sie mit Nitrogruppen in Kontakt kommen, wie sie in den Sprengstoffen Trinitrotoluol (TNT) und auch Pikrinsäure vorhanden sind, da diese ihnen Elektronen entziehen. Da aus älteren Land- und besonders Seeminen oftmals feinste Spuren der Sprengstoffe austreten und Polysilol schon auf geringste Mengen anspricht, lassen sich Minen so über mehrere hundert Meter im Wasser aufspüren. Ausführungen der Wissenschaftler der University of California zufolge, die diese Entdeckung gemacht haben, ist schon ein Tropfen Sprengstoff in einem Schwimmbad mit hundert Metern Bahnlänge am anderen Ende ausreichend, um eine Fluoreszenzabnahme festzustellen. Aber auch in der Luft oder auf Feststoffen funktioniert diese Art der Analyse, die den großen Vorteil hat, dass sich der Kunststoff auf die unterschiedlichsten Oberflächen aufbringen lässt, die sich dann als Detektoren einsetzen lassen.

Onlinesensoren sind ein wichtiges Hilfsmittel zur stetigen Verbesserung nanotechnologischer Produkte, da, wie auch bei makroskopi-

schen Produkten, kein hundertprozentiger Qualitätsstandard gesichert werden kann und eine schnelle und verhältnismäßig einfache Überwachung der Beschaffenheit des Produkts Zeit und Geld spart. Außerdem ermöglicht sie eine Aussortierung schadhafter Bauteile und minimiert damit eine Fehlfunktion des zugehörigen Gesamtsystems. Hierdurch können neben der Qualität auch die Sicherheit und Langlebigkeit entscheidend verbessert werden.

Vielseitige Sensoren wollen Forscher künftig durch entsprechend behandelte halbleitende Nanodrähte aus Silizium schaffen. Beispielsweise durch die Dotierung dieser wenige Nanometer dicken Drähte mit Bor lässt sich der Säure-Base-Gehalt einer Flüssigkeit bestimmen. Eine Beschichtung mit einem Protein ermöglicht die gezielte Auswertung von Calciumionen, die maßgeblich an vielen grundlegenden biologischen Prozessen beteiligt sind. Nachweisbar sind solche Stoffe durch eine Veränderung der Leitfähigkeit der Nanodrähte, die durch Wechselwirkung der Probe mit den behandelten Nanodrähten entsteht. Ebenfalls aus dünnen Drähten, in diesem Fall aus dem Metall Palladium, haben französische und amerikanische Forscher einen hoch empfindlichen Nanosensor für explosives Wasserstoffgas entwickelt. Im Gegensatz zu makroskopisch aufgebautem Palladium erhöht sich durch die Nanostrukturen die Leitfähigkeit der Drähte bei Kontakt mit Wasserstoff innerhalb von Sekundenbruchteilen. Neben diesem Vorteil des Nanosensors sind auch noch seine Unempfindlichkeit gegenüber anderen Gasen sowie ein extrem niedriger Energiebedarf erwähnenswert. Da Wasserstoff in letzter Zeit immer mehr die Rolle als künftig wichtiger Energieträger zugeordnet wird, ist eine Anwendung eines solchen Sensors in Zukunft in vielen Bereichen denkbar, da der Austritt von Wasserstoff beispielsweise bei einem entsprechend betriebenen Fahrzeug ein extrem hohes Risiko einer Explosion des entstehenden Knallgasgemisches bergen würde.

## Mikroelektronik trifft Nanotech

Im Bereich der Computerindustrie werden weitere Erfolge zunehmend von nanotechnologischen Entwicklungen beeinflusst werden, und zwar nicht nur durch neuartige Computer, die, beispielsweise durch das

Ausnutzen von Quanteneffekten, völlig neue Techniken für einen weiteren Geschwindigkeitsvorteil einsetzen. Ein viel näher liegender Effekt ist der Einsatz verbesserter Lithographiemethoden, um Chips in kleineren Strukturen zu fertigen, bei denen durch nanotechnologische Entwicklungen optimierte Bauteile die nötige Präzision liefern. Die Nanotechnologie wird so in den immer kleiner werdenden Strukturen eine weitere Leistungssteigerung im bisherigen Umfang für die nächsten Jahre unterstützen. Aber auch umgekehrt verhelfen die immer besser werdenden Computersysteme der Nanotechnologie zu Entwicklungsschüben. So kann man davon ausgehen, dass in der nächsten Zeit weder Mikroelektronik noch Nanotechnologie einen entscheidenden Durchbruch erreichen werden, ohne dass der jeweils andere Bereich an dessen Entwicklung beteiligt war.

Während 1959 Richard P. Feynman sich Hochleistungscomputer noch in herkömmlichen Fertigungsmethoden bloß in kleinen Strukturen vorstellte, hat die heutige Mikroelektronik mit herkömmlichem Schrauben und Lötens nichts mehr gemein. Zwar wurden die von Feynman angedachten Größenordnungen bei weitem noch nicht erreicht, allerdings sind die Erfolge der Computerrevolution schon beachtlich. Mit Hilfe der Lithographie geschaffene integrierte Schaltkreise (IC: integrated circuits) mit Leiterbahnen in Größenordnungen von 130 Nanometern stellen den heutigen Stand der Technik dar. Lithographie ist ein eigentlich aus der Drucktechnik stammender Begriff, der die Reproduktion von Kunstwerken in großen Mengen beschreibt. Die Produktion von integrierten Schaltkreisen meint mit Lithographie die exakte Reproduktion von in Silizium geätzten Strukturen, die verbunden und entsprechend dotiert die Transistoren des Chips ergeben. Die von Fremdkörpern extrem rein gehaltene Oberfläche wird mit Stoffen wie Bor und Phosphor verätzt, wodurch entsprechende Bereiche entstehen, die verbunden einen Halbleitertransistor ergeben. Die Strukturen werden zunächst mit einem Lichtstrahl vorgeschrieben, danach wurde in der Vergangenheit Aluminium als Leiterbahn aufgetragen, mittlerweile ist es schon möglich, das besser leitende Kupfer zu verwenden, was einen niedrigeren Stromverbrauch und, damit gepaart, höhere Effizienz der ICs ermöglicht. Allerdings stößt diese Methode des Leiterbahnauftrags zunehmend an ihre Grenze. Die mit dieser Technik bisher erzielte Verdopplung der Transis-

torenzahl auf einem Prozessor in einem Zeitzyklus von rund achtzehn Monaten – als Faustregel aufgestellt von Intel-Seniorchef Gordon Moore und deshalb auch als Moore's Law bekannt – wird jedoch innerhalb des nächsten Jahrzehnts an ihre Grenzen geraten.

Ein hierfür wichtiger Effekt wurde von Wissenschaftlern der Harvard University entdeckt. Drähte, in diesem Fall metallüberzogene Nanotubes, mit einem Durchmesser in Größenordnungen kleiner als dreißig Nanometer verlieren ihre gute Leitfähigkeit. Auch für nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlte Drähte lässt bei kleiner werdenden Strukturen die Supraleitfähigkeit immer mehr nach. Die Forscher machen dafür quantenmechanische Effekte verantwortlich. In den untersuchten Dimensionen entstehen kurze Spannungstöße, wenn Elektronen ihren Quantenzustand ändern und so nicht mehr widerstandslos durch den Leiter gleiten. Bei immer weiter miniaturisierten Leitern wird also ab dreißig Nanometern der Widerstand zunehmen, was auch die Chipproduktion beeinflussen wird. Außerdem wird in diesen Dimensionen mit wenigen Elektronen gearbeitet, die dementsprechend auch den Regeln der Quantenmechanik unterliegen. Der Tunneleffekt wird hier die Elektronen durch die Wände verschwinden lassen, was den Prozessor kurzschließen würde.

Weiterentwicklungen der Lithographie, weg von herkömmlicher Photolithographie, die abhängig von der Wellenlänge des Lichts ist, werden durch Verbesserung der eingesetzten Bauelemente ermöglicht. So können Elektronenstrahl- und Röntgenstrahlolithographie, X-Ray-Lithographie, schon heute die Erzeugung wenige Nanometer großer Strukturen erbringen; weitere Fortschritte sind mit Sicherheit innerhalb der nächsten Jahre zu erwarten. Bei angenommener Gültigkeit von Moore's Law für die nächsten Jahre werden aber um das Jahr 2012 die Leiterbahnstrukturen der Chips den erwähnten quantenmechanischen Effekten unterworfen sein und die heutige Chipproduktion an ihre Grenzen stoßen.

Jedoch sind auch andere Methoden zur Herstellung neuer Chips denkbar. Während der erste Transistor, der 1947 an den Bell Laboratories entwickelt wurde, noch mehrere Zentimeter groß war, hat die Mikroelektronik dieses Bauteil durch völlig neue Fertigungsmethoden auf ein Buchteil seiner Größe reduziert. Vierzig Jahre später wurde ebenfalls an den Bell Laboratories der erste Transistor vorgestellt, der

Schaltvorgänge mit einem einzelnen Elektron durchführen kann. Der von Theodore A. Fulton und Gerlad J. Dolan entwickelte Single Electron Tunneling Transistor (SET) nutzt die beim Schalten mit einem einzelnen Elektron auftretenden Quanteneffekte aus und unterscheidet sich deshalb auch weiter gehend in seinen möglichen Funktionen von seinen großen Vorbildern.

Die Elektronik von morgen wird von Weiterentwicklungen der Entdeckungen der letzten Jahre profitieren können. Weltweit erzielen Forscher immer mehr Durchbrüche im Bereich der molekularen Elektronik. Mit Sicherheit werden aber auch Ansätze zum Scheitern verurteilt sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass es in nächster Zeit einen entscheidenden Durchbruch geben wird, ist relativ gering, allerdings haben Forscher jüngst einen ersten Nanocomputer fünf Jahre früher als erwartet in Aussicht gestellt. Die Vielzahl der Forschungsansätze wird unter teilweise enormem Kostenaufwand allerdings nur durch ihre Breite zu einem Nanocomputer führen, der vielleicht auch nicht den heutigen Konzepten entsprechen wird. Allerdings müssen bis dahin noch viele Hürden genommen werden, von denen manche vielleicht auch mit bisherigen Ansätzen nicht zu bewältigen sind. Deshalb werden die heute begonnenen Konzepte vielleicht erst in ferner Zukunft die Erwartungen erfüllen können.

Momentan versuchen Forscher, mit verschiedenen Methoden Transistoren aus einzelnen oder wenigen Molekülen zu verwirklichen. Im Jahr 1999 wurde ein einzelnes Molekül als Schalter an der Rice University und in Yale von James M. Tour und Mark A. Reed vorgestellt. Beispielsweise durch selbstwachsende Strukturen auf Siliziumoberflächen wird versucht, molekulare Schaltkreise zu erzeugen, die sich durch schnellere Schaltvorgänge auf Grund der reduzierten Größe der Transistoren auszeichnen. Wiederum an den Bell Labs ist es einer Forschergruppe im Jahr 2001 gelungen, aus einzelnen halbleitenden Kohlenwasserstoff- und Goldmolekülen als Elektroden einen der organischen Chemie zugehörigen Transistor zu fertigen. Auf einem Siliziumwafer befindet sich eine hauchdünne Goldschicht. Diese wird in eine Lösung mit den Kohlenwasserstoffen getaucht, die sich durch Selbstorganisation senkrecht auf der Elektrode anordnen und so einen einlagigen Transistor kanal bilden, der für die Schaltvorgänge verantwortlich ist. Eine weitere abgeschiedene Goldschicht dient als zweite Elektrode. Dieser Transistor

lässt sich bereits in einfache Schaltkreise integrieren und kann hier die Schaltfunktion eines herkömmlichen Transistors ausführen. Allerdings kommt dieser Ansatz nach wie vor nicht ohne Silizium aus. Als Ansatz für eine Umsetzung der theoretischen Konzepte kann dieses Ergebnis bereits dienen. Allerdings sehen selbst die Forscher erste Anwendungen, die aus ihren Ergebnissen entstehen können, erst in vielen Jahren.

Holländische Forscher haben in einem weiteren Ansatz Nanotubes zusammen mit Aluminium als Steuerelektrode für erste, simple Kohlenstofftransistoren benutzt. Auf einzelnen isolierten Aluminiumbahnen wurde je ein Kohlenstoffröhrchen mit einem Durchmesser von rund einem Nanometer aufgebracht. An den Enden der Röhrchen wurden Golddrähte angebracht, durch die man einen Strom durch die Nanotubes fließen lassen kann. Da die Nanotubes halbleitende Eigenschaften besitzen, leiteten sie zunächst kaum Strom. Durch Anlegen einer Spannung an die Aluminiumbahnen konnten in den Nanotubes freie Elektronen entstehen, und ein Strom kann fließen. Die so gefertigten Transistoren können zwar schon zu simplen Schaltkreisen verknüpft werden, allerdings stellen auch diese Ergebnisse nur erste Schritte dar. Bis man überhaupt über Produktion in größerer Stückzahl nachdenken kann, muss noch eine Vielzahl von Problemen gelöst werden. Die Schaltgeschwindigkeit der Transistoren ist bei weitem noch zu langsam, genauso wie es noch nicht möglich ist, die Nanotubes gezielt und in großen Mengen abzulagern. In einem funktionsfähigen Nanotubetransistor wird mit bis zu einer Billion Schaltvorgängen pro Sekunde gerechnet.

Die durchaus positiven Aussichten, die ein Erfolg der verfolgten Grundlagen verwirklichen könnte, werden allerdings selbst nach optimistischen Schätzungen der Forscher erst gegen Ende des Jahrzehnts eintreten. Für wahrscheinlicher wird jedoch momentan die Mitte des nächsten Jahrzehnts gehalten. Bis dahin wird auch noch ein enormer Forschungsaufwand unter hohen Kosten nötig sein, der bei einem nicht zu unterschätzenden Risiko durchaus zu bahnbrechenden Neuerungen führen kann.

## Computer der Zukunft

Alle erwähnten Forschungsansätze sollen in Richtung der molekularen Elektronik stoßen. Besonders der SET-Transistor weist durch das Ausnutzen von Quanteneffekten zum Ausführen von logischen Operationen in eine weitere Richtung der Forschung. Weg von der Verbesserung der existierenden Chipfertigung durch die Nanotechnologie gibt es einen neuen Ansatz, der über die althergebrachte, binäre Denkweise hinausgeht. Als Ziel sehen die Forscher den Quantencomputer, der in der Öffentlichkeit teilweise als sagenumwobener Supercomputer gepriesen wird. Auch wenn die theoretischen Möglichkeiten, die Forscher sehen, enorm sind, werden sie erst in vielen Jahren vollkommen verwirklicht werden. Außerdem wird der Quantencomputer nicht bei allen Problemstellungen Anwendung finden, also die herkömmlichen Personalcomputer nicht aus den meisten heute üblichen Bereichen verdrängen.

Genauso wie die Quantenmechanik ist auch der Quantencomputer eigentlich kein nanotechnologisches Forschungsfeld. Allerdings ist an der praktischen Umsetzung von Quantencomputern fast immer auch die Nanotechnologie beteiligt. Viele Bauteile entstehen beispielsweise nur mit Hilfe nanotechnologischer Werkzeuge.

Die Funktionsweise ist in unserer makroskopischen Welt nicht bekannt und tritt erst in den entsprechenden Größenordnungen auf. Durch ein verschränktes Teilchenpaar lässt sich mit Hilfe von einem Bit, das klassisch nur den Zustand 0 oder 1 übertragen kann, zwei Bits an Informationen übertragen. Praktisch wird ein Bit an Informationen durch einen Quantenzustand eines Elementarteilchens dargestellt, beispielsweise durch seinen Spin oder Energiezustände. Herkömmliche Computer können mit größeren Zahlen als den klassischen binären Zuständen rechnen, indem sie mehrere Bits aneinander reihen. Die so in einem Register zusammengefassten Daten können sich nur in ihrem reinen Zustand befinden, Quantenregister dagegen sind in der Lage, sich in allen möglichen Zuständen zu befinden, wobei jeder Zustand die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzt, solange sie für jedes Quantenbit (Qubit) bei fünfzig Prozent liegt. Das Elektron befindet sich in der Superposition. Die einfachsten Operationen eines Computers, so genannte Gatter, rufen durch das Schalten mit einem oder zwei Bits bestimmte Änderungen der

Aussagen hervor. Wird ein Quantenbit durch eine solche Operation verändert, ändern sich alle seine Zustände dementsprechend. Hierdurch können mit den ebenfalls veränderten Übergangszuständen mehrere Teilaufgaben gleichzeitig bearbeitet werden. Während in einem klassischen Computer mehrere Gattertypen vorhanden sind, um die nötigen Berechnungen auszuführen, kommt der Quantencomputer mit zwei dieser Schaltungen aus. Sein »NICHT-Gatter« invertiert den Wert des Bits, das kontrollierte NICHT-Gatter invertiert den Wert bei einem entsprechenden Kontrollbit, das den Status 1 besitzt.

Um in ferner Zukunft das Potenzial eines Quantencomputers ausreizen zu können, benötigt man neue Rechenwege für den Computer, da heute schon klar ist, dass die bisherigen Algorithmen nicht das besondere Verhalten der Quantenbits berücksichtigen. Der erste auch anwendbare Typ eines solchen Algorithmus wurde 1994 von Peter Shor, einem Forscher der damaligen American Telephone and Telegraph (AT&T) Bell Labs, entdeckt. Damit ließ sich eine Zahl wesentlich schneller in ihre Primfaktoren zerlegen, als mit den bei herkömmlichen Rechnern üblichen Algorithmen. Mittlerweile ist es Forschern von IBM und der Stanford University erstmals gelungen, diese theoretischen Überlegungen auch praktisch umzusetzen. Den Forschern gelang es, die Zahl 15 in ihre Primfaktoren 3 und 5 zu zerlegen. Trotz der Einfachheit der Aufgabenstellung sehen die Forscher hier einen wichtigen Schritt für den Quantencomputer.

Der Suchalgorithmus von Grover ist ebenfalls ein spezieller Algorithmus, der eine Suche durch die Einbeziehung der Wahrscheinlichkeit extrem verkürzt. Eine Telefonbuch-CD von Deutschland hat ungefähr vierzig Millionen Einträge. Eine herkömmliche Suchroutine benötigt zum Durchsuchen, mathematisch betrachtet, in diesem Fall zwanzig Millionen Versuche zum Finden des richtigen Datensatzes. Der Grover-Algorithmus dagegen benötigt unter den gegebenen Bedingungen lediglich Wurzel  $n$  Versuche, für das Telefonbuch also nur ungefähr 6.300. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit der Quantenbits für richtige Lösungen erhöht, die für falsche dementsprechend gesenkt. Eine erste praktische Umsetzung dieses Algorithmus gelang im selben Jahr am MIT mit einem Zwei-Quantenbit-Rechner. Obwohl diese Theorien bereits bestehen, werden sie ihre praktische Anwendung erst zusammen mit einem funktionstüchtigen Quantencomputer finden. Und

über den Zeitpunkt für eine solche Maschine herrscht in der Wissenschaft keine klare Meinung.

Von nahezu allen Wissenschaftlern wird das Grundprinzip für durchaus realisierbar gehalten, aber erst durch die Verwendung mehrerer hundert Quantenbits ist eine wirkliche Geschwindigkeitssteigerung im Vergleich zu herkömmlichen Computern möglich, bisher wurden allerdings lediglich unter enormem Aufwand maximal sieben zusammenarbeitende Qubits realisiert. Außerdem sind noch durch quantenmechanische Effekte auftretende Hürden durch entsprechende Fehlerkorrekturen zu überwinden, beispielsweise kann die Superposition des Elektrons spontan und ungewollt zerfallen.

Im Zusammenhang mit der immer weiterwachsenden globalen Kommunikation und der immer wieder auftretenden Datenspionage könnte ein weiterer Quanteneffekt in fernerer Zukunft interessant werden. Wird der erzeugte Schlüssel eines Kryptoprogramms mittels Photonen übertragen, verändert jeder Unbefugte deren Zustand und damit die versandten Informationen. Das können Sender und Empfänger durch den teilweisen Abgleich des Schlüssels feststellen und dementsprechend einen neuen generieren. Diese neue Methode der Kryptographie wurde bereits über eine mehr als zwanzig Kilometer lange Glasfaserstrecke unter dem Genfer See erfolgreich getestet. Aber auch hier befindet sich die Forschung noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, zumal für eine breite Anwendung zunächst auch die entsprechende Infrastruktur geschaffen werden muss. Eine solche Technologie wird in ihren frühen Phasen der Anwendung wohl Institutionen mit hohem Sicherheitsbedarf vorbehalten bleiben und erst wesentlich später, wenn überhaupt, Einzug in den Massenmarkt halten. Zu einer solchen abhörsicheren Kommunikationsmethode ist Forschern des Max-Planck-Institutes für Quantenoptik jüngst eine erste praktische Umsetzung gelungen. Mit einem nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlten Calcium-Ion können die Forscher nicht nur Lichtwellen präzise messen, sondern auch Lichtblitze aus einzelnen Photonen bestehend aussenden, die ein wichtiger Schritt in Richtung abhörsichere Kommunikation wären.

Allerdings hätte ein funktionierender und leistungsfähiger Quantencomputer auch die Fähigkeit, bisherige Verschlüsselungssysteme nahezu nutzlos zu machen. Viele solcher Systeme basieren auf der Annahme,

dass es für herkömmliche Rechner kaum möglich ist, ohne Schlüssel Produkte in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Für den Quantencomputer stellt dies keine Hürde dar, der Umkehrvorgang des Verschlüsseln dauert bei ihm theoretisch genauso lange wie das bisher übliche Generieren der codierten Daten.

Für einen anderen Weg zu neuen Computerkonzepten wird wie in vielen anderen Fällen auch die Natur als Vorbild genommen. Ein in der Praxis anwendbarer DNA-Computer ist zwar momentan noch nahezu ein reines Gedankenspiel, das erst langsam durch Ergebnisse der Grundlagenforschung eine grobe Form annimmt. Vergleichbar hat allerdings auch die Mikroelektronik mit Röhrencomputern angefangen, denen zum damaligen Zeitpunkt wohl kaum jemand das Potenzial zur Weiterentwicklung zum heutigen Großrechner zugetraut hätte. Im Bereich des Biocomputers befindet man sich heute ungefähr in diesem Stadium. Beispiele zeigen, welches im Vergleich zu unseren heutigen Computern unvorstellbare Potenzial theoretisch in dieser Technologie steckt. In einem Liter DNA-Lösung mit wenigen Gramm der DNA-Stränge lassen sich theoretisch mehrere hundert Terabyte an Daten speichern, was mit der heutigen Mikroelektronik kaum realisierbar ist. Aber auch für Rechenoperationen besitzen die DNA-Moleküle theoretisch das Potenzial. Eine DNA-Lösung könnte nach Meinung der Wissenschaftler durchaus das 106fache an Rechenleistung erbringen, was heutige Großrechner gerade so erreichen, da die vielen DNA-Stränge in einer entsprechenden Lösung gleichzeitig arbeiten, also eine massiv-parallele Rechenleistung im Vergleich zu herkömmlichen Computersystemen bieten.

Und auch der Datendurchsatz bei natürlichen Kopiervorgängen ist enorm und weckt deshalb das Interesse der Forschung. Nach der Zellteilung wird das Erbmaterial mit bis zu 1,6 Millionen Basenpaaren pro Sekunde wieder reproduziert, wobei dieser Vorgang mit einer extrem niedrigen Fehlerrate abläuft und in Millionen Zellen gleichzeitig geschehen kann. Ein weiterer Vorteil des DNA-Computers ist seine extreme Haltbarkeit. Während heutige Speichermedien oft schon nach wenigen Jahrzehnten nicht mehr lesbar sind, ist es Forschern gelungen, das Erbmaterial eines mehrere Millionen alten Insekts zu analysieren.

Könnte man die Möglichkeiten eines solchen Systems ausnutzen, massiv parallel zu arbeiten, wären bekannte Probleme der Informatik

wesentlich einfacher zu lösen. Als Laborversuch gelang es einem DNA-System bereits, zwischen mehreren Knotenpunkten den kürzesten Weg in einer adäquaten Zeit zu berechnen, was klassisch das Problem des Handlungsreisenden darstellt. Wird ein Verkehrsnetz als Graph dargestellt, in dem die einzelnen Kreuzungen Knotenpunkte sind, und ein Reisender muss Kunden an mehreren Dutzend Orten besuchen, stehen ihm extrem viele Möglichkeiten als Wegroute zur Verfügung. In diesem Graph den kürzesten Hamiltonschen Pfad zu finden ist eigentlich für einen herkömmlichen Computer eine einfache Aufgabenstellung, die allerdings mit den bekannten Algorithmen nur in extrem langer Zeit zu berechnen ist. Bis heute ist kein Algorithmus bekannt, der eine solche Problemstellung in einer angemessenen Zeit lösen kann; dem DNA-Computer gelang dies 1994, wie schon beschrieben, im Laborversuch, in dem jede Stadt und jeder Straßenabschnitt als eindeutiges DNA-Fragment simuliert wurden. Aus den sich selbsttätig zusammensetzenden Routen wurden diejenigen, die nicht jede »Stadt« genau einmal enthielten, aussortiert, übrig blieben die entsprechenden Lösungen.

## Nanotech in der Medizin

Medizinische Anwendungen der Nanotechnologie zeigen bereits heute erste Ansätze. Da Forscher immer mehr in die Lage versetzt werden, den Aufbau der natürlichen Organismen zu verstehen und vor allem auch technisch nachvollziehen zu können, sollen aus der heutigen Forschung bereits in naher Zukunft mehrere Konzepte als marktfähige Produkte eingeführt werden können. Besonders ragt hier die Biomineralisation heraus, die die Herstellung körperverträglicher Materialien ermöglicht. Durch das Nachvollziehen natürlicher Bildungsprozesse, der so genannten Bionik, werden heute bereits im Labor Knochen oder Zahnprothesen hergestellt, die wesentliche Verbesserungen bei der Heilung von Knochen- oder Zahndefekten ermöglichen sollen. Denkbar sind aus Sicht der Forscher auch biologische Pflaster beispielsweise bei Verbrennungen, da biokompatibles Material optimale Gewebeeigenschaften und mechanisches Verhalten vorweisen könnte. Neben der besseren Verträglichkeit könnten so auch ein besserer Kontakt und damit höhere Belastbarkeit erreicht werden. Auch die Reparatur von

neuronalen Defekten könnte möglich werden, wodurch unterbrochene Nervenstränge repariert und somit beispielsweise Lähmungen geheilt werden könnten. Zunächst geht es hier jedoch um einfacherere Regeneration von Hautgewebe oder Knochen. Für realistisch wird hier als Fernziel auch die Regeneration ganzer Organe gehalten, indem durch künstliche Grundgerüste das Zellwachstum entsprechend gesteuert wird. So könnte in absehbarer Zukunft beispielsweise ein komplett künstlich geschaffenes Herz entstehen.

Auch auf dem Gebiet der Krebsbekämpfung können Nanopartikel schon in nächster Zeit weiter verbesserte Therapien ermöglichen. Metallpartikel, im konkreten Fall Eisenoxid, wurden von Forschern der medizinischen Fakultät Charité der Berliner Humboldt-Universität mit Zuckermolekülen ummantelt. Diese Nanopartikel werden von Krebszellen wegen des Zuckermantels bevorzugt aufgenommen und in ihnen dadurch konzentriert. Ein von außen wirkendes elektromagnetisches Feld erhitzt die Eisenpartikel in den Zellen und dadurch den Tumor, was zu dessen Zerstörung führt.

Medikamente und Kosmetika können von der Nanotechnologie in näherer Zukunft profitieren, da wesentlich kleinere Partikel schneller, effektiver und auch gezielter wirken können und außerdem die Funktionsweise der Präparate wesentlich besser auf den gewünschten Effekt im Voraus abgestimmt werden kann. Hierbei wird besonders das auch schon als Massenapplication erwähnte Drug-Delivery-Prinzip eine große Rolle spielen.

Das bekannteste Beispiel für eine nanotechnologisch revolutionierte Medizin der Zukunft entstammt einem Science-Fiction-Film der sechziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts. Eric Drexler hat dieses Beispiel wieder aufgegriffen und von »U-Booten« gesprochen, die als Nanobots in den menschlichen Körper injiziert werden könnten und Ärzten so nicht nur den Einblick in Blutkreislauf und Nervensystem erlauben, sondern auch im Heilungsprozess eingesetzt werden könnten. Gedacht wird hier beispielsweise an Nanobots, die bei inneren Blutungen gezielt an den entsprechenden Stellen sich selbst in die Adern einsetzen und sie so verschließen. Oder aber Nanobots, die Arterien von innen entschlacken und so einen Herzinfarkt oder Schlaganfall vorbeugend verhindern könnten. Außerdem könnten Nanobots als schnell lernfähige Antikörper durch einen externen Computer-

backbone auch sich schnell verändernde Viren erkennen und vernichten. Solche Beispiele sind momentan noch mehr als Zukunftsmusik und werden deshalb auch von vielen Forschern als reine Science-Fiction abgetan. Allerdings hat gerade dieses Beispiel die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit für die nanotechnologischen Anwendungen in der Medizin geweckt. Weniger wichtig ist, ob es realisiert wird, da dies – wenn überhaupt – erst in mehreren Jahrzehnten geschehen wird. Aber es zeigt, dass die Nanotechnologie im Bereich der Medizin durchaus in der Lage sein wird, neue Therapien hervorzubringen, die so bisher kaum oder gar nicht zu bekämpfende Krankheiten besser behandeln könnten. Der reale Nutzen, den nanotechnologische Entwicklungen bringen können, wird deshalb auch nicht abgestritten.

Anleihen an die Natur hat sich eine Methode zum Nachweis von Mikroorganismen genommen. Magnetotaktische Bakterien haben in ihrem Inneren nanodimensionierte Magnete, mit denen sie sich im Wasser orientieren können. Mit solchen optimal dimensionierten Magnetkristallen, die sich künstlich herstellen lassen, versuchen Forscher in den USA und Deutschland, durch magnetisch markierte Antikörper Krankheitskörper nachzuweisen. In einem starken Magnetfeld richten sich an ihr spezifisches Ziel angedockte Antikörper aus und lassen sich so nachweisen. Nicht gebundene Antikörper zeigen keine nachweisbaren Reaktionen und müssen deshalb im Gegensatz zu bisherigen Verfahren nicht zeitaufwendig aussortiert werden. Auch die Empfindlichkeit der neuen Methode ist bereits höher als bei der heute üblichen Fluoreszenzmarkierung und wird sich in absehbarer Zeit weiter deutlich steigern lassen. Allerdings wird in speziellen Bereichen der Forschung der magnetische Nachweis die Fluoreszenzmarkierung nicht verdrängen, da auch diese Technologie Vorteile bietet.

Der Nachweis von DNA-Sequenzen geschieht heute relativ umständlich mit Hilfe von so genannten Genchips und Markierungen. Ein deutlich einfacherer Nachweis könnte durch reine mechanische Effekte in nanoskaligen Dimensionen geschehen. Kleinste Federarme mit DNA beschichtet können gezielt bestimmte DNA-Sequenzen binden, wodurch sich die Federn verbiegen. Dieser Effekt lässt sich optisch nachweisen und ist bereits praktisch im Labor umgesetzt worden. Viele solcher Federarme könnten als Nachweissystem in biologischem Material gezielt DNA-Sequenzen einfach und schnell aufspüren.

## Grenzen der Definition

Die Grenzen der Definition über Nanotechnologie sind noch fließend, da sich diese Technologiestufe noch am Anfang befindet. Auch Konzepte, die zunächst noch auf größeren Ebenen arbeiten und dann durch weitere Miniaturisierung auf die molekulare Ebene vorstoßen, können durchaus zur Nanotechnologie gezählt werden, allein schon deshalb, weil es heute vielfach noch technisch zu komplex ist, voll funktions-tüchtige Maschinen im Idealfall aus wenigen Atomen zu bauen oder Konzepte direkt umzusetzen. Dagegen sind manche Konzepte, die durchaus molekulare Einflüsse haben, prinzipiell nicht zur Nanotechnologie zu zählen, da hier keine gezielte Kontrolle der Materie vorliegt, sondern die Wirkungsweise eher aus der Natur der Sache entsteht. Sämtliche natürlichen Prozesse finden auf molekularer oder sogar submolekularer Ebene statt; jedes künstliche Präparat beeinflusst selbstverständlich diese Prozesse, ohne sie jedoch gezielt zu kontrollieren. Im Gegensatz zu heute handelsüblichen Präparaten würde ein Nanotech-Medikament keine unerwünschten Nebenwirkungen auf unbeteiligte Organe oder andere Vorgänge des Organismus haben, da es gezielt die Ursache angreift und nicht in einem »biologischen Overkill« zum Erreichen seines Zieles über das Notwendige hinausschießen muss. Außerdem sind die kleineren Partikel in der Lage, wesentlich schneller ihre Wirkung zu entfalten, was den Einsatz der Wirkung deutlich reduzieren kann. In ersten Schritten kann das aber auch durchaus heißen, dass bisherige Wirkstoffe durch Nanopartikel auf kleinere Ebenen gebracht und gezielt an den Wirkungsort transportiert werden, wodurch auch ein besserer Heilungsprozess ermöglicht wird, so genannte Drug-Delivery-Systeme. Außerdem macht es die Nanotechnologie möglich, von den klassischen Behandlungsmethoden abzukommen. Würde man zum Beispiel einem Unfallopfer bei schweren inneren Blutungen spezialisierte Nanobots in die Blutbahn injizieren, könnten diese das körpereigene System beim Verschließen der Wunden unterstützen, sich selbst als Verschluss in die Blutbahn einbauen und so relativ einfach und schnell als molekularer Baustein das Überleben sichern.

Die bisher erwähnten Ideen sind teilweise schon seit den achtziger Jahren in wissenschaftlichen Publikationen abgehandelt worden, auch sind bereits zahllose Patente auf diesem Gebiet angemeldet; allerdings

sind viele Ergebnisse der Forschung nur als Laborexperimente ge-  
glückt. Deshalb spielt die immer stärker ausgeprägte Zusammenarbeit  
zwischen Unternehmen und Forschern eine wichtige Rolle, dass neben  
weiterer Forschung auch an der industriellen Nutzbarmachung dieser  
Konzepte gearbeitet wird. Damit wären viele heutige Nischenprodukte  
auf Grund ihrer höheren Verfügbarkeit wesentlich besser einsetzbar  
und würden mit Sicherheit auch hohe Verkaufszahlen erreichen. Neben  
den eigentlichen Entwicklungen ist dieser Schritt also genauso wichtig,  
damit viele Menschen und Wirtschaftszweige raschen Zugang zu diesen  
Möglichkeiten erhalten und auch das Potenzial dieser Zukunftstechno-  
logie durch ein Interesse in der breiten Öffentlichkeit entsprechend  
gewürdigt wird. Denn so könnte der Fortschritt eine weitere Be-  
schleunigung erfahren.

## 4 Der Assembler – Materie kontrollieren?

---

»Wenn wir weit genug zu den Grundlagen  
des Lebens vorgedrungen sind, braucht keiner  
Ihrer Wünsche unerfüllt bleiben.«

*Albert Szent-Györgyi*

Die molekulare Nanotechnologie ist das wohl eindrucksvollste Gebiet der Nanotechnologie. Alle heute bestehenden nanotechnologischen Produkte und Forschungsansätze gehen im Grunde auch auf die Art der molekularen Nanotechnologie, die Richard Phillips Feynman 1959 diskutierte, zurück. Auf dem Weg zur molekularen Nanotechnologie in Perfektion, die nach wie vor hauptsächlich in der Theorie besteht, wurden bisher viele Ziele erreicht, ohne eine direkte Kontrolle auf atomarer Ebene auszuüben.

Das interessanteste Ziel der nanotechnologischen Forschung ist gleichzeitig auch das entfernteste. Der von Eric Drexler als Gedankenexperiment geschaffene Assembler wird zwar als reales Produkt nach optimistischen Schätzungen frühestens in zehn Jahren existieren. Allerdings würde die Schaffung eines Assemblers, der gleichzeitig ein Nanobot wäre, den wohl unglaublichsten Durchbruch in der technologischen Entwicklung der letzten Jahrzehnte darstellen. Die Fähigkeit der gezielten Kontrolle einzelner Atome ermöglicht eine völlig neue technologische Stufe, während die meisten gravierenden technologischen Neuerungen der Vergangenheit, und teilweise auch der Nanotechnologie, nur Weiterentwicklung bestehender Konzepte waren.

Obwohl bisher große Fortschritte der beteiligten Firmen und Institute bei der Entwicklung des Assemblers gemacht wurden, bleibt das Bootstrap-Problem die größte Hürde zum Assembler. Die Situation hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Frage, was zuerst existierte, die Henne oder das Ei. Der Assembler entsteht eigentlich durch einen Assembler. Mit den heute favorisierten Bottom-up-Strategien wird beides auf einmal geschaffen, die Henne und das Ei.

## Visionen

Einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Realisierung eines Assemblers machte Eric Drexler mit der schon erwähnten Publikation »Nanosystems«. An der Vorstellung, einzelne Atome mit molekularen Robotern zu verarbeiten, arbeiten mittlerweile mehrere Forschergruppen und Firmen, die dabei teilweise auch unterschiedliche Ansätze auf dem Weg hin zum ersten Assembler verfolgen.

Nachdem Eric Drexler mit »Nanosystems« viele theoretische Grundlagen zur prinzipiellen Machbarkeit seiner nanotechnologischen Visionen geliefert hat, ist heute die Natur das große Vorbild, um neue Ansätze entstehen zu lassen. Gibt es ein Konzept aus der Natur, das man technologisch analog adaptieren kann, kann dies unter Umständen erfolgversprechender sein, als reine Gedankenexperimente umzusetzen.

Einen guten Vergleich zu dem Assemblerkonzept stellen die Ribosomen dar, die in natürlichen Zellen durch Aneinanderkettung von Aminosäuren nahezu jedes Protein als lineare Sequenz erzeugen können und das durch Ausnutzung chemischer und physikalischer Effekte. Dieses Vorbild, das klar der feuchten Nanotechnologie zugeordnet werden kann, stellt gleichzeitig auch den ersten Ansatz zum Erschaffen des ersten Assemblers dar, denn ein Ribosom, das nur ein Volumen von einigen tausend Kubiknanometern hat, ist nichts anderes als ein hoch spezialisierter Bioassembler, durch den man eventuell einen Universalassembler synthetisieren könnte. Ein solcher Ansatz existiert bereits, jedoch nur im Computer. Ralph Merkle, Forschungsleiter der auf dem Gebiet des Assemblers führenden Firma Zyvex, betont auch, dass man sich im Moment noch mit den theoretischen Grundlagen beschäftigt, die aber zu niedrigen Kosten realisierbar sein werden. Und allmählich wird die reine Theorie durchaus Realität. Japanischen Forschern gelang es erstmals, selbstreproduzierende Moleküle zu erzeugen, die in einem optimierten Stadium auch ihren Einsatz bei der Verbesserung von Medikamenten finden könnten.

Auch auf chemischem Wege gibt es schon länger Ansätze, durch gezielte Synthese chemische Bausteine zu erzeugen, die sich als gelöste Teilchen selbständig zu der gewünschten Form als Assembler zusammensetzen.

Der wohl einleuchtendste Ansatz kommt aus der Physik, die auf die

kontinuierliche Verbesserung von Rastertunnel- oder Rasterkraftmikroskopen setzt, die heute schon in der Lage sind, bestimmte Atome unter Einschränkungen zu bewegen, aber noch längst nicht die benötigte Präzision im dreidimensionalen Raum erbringen können. Damit könnte ein Bauplan direkt aus der makroskopischen Welt auf die molekulare Ebene übertragen werden.

Allerdings gibt es neben dem von Eric Drexler favorisierten Konzept der Bottom-up-Technologie auch Versuche, mittels kontinuierlicher Verkleinerung den Assembler als Ziel zu verwirklichen. In ersten Schritten wird das Konzept als normale makroskopische Maschine umgesetzt, die in verschiedenen Verkleinerungen realisiert wird. Jede Maschine besitzt die Möglichkeit, sich selbst zu replizieren, um das Achtfache vergrößert oder verkleinert. Die Roboter könnten mit Hilfe von Funksignalen untereinander kommunizieren und hätten entweder einen eigenen Steuerungscomputer an Bord oder werden durch externe Computer koordiniert. Extrem leistungsfähige Nanocomputer würden als massiv parallel arbeitendes Multitaskingsystem die notwendige Leistung erbringen. Auch wenn die kontinuierliche Verkleinerung dieser Roboter, bis sie den Zustand eines Nanobots erreichen, eigentlich geradewegs entgegen den Kriterien für die Nanotechnologie steht, gehört sie auf jeden Fall mit zu nanotechnologischen Forschungsprozessen. Zum einen ist dieses Konzept der Ursprung aller Visionen über die Molekulartechnik, und außerdem arbeitet es nicht zur stetigen Verbesserung der Systemleistung in kleineren Bahnen, sondern ist von Anfang an darauf angelegt, in kleinsten Dimensionen zu wirken.

Bis aber nur der Ansatz der schon lange existierenden Idee des Assemblers jedoch auch nur teilweise in frühestens zehn Jahren Wirklichkeit wird, müssen die forschenden Firmen und Institute weiterhin hohe Summen in die Fortführung der Grundlagenforschung fließen lassen. Die bisher erzielten Ergebnisse sind allerdings schon beachtlich, stellen aber immer noch nur den Anfang dieser Revolution dar. Allerdings sollte die Aussicht, erst in vielen Jahren endgültige Erfolge zu erzielen, weniger abschrecken, sondern eher motivieren. Denn je schneller diese Technologie breites öffentliches Interesse erzielt, desto früher werden Ergebnisse vorzeigbar.

## Forschung

Die Vision, dass der Assembler als Technik wirklich Anwendung finden wird, kann möglicherweise erst in ferner Zukunft Realität werden. Vielleicht wird die Idee, wie sie heute existiert, aber auch nie so umgesetzt werden können. Zu den größten Problemen gehört heute noch die gezielte Bewegung beliebiger einzelner Atome; Atomgruppen oder Molekülverbände können durchaus schon bewegt werden, für einzelne Atome fehlt bei weitem noch die ausgereifte Technik. Genauso wie die nötige Rechnerunterstützung, da Milliarden von Rechenoperationen parallel ausgeführt werden müssen, sowohl zum Kreieren als auch zum Steuern der Nanobots. Außerdem fehlt noch die entsprechende Software, die in der Lage ist, Modelle der Assembler maschinell in die Realität umzusetzen oder auch virtuelle Testläufe durchzuspielen.

Das Ergebnis der Langzeitforschung und der Überwindung der technischen Hürden könnte beispielsweise ein Nanomanipulator sein, der mit Hilfe eines Greifarmes einzelne Atome bewegen kann, ähnlich wie ein Fließbandroboter. Durch eine CAD-ähnliche Steuerung der Assembler wird eine direkte Kontrolle über die einzelnen Atome ausgeübt, womit sie sich genau im dreidimensionalen Raum positionieren lassen. Durch diese Steuerung der einzelnen Atome ließen sich so chemische Synthesen gezielt beeinflussen. Man könnte bestimmte Bindungen auflösen und neu im Rahmen der Naturgesetze zusammensetzen, eine mögliche Anwendung wäre eine Art intelligenter Katalysator. Da Nanomanipulatoren verschwindend klein sind, könnten Milliarden von ihnen im Verbund arbeiten. Durch gezieltes Zusammenarbeiten wären auch größere und komplexe Strukturen möglich, die aus atomaren Bausteinen entstanden sind. Beispielsweise könnten so reinste Materialien produziert werden. Denn neben dem Greifarm wäre auch eine Art Schaufelrad möglich, das aus den Ausgangsstoffen nur die gewünschten Atome heraussortiert, so dass nur diese im nächsten Prozess weiterbearbeitet werden.

Solche Nanobots sind allerdings nicht selbständig dazu in der Lage, ihren Strom zu erzeugen. Außerdem müssen die CAD-Daten zunächst extern berechnet werden, auch um die einzelnen Assembler zu koordinieren, damit das gewünschte Endprodukt entstehen kann. Deshalb benötigen die einzelnen Roboter alle eine »Verkabelung« zu den

Steuerungssystemen. Und diese Notwendigkeit macht weitere Ansätze erforderlich. Dazu gehört auch die Anordnung der Assembler auf einer Grundsubstanz, die zum einen Daten und Energie bereitstellt, die benötigten Materialien herbeiführt, aber auch die Assembler an ihre Arbeitsposition bringt, was wesentlich größere Strukturen ermöglicht, da man auch unkomplizierter große Höhen erreichen kann.

Neben dem einleuchtenden und auch bekannteren Modell des Greifarms gibt es noch weitere interessante Methoden, einen Nanoassembler zu bauen. Ein anderes Konzept verzichtet im Gegensatz zu dem Roboterarm auf den direkten Kontakt zu der zu beeinflussenden Materie. Der optische Assembler ist in der Lage, einzelne Atome, aber auch Moleküle oder kleinere Molekülverbände in einem elektromagnetischen Feld zu drehen und zu bewegen. Durch eine mit vielen kleinen und einzeln ansteuerbaren Emittlern besetzte Fläche kann man gezielt elektromagnetische Felder mit Lasern erzeugen und diese auch steuern. Der perfekte optische Assembler wird diese Felder mit Quantenlasern erzeugen. Diese Technik lässt Laserlicht aus einzelnen »künstlichen Atomen« entstehen, in denen eingefangene Elektronen durch Modifizierung des elektrischen Feldes ihre Bahn verändern. Durch die so von ihnen ausgehenden elektromagnetischen Wellen kann im Verbund auf molekularer Ebene ein präzise arbeitendes System erreicht werden, das einzelne Atome bewegen und positionieren kann. Allerdings stellen sich hier quantenmechanische Probleme, was eine sinnvolle Anordnung erschwert. Jeder Emitter würde hier durch seine Steuersignale seine Nachbarn ebenfalls beeinflussen, wodurch die gezielte Steuerung der Fläche zunächst unmöglich erscheint. Allerdings lässt sich durch gezielte mathematische Optimierung diese Fläche dennoch ausnutzen. Da jedoch diese Berechnungen zum Erreichen der Echtzeitkontrolle hochkomplex sind, würde man heute tausende vernetzte Großrechner benötigen, ein absolut noch nicht zu realisierendes Hindernis. Aber in Zukunft entstehende Nanocomputer werden in der Lage sein, diese Rechenleistung auf kleinstem Raum zur Verfügung zu stellen, womit auch diese Echtzeitberechnungen möglich werden.

Da eine Emitterplatte gleichzeitig aber auch als Empfänger dient, kann man mit zwei gegenüberliegenden Plattensystemen ein Feld erzeugen, in dem durch die erzeugten Schwingungen nur bestimmte Bereiche, so genannte Knoten, in denen sich die Atome aufhalten, beeinflusst werden.

Da man diese Knoten verschieben kann, lassen sich Atome um eine Achse drehen. Sitzen sich jetzt jeweils drei Platten gegenüber, kann man die Atome im dreidimensionalen Raum bewegen, und durch die Wechselwirkung der elektromagnetischen Felder von Assembler und Atom ist man jederzeit in der Lage, die genaue Lage des Atoms zu bestimmen.

Werden nun mehrere Atome entsprechend ausgerichtet und aneinander geführt, kann eine chemische Synthese gezielt gesteuert werden. Allerdings sind die heutigen Wellenlängen der Laser noch nicht ausreichend, was also eine genaue Steuerung noch verhindert. Mit speziellen UV-Lasern wird man in der Lage sein, einzelne Elektronen aus den Hüllen zu stoßen und damit die Reaktionsfreudigkeit der einzelnen Atome anzuregen, also eine wirklich gezielt gesteuerte chemische Reaktion. Heute kann man Atome schon steuern, allerdings ist ihr Abstand noch auf die Wellenlänge des Lichtes beschränkt, was für eine Reaktionssteuerung noch viel zu groß ist.

Forschergruppen in verschiedenen Ländern arbeiten an der Realisation eines Assemblers. Auch Durchbrüche bei anderen Forschungsprojekten werden die Nanobots weiter vorantreiben, genauso wie Entdeckungen bei der Erforschung des Assemblers andere Gebiete beeinflussen werden. Weiter optimierte Mikroskopietechnologien und Präzisionswerkzeuge sowie Fortschritte bei Nanooptiken können hier eine wichtige Rolle spielen. Sollte es einem einzelnen Konzern gelingen, den ersten Assembler zu patentieren, wäre dies mit Sicherheit eine enorme Einnahmequelle. Allerdings würde eine solche Monopolstellung bei einer derart grundlegenden technologischen Revolution ihre Schattenseiten mit sich bringen. Da jedoch die technologische Breite einer solchen Entwicklung enorm ist und viele Institutionen an einem marktfähigen Assembler forschen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass es einen einzelnen Durchbruch gibt, kaum zu befürchten.

## Zukunft

Universalassembler sollen vermutlich das erste Produkt aus den Visionen heraus werden, damit man zunächst überhaupt ein Werkzeug auf atomarer Ebene hätte. Später könnten damit auch andere Arten von spezialisierten Assemblern geschaffen werden, die wenige, aber

bestimmte Aufgaben besonders effektiv ausführen könnten. Wird dieser Traum der molekularen Nanotechnologie Wirklichkeit, könnten absolut unglaublich wirkende Dinge geschehen, die bisher nur dem Bereich Science-Fiction zugeschrieben wurden. Da jede Art von Materie, Menschen, Tiere, Pflanzen und unbelebte Gegenstände, im Kleinsten aus einzelnen Atomen zusammengebaut ist, eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten. Forscher träumen von perfekten Werkstoffen mit optimierten Eigenschaften wie extrem hoher Reißfestigkeit. Anwendungen, die bisher wegen mangelnder molekularer Präzision nicht möglich sind, können durch solche Werkstoffe verwirklicht werden. Beispielsweise können hier schon die Nanotubes angeführt werden, die durch ihre hochfesten Eigenschaften bekannte Konstruktionen ablösen könnten, und das bei einer längeren Lebensdauer und gleichzeitig höherer Belastbarkeit. Solche Produkte aus Nanotubes könnten optimal durch Assembler hergestellt werden, da alle bisher verwendeten Herstellungsverfahren nur von natürlichen Effekten auf atomarer Ebene Gebrauch machen und dabei keine optimale Ausnutzung von Energie und Rohmaterialien erreichen, wodurch ein Assembler die Kosten der Kohlenstoffröhrchen extrem senken könnte und damit der wirtschaftliche Nutzen enorm wäre.

Die Komplexität eines durch Assembler geschaffenen Produktes, das bereits bei einer Masse von wenigen Gramm aus Millionen von Milliarden Atomen besteht, verdeutlicht, wie wichtig es ist, dass diese Roboter in der Lage sein müssen, sich selbst zu replizieren. Zwar wird ein Nanobot eine Million oder mehr Atome pro Sekunde bewegen können, allerdings besteht schon ein Gramm reines Silizium aus mehr als zwanzig Trilliarden einzelner Atome, die nur dann verarbeitet werden können, wenn entsprechend viele Assembler vorhanden sind. Bei einer Bauzeit von mehreren Minuten pro Nanobot können in wenigen Stunden mehr als eine Trillion unsichtbarer Helfer entstehen.

Eric Drexler hat als Beispiel für eine solche »Maschine« aus unzähligen Assemblern, die er auch als Utility Fog bezeichnet, eine Kiste mit Milliarden von Assemblern genannt, die aus Wasser, Gras und Energie Steaks produzieren werden, ohne dass Kühe zeitaufwendig und arbeitsintensiv unter teilweise unwürdigen Bedingungen gemästet und geschlachtet werden müssen. Wird eine Kuh im Dienst der Fleischindustrie gemästet, machen die einzelnen Zellen ihres Körpers als natürliche

Assembler im Prinzip nichts anderes, als die mit Wasser und Gras aufgenommenen Atome unter Energieaufwendung umzuwandeln. So ließe sich außerdem auch sicherstellen, dass nur gewünschte Moleküle in das Nahrungsmittel gelangen und Krankheitserregern der Weg verwehrt bleibt.

Ein weiteres Problem auf dem Weg hin zum ersten kommerziellen Assembler stellen die benötigten Rechenkapazitäten und anfallenden Daten dar. Produkte unserer makroskopischen Welt bestehen aus unvorstellbar vielen Atomen. Ein Kubikmeter Wasser besteht beispielsweise aus mehreren Quadrilliarden (eine Quadrilliarde ist eine eins mit 28 Nullen) Atomen. Um also durch Assembler makroskopische Produkte entstehen lassen zu können, müssen unzählige Positionen von einzelnen Atomen im dreidimensionalen Raum geplant und gespeichert werden. Über solche Kapazitäten werden erst Nanocomputer der Zukunft verfügen, die allerdings durch entsprechende Entwicklungen im Softwarebereich einen solchen Planungsprozess vollkommen computerisiert ablaufen lassen können. Um bestehende Produkte replizieren zu können, wird auch an den Einsatz so genannter Disassembler gedacht. Diese spezialisierten Nanobots würden einen Gegenstand Atom für Atom auseinander bauen und jede einzelne Position einem Computer zum Speichern übermitteln. Aus den so gewonnenen Informationen ließe sich der zerlegte Gegenstand als absolut identischer materieller Klon reproduzieren.

Unter den Forschern gibt es nach wie vor kritische Stimmen zum Assembler. Nachdem Eric Drexler zu Beginn wegen seines reinen visionären Denkens in der Fachwelt kritisiert wurde, konnte er zwar durch eine wissenschaftliche Arbeit die Argumente der Kritiker teilweise entkräften, kritische Stimmen blieben jedoch. Zu den prominentesten Kritikern der letzten Zeit gehört der Nobelpreisträger und Mitentdecker der Fullerene Richard E. Smalley. Zusätzlich zu der hohen Hürde, zunächst einen Assembler und daraus Milliarden von Assemblern zu schaffen und diese gezielt und kontrolliert einzusetzen, zeigt Smalley zwei Probleme auf atomarer Ebene, die seiner Meinung nach im Kontrast zu Nanotech-Visionären den Traum eines arbeitsfähigen Assemblers zunichte machen. Da Atome sich in ihren Dimensionen gegenseitig beeinflussen, müsste ein Assembler nicht nur einzelne Atome, sondern gleichzeitig auch die »Umgebung« kontrollie-

ren. Doch bei der Kontrolle über einzelne Atome würde einerseits das »Problem der dicken Finger« auftreten, der Roboterarm wäre zu groß, unbeweglich und bei weitem nicht in der Lage, einzelne Atome gezielt genug zu greifen. Andererseits würde das »Problem der klebrigen Finger« einen hypothetischen Nanobot daran hindern, das »klebende« Atom an der gewollten Stelle loszulassen, also den gezielten Bau von Strukturen unmöglich machen.

Gerade im Bereich des Assemblers stehen sich viele unterschiedliche Positionen gegenüber. Da sich hier jedoch der Großteil der Argumente auf Theorien stützt und sich die Assembler-Forschung noch in den absoluten Grundlagen befindet, ist ein endgültiges und vor allem befriedigendes Ergebnis noch länger nicht zu erwarten, zumal die Visionäre hoffen, die von ihren Kritikern angesprochenen Probleme überwinden oder umgehen zu können. Sollte die eine oder die andere Meinung Recht behalten, mit einem ersten existenten Assembler ist nach überwiegender Expertenmeinung innerhalb der nächsten Jahrzehnte kaum zu rechnen.

Für die nächste Zukunft spielen allerdings weder die extrem positiven Fantasien, noch die alles als abwegig darstellenden Stimmen eine Rolle. Gerade das Konzept des Assemblers stellt die Nanotechnologie in das Interesse der Öffentlichkeit. Und da es viele Bereiche geben wird und teilweise bereits gibt, in denen Nanotechnologie eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt, ist dieses Interesse berechtigt und wichtig. Gerade Konzepte wie das des Assemblers wecken auch das Interesse der staatlichen Förderung und vereinen diese und andere Fördermittel. Eine Technologie, die wie die Nanotechnologie noch am Anfang steht, ist auf solche Mittel essentiell angewiesen. Umsetzbare Konzepte können so schneller marktfähig werden und Bereiche unseres Lebens beeinflussen, vielleicht sogar revolutionieren. Auch die Forschung an den großen Visionen wie dem Assembler sollte deshalb nicht als nutzlose Utopie abgetan werden. Der Assembler selbst wird nicht der alles entscheidende Durchbruch sein. Aber die aktuelle Forschung an ihm lässt bereits heute die beteiligten Firmen und Institute Entdeckungen machen, die ihre Anwendung auch außerhalb der eigentlichen Forschung finden werden. Und solche Nebeneffekte, seien es neue Oberflächenbeschichtungen oder verbesserte Computerchips, werden ihren Nutzen nicht verfehlen und in den nächsten Jahren die Kosten der

Forschung rechtfertigen. Und nicht zuletzt sind es gerade die fantasie-reichen Forschungsprojekte, die kompetente Forscher für einen Bereich interessieren oder Menschen überhaupt erst für den naturwissen-schaftlichen Bereich begeistern, so dass sie ihn zu ihrem Beruf machen. Denn auch nur durch eine Bündelung von Kompetenzen werden nahe-zu alle Forschungsprojekte nützliche Patente hervorbringen, die viel-leicht nicht ihrem eigentlichen Ziel dienen, wohl aber Anwendung in anderen Bereichen finden können.

## 5 Nanotech – Gefahr oder Chance?

---

»Das schönste Erlebnis ist die  
Begegnung mit dem Geheimnisvollen.«

*Albert Einstein*

Die Chancen der Nanotechnologie in Perfektion erscheinen geradezu gigantisch. Bisher liefert allerdings nur die Theorie diese Möglichkeiten, die Umsetzung solcher Konzepte befindet sich noch in der absoluten Grundlagenforschung. Funktionstüchtige Assembler könnten als Ergebnis auch eine Rolle im Umweltschutz spielen. Durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe wird entstehendes Kohlenstoffdioxid weltweit in Milliarden Tonnen freigesetzt. Assembler könnten diesen Stoff zu Sauerstoff und Kohlenstoff abbauen, womit einerseits die Umwelt entlastet würde und andererseits ein wichtiger Rohstoff preisgünstig gesichert würde. Auch Materialkreisläufe könnten verbessert werden. Eine Mülltrennung Atom für Atom wäre als optimales Recyclingverfahren eine Möglichkeit, zukünftig aus Abfällen wieder hochwertige Rohstoffe zu gewinnen, wie es bei Materialgemischen heute teilweise nicht möglich wäre. Das wohl entfernteste Beispiel für die molekulare Nanotechnologie der Zukunft wäre ein Utility Fog, der an beliebigen Orten aus vorhandenen Stoffen nach versendeten Bauplänen hochkomplexe Produkte fertigen würde. Beispielsweise würde ein Fernseher so direkt an seinem Einsatzort entstehen, ohne lange Produktions- und Verkaufsketten. Verschiedene nanotechnologische Konzepte wurden in Science-Fiction wie Star Trek eingebunden. Ideen wie ein Holodeck oder der Replikator, der Mahlzeiten »aus dem Nichts« zubereitet, gehen von ihrem Prinzip her auf eine hoch entwickelte Assembler-Technologie zurück.

Solche Zukunftsmusik wird allerdings zunächst keine Rolle spielen, sie bleibt ein wesentlicher Faktor, um das Potenzial der Nanotechnologie zu verdeutlichen und ein breites Interesse der Öffentlichkeit für die Nanotechnologie zu gewinnen. Der wirkliche Nutzen der nächsten Jahre wird aus den unscheinbaren Verbesserungen hervorgehen, die nicht den teilweise an die Nanotechnologie gestellten spektakulären Erwartungen entsprechen werden.

Allerdings verweisen auch renommierte Forscher auf potenzielle Gefahren einer molekularen Nanotechnologie. Dabei geht es weniger um Probleme wie die in letzter Zeit aufgetauchte Frage, ob bestimmte Nanopartikel ein mögliches Krebspotenzial besitzen. Vielmehr wird diskutiert, welche Gefahren eine fortgeschrittene Nanotechnologie beinhalten könnte. Wenn in dreißig Jahren und mehr durch Nanoelektronik und neue Computerkonzepte eine Rechenleistung erreicht werden kann, die die eines menschlichen Gehirns übertrifft, ist der Gedanke an eine künstliche Intelligenz gar nicht mehr so abwegig. Sollte eine solche künstliche Intelligenz eine Software als Grundlage erhalten, die ihr zu viele Freiräume bietet, sich selbst weiterzuentwickeln, könnten die Folgen außer Kontrolle geraten. Ein Computer, der eigenständig Entscheidungen trifft, kann in seinen Handlungen auch von seinen Erbauern nicht vorhergesehen werden. Mögliche Konsequenzen wären für niemanden vorhersehbar, da das Gegenüber auch intelligent reagiert und sein Handeln entsprechend überlegt. Eine KI, die nicht von Anfang an der strikten Kontrolle unterliegt, könnte also durchaus eine potenzielle Gefahr darstellen.

Genauso könnten auch serienreife Assembler eine Gefahr darstellen. Milliarden dieser kleinen Roboter, die sich selbständig replizieren können, sind theoretisch nicht nur in der Lage, nützliche Arbeit zu verrichten. Ein außer Kontrolle geratener Utility Fog könnte über die Erdoberfläche wandern und alle Gegenstände auf seinem Weg in ihre Bestandteile zerlegen. Übrig bliebe eine graue Schmiere; der Utility Fog würde zum Gray Goo, ein ebenfalls von Eric Drexler eingeführter Begriff. Ein solcher Gray Goo hat eine gewisse Ähnlichkeit mit heutigen Computerviren in Datennetzen. Allerdings haben es solche Viren bisher nie geschafft, beispielsweise das Internet komplett zu zerstören, auch wenn der Schaden teilweise enorm war. Auch durch Kontrolle von außen bleibt immer noch ein Spielraum zum Verhindern einer solchen Katastrophe. Ein Assembler benötigt Informationen und Energie. Nach gängigen Konzepten wird eine solche Versorgung von außen vorgenommen, was bereits zeigt, dass eine große Kontrollmöglichkeit bleibt, die solche Gefahren minimiert.

Auch der Missbrauch verschiedener Zukunftstechnologien, nicht nur der Nanotechnologie, ist ein Aspekt möglicher Gefahren. Auch die Nanotechnologie könnte in Zukunft relativ kleinen Gruppen ohne

enormen finanziellen und logistischen Aufwand ein großes zerstörerisches Potenzial an die Hand geben. Im Gegensatz zu beispielsweise dem Bau einer Atombombe ist nicht mehr der höchstselte Rohstoff der entscheidende Faktor, sondern Wissen wird der unabdingbare Schlüssel. In diesem Zusammenhang wird deshalb auch von einer wissensbasierten Massenvernichtung gesprochen, die durchaus ein Gefahrenpotenzial birgt.

Zu einem der bekanntesten Kritiker wurde im Jahr 2000 Bill Joy, Chefentwickler und Mitbegründer von Sun Microsystems. Mit »Warum die Zukunft uns nicht braucht« verwies Joy unter Bezugnahme auf Ray Kurzweils Buch »Homo S@piens« auf die möglichen Gefahren aller Zukunftstechnologien. In seinem Artikel verweist Joy auf die Probleme, die mit neuen Technologieformen auftreten können. Murphys oder besser Finagles Gesetz beschreibt genau dieses Problem: »Was schief gehen kann, das geht auch irgendwann einmal schief.« Als Beispiele seien durch übertriebenen Antibiotikaeinsatz resistent gewordene, extrem gefährliche Bakterien genauso genannt wie Malariaerregern, die durch DDT ausgerottet werden sollten, aber ebenfalls resistent wurden, und auch die Malariaerregern selbst können nun DDT widerstehen.

Selbstverständlich sind die hier erwähnten Gefahren der Nanotechnologie genauso weit von der Realität entfernt wie ein Eintreten der großen Visionen. Das soll allerdings nicht bedeuten, dass die Nanotechnologie zunächst absolut risikolos ist. Wie bei allen neuen Technologien werden mit zunehmendem Fortschritt auch die Möglichkeiten zum Missbrauch und die Gefahren selbst zunehmen. Deshalb sollte eine kontrollierte und öffentliche Forschung im Interesse aller sein. Nicht nur, dass so ein besserer Wissensaustausch erfolgen kann und die Forschung Rückhalt und Unterstützung durch eine aufgeklärte Öffentlichkeit erfährt, auch eine Missbrauchskontrolle ist so möglich. Stehen die Forschungsprojekte in der öffentlichen Diskussion, können die verantwortungsvollen Forscher unterstützt und gefährliche Ansätze von Anfang an unterbunden werden.

Bei einer solchen öffentlichen Diskussion über die Technologien des 21. Jahrhunderts ist es jedoch wichtig, dass die Auseinandersetzung mit dem Thema »weder durch Technikangst, noch durch blindes Vertrauen in die Technik geprägt ist« (Bill Joy).

## 6 Die internationale Nanotech-Community

---

»Die besten Entdeckungsreisen macht man nicht in fremden Ländern, sondern indem man die Welt mit neuen Augen betrachtet.«

*Marcel Proust*

Auf dem Gebiet der Nanotechnologie wird global immer intensiver geforscht und entwickelt. Allein die von Regierungsorganisationen berichteten weltweiten Fördermittel sind von 432 Millionen US-Dollar im Jahr 1997 auf 1577 Millionen US-Dollar im Jahre 2001 um über 360 Prozent angestiegen. Mehr als dreißig Länder initiieren oder verfügen bereits über nationale Aktivitäten auf diesem Gebiet.

Die Vereinigten Staaten, Japan und Deutschland haben sich als Vorreiter der Nanotech-Bewegung herauskristallisiert. Obwohl auch Japan und Deutschland weltweit im Bereich Nanotech führen, kann man die Vereinigten Staaten in dieser Dreiergruppe als dominierend bezeichnen. In keinem anderen Land fördern Staat und Unternehmen die Nanotechnologie intensiver als in den USA. Etwa ein Drittel der weltweiten Forschung im Bereich Nanotechnologie findet in den Vereinigten Staaten statt. An einem Investment in den USA kommt man als interessierter Anleger somit kaum vorbei. Die Dominanz von amerikanischen Unternehmen, die wir bereits bei Software, Internet und Biotech beobachten konnten, könnte sich auch auf dem Gebiet der Nanotechnologie wiederholen. Als Investor kann man diese Beobachtungen nicht ignorieren. Die Vereinigten Staaten sind aktuell das international führende Nanotech-Land. Eine Investition in amerikanische Unternehmen, die meist an der innovativen Börse für Wachstumswerte, der »NASDAQ« gehandelt werden, wird glücklicherweise durch den Umstand erleichtert, dass die Mehrheit der Unternehmen durch ein Duallisting auch an den deutschen Börsen in Euro handelbar ist. Hervorzuheben sind hierbei die Börsen in Frankfurt, Berlin und Hamburg, an denen eine Vielzahl der amerikanischen Nanotechfirmen gehandelt werden kann. Da es vor allem bei den kleineren amerikanischen Unternehmen in Deutschland zum Teil nur sehr geringe Umsätze gibt, sollten die exotischeren Werte direkt in den USA geordert werden. In Deutschland sind

die gehandelten Stückzahlen gerade der kleineren Unternehmen oft zu gering, um einen fairen Preis zu bekommen.

Doch neben den Vereinigten Staaten und Japan sind auch in Europa und gerade in Deutschland Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Nanotechnologie sehr aktiv. Viele junge und mittelständische Unternehmen aus Deutschland verdienen schon mit Nanotechnologie Geld. Man findet in Deutschland Weltmarktführer in Nischenbereichen genauso wie Tochterunternehmen von amerikanischen Nanotech-Firmen. Viele dieser Unternehmen sind noch nicht an der Börse und beabsichtigen diesen Schritt in den nächsten Jahren; für viele Unternehmen ist der Börsengang jedoch auch in absehbarer Zeit kein Thema, sie möchten sich ihre Unabhängigkeit bewahren.

Doch nicht nur in den drei führenden Ländern spielen die nanotechnologische Forschung und Entwicklung eine wachsende Rolle. So existieren beispielsweise in allen Ländern der Europäischen Union Bemühungen und Initiativen im Bereich Nanotechnologie, die zwar in ihrem Umfang nicht an die Aktivitäten Deutschlands heranreichen, aber trotzdem das gesamte Spektrum der Möglichkeiten auf diesem Gebiet abdecken.

Auch in Asien hat nicht nur Japan die Chancen und Möglichkeiten der Nanotechnologie erkannt. Bereits 1995 wurde in Singapur ein nationales Programm gestartet, im selben Jahr benannte die koreanische Regierung die Nanotechnologie als Forschungsschwerpunkt auf Grund ihres großen Potenzials für die Halbleiterindustrie.

Taiwan steigert die nanotechnologische Forschung durch sein »Industrial Technology Research Institute« und »National Science Council« mit dem Ziel, weiterhin eine führende Rolle auf dem Gebiet der Informationstechnologie zu spielen. Auch in der Volksrepublik China wird die Nanotechnologie bereits seit Jahren gefördert. China verfügt neben einer ganzen Reihe von Aktivitäten auch über eine bedeutende Forschung bei fortschrittlichen Materialien und bei der Untersuchung und Herstellung von Nanotubes.

Neben den USA, Europa und Asien werden auch in Australien die nanotechnologische Forschung und Entwicklung vom »National Research Council« mit beträchtlichen Beträgen gefördert. In Australien existiert eine Vielzahl von Programmen in Universitäten und der Industrie.

Auch Russland erkannte bereits die Chancen und Möglichkeiten der Nanotechnologie und fördert sie mittlerweile intensiv. Zu diesem Zweck wurde die »Russische Gesellschaft für Rastersondenmikroskopie und Nanotechnologie« etabliert. Das Land verfügt über besondere Stärken auf dem Gebiet der nanostrukturierten Materialien und der nanokristallinen Strukturen.

Das Verhältnis der nanotechnologischen Forschung und Entwicklung zwischen den USA und dem Rest der Welt beläuft sich auf etwa dreißig zu siebzig Prozent. Dominierten die Vereinigten Staaten die weltweite Forschung und Entwicklung in allen Technologien insgesamt im Jahre 1997 noch mit vierzig Prozent, fällt der Anteil der USA an der weltweiten Forschung im Bereich Nanotechnologie bereits geringer aus. Die Chancen stehen gut, dass sich somit auch die Errungenschaften dieser neuen Technologie globaler verteilen.

## Nanotechnologie in den Vereinigten Staaten

Im Bereich der Nanotechnologie für Elektronik und Datenspeicher sind die USA weltweit führend, genauso wie bei den Schnittstellen von Nano- und Biotechnologie. Zusammen mit Japan nehmen die USA auch eine führende Rolle auf dem Gebiet der Nanotechnologie für Mikroskopie und Analytik ein.

Die nanotechnologische Forschung und Entwicklung spielen sich in den Vereinigten Staaten in den unterschiedlichsten Industriebereichen und Organisationen ab. Intensiv durch die amerikanische Regierung gefördert und von einer innovationsfreudigen Bevölkerung akzeptiert, entwickelt sich die Nanotechnologie in den Vereinigten Staaten unter besonders guten Voraussetzungen. Unter dem damaligen Präsidenten Bill Clinton wurde im Januar 2000 das erste schlüssige nationale Nanotechnologieprogramm der Vereinigten Staaten angekündigt. Die National Nanotechnology Initiative (kurz »NNI«) brachte die verschiedenen öffentlichen Förderungsinitiativen auf einen gemeinsamen Nenner, um Forschungsaktivitäten besser zu koordinieren und effektiver zu verwirklichen. Unter Mitwirkung der beteiligten Staatsorganisationen sowie privater und akademischer Institutionen soll sichergestellt werden, dass die Vereinigten Staaten auch in Zukunft die führende Rolle

auf dem Gebiet der Nanotechnologie spielen. Mit öffentlichen Investitionen von 422 Millionen US-Dollar im Jahr 2001, geplanten 579 Millionen US-Dollar im Jahr 2002 sowie 679 Millionen US-Dollar im Jahr 2003 wird die Nanotechnologie von der amerikanischen Regierung immer intensiver gefördert. Die nanotechnologischen Fördermittel der Regierung teilen sich auf die verschiedenen Regierungsorganisationen auf: Die größte Summe erhält die National Science Foundation, gefolgt vom Department of Defense, dem Department of Energy, den National Institutes of Health und der NASA. Im Jahre 2002 wurden erstmals auch die Environmental Protection Agency und das Department of Justice mit nanotechnologischen Fördermitteln bedacht. Insgesamt werden so acht staatliche Organisationen beteiligt, die diverse Projekte auf dem Gebiet der nanotechnologischen Forschung und Entwicklung fördern.

Die Nanotechnologie wird von der Regierung aus verschiedenen Gründen mit großem Interesse gefördert: Die USA wurden sich bewusst, dass Hochtechnologie im Allgemeinen einer der herausragenden Wachstumsmotoren für die amerikanische Wirtschaft ist. Die Nanotechnologie im Besonderen kann mit ihren Auswirkungen auf fast jede bestehende Technologie dabei natürlich nicht ignoriert werden. Daher unterstützen die Vereinigten Staaten die nanotechnologische Forschung und Entwicklung, um die eigene Position auf den Weltmärkten behaupten und wenn möglich verbessern zu können.

Ein weiterer Kernpunkt des amerikanischen Interesses an der Nanotechnologie liegt in den potenziellen militärischen Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Technologiestufe. Hier reichen die Anwendungsgebiete von neuen Werkstoffen für perfekte Panzerung bis hin zu den düsteren Visionen militärisch genutzter Assembler mit gigantischem Zerstörungspotenzial. Gerade auf dem Gebiet der Verteidigung können es sich die Vereinigten Staaten nicht leisten, eine Entwicklung wie die der Nanotechnologie zu unterschätzen und so technisch hinter potenzielle Gegner zurückzufallen. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt zu betrachten, dass die Nanotechnologie völlig neuartige Waffen hervorbringen könnte, die in ihrer militärischen Bedeutung den konventionellen Massenvernichtungswaffen entsprechen könnten. Das Department of Defense verfügt aus diesem Grund nach der National Science Foundation über den zweitgrößten Betrag der gesamten amerikanischen Fördermittel auf dem Gebiet der Nanotechnologie.

Die NNI zeigte schon kurz nach Beginn die ersten Erfolge und belebte nanotechnologische Aktivitäten, verteilt über die gesamten Vereinigten Staaten. Allein seit dem Start der NNI begannen mehr als dreißig Universitäten in den USA mit dem Aufbau von nanotechnologischen Forschungszentren. Interessant ist, dass die NNI nicht nur national, sondern auch international Wirkung zeigte: Die Initiative stimulierte Bemühungen anderer Nationen, eigene Initiativen nach dem Vorbild der NNI ins Leben zu rufen.

Gerade in den Vereinigten Staaten ist auch etwa ein halbes Duzend gemeinnütziger Organisationen auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätig. Diese Organisationen spielen eine wichtige Rolle bei der Öffentlichkeitsarbeit für die Nanotechnologie. Sie veranstalten und finanzieren Konferenzen, veröffentlichen Forschungsergebnisse und machen nanotechnologische Lobbyarbeit.

Eine der bekanntesten dieser Organisationen ist das Foresight Institute mit Sitz im kalifornischen Palo Alto, im Herzen des Silicon Valley. Das Foresight Institute ist eine gemeinnützige Bildungsorganisation, die gegründet wurde, um der Gesellschaft zu helfen, sich auf die zu erwartenden fortschrittlichen Technologien vorzubereiten. Foresight konzentriert sich dabei auf die molekulare Nanotechnologie, da die Entwicklung dieser Technologie aus Sicht des Institutes eine große Auswirkung auf die Zukunft unserer Zivilisation hat. Das Ziel von Foresight ist, die aufstrebenden Technologien so zu lenken und zu führen, dass sie der Verbesserung menschlicher Bedingungen dienen. Das Institut betreibt einen interdisziplinären Wissensaustausch und führt kritische Diskussionen, um die öffentliche und private Entscheidungsfähigkeit in diesem Bereich für Politik und Wirtschaft zu verbessern. Das Foresight Institute erkannte früh, dass die nanotechnologische Entwicklung neben den großen Vorteilen auch Gefahren mit sich bringt. Um zu helfen, die Gefahren zu vermeiden und die Vorteile zu erreichen, engagiert sich das Foresight Institute auf verschiedenen Gebieten: Es fördert das Verständnis der Nanotechnologie und ihrer Wirkungen durch Information der Öffentlichkeit und Entscheidungsträger. Ferner ist das Foresight Institute ein Ansprechpartner für nanotechnologische Fragestellungen und kommuniziert offen über diese. Das Foresight Institute unterstützt auch nützliche Ergebnisse der nanotechnologischen Entwicklung einschließlich verbesserter ökonomischer, sozialer und umweltschonender

Bedingungen. Durch Konferenzen, verschiedene Publikationen und vom Institut ausgeschriebene Preise für herausragende Leistungen hat sich Foresight unter Leitung seines Vorsitzenden K. Eric Drexler als eine der bedeutendsten Organisationen auf dem Gebiet der Nanotechnologie etabliert.

Eine weitere gemeinnützige Organisation mit herausragenden Leistungen auf dem Gebiet der nanotechnologischen Öffentlichkeitsarbeit ist das 1991 gegründete Institute for Molecular Manufacturing (kurz IMM), mit Sitz im kalifornischen Los Altos. Das IMM hat sich als Ziel die Ausführung der Forschung zur Entwicklung der molekularen Herstellung, der so genannten molekularen Nanotechnologie gemacht. Das IMM fördert auch Richtlinien für Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die das Risiko von versehentlichen Unfällen oder dem Missbrauch der molekularen Nanotechnologie minimieren.

Das IMM sponsert die vom Foresight Institute jährlich abgehaltenen Konferenzen zum Thema »Molekulare Nanotechnologie« und veröffentlicht aktuelle Forschungsergebnisse, die vom IMM unterstützt wurden.

Die gemeinnützigen Organisationen auf dem Gebiet der Nanotechnologie spielen eine zentrale Rolle in der öffentlichen Meinungsbildung zum Thema Nanotechnologie in den USA. Durch breit angelegte Informationsaktivitäten helfen sie, der Bevölkerung die Chancen dieser neuen Technologie näher zu bringen und Vorurteile abzubauen. Gerade auch durch die Arbeit dieser Organisationen wird die Nanotechnologie in den USA von weiten Teilen der Bevölkerung akzeptiert und getragen.

## Nanotechnologie in Deutschland

In den Bereichen der Nanotechnologie für Chemie und Materialien führt Deutschland knapp vor den USA und Japan, auf dem Gebiet der optischen Nanotechnologie behauptet Deutschland eine führende Position mit Japan.

Verschiedene Faktoren machen Deutschland zu einem idealen Nanotechnologieland. Voraussetzungen wie eine etablierte Industrie, eine führende Forschungslandschaft und nicht zuletzt eine hohe Investitionsbereitschaft ermöglichen dies. Bereits jetzt existiert in Deutschland

eine ausgeprägte Nanotechnologieszene, die den internationalen Vergleich nicht scheuen muss.

Doch eine solche Fachszene ist keine Selbstverständlichkeit. Zurückzuführen ist sie unter anderem auf die Bemühungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Das BMBF rief früh eine Förderinitiative zur Nanotechnologie ins Leben. Gemeinsam mit Vertretern von Industrie und Wirtschaft wurde 1998 beschlossen, einen groß angelegten Wettbewerb zur Findung von »Kompetenzzentren der Nanotechnologie« auszuschreiben. Dieser Wettbewerb wurde mit dem Ziel ins Leben gerufen, die Projektförderung auf dem Gebiet der Nanotechnologie zu intensivieren. Im Oktober 1998 nahmen schließlich sechs Kompetenzzentren der Nanotechnologie ihre Arbeit auf.

Durch die Bildung von Netzwerken und die Bündelung von Kompetenzen sollten so in Deutschland die gemeinsam vorhandenen Stärken international noch sichtbarer gemacht werden und durch Synergien größere Effizienz sowie ein teilweiser Innovationsvorsprung und höhere Wertschöpfung erreicht werden.

Die sechs deutschen Nanotechnologie-Kompetenzzentren unterscheiden sich durch ihre thematische Spezialisierung. Jedes Kompetenzzentrum bildet ein Netzwerk von Forschungseinrichtungen, klein- und mittelständischen Betrieben, Großunternehmen sowie Dienstleistern, die in einem gemeinsamen Bereich der Nanotechnologie zusammenarbeiten.

Das BMBF erkannte recht schnell, dass durch die Nanotechnologie die Grenzen zwischen den klassischen Wissenschaften verschwimmen. Jedes Kompetenzzentrum zeichnet sich daher trotz thematischer Spezialisierung durch eine aktive interdisziplinäre Zusammenarbeit aus.

Auf dem Weg, Deutschland als hervorragenden Standort für die Nanotechnologie im weltweiten Vergleich zu etablieren, spielen diese Kompetenzzentren eine wesentliche Rolle. Die Förderung durch das BMBF verfolgt unter anderem das Ziel, durch eine gute Position in der Nanotechnologie neues Wissen unternehmerisch zu nutzen und daraus in Deutschland Beschäftigung und Einkommen zu schaffen. Auch die Attraktivität der Nanotechnologie auf dem Gebiet der Rohstoff- und Energieeinsparung wurde vom BMBF als förderungswürdiges Ziel der Nanotechnologie erkannt.

Das BMBF legte die Aufgaben der Kompetenzzentren fest. Die Kompetenzzentren dienen der Koordination von Forschung auf dem jeweiligen Gebiet und der Schaffung eines wirtschaftlich attraktiven Umfelds, zum Beispiel zur Kapitalbeschaffung von jungen Start-ups. Die verschiedenen Kompetenzzentren sind auf dem Gebiet der Öffentlichkeitsarbeit für Nanotechnologie genauso tätig wie in den Bereichen Aus- und Weiterbildung. Neben der Beratung von Unternehmen sind sie auch für Fragen der Standards und der Normung zuständig.

Ein weiterer Faktor für die herausragende Stellung Deutschlands auf dem Gebiet der Nanotechnologie ist das deutsche Hochschulsystem. Deutsche Forscher erhielten bisher 84 Nobelpreise auf dem Gebiet der Naturwissenschaften, wodurch die Forschung auf höchstem internationalem Niveau verdeutlicht wird. Mit den 318 deutschen Hochschulen, davon 118 Universitäten und 149 Fachhochschulen, existiert in Deutschland eines der effektivsten Hochschulsysteme der Welt. An den Hochschulen sind drei Viertel der aus staatlichen Mitteln finanzierten Grundlagenforschung angesiedelt.

Auch die außeruniversitären Forschungseinrichtungen in Deutschland haben weltweit einen exzellenten Ruf und sind von Interdisziplinarität und Internationalität geprägt. Die Nanotechnologie ist von großer Bedeutung für alle außeruniversitären Forschungsgemeinschaften und wird von zahlreichen Instituten erforscht.

Eine wichtige Einrichtung im Bereich Grundlagenforschung ist hierbei die »Max-Planck-Gesellschaft« mit 78 Instituten und rund 11.000 Mitarbeitern. Die Nanotechnologie wird von den Wissenschaftlern der Max-Planck-Gesellschaft intensiv erforscht: So gelang es beispielsweise Wissenschaftlern vom Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Nanoröhrchen aus verschiedensten Materialien mit kontrollierter Zusammensetzung und an definierten Positionen herzustellen. Dieses und eine Vielzahl von weiteren Forschungserfolgen verdeutlichen, dass die Nanotechnologie bereits fester Bestandteil der Forschungsbemühungen der Max-Planck-Institute ist.

Auch die »Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren« engagiert sich stark auf dem Gebiet der nanotechnologischen Forschung. Mit 16 Helmholtz-Zentren und insgesamt 22.500 Mitarbeitern wird eine an bestehende oder künftige Bedürfnisse der Wirtschaft orientierte Forschung geleistet. Mit ihrer

Arbeit zur Weiterentwicklung der Nanotechnologie leisten die Helmholtz-Zentren einen wesentlichen Beitrag zu den staatlich geförderten Programmen.

Die »Fraunhofer-Gesellschaft« mit ihren 47 Instituten und 9.000 Mitarbeitern spielt im Bereich Nanotechnologie ebenfalls eine herausragende Rolle als Innovationsmotor. Der Bereich »Auftragsforschung« für Industrie und öffentliche Hand macht zwei Drittel des Forschungsvolumens aus und verhilft Unternehmen zum neuesten Stand von Technik und Organisation. Die Auftragsforschung liefert Politik und Wirtschaft optimale Grundlagen für ihre Entscheidungen. Der Bereich »Vorlauftforschung« sorgt dafür, dass Technologien von strategischer Bedeutung vorangetrieben werden. Beide Wirkungsfelder fördern Innovationen und stärken damit die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft. Im Bereich Nanotechnologie koordiniert das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden beispielsweise die Tätigkeit des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums »Ultradünne funktionale Schichten«.

Ebenfalls stark engagiert im Bereich Nanotechnologie ist die »Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz«, ein Zusammenschluss von 79 wissenschaftlich, rechtlich und wirtschaftlich eigenständigen Forschungsinstituten und Serviceeinrichtungen für die Forschung in Deutschland. Mit 12.000 Mitarbeitern haben die Leibniz-Institute überregionale Bedeutung und arbeiten im gesamtstaatlichen Interesse. Die Leibniz-Institute sind auf thematisch definierten, zukunftsweisenden Forschungsfeldern tätig, die zumeist eine langfristige Bearbeitung erfordern und sich wegen ihres Umfangs oder ihrer Inhalte nicht für die typische Universitätsforschung eignen. Zu den Leibniz-Instituten zählt das renommierte »INM – Institut für Neue Materialien« aus Saarbrücken. Das INM erforscht seit 1990 unter der Leitung von Prof. Dr. Helmut Schmidt mit 247 Mitarbeitern neuartige, für Innovationen speziell entwickelte High-Tech-Werkstoffe, die durch chemische Nanotechnologie hergestellt werden. Neben einer Reihe erfolgreicher Entwicklungen für die Industrie koordiniert das INM gemeinsam mit der Universität Kaiserslautern im Auftrag des BMBF das Kompetenzzentrum Nanotechnologie »Funktionalität durch Chemie«.

Eine weitere Vereinigung, die zur aussichtsreichen Position der

Nanotechnologie in Deutschland einen wichtigen Beitrag geleistet hat, ist der Verein Deutscher Ingenieure, kurz VDI. Der VDI ist eine gemeinnützige, von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen unabhängige Organisation. Als die größte technisch-naturwissenschaftliche Vereinigung Europas sieht sich der VDI verpflichtet, die wichtigsten Zukunftstechniken zum Vorteil von Wissenschaft und Gesellschaft aktiv mitzugestalten. Die Tätigkeiten des VDI im Bereich Nanotechnologie bestehen aus der Organisation von Workshops, Tagungen und Messen, der Erarbeitung von Richtlinien und einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit. Der VDI engagiert sich bereits seit Jahren auf diesem Gebiet und hat so auch international sehr viel Aufmerksamkeit auf die deutschen Leistungen im Bereich Nanotechnologie lenken können.

Mit den Kompetenzzentren, der Forschung an den Hochschulen und den außeruniversitären Einrichtungen engagieren sich in Deutschland auch die unterschiedlichsten Unternehmen in der Nanotechnologieszene. Bei einer Vielzahl dieser Unternehmen handelt es sich um Spin-offs von größeren Konzernen oder Universitäten, aber auch Unternehmen aus dem Mittelstand und Start-ups spielen eine beachtliche Rolle. Eine Reihe von Börsengängen steht hier in den nächsten Jahren an, die davon betroffenen Unternehmen gilt es zu kennen und zu beobachten. Doch man muss sich auch in Deutschland nicht auf die kleinen Vertreter der Nanotechnologie beschränken, auch große und allgemein bekannte Unternehmen haben Nanotech als Technologie der Zukunft erkannt. Und selbst im deutschen Aktienindex, dem DAX, wird man fündig. Die Nanotechnologie hat ihren Einzug in die deutsche Industrielandschaft schon längst hinter sich. Interessierte Anleger müssen sich nur noch auf die Suche nach geeigneten Kandidaten begeben, um ihr Aktiendepot mit der Technologie der Zukunft zu bereichern. Das Interessante an vielen der großen deutschen Nanostocks ist, dass ihre Tätigkeiten auf dem Gebiet der Nanotechnologie von der Öffentlichkeit, von Medien und Analysten kaum wahrgenommen werden. Viele dieser Unternehmen weisen auf Grund ihres nanotechnologischen Engagements ein langfristig überproportionales Kurspotenzial auf.

Manche Unternehmen verfolgen beim Thema Nanotechnologie jedoch eine passive Strategie. Gerade große Pharmaunternehmen wie

die Aventis AG setzen hierbei auf eine Integration externer Kräfte und forschen und entwickeln nicht im eigenen Unternehmen. »Sollten sich auf diesem Gebiet Neuerungen ergeben, die etwa zur zielgenauen Verteilung von Arzneistoffen im Körper geeignet wären, würden wir sicher mit entsprechenden Unternehmen kooperieren«, so Joachim Pietzsch, bei der Aventis Pharma AG zuständig für Scientific Public Relations. »Wir können nicht alles im eigenen Unternehmen erfinden und entdecken – ein wesentliches Erfolgskriterium für ein großes Pharmaunternehmen ist ja der Aufbau einer virtuellen Forschungsorganisation, die die schnelle Integration externer Kreativität über Allianzen ermöglicht.«

Quer durch alle Branchen ziehen sich jedoch eine Begeisterung und Euphorie, die mit den Möglichkeiten der Nanotechnologie verbunden werden. Innovationspotenziale auf dem Gebiet der Nanotechnologie sowohl für Produkte als auch Produktionsverfahren wurden in der deutschen Industrielandschaft bereits erkannt und werden von den jeweiligen Unternehmen verfolgt. Da wir uns noch in einem frühen Stadium der Entwicklung befinden, bleibt die aufmerksame Beobachtung gerade für Anleger eine Pflicht.

## Nanotechnologie in Japan

Unter anderem mit der Entdeckung und Entwicklung der Kohlenstoffnanoröhren (den »Carbon-Nanotubes«) nahm Japan in den vergangenen Jahren eine führende Rolle auf dem Gebiet der Nanotechnologie ein. Bereits seit vielen Jahren bestehen in Japan intensive Förderaktivitäten auf dem Gebiet der Grundlagenforschung sowie in der Materialwissenschaft und den industriellen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie.

Regierungsorganisationen und große japanische Konzerne stellen die Hauptfinanzierungsquellen der nanotechnologischen Entwicklung dar, kleine und mittlere Unternehmen spielen hierbei eine untergeordnete Rolle. Die Forschungsaktivitäten verteilen sich auf relativ große Labors der Regierung, der Industrie und der Universitäten. Die Finanzierung der nanotechnologischen Forschung in Japan wurde unterstützt durch die im Jahre 1995 gesetzlich festgelegte umfassende Steigerung der

Grundlagenforschung in Japans »Science and Technology Basic Law No.130«. Obwohl dieses Gesetz nicht vollständig umgesetzt wurde, sorgte es für eine zusätzliche Stimulation der nanotechnologischen Forschung in Japan. Doch Japans nanotechnologische Förderung begann schon weitaus früher: Das erste Fünfjahresprogramm für ultrafeine Partikel startete 1981 mit ERATO, dem »Exploratory Research for Advanced Technologies«-Programm.

Anfang der Neunziger startete das heutige Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (Ministry of Economy, Trade and Industry, kurz »METI«) eine Reihe von verschiedenen Projekten, die sich mit Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Nanotechnologie befassten. Das heutige METI, welches damals noch unter dem Namen Ministry of International Trade and Industry (kurz »MITI«) operierte, erkannte schon zu diesem Zeitpunkt, dass bis zu einer breiteren Anwendung der Nanotechnologie noch intensive und interdisziplinäre Grundlagenforschung zu bewältigen war. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde im Jahre 1992 das Projekt »Ultimate Manipulation of Atoms and Molecules« ins Leben gerufen. Das METI förderte dieses Projekt mit einer Laufzeit von zehn Jahren und einer Fördersumme von über 220 Millionen US-Dollar.

Auch heute wird die Nanotechnologie in Japan mit hohem Aufwand gefördert. Die Fördersummen in Japan haben eine jährliche Wachstumsrate von 15 bis 20 Prozent und sollten so auch in Zukunft die führende Stellung des Landes auf diesem Gebiet sichern.

Die im Verlauf der vergangenen Jahre immer intensiver werdenden Forschungsbemühungen Japans sind auf das überragende Wachstum der staatlichen Förderung für Grundlagenforschung und die steigende Anzahl an akademischen und industriellen Forschern auf dem Gebiet der Nanotechnologie zurückzuführen. Der Hauptantrieb für diese positive Entwicklung sind die Suche nach technologischen Innovationen und die Aussicht auf neue industrielle Anwendungen, vermischt mit wissenschaftlicher Neugierde.

Die Zusammenarbeit von Universitäten und Industrie ist in Japan besonders ausgeprägt und wird durch die spezielle Förderung des METI weiter intensiviert. Zu diesem Zwecke wurden spezielle Universitätsprojekte, die unter Beteiligung von Forscherpersonal aus der Industrie arbeiten, gezielt gefördert. Viele der akademischen Laborato-

rien sind daher mit Langzeitbesuchern aus der Industrie besetzt. In einem einzigen Labor können so Angestellte von konkurrierenden Unternehmen nebeneinander an unternehmensspezifischen Projekten arbeiten.

## 7 Investieren in die Nanotechnologie

---

»Es ist oft produktiver, einen Tag lang über sein Geld nachzudenken, als einen ganzen Monat für Geld zu arbeiten.«

*Heinz Brestel*

Die Nanotechnologie entwickelt sich mit hoher Geschwindigkeit. Wir stehen am Anfang einer faszinierenden technologischen Entwicklung, die unser Leben in den verschiedensten Bereichen verändern könnte. Noch befindet sich die Nanotechnologie in ihren Kinderschuhen, viele Zukunftsvisionen des nanotechnologischen Fortschritts lesen sich wie ein Science-Fiction-Roman. Doch die Nanotechnologie besteht bereits heute nicht nur aus Zukunftsvisionen: Mittlerweile verdienen die verschiedensten Unternehmen Geld mit Produkten, die von Materialien und Systemen im Nanomaßstab profitieren. Eine ganze Reihe von Innovationen steht in den kommenden Jahren zur Kommerzialisierung an. Viele dieser Unternehmen sind börsennotiert und bieten Anlegern daher bereits jetzt die Möglichkeit, an der nanotechnologischen Entwicklung mitzuverdienen.

Die Chance, eine Entwicklung wie die der Nanotechnologie von Anfang an für die Performance des eigenen Aktiendepots zu nutzen, kann sich als eine der gewinnbringendsten Entscheidungen überhaupt darstellen. Wer die Entwicklungen der vergangenen Jahre und Jahrzehnte beobachtet hat, der weiß, dass aus den kleinen Unternehmen von heute Weltkonzerne mit gigantischen Marktkapitalisierungen werden können. Es ist der klassische Traum eines jeden Anlegers, solche führenden Unternehmen der Zukunft zu entdecken.

Die amerikanischen Investmentexperten von Merrill Lynch halten es bereits für möglich, dass der nanotechnologische Fortschritt das Fundament für den nächsten Bullenmarkt wird. So, wie es Textilien, Eisenbahn, Automobil und Computer waren, hat auch die Nanotechnologie auf Grund ihres interdisziplinären Charakters das Potenzial, die Aktienmärkte mit Innovationen über Jahre zu beflügeln.

Rund um den Globus wird daher auf dem Gebiet der Nanotechnologie mit hohem Aufwand geforscht und entwickelt. Nanotechnolo-

gie ist das neue Zauberwort, das große Erwartungen weckt und Geldtöpfe öffnet. Das Ziel von Regierungen, Universitäten und Unternehmen ist, am künftigen Milliardenmarkt Nanotechnologie mitzuverdiene. Dieses Ziel teilen viele Unternehmen mit ihren Aktionären.

Auch als Investor möchte man sich natürlich möglichst früh im künftigen Milliardenmarkt positionieren. Schon jetzt in eine Zukunftstechnologie zu investieren, die nur wenigen bekannt ist, zahlt sich meist mehr aus, als in wenigen Jahren dem Trend hinterherzulaufen und später zu höheren Kursen einzusteigen.

Bereits jetzt durch einen zeitlichen Wissensvorsprung investiert zu haben kann daher bares Geld wert sein. Als Anleger darf man allerdings nie den langfristigen Charakter der Nanotechnologie aus den Augen verlieren. Genau wie das Internet läuft auch die Nanotechnologie Gefahr, ein »Hype« zu werden, der sich nach kurzer Zeit als Spekulationsblase entpuppen könnte. Doch genau wie beim Internet besteht auch die Chance, als früh investierter Anleger von den Entwicklungen positiv zu profitieren. Wenn die Medien glauben, den nanotechnologischen Fortschritt als großen »Börsenhype« erkannt zu haben, sollte man sprichwörtlich »seine Schäfchen im Trockenen haben«.

Anleger sollten sich darüber bewusst sein, dass die Nanotechnologie bei anhaltend positiver Entwicklung die nächste grundlegende Technologiestufe darstellt, deren Erfolge allerdings erst nach und nach auftreten werden. Als Anleger sollte man daher nicht auf einen kurzfristigen Erfolg spekulieren. Die Auswirkungen der Nanotechnologie brauchen auf Grund der technologischen Gegebenheiten viel Zeit, werden jedoch auch nachhaltiger und tief greifender sein, als es beispielsweise das Internet oder die Biotechnologie jemals sein könnte. Die Nanotechnologie ist umfassender, sie wird bei voller Entfaltung in mehr Lebensbereiche mit einer höheren Intensität eingreifen als jede zuvor von der Menschheit entwickelte Technologie. Doch dies wird sich erst in einer Zukunft abspielen, die uns wohl noch viele Jahre vorausliegt.

Trotz dieses langfristigen Charakters ist es sehr wahrscheinlich, dass bereits in den nächsten Monaten und Jahren einzelne Technologieerfolge auf dem Gebiet der Nanotechnologie der Börse immer wieder positive Impulse geben werden und die Nanotechnologie so auch weiter in das Blickfeld der breiten Öffentlichkeit führen.

Wichtig ist es, als Anleger die Nanotechnologie schon jetzt als

Chance zu erkennen. Wenn der nanotechnologische Fortschritt anhält, dürfte sich daraus die Grundlage für eine neue industrielle Revolution ergeben. Mit übertriebenen Hoffnungen, aber auch mit unbegründeten Ängsten ist der Sache sicher nicht gedient.

Nanostocks bieten Aktionären die Möglichkeit, an der aufstrebenden nanotechnologischen Entwicklung teilzuhaben. Anleger haben so die Chance, den nanotechnologischen Fortschritt unmittelbar für die Performance des eigenen Aktiendepots zu nutzen.

## Was sind Nanostocks?

Nanostocks sind börsennotierte Unternehmen, die auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätig sind. Es handelt sich bei Nanostocks sowohl um Unternehmen, die Forschung und Entwicklung betreiben und nanotechnologische Verfahren und Produkte herstellen, als auch um Unternehmen, die nanotechnologische Materialien und Systeme nutzen und damit bereits Geld verdienen. Zu Nanostocks im weiteren Sinne kann man Unternehmen zählen, denen sich durch den nanotechnologischen Fortschritt neue Chancen und Möglichkeiten für ihr Geschäftsfeld bieten. Natürlich muss man zu den Nanostocks auch die Ausrüster zählen, die mit entsprechenden Instrumenten und Systemen das Arbeiten im Nanometerbereich überhaupt erst ermöglichen.

Grundsätzlich kann es sich bei Nanostocks um große und etablierte Unternehmen handeln, die meisten Nanostocks sind allerdings noch kleine oder mittelständische Unternehmen, die in diesem interdisziplinären Gebiet tätig sind.

Umstritten ist die Subsumtion eines Unternehmens unter den Begriff »Nanostock«: Da sich selbst der Begriff »Nanotechnologie« derzeit nicht scharf abgrenzen lässt, besteht diese Schwierigkeit natürlich im besonderen Maße für die auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätigen Unternehmen. So entpuppen sich manche Produkte von Unternehmen bei genauerer Betrachtung gar nicht als »Nano«, sondern nur als Erzeugnisse im Mikrometermaßstab.

Erschwerend für eine klare Abgrenzung ist auch der Umstand, dass manches Produkt aus der Nanowelt schon längst angewandt wird, ohne allerdings explizit der Nanotechnik zugeordnet zu werden. Gerade im

Bereich der Chemie und Biotechnologie trifft man auf eine ganze Reihe nanotechnologischer Konzepte, die nicht unbedingt als solche bezeichnet werden.

Eine einschränkende Definition der Nanotechnologie von Mihail C. Roco von der amerikanischen National Science Foundation lässt sich auch auf Nanostocks anwenden: Demnach sind Nanostocks Unternehmen, die sich mit Materialien und Systemen beschäftigen, welche über eine Reihe von Schlüsseigenschaften verfügen. Die Größe dieser Materialien und Systeme muss sich in einer Dimension bewegen, die zwischen einem und einhundert Nanometern beträgt. Außerdem werden diese Systeme und Materialien von Prozessen erzeugt, durch die man die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Strukturen molekularer Größe kontrollieren kann. Als abschließende Eigenschaft sollten sich diese Materialien und Systeme zu größeren Gebilden zusammensetzen lassen.

Wenn Unternehmen so charakterisierte Materialien oder Systeme entwickeln, mit ihnen arbeiten oder diese herstellen, zählen sie zu den Nanostocks.

Bei Nanostocks muss man ebenfalls beachten, dass sie den unterschiedlichsten Branchen angehören, da die nanotechnologische Entwicklung die verschiedensten Arbeitsgebiete beeinflusst. So gibt es Nanostocks beispielsweise in der Elektronikbranche, bei Werkstoffherstellern und in der Biotechnologie. Da es sich bei der Nanotechnologie um eine interdisziplinäre Wissenschaft mit ineinander greifenden Elementen aus anderen Bereichen wie der Biologie, Physik und Chemie handelt, sind Nanostocks so in der Regel auch immer anderen Branchen zuzuordnen.

Diese Branchenzugehörigkeit bringt selbstverständlich auch mit sich, dass Unternehmen, die bislang beispielsweise im Bereich Biotechnologie oder der organischen Chemie tätig waren, sich neuerdings immer öfter als Nanotechnologie-Unternehmen bezeichnen. Eine solche Besinnung auf nanotechnologische Werte ist natürlich aus Unternehmenssicht mehr als verständlich: Schließlich ist das Präfix »Nano« mittlerweile sexy und bringt dem Unternehmen die begehrte größere Aufmerksamkeit. Dieses Prinzip »Alter Wein in neuen Schläuchen« bedeutet für Anleger natürlich eine zusätzliche Schwierigkeit. Sie müssen sich mit den Geschäftsmodellen der Unternehmen auch in Zukunft

kritisch auseinander setzen, um zu erkennen, ob es sich tatsächlich um eine innovative Idee handelt. Eine ausführliche Information über das jeweilige Unternehmen sollte daher auch bei Nanostocks als Pflicht verstanden werden.

## Nanostocks zwischen Hoffnung und Zweifeln

Die gigantischen Forschungsinvestitionen, die daraus resultierende ausgeprägte Forschungslandschaft und ihre ersten Erfolge sowie die faszinierenden Potenziale der Nanotechnologie bieten natürlich Raum für überzogene Erwartungen und übertriebene Hoffnungen. Gerade an der Börse machen die mit der Nanotechnologie verbundenen Hoffnungen einen besonderen Reiz aus. Doch jeder Anleger weiß auch, dass es kaum etwas Schlimmeres gibt als enttäuschte Hoffnungen. Daher sind die verschiedenen Zweifel, die hin und wieder gegenüber der Nanotechnologie geäußert werden, ein notwendiges Korrektiv, um Investoren die Risiken und Schwierigkeiten der neuen Technologie vor Augen zu halten.

Und diese Schwierigkeiten sind wie bei jeder aufstrebenden Technologie in einem solch frühen Stadium noch sehr vielfältig. Die Nanotechnologie befindet sich in vielen Unternehmen noch in der Grundlagenforschung und ist hier für Investoren daher noch nicht von Interesse.

Eine grundlegende Schwierigkeit der nanotechnologischen Entwicklung ist beispielsweise auch die Einschätzung des Marktpotenzials für die verschiedenen Branchen. Diese Problematik äußert sich darin, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Bewertungen zum Marktpotenzial der nanotechnologischen Innovationen gibt. Einer von vielen Gründen hierfür ist, dass der wissenschaftliche Fortschritt durch ständig neue technologische Erfolge die wirtschaftlichen Aussichten der Nanotechnologie verändert und so verlässliche Prognosen nur sehr schwer ermöglicht. Diese Prognoseunsicherheit ist auch aus praktischen Gründen leicht verständlich: Wenn man durch die Nanotechnologie beispielsweise Werkstoffe erschaffen kann, die bei einem Bruchteil des Gewichts um ein Vielfaches härter und belastbarer sind als Stahl, so kann man das Marktpotenzial in den bekannten Anwendungsgebieten

des Stahls relativ problemlos berechnen. Nicht zu berechnen und daher schwer einzuschätzen ist allerdings das Potenzial eines solchen Werkstoffes für Anwendungen, die bislang technisch nicht möglich waren. Da durch solche Werkstoffe eine Vielzahl von innovativen Produkten überhaupt erst denkbar wird, ist das Marktpotenzial für die sich neu eröffnenden Märkte kaum bestimmbar.

Viele Hoffnungen der Anleger knüpfen sich allerdings auch an nanotechnologische Visionen, die heute unwirklich und als kaum realisierbar erscheinen. Natürlich ist es zum jetzigen Zeitpunkt schwer abschätzbar, was erreicht werden kann und was Utopie bleibt. Wissenschaftler setzen sich gegenwärtig mit einer Fülle von Problemen auseinander, die auf dem Weg zu neuen technologischen Erfolgen auftreten.

Neben den technologischen Problemen treten auch wirtschaftliche Herausforderungen auf, wenn neue Innovationen kommerziell genutzt werden sollen. Der Weg von einer erfolgreich getesteten Technologie aus dem Labor in die Massenproduktion ist auch heute noch mit Schwierigkeiten und Risiken verbunden.

Gerade für Anleger besteht daher die Notwendigkeit, lohnende nanotechnologische Ziele zu suchen und zu erkennen. Solange sich die Forschung noch in die unterschiedlichen Richtungen bewegt, bedarf es besonderer Anstrengung, zwischen Utopien und Machbarem zu unterscheiden.

## Potenziale erkennen – Chancen nutzen

Es besteht kein Zweifel darüber, dass nanotechnologische Errungenschaften börsennotierten Unternehmen zu nachhaltigem Wachstum verhelfen. Dafür sprechen neben der fortschreitenden Entwicklung auch die gigantischen Möglichkeiten dieser spannenden Technologie. Es liegt allerdings in der Natur der Sache, dass man als Investor diese Potenziale erkennen muss, um sie für sich nutzen zu können.

Viele Faktoren machen die Nanotechnologie zu einem interessanten und attraktiven Gebiet für Anleger. Einer der wichtigsten ist sicher, dass der nanotechnologische Fortschritt die unterschiedlichen Bereiche des Lebens beeinflussen wird. Die Nanotechnologie wird nicht nur die Größe und Leistungsfähigkeit unserer zukünftigen Computer beachtlich verbes-

sern, sie wird auch neue Werkstoffe und neue medizinische Verfahren bringen. Man könnte diese Aufzählung von potenziellen Auswirkungen der Nanotechnologie beliebig fortsetzen, da die Nanotechnologie durch- aus jedes erdenkliche Gebiet des menschlichen Lebens verändern wird. Und sie wird uns Anwendungen und Produkte ermöglichen, an die wir bislang noch überhaupt nicht zu denken wagten.

Als Investor muss man sich in erster Linie über den interdisziplinären Charakter der Nanotechnologie bewusst werden. Das gesamte Phänomen der Nanotechnologie, das wie ein roter Faden die verschiedensten Branchen verbindet, gleicht einer Revolution. Und diese Revolution zeigt sich in den unterschiedlichsten Gesichtern. In manchen Bereichen wird die Nanotechnologie neuartige Möglichkeiten erschaffen, in anderen Bereichen wird sie die natürliche Weiterführung bereits bestehender Entwicklungen sein. Die Kunst beim Investieren in Nanostocks ist, sämtliche Facetten dieser Technologie als Investor erfolgreich auszuschöpfen.

Neben den branchenübergreifenden Potenzialen der Nanotechnologie sollte man als Anleger nicht vergessen, dass sich die Nanotechnologie nicht nur auf die Kursentwicklung von kleinen und mittleren Unternehmen auswirkt. Gerade große und etablierte Konzerne engagieren sich schon jetzt intensiv auf dem Gebiet der Nanotechnologie und verfügen so über ein zusätzliches Kurspotenzial. Großkonzerne verfügen über die nötigen Kapitalreserven, um gerade die kostenintensiven Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie von der Grundlagenforschung bis hin zur Kommerzialisierung zu tragen.

Die Unternehmenslandschaft auf dem Gebiet der Nanotechnologie ist daher bunt gemischt, außer den großen Konzernen gibt es eine Reihe von jungen Start-ups sowie Spin-offs der Großkonzerne oder der universitären Forschungslaboratorien. Neben zahlreichen Unternehmen, die mit dieser Querschnittstechnologie bereits Geld verdienen, macht manches Unternehmen bei anhaltendem Umsatzwachstum noch keine Gewinne. Bei diesen meist kleinen Unternehmen ist das Anlage- risiko enorm, doch immer wieder wird es einigen Unternehmen gelin- gen, sich zu großen Technologieführern und Weltkonzernen zu ent- wickeln. In solche Unternehmen zu einem Zeitpunkt zu investieren, zu dem sie noch relativ klein und unbekannt waren, kann sich in einigen Jahren für die Aktionäre in einer Traumrendite niederschlagen. Doch

auch den großen Konzernen eröffnen sich durch die Nanotechnologie neue Wege zu innovativen Produkten und Produktionsverfahren. Nanotechnologische Erfolge gewinnen auch hier nach und nach an Bedeutung und werden sich langfristig auch in den Aktienkursen der Großkonzerne widerspiegeln.

## Risikofaktor Nanostocks

Die Vergangenheit hat uns gezeigt, dass Aktien in der Regel mehr Ertrag bringen als Sparguthaben und festverzinsliche Wertpapiere. Natürlich haben gerade die schwankenden Bewegungen in jüngster Zeit an den Aktienmärkten dazu geführt, dass viele Investoren ihre Anlage überdenken. Erfahrene Anleger wissen allerdings, dass Kursschwankungen eine völlig normale Erscheinung am Aktienmarkt sind. Kursrückgänge sind nichts Neues; sie begleiten den Investor seit den Anfängen des Börsenhandels und sorgen seit jeher für Kopfschmerzen.

Gerade bevor man sich mit einem Investment in Aktien der Nanotechnologie befasst, sollte man sich deutlich machen, wie wichtig ein ausgewogenes Anlage-Portfolio für ein erfolgreiches Investment in Aktien ist. Das Investment gerade in die kleineren und extrem schwankungsanfälligen Nanostocks ist zwar mit einem erhöhten Kursrisiko verbunden; es bietet allerdings auch die Chance auf höhere Kursgewinne. Nicht jeder Anleger kann jedoch mit solch einem erhöhten Risiko- und Ertragspotenzial umgehen. Doch ein Investment in Nanostocks bietet sich nicht nur einem risikofreudigen Anleger an. Dem konservativen Investor bieten gerade die großen Unternehmen und Konzerne, die auf dem Gebiet der Nanotechnologie forschen und entwickeln, die Gelegenheit, auch mit weniger Risiko von den Möglichkeiten der Nanotechnologie zu profitieren. Ein großer Teil der Entwicklung spielt sich jedoch in einer Vielzahl von kleinen und mittelständischen Unternehmen weltweit ab. Diese Unternehmen haben hohe Ausgaben für ihre Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Viele dieser Unternehmen können und werden scheitern, ihnen wird das Geld ausgehen, bevor sie erste Gewinne mit ihren Forschungsergebnissen erzielen können. Die Aussichten der Nanostocks auf hohe Gewinne sorgen üblicherweise bei den meisten Anlegern für utopische Gewinnfantasien. Es

besteht daher die große Gefahr, dass sich Nanostocks zur treibenden Kraft für die nächste große »Spekulationsblase« an den Börsen entwickeln. Übertriebene Kurs-Gewinn-Verhältnisse und unverhältnismäßig hohe Börsenkapitalisierungen sollten auch in Zukunft bei jedem Anleger ein gewisses Misstrauen auslösen. Die Vergangenheit hat durchaus gezeigt, dass nach jeder Übertreibung der Weg in die Normalität schneller als erwartet eintritt.

Einem Investment in Nanostocks sollte daher eine ausführliche Informationsphase über das jeweilige Unternehmen vorangehen. Nur wenn man sich mit der Situation des Unternehmens vertraut macht und das Risiko abschätzen kann, ist man auch bereit, eine längerfristige und gewinnbringende Investition einzugehen. Es gilt also, Märkte und dort mögliche Anlagegewinne realistisch einzuschätzen. Jeder Investor muss sich vor dem Investment in Nanostocks klar darüber sein, welches Anlagerisiko er bereit ist einzugehen. Um das Risiko eines hohen Verlusts zu minimieren, sollten Investoren den Erfolg ihrer Anlage nicht von einem einzigen Unternehmen abhängig machen. Unerlässlich ist auch das regelmäßige Überprüfen der Investitionen in Nanostocks, um sicherzustellen, dass die getätigte Anlage noch zu den eigenen persönlichen Bedürfnissen passt und sich das individuelle Anlageziel nicht verändert hat. Nur durch eine gewissenhafte Vorbereitung wird ein Engagement in Nanostocks eine gewinnbringende Investition. Nanostocks haben nicht nur das Potenzial, sich kurzfristig zu den Lieblingen an den Börsen zu entwickeln. Sie können auch über die langfristige Kraft verfügen, nachhaltige Werte zu schaffen.

## Nanotech-Fonds

»Wer in die Nanotechnologie investieren will, muss das Unternehmen erst selbst gründen.« Dieser in der Investmentbranche kursierende Witz ist natürlich überspitzt. Es gibt bereits eine Reihe von Unternehmen, die börsennotiert und auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätig sind.

Wer sich für Nanostocks interessiert, muss jedoch bislang auf die einzelnen Unternehmen zurückgreifen. Wer nach Fonds sucht, die ausschließlich in Nanostocks investieren, wird nicht fündig. Es gibt noch

keine reinen Nanotech-Fonds. Dieser Nachteil für die breite Anlegermasse kann sich als Vorteil für den einzelnen Investor darstellen. Als Privatanleger hat man die Möglichkeit, in Nanostocks zu investieren, bevor große Kapitalströme aus Branchenfonds in dieses Segment fließen. Obwohl die Mehrheit der Fondsgesellschaften die Zukunftsaussichten der Nanotechnologie sehr positiv bewertet, so ist doch eine Reihe von Gründen dafür verantwortlich, dass es bislang keine reinen Nanotech-Fonds gibt. Zum einen ist die geringe Anzahl von Nanostocks und die damit verbundene geringe Marktkapitalisierung ein Faktor, der es den Fondsgesellschaften unmöglich macht, Branchenfonds zur Nanotechnologie aufzulegen. Die Fondsgesellschaften würden bei Unternehmen mit geringer Marktkapitalisierung die Kurse bei Käufen und Verkäufen zu stark beeinflussen. Zum anderen sind die Unternehmen, die von der Nanotechnologie profitieren, noch größtenteils keine »reinen« Nanostocks, das heißt ihr Hauptgeschäftsfeld liegt noch nicht im Bereich der Nanotechnologie. Ein weiterer Faktor ist, dass sich »Nano« in der Mehrzahl der Unternehmen noch im Bereich Forschung und Entwicklung abspielt, die Branche sich für Fondsgesellschaften somit in einem zu frühen Stadium befindet. Allerdings investieren fast alle Fondsgesellschaften schon in Unternehmen, die direkt oder indirekt an der Nanotechnologie verdienen. Nanostocks sind bereits Bestandteil einer ganzen Reihe von Technologiefonds oder Fonds, die sich auf Unternehmen mit kleinen Marktkapitalisierungen spezialisiert haben. Auf Grund der Marktengde der zum Teil kleinen Nanostocks macht der Anteil innerhalb dieser Fonds allerdings selten mehr als ein Prozent aus.

Gerade in letzter Zeit verdichten sich in der Investmentbranche die Gerüchte, dass einige Fondsgesellschaften bereits Konzepte für Branchenfonds zum Thema Nanotechnologie »in der Schublade« haben. Natürlich äußern sich Fondsgesellschaften nicht gerne über ihre zukünftigen Produkte. Doch jeder Anleger sollte sich darüber bewusst sein, dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis der erste Nanotech-Fonds angeboten wird: Je mehr das Thema Nanotechnologie öffentliche Beachtung findet, desto größer wird auch das Interesse von Fondsgesellschaften, das entstehende Verlangen der Investoren nach einem Nanotech-Fonds zu befriedigen.

## 8 Nanostocks

---

»Gelegenheit ist überall, man muss sie nur erkennen.«

*Sir Charles Clore*

### > Nanomaterialien und Anwender

Die Nanotechnologie wird grundlegend die Art und Weise ändern, wie Werkstoffe und darauf basierende Anwendungen in Zukunft hergestellt werden. Die Fähigkeit, nanoskalige Bausteine von genau bestimmter Größe und Zusammensetzung zu synthetisieren und sie dann zu größeren Strukturen mit einzigartigen Funktionen und Eigenschaften zusammenzusetzen, wird ganze Bereiche der Werkstoffindustrie revolutionieren. Einige der Innovationen durch Nanomaterialien sind leichtere, härtere und programmierbare Materialien, die Reduzierung der Kosten von Materialkreisläufen durch geringere Ausfallquoten sowie innovative Anwendungen basierend auf neuen Werkstoffen. Die Forscher werden in der Lage sein, Strukturen zu entwickeln, die nie zuvor in der Natur beobachtet werden konnten.

Makromoleküle wie Kohlenstoff-Nanotubes werden in den nächsten Jahren große Aufmerksamkeit erlangen. Mit ihrer Elastizität, Zugfestigkeit und thermischen Stabilität sowie ihren elektrischen Eigenschaften werden innovative Anwendungen in den unterschiedlichsten Bereichen ermöglicht.

Auch den Anwendern nanotechnologischer Materialien eröffnet sich ein faszinierendes Potenzial für ihr Unternehmen. Früh erkannt, kann der nanotechnologische Innovationsschub für ein Unternehmen ein wichtiger Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz sein. Die Nanotechnologie ermöglicht es, Produkte zu verbessern, neue Produkteigenschaften zu generieren und so neue Märkte zu erschließen.

>>

## Degussa AG



International anerkannt auf dem Gebiet der Nanotechnologie, kennen in Deutschland bislang nur wenige Anleger die Aktivitäten des Unternehmens auf diesem Gebiet. Doch Degussa hat die Möglichkeiten der Nanotechnologie für ihr Geschäft schon längst erkannt. Die neue Degussa AG ist im Februar 2001 aus dem Zusammenschluss von Degussa-Hüls und SKW Trostberg entstanden. Der neue Konzern besteht aus sechs Unternehmensbereichen (Divisionen) mit 23 Geschäftsbereichen. Künftig will sich das Unternehmen auf die sechs Kerngeschäftsfelder Gesundheit und Ernährung, Bauchemie, Fein- und Industriechemie, Performance-Chemie, Coatings und Füllstoffsysteme sowie Spezialkunststoffe konzentrieren. Das Unternehmen erreichte im Geschäftsjahr 2001 einen Umsatz von 12,9 Milliarden Euro und beschäftigte rund 53.400 Mitarbeiter. Die neue Degussa AG stellt somit den weltweit größten Spezialchemie-Konzern dar. Das Mitglied des deutschen Aktienindex ist gerade auf dem Gebiet der Nanotechnologie sehr aktiv. Gegenwärtig konzentriert sich Degussa auf den Bereich der nanoskaligen Partikel. Seit Anfang 2000 betreibt die Degussa an ihrem Standort im hessischen Hanau-Wolfgang zusammen mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) das so genannte »Projekthaus Nanomaterialien«. 17 Forschungsmitarbeiter der Degussa arbeiten dort gemeinsam mit Wissenschaftlern von neun

deutschen Universitäten an neuen Technologien zum Herstellen von Nanomaterialien. Die Gesamtkosten des Projekts belaufen sich auf rund elf Millionen Euro über einen Zeitraum von insgesamt drei Jahren. Etwa die Hälfte dieser Aufwendungen trägt die DFG. Während die meisten anderen Unternehmen bei der Suche nach nanoskaligen Materialien die Flüssigphasen-Synthese favorisieren, gibt die Degussa den so genannten Gasphasen-Reaktoren den Vorzug. Das Unternehmen nutzt Hochtemperatur-Gasphasen-Reaktoren bereits seit langem zur Herstellung von Industrieruß und der pyrogenen Kieselsäure Aerosil, wobei jeweils nanoskalige Primärteilchen entstehen. In den Hochtemperatur-Gasphasen-Reaktoren werden durch Kondensation bei Temperaturen bis zu 10.000 Grad Celsius Nanoteilchen aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen hergestellt. Größe und Form der Partikel bestimmen ihre Eigenschaften und damit die Einsatzmöglichkeiten. Bislang sind sechs solcher Pilotanlagen bereits fertig gestellt. In diesen Anlagen erfolgt die Partikelbildung innerhalb weniger Millisekunden.

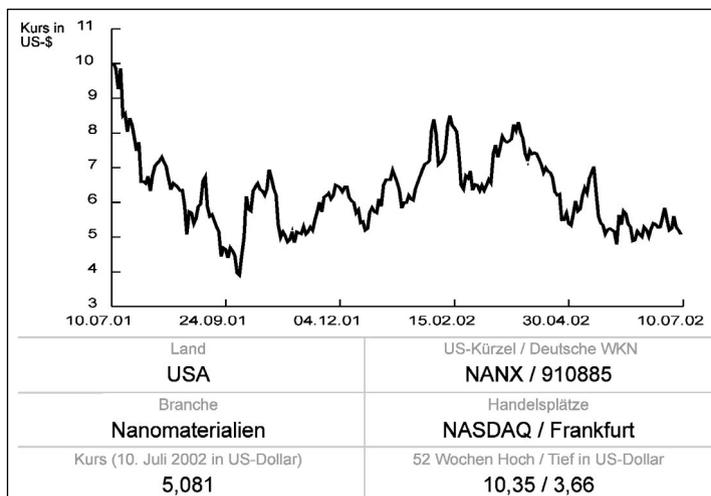
Welche Nanomaterialien entwickelt werden, bestimmt der Markt. Degussa arbeitet eng mit potenziellen Kunden zusammen, den so genannten »Joint-Research-Partnern«. Schon in einem sehr frühen Stadium werden von potenziellen Kunden die neuen Partikel auf ihre Eignung in diversen Anwendungen untersucht. Nur durch diese enge Kooperation ist Degussa heute in der Lage, aus Ideen oder Projekten innerhalb weniger Jahre marktreife Produkte werden zu lassen. Das »Projekthaus« trägt somit dazu bei, dass die Entwicklungszeiten für Nanomaterialien deutlich verkürzt werden können.

Einer der Forschungsschwerpunkte im Bereich Nanomaterialien sind neuartige Metalloxid-Dispersionen. Sie werden unter anderem für die ultrapräzise Oberflächenbearbeitung benötigt, beispielsweise für das chemisch-mechanische Polieren künftiger Chip-Generationen. Derzeit sind die elektronischen Bauteile auf einem Chip etwa 130 millionstel Millimeter groß, in einem nächsten Schritt sollen es nur noch 90 millionstel Millimeter sein. Damit bei diesen winzigen Strukturen keine Fehler auftreten, muss jede der fünf bis sieben Schichten, aus denen ein Chip besteht, absolut eben sein. Mit dem chemisch-mechanischen Polieren ist das zu schaffen. Auch in zahlreichen anderen Anwendungen können die Nanomaterialien Eingang finden. Mögliche Einsatzgebiete sind die Herstellung von Lacken, Kunststoffen, Klebstoffen und Pigmenten.

Weitere Einsatzgebiete könnten kleinste Kondensatoren für die Elektrotechnik, bei Lichtwellenleitern, in der Display-Technologie sowie bei der Herstellung von Katalysatoren für die Chemie- und Automobilindustrie sein.

»Miniaturisierung ist oftmals auch Voraussetzung für jene Multifunktionalität, die sich Kunden wünschen – sei es der kratzfeste, transparente Autolack oder das Handy mit Internet- und Fernsehanschluss. Und der Schlüssel zur Miniaturisierung ist die Nanotechnologie«, bringt es Dr. Alfred Oberholz, Mitglied des Vorstands der Degussa AG, auf den Punkt. »Nanomaterialien sind nicht nur die Stoffe, von denen Materialwissenschaftler träumen – Nanomaterialien sind auch die Stoffe, von denen sich die Degussa AG künftig viel verspricht.«

### Nanophase Technologies Corporation



Bei der Nanophase Technologies Corporation handelt es sich um ein reines Nanotechnologie-Unternehmen. Die 1989 gegründete Aktiengesellschaft hat ihren Firmensitz im amerikanischen Romeoville/Illinois, einem Vorort von Chicago. Nanophase ist ein weltweit führender Anbieter von nanokristallinen Materialien und an der amerikanischen NASDAQ gelistet. Die patentierte Technologie und Ausrüstung von Nano-

phase ermöglichen die Herstellung von Material mit einer Partikelgröße im nanoskaligen Bereich. Die Produkte von Nanophase stellen eine Technologie dar, die es Wissenschaftlern erlaubt, die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Stoffen durch den Zusatz von nanokristallinen Materialien zu verändern. Nanokristalline Materialien sind keramische oder metallische Pulver, einschließlich komplexer Metalle, mit einer Partikelgröße von weniger als einhundert Nanometern. Mit der Beimischung dieser Partikel ist Nanophase in der Lage, Produkteigenschaften zu stabilisieren, zu kontrollieren oder zu verbessern. Nanophase gehört zu einem kleinen Kreis von Unternehmen, die über die Technologie und die Kapazitäten verfügen, nanokristalline Materialien von kommerziellem Umfang und Qualität herzustellen.

Die meisten Kunden von Nanophase haben mit dem Unternehmen Geheimhaltung über die Geschäftsbeziehungen vereinbart, da sie den Einsatz und die Wirkung der nanokristallinen Materialien in ihrem Produkt als Vorteil gegenüber ihrer Konkurrenz schützen wollen. Die Materialien von Nanophase werden in einer Vielzahl der unterschiedlichsten Produkte eingesetzt. Bestes Beispiel für ein Anwendungsgebiet von nanokristallinen Materialien liefert die BASF AG, der größte Kunde von Nanophase. Nanophase liefert BASF nanokristallines Zinkoxid, welches in einer ganzen Reihe von Sonnenschutzprodukten und kosmetischen Utensilien eingesetzt wird. Das Material hat eine Partikelgröße von 50 bis 75 Nanometern und wird beispielsweise einer Körperlotion beigemischt. Da die Partikelgröße geringer als die Wellenlänge des Lichts ist, wirkt die Körperlotion trotz Zusatz transparent. Sie erlangt mit dem nanokristallinen Zusatz einen optimalen Sonnenschutz mit den Eigenschaften eines Sunblockers und ist gleichzeitig kosmetisch akzeptabel. Ein weiterer Vorteil ist, dass dieser nanokristalline Zusatz chemisch träge ist und, im Gegensatz zu organischen Sonnenschutz-Zusätzen, von der Haut nicht aufgenommen wird. Somit bietet die Körperlotion dank des Nanophase-Zusatzes einen Ganztageschutz vor der Sonne.

Ein weiterer Kunde von Nanophase ist ein führender Hersteller von Vinyl-Fußboden. Der nanokristalline Zusatz ermöglicht eine um den Faktor vier erhöhte Abriebfestigkeit des Bodens. Der Hersteller ist nun dank Nanophase in der Lage, auf seine Produkte eine lebenslange Garantie zu geben.

Nanokristalline Materialien werden auch von einem der führenden Autozulieferer eingesetzt. Produkte von Nanophase finden hier ihren Einsatz bei Katalysatoren. Die durch den Zusatz verbesserten Katalysatoren weisen eine weitaus bessere Leistung unter widrigen Umständen, zum Beispiel bei einem Kaltstart des Autos, auf.

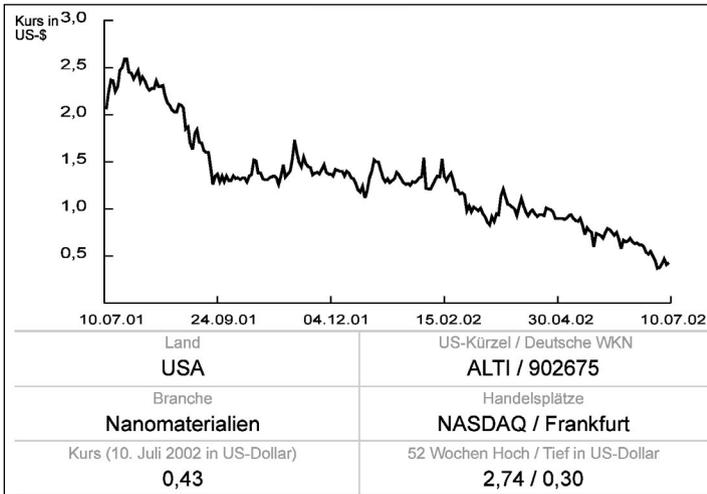
Diese Beispiele verdeutlichen, dass die nanokristallinen Materialien von Nanophase in den unterschiedlichsten Produkten eingesetzt werden können. Eine ganze Reihe weiterer Einsatzgebiete befindet sich in den verschiedensten Phasen der Entwicklung. Ein interessantes Beispiel hierfür sind hitzeresistente und antielektrostatische Nanobeschichtungen für die Mikroelektronik. Joseph E. Cross, Vorstandsvorsitzender von Nanophase, sieht das größte Wachstumspotenzial kurzfristig im Bereich von Gesundheitsprodukten. Die Zusammenarbeit mit BASF und die Entwicklung mit anderen Branchengrößen in diesem Bereich lassen auf eine sehr positive Umsatzentwicklung schließen. Für zusätzliche Fantasie sorgen viele andere Produkte wie beispielsweise eine hitzebeständige Beschichtung in Sprayform. Die US-Navy wendet dieses neue Produkt seit kurzem bei Reparaturen von U-Booten und Katapulten von Flugzeugträgern an.

Gerade auf dem Gebiet der Beschichtungen bahnen sich neue Fortschritte an, die das jeweils beschichtete Produkt in seinen Eigenschaften vielfältig verbessern.

Interessant ist auch der Fortschritt, der bei Nanophase auf dem Gebiet des Herstellungsprozesses der nanokristallinen Materialien gemacht wird. Nanophase ist es gelungen, die Herstellungskosten seiner Materialien im Jahr 1999 um 30 und im Jahr 2000 um 25 Prozent zu senken. Diese Effizienzsteigerung hält weiter an, denn das Unternehmen arbeitet kontinuierlich daran, seine Herstellungskosten zu verringern. Der Herstellungsprozess ist durch eine breite Basis an Patenten gesichert, und neue Entwicklungen werden konsequent patentiert. Aktuell hat Nanophase 26 Patente im Besitz oder unter Lizenz. Positiv auf die weitere Entwicklung von Nanophase werden sich auch die beiden langjährigen Kooperationsabkommen mit BASF auswirken. Neben einer weltweiten exklusiven Zusammenarbeit beim Einsatz von Zinkoxid-Materialien in Sonnenschutzprodukten wurde das bestehende Abkommen zur Finanzierung einer Zinkoxid-Produktionsanlage von Nanophase bis Juni 2004 verlängert. Durch diese Kapazitätserwei-

terung sollte der mit BASF erzielte Umsatz weiter gesteigert werden. Der Umstand, dass sich die von Nanophase hergestellten Materialien in zahlreichen anderen Produkten einsetzen lassen, spricht für ein weiterhin hohes Umsatzpotenzial.

### Altair International Inc.



Doch die Konkurrenz schläft bekanntlich nicht. Auch bei der an der amerikanischen NASDAQ gelisteten Altair International Inc. handelt es sich um einen Nanostock. Der Hersteller von Nanomaterial befindet sich in bester Gesellschaft mit Konkurrenten wie der Degussa AG oder Nanophase. Doch Altair war nicht immer ein Nanostock. Das Unternehmen wurde erst in den letzten Jahren auf das neue Geschäftsfeld Nanotechnologie ausgerichtet.

Altair International wurde ursprünglich im Jahr 1973 als Gesellschaft für Bergbauerkundung gegründet. Im Jahre 1994 wendete sich das Unternehmen der Herstellung und Entwicklung von Ausrüstungen für die Gewinnung und Verarbeitung von Mineralien zu. Nachdem Altair im November 1999 von BHP Minerals International (Melbourne, Australien) eine Verarbeitungstechnologie für Nanopartikel gekauft hat, wurden die Prioritäten des Unternehmens neu auf die Produktion und den Verkauf von Nanopartikel-Produkten ausgerichtet. Es wurde die

neue Division »Altair Technologies«, eine hundertprozentige Tochter von Altair International, gegründet, und zur Verstärkung des neuen Unternehmensfokus wurde ein Managementteam für Nanopartikel gebildet. Mit dem neuen Ziel vor Augen wurden die Ressourcen des Unternehmens verbessert und umverteilt, um die Bemühungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie zu unterstützen. Mittlerweile bezeichnet sich Altair selbst vornehmlich als Wissenschafts- und Technologieunternehmen mit Schwerpunkt »Nano«.

Das Verfahren, mit dem Altair Nanopartikel gewinnt, unterscheidet sich von den anderen gegenwärtig verwendeten Verfahren zur kommerziellen Herstellung. Das Verfahren von Altair ist auf das Züchten kristalliner Materialien in einem dichten Film ausgerichtet. Es ermöglicht eine bessere Kontrolle der Partikelgrößen, ihrer Formen und morphologischen Eigenschaften. Die bessere Steuerung der Produktart liefert Altair einen Vorteil in den bestehenden Märkten für Nanopartikel und ist ein bedeutsamer Vorteil bei der Erschließung neuer Hightech-Märkte.

Das Verfahren von Altair wurde entwickelt, um der Industrie Farbpigmente zu niedrigen Kosten bei hohen Volumina zu liefern. Altair entwickelte das Herstellungsverfahren so, dass Nanopartikel von hoher Qualität kostengünstig hergestellt werden können.

Das Herstellungsverfahren von Altair ist in der Lage, wirtschaftlich eine große Vielfalt von anorganischen Nanopartikeln, einschließlich Titan und anderen Metalloxiden, zu produzieren. Außerdem können durch dasselbe Verfahren mit anderen Kontrollmethoden große Kristalle mit einzigartigen Eigenschaften produziert werden.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Nanopartikel von Altair sind vielfältig. Durch die Tochter Altair Technologies werden mit diversen Kooperationspartnern neue Anwendungsmöglichkeiten und Produkte erforscht und entwickelt.

So hat Altair beispielsweise eine Alternative Energy Group ins Leben gerufen, die sich ausschließlich mit der Forschung nach Produkten auf dem zukunftsweisenden Gebiet der alternativen Energie beschäftigt.

Mit dem renommierten Massachusetts Institute of Technology (kurz MIT genannt) kombiniert Altair Forschungsbemühungen an einer Oxidbrennstoffzelle, die Anwendung in fest stehenden Kraftwerken oder Flottenfahrzeugen, wie Omnibussen oder Lastkraftwagen, finden könnte.

Das Ziel des Altair/MIT-Brennstoffzellenprogramms soll nicht eine weitere Brennstoffzelle mit einem anderen Standard oder einer leichten Änderung des Brennstoffzellen-Designs sein. Altair und das MIT entwickeln die nächste Generation der Brennstoffzelle. Das Ziel von Altair ist die Produktion und Bereitstellung einer Treibstoffumwandlungseinheit mit höchster Leistung, die gegenwärtige Mängel in den Entwürfen der Brennstoffzellen überwinden soll. Altair versucht, dieses Ziel mit einzigartigen und patentierten Materialien zu erreichen, die in vom MIT entwickelten Katalysatoren eingesetzt werden.

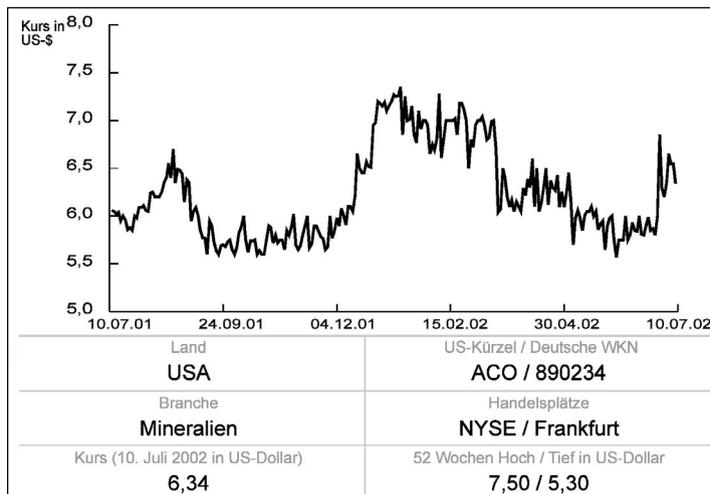
Auch auf anderen Gebieten ist Altair sehr engagiert. So entwickelt das Unternehmen nanostrukturierte Materialien für Anoden und Kathoden von verbesserten Batterien. Altair erwartet mit seinen Forschungen die Produktion der »nächsten Generation« von Energiespeichern.

Auch auf dem Gebiet der Solarenergie ist Altair aktiv. Mit europäischen Forschern arbeitet man daran, die photochemischen und elektrochemischen Eigenschaften von fortschrittlichen Oxiden für die Anwendung in Solarzellen zu ergründen.

Altair liefert auch nanodimensioniertes Pulver für die Verwendung in keramischen, hitzebeständigen Sprühanstrichen als Teil eines Forschungsprogramms des amerikanischen »Office of Naval«. Das Forschungsprogramm hat die Aufgabe, den Abnutzungswiderstand, die Flexibilität, Zähigkeit und Anwendungshandhabung für Schiffe der US-Navy und deren Ausrüstung zu verbessern. Altair verkündete vor kurzem die Entwicklung eines neuen Nanopulvers für verbesserte thermische Sprühprodukte im Korrosionsschutz, bei thermischen Barrieren und Mikroprodukten.

Zahlreiche weitere Anwendungen in den Bereichen Farbanstriche, Kosmetik und Katalysatoren befinden sich im Entwicklungsstadium. So wird aktuell die Verbesserung der katalytischen Leistungen mit Nanopartikeln von Altair durch Kunden im Bereich der Katalysatoranwendungen bei der Grundwassersäuberung und der Reduzierung von Auspuffemissionen beim Auto getestet.

## AMCOL International Corporation



Die amerikanische AMCOL International Corporation ist mit ihrer Tochtergesellschaft Nanocor Inc. aktiv im Bereich Nanotechnologie tätig. AMCOL wird an der Börse in New York gehandelt und produziert und vermarktet Spezialmineralien, die für Anwendungen in den verschiedensten Bereichen eingesetzt werden.

Nanocor wurde 1995 gegründet, um chemisch modifizierten Lehm als Zusatz für Plastik herzustellen und zu vertreiben. Die Produkte von Nanocor werden genutzt, um fortschrittliche Plastikstoffe herzustellen, die mit Nanosubstanzen hergestellt werden. Diese Nanosubstanzen ermöglichen eine verbesserte Hitzebeständigkeit sowie strukturelle und isolierende Eigenschaften. Durch Nanosubstanzen verbessertes Plastik wird für Anwendungen in Autoteilen, Nahrungsmittelverpackungen, elektrischen Komponenten, Geräten und kommerziellen Bauteilen genutzt.

Das Ziel von Nanocor ist die Entwicklung, Produktion und Vermarktung der weltweit ersten Familie von chemisch modifizierten, nanodimensionierten Lehmprodukten für den Einsatz in einer neuen Kategorie von plastischen Materialien, den so genannten »Nanokompositen«. Schon die Beimischung eines einstelligen Prozentsatzes des Nanolehms von Nanocor in ein Plastik verursacht große Unterschiede in dessen mechanischen, thermischen und isolierenden Eigenschaften.

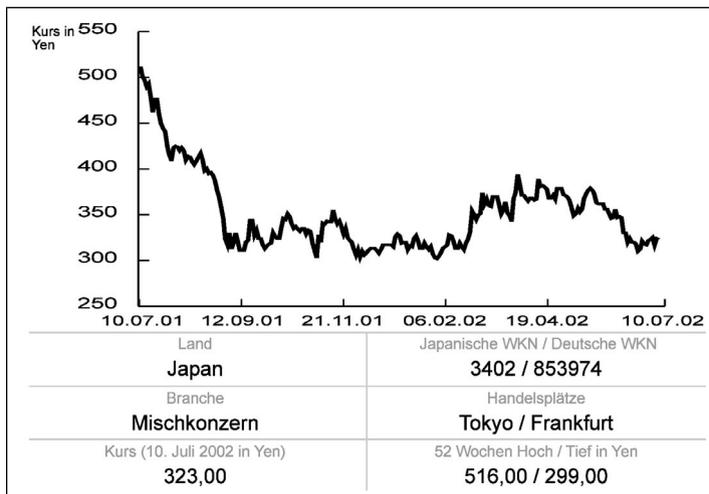
Es ist das Geschäft von Nanocor, das »Nano« in die Nanokomposite zu bringen. Um dies erfolgreich zu tun, schafft Nanocor Beziehungen zu Kunden, um den wirksamsten Nanolehm für ihren individuellen Bedarf auf Grundlage des beigemischten Polymers und der erwünschten Eigenschaften und Leistungen zu liefern. Die Partner bringen ihre speziellen Sachkenntnisse und ergänzen das Produkt zum Nanokomposit. Durch diese Zusammenarbeit werden Nanokomposit-Produkte zur kommerziellen Realität. Das Team von Nanocor besteht aus Lehm- und Polymerspezialisten, die mit Ingenieuren im technischen Zentrum des Unternehmens in Arlington Heights/Illinois die kritischen Eigenschaften und Werkzeuge entwickeln, die nötig sind, um die Bedürfnisse der Nanokomposit-Hersteller zu verstehen. Die Möglichkeiten von Nanocor beinhalten auch das Modellieren per Computer, um entsprechende Chemikalien für die Lehmbehandlung zu definieren und vorherzusehen sowie Ausrüstungen und Verfahren herzustellen, die dazu geeignet sind, fast alle Chemikalien auf die Lehmoberfläche einwirken zu lassen. Versuchsmengen von Nanokompositen können an diesem Standort präpariert werden, und eine vollständige Ausrüstung an Polymermessgeräten ist vorhanden, um die mechanischen, thermischen und isolierenden Eigenschaften vor Ort zu bestimmen.

Die Nanocor-Produktionsanlage in Aberdeen/Missouri liefert kommerzielle Mengen des chemisch behandelten Nanolehms entsprechend jeder Kundenspezifikation. Die Anlage rüstet sich auf, um jährlich 40 Millionen Pfund gereinigten, polymerartigen Lehm produzieren zu können. In Aberdeen befinden sich auch Einrichtungen zur chemischen Verarbeitung, ein Labor für die Qualitätskontrolle sowie Verpackungseinrichtungen.

Nanocor hat sich eine Lizenz von Toyotas Forschungs- und Entwicklungseinheit gesichert, um Nylon-Nanokomposite herzustellen. Toyota ist ein Pionier auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung von Nanokompositen. Zusätzlich hat Nanocor seine eigenen Patente auf Grundlagentechnologien entwickelt und erweitert den Begriff der Nanokomposite um neue Polymerarten.

Ende Oktober 2000 hat AMCOL International sich dazu entschlossen, Nanocor aus dem Unternehmen herauszulösen und dieses Spin-off als eigenständiges Unternehmen arbeiten zu lassen.

## Toray Industries



Der japanische Mischkonzern Toray Industries ist einer der weltweit führenden Hersteller von synthetischen Fasern und Textilien. Das 1926 gegründete Unternehmen gehört auch zu den führenden Chemiekonzernen der Welt. Bei den Unternehmen der Toray-Gruppe machen Fasern und Textilien 40,3 Prozent der Geschäftstätigkeit aus, Plastik und Chemikalien 22,9 Prozent. Auch im Bereich Pharmaka und bei einer Reihe weiterer Produkte und Dienstleistungen ist der Mischkonzern tätig. Die Unternehmen der Toray-Gruppe haben im Fiskaljahr 2001 einen Umsatz von 1075 Milliarden Yen (etwa 9,25 Milliarden Euro) mit knapp 35.700 Mitarbeitern weltweit erwirtschaftet. Die Unternehmensführung hat die Chancen der Nanotechnologie erkannt und richtet Toray konsequent auf das neue Betätigungsfeld aus.

Mit Investitionen von rund fünf Milliarden Yen baut die Toray-Gruppe ein neues Labor, um die Forschungsaktivitäten des Unternehmens auf dem Gebiet der Nano- und Biotechnologie zu stärken. Das Labor soll im Frühjahr 2003 fertig gestellt werden und wird von Toray am Standort seines pharmazeutischen Forschungslabors im japanischen Kamakura angesiedelt. Zunächst sollen sechzig Wissenschaftler den Betrieb der Forschungseinrichtung aufnehmen, die Zahl der Wissenschaftler soll allerdings auf einhundert im Jahr 2004 aufgestockt wer-

den. Das neue Forschungszentrum soll nach Torays Plänen nicht nur die Biotechnologie mit der Nanotechnologie verschmelzen lassen, es soll auch die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Forschergruppen und Universitäten fördern. Nanotechnologische Forschungsschwerpunkte des neuen Labors werden nanomolekulares Design, Nanopartikel und Materialien aus Nanokompositen sein.

In Kooperation mit Professor Hisanori Shinohara von der Universität Nagoya gelang Toray die Entwicklung einer kostengünstigen synthetischen Methode, um Kohlenstoff-Nanotubes mit doppelter Wand, die so genannten double-walled carbon nanotubes, oder kurz »DWNTs« herzustellen. Auf Grund der Zusammenarbeit von Professor Shinohara und Toray kann die entwickelte Methode problemlos für die Massenerstellung genutzt werden und so bei einer hohen Ausbeute Herstellungskosten von 100 US-Dollar pro Kilogramm DWNTs ermöglichen.

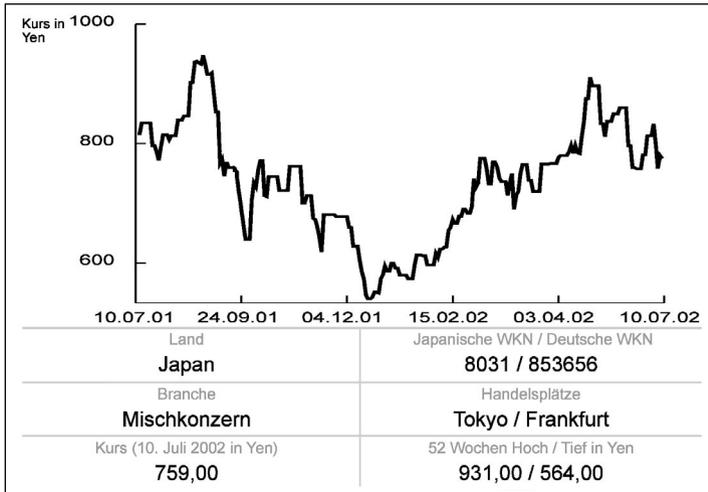
Die DWNTs verfügen über etliche Vorteile gegenüber den anderen Arten der Kohlenstoff-Nanotubes. Sie haben mit ein bis drei Nanometern einen geringen Durchmesser und sind sowohl stärker als auch haltbarer. Die innere Röhre behält ihre Eigenschaften auch bei, wenn die äußere Röhre modifiziert wird.

Toray beabsichtigt, die DWNTs in zwei Jahren zu kommerzialisieren. Erste Einsatzgebiete befinden sich im Bereich der Flachbildschirme. Fernsehbirldröhren und normale Computermonitore arbeiten mit Elektronen, die einen Phosphorbildschirm in einem kontrollierten Muster durchschlagen und so das Licht auf dem Bildschirm verursachen, das man als Fernsehbild sieht. In herkömmlichen Bildröhren werden diese Elektronen von einer einzelnen, rot glühenden Kathode an der Rückseite der Bildröhre emittiert. Der Abstand zum Bildschirm entspricht hierbei in etwa der Breite des Bildschirms. Dieser Abstand wird benötigt, um jedes Elektron von der Kathode genau zu jedem Punkt (oder »Pixel«) auf dem Bildschirm zu steuern. Eine solche Bildröhre ist daher groß und unhandlich. Wenn das Display genauso viele Kathoden wie Pixel haben könnte, dann könnte es extrem dünn sein. DWNTs können solche verteilten Kathoden sein. Wenn eine Spannung zwischen einem führenden Nanotube und einem flachen Phosphorbildschirm einige Millimeter vom freien Ende des Nanotubes angelegt wird, so ist das elektrische Feld am Ende des Nanotubes so groß, dass es die Elektronen aus dem Nanotube förmlich herauszieht. Diese »feld-

emittierten« Elektronen werden dann vom elektrischen Feld beschleunigt, durchschlagen den Bildschirm und bewirken so ein Leuchten des Phosphors. Diese neuartige Methode der Elektronenemission erfordert keine zusätzliche Hitze und liefert eine höhere Elektronendichte als die geheizten Kathoden, die bei gewöhnlichen Bildröhren verwendet werden. Nanotubes sind der wirksamste bekannte Feldemittent und verfügen über eine außerordentlich lange Lebensdauer. Eine Reihe von Elektrogeräteherstellern hat jetzt Prototypen für solche Displays entwickelt, die äußerst lichtstark sind, eine außerordentlich lange Lebensdauer haben und eine bessere Bildqualität liefern als die in den meisten Laptop-Computern verwendeten Flüssigkristallbildschirme.

Ein weiteres aussichtsreiches Anwendungsgebiet von DWNTs ist die Verwendung als Wasserstoffspeicher für Brennstoffzellen. Ein zentrales und bisher ungelöstes Problem auf dem Weg zu einer Wasserstofftechnologie ist die Speicherung des Gases im Fahrzeug. Bisherige Speichersysteme konnten die Anforderungen an Reichweite, Gewicht und Handhabbarkeit nicht erfüllen. Bislang wurde Wasserstoff, der für den Betrieb der Brennstoffzellen benötigt wird, in so genannten »Metallhydridspeichern« aufbewahrt. Diese Speicher enthalten teures Nickelmetall, und durch ihr hohes Eigengewicht kam es dabei zu einem ungünstigen Verhältnis vom Speicher zur speicherbaren Menge an Wasserstoff. Ein weiteres Problem war bislang, dass Wasserstoff in flüssiger Form gespeichert wird. Die Verflüssigung des Wasserstoffgases bei Temperaturen unter minus 252 Grad Celsius ist aufwendig, und die Speichertanks müssen zusätzlich mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden. Nanotubes haben in Laborexperimenten hohe Speicherfähigkeiten bei Normaldruck gezeigt und könnten so den alltagstauglichen Einsatz von Brennstoffzellen ermöglichen.

## Mitsui &amp; Co., Ltd.



Die japanische Unternehmensgruppe Mitsui & Co., Ltd. ist das größte und älteste japanische Handelsunternehmen und auf dem besten Weg, der erste Massenproduzent von Nanotubes zu werden. Das »Sogo Shosha«, wie universale Handelsunternehmen in Japan bezeichnet werden, verfügt über ein weltumspannendes Netz mit Büros in mehr als 90 Ländern und rund 880 Tochtergesellschaften und Joint Ventures. Mitsui konnte im Jahr 2001 mit mehr als 10.000 Mitarbeitern einen Umsatz von 13.048 Milliarden japanische Yen, umgerechnet mehr als 111 Milliarden Euro, verbuchen. Das Unternehmen und seine Tochtergesellschaften handeln mit den unterschiedlichsten Gütern, von Computer-Hardware über medizinische Ausrüstung bis hin zu Lebensmitteln und Textilien.

Das traditionsreiche Unternehmen kann auf eine Geschichte zurückblicken, die bis ins Jahr 1876 reicht. Mitsui hat in der Wirtschaftsgeschichte Japans eine wesentliche Rolle beim Aufbau von Handelsbeziehungen mit dem Ausland und der Investition in neue Industriebereiche gespielt. Das Unternehmen gilt als einer der Faktoren für den wirtschaftlichen Erfolg Japans im Ausland.

Auch auf dem Gebiet der Nanotechnologie engagiert sich Mitsui. Das Unternehmen begann im April 2002 mit den Bauarbeiten für eine Fabrik, die große Mengen an Kohlenstoff-Nanotubes herstellen soll.

Die in Akishima City/Tokyo unter Regie der hundertprozentigen Mitsui-Tochter »Carbon Nanotech Research Institute« (kurz »CNRI«) entstehende Fabrik soll im September 2002 mit der Testproduktion starten. Bei voller Auslastung soll die Fabrik 120 Tonnen Nanotubes pro Jahr produzieren. Bei den vom CNRI hergestellten Nanotubes wird es sich um Röhren mit mehreren Wänden, die so genannten multi-wall carbon nanotubes, oder kurz »MWCN«, mit einem Durchmesser von 20 Nanometern handeln. Weltweit laufen die Bemühungen auf Hochtouren, Nanotubes in großen Kapazitäten herzustellen. Mit seinen Plänen würde Mitsui das erste Unternehmen sein, das Nanotubes in Kapazitäten von mehreren Tonnen produziert.

Die Unternehmenstochter CNRI wurde im Juli 2001 gegründet, um für Mitsui auf dem Gebiet der nanotechnologischen Materialien aus Kohlenstoff Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Mit dem Unternehmensziel, eine neue nanotechnologische Industrie zu erschaffen, ist Mitsui das erste japanische Handelshaus, das ein eigenes Forschungsinstitut etabliert hat. CNRI arbeitet in gemeinsamen Forschungsprojekten mit Universitäten, anderen Forschungsorganisationen und Unternehmen in Japan sowie auf der ganzen Welt zusammen.

Mitsui plant, die MWCNs zu einem Preis von einem Zehntel der bisher von anderen Unternehmen veröffentlichten Nanotube-Preise verkaufen zu können. Durch einen niedrigen Preis würde sich den Nanotubes ein breites Spektrum von industriellen Anwendungen eröffnen. Wenn es gelingt, Nanotubes zu geringen Preisen auf den Markt zu bringen, würden sie durch ihre begehrten elektrischen und mechanischen Eigenschaften beispielsweise die Entwicklung von Hochleistungsplastik forcieren. Solche Plastikarten könnten beispielsweise für leichtere Automobile, elektronische Geräte und Brennstoffzellen eingesetzt werden. Wenn die Massenproduktion angelaufen ist, plant Mitsui Kooperationen mit Herstellern aus unterschiedlichen Branchen sowie das Lizenzieren von Ausrüstung und Know-how. Als Teil dieser Aktivitäten wird Mitsui die Entwicklung entsprechender Industrien vorantreiben und sich an kleinen und mittleren Unternehmen selbst beteiligen.

Durch die frühe Massenproduktion von MWCNs mit einem Durchmesser von 20 Nanometern kann Mitsui sich im Markt für Nanotubes positionieren und so eine Dominanz von Nanotubes mit einer Wand verhindern, die bislang noch nicht in großen Mengen produziert wer-

den können. Dem Unternehmen kann es durch die Massenproduktion der kostengünstigen Nanotubes gelingen, den nanotechnologischen Fortschritt in den nächsten Jahren der breiten Bevölkerung zugänglich zu machen.

## BASF AG



Bei der deutschen BASF AG handelt es sich um ein internationales Unternehmen der chemischen Industrie, das seinen Wert durch Wachstum und Innovation nachhaltig steigern will. Den Kunden bietet die BASF ein leistungsfähiges Sortiment, das hochveredelte Chemikalien, Kunststoffe, Farbstoffe und Pigmente, Dispersionen, Fahrzeug- und Industrielacke, Pflanzenschutzmittel sowie Feinchemikalien umfasst und bis zum Erdöl und Erdgas reicht. Die ausgeprägte Verbundstrategie ist eine besondere Stärke der BASF und sichert ihr Kostenführerschaft und somit langfristige Wettbewerbsvorteile. Mit einem Umsatz von rund 32,5 Milliarden Euro und über 90.000 Mitarbeitern im Geschäftsjahr 2001 ist die BASF eines der weltweit führenden Unternehmen der chemischen Industrie.

Nanotechnologie ist für sehr viele Arbeitsgebiete der BASF von Bedeutung. Eine große Rolle spielen Festkörper im Nanobereich bei der Entwicklung neuer Katalysatoren. Auch innovative Produkte wie etwa

die colorvariablen Pigmente verdanken ihre besonderen Eigenschaften Strukturen, die nur einige hundert Nanometer groß sind.

Ein weiteres Produkt, das die BASF in Form von Nanopartikeln vertreibt, ist das Betacarotin. Bei der Herstellung fällt diese Substanz normalerweise in Form tieferer Kristalle an, die nicht wasserlöslich und damit auch nicht bioverfügbar sind. Um das Betacarotin zum Beispiel als Farbstoff einsetzbar zu machen, produziert es die BASF als Nanopartikel. Dazu entwickelten Forscher des Unternehmens ein besonderes Verfahren: die Mikronisierung. Dabei wird das grobkristalline Rohmaterial zunächst bei hohen Drücken und Temperaturen in Alkohol gelöst und dann durch Zumischen einer wässrigen Schutzkolloidlösung als Nanopartikel in der gewünschten Größe ausgefällt.

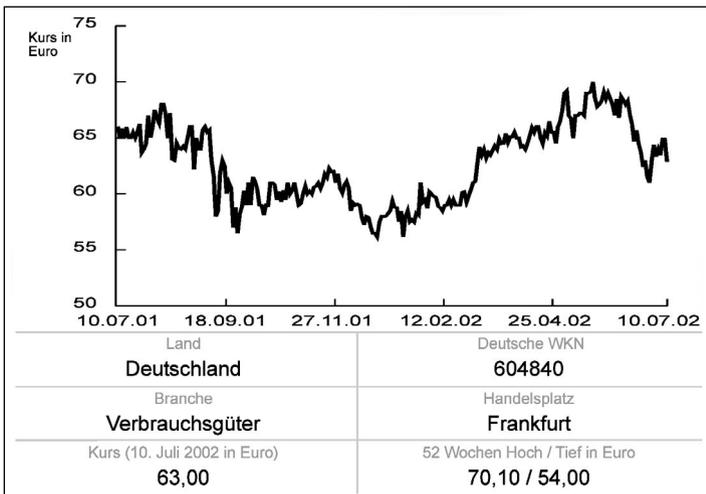
Ein weiterer Anwendungsbereich sind Autolacke auf Wasserbasis. Die darin enthaltenen organischen Farbpigmente werden im Nanobereich produziert, damit sie sich optimal in der wässrigen Phase verteilen. Darüber hinaus arbeiten Forscher der BASF Coatings AG in Münster zurzeit an extrem kratzfesten Lacken. Einer von drei Wegen, die derzeit erforscht werden, führt über Nanopartikel, welche die gleiche chemische Basis besitzen wie Glas. Sie verleihen dem Lack Härte und Kratzfestigkeit. Vor ihrem großtechnischen Einsatz in der Automobilserienproduktion sind aber noch viele Fragen zu klären: Zum einen müssen diese Partikel in großer Anzahl mit völlig identischer Struktur hergestellt werden, zum anderen muss ihre optimale Einbettung in den Lack ebenso sichergestellt sein wie eine lang anhaltende Stabilität.

Ein ganzes Gebiet der Chemie, das sich definitionsgemäß in der »Nanowelt« abspielt, sind die kolloidalen Systeme.

Derzeit erleben die Kolloidforschung und die eng mit ihr verknüpfte Grenzflächenforschung international eine Expansionsphase. Von den neuen Erkenntnissen profitiert vor allem die Forschung auf dem Gebiet der Effektstoffe, die einem System eine bestimmte Eigenschaft verleihen, ohne wie ein Wirk- oder Werkstoff direkt in Erscheinung zu treten. Bei diesem Effekt kann es sich um Farbigekeit von Anstrichfarben und Lacken, um Reißfestigkeit und Bedruckbarkeit von Papier, um Hydrophobierung und Nachfetten von Leder, um günstige Verarbeitungseigenschaften von Textilfasern, um Reinigungswirkung von Waschmitteln, um Viskositätsregulierung von Ölen und vieles andere handeln.

Die Aktivitäten der BASF zeigen, dass der nanotechnologische Fortschritt aus vielen Unternehmen nicht mehr wegzudenken ist. Die BASF richtet ihr Handeln am Leitbild der »nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung«, dem Sustainable Development, aus. Die Nanotechnologie unterstützt das Unternehmen auf diesem Weg.

## Henkel KGaA



Auch bei einem weiteren Mitglied des deutschen Aktienindex, der Henkel KGaA, handelt es sich um ein Unternehmen, das sich auf dem Gebiet der Nanotechnologie stark engagiert. Allerdings geht die Henkel KGaA zur Nutzung des Potenzials der Nanotechnologie einen anderen Weg. Sie betreibt seit August 2000 mit der Technischen Universität Darmstadt (TUD) sowie einer Gruppe von derzeit sechs Professoren verschiedener Hochschulen und unterschiedlicher Fachdisziplinen aus den Bereichen Chemie und Materialwissenschaft gemeinsam die Forschungsfirma SusTech GmbH & Co. KG, die ihren Sitz im Chemiegebäude der TUD auf der »Lichtwiese« hat. Der Name der Firma ist abgeleitet von »Sustainable Technologies«, Technologien zum nachhaltigen Wirtschaften.

Die TUD liefert gegen marktübliche Konditionen die analytische und sonstige Infrastruktur und stellt Laboratorien und technische Peripherie

zur Verfügung, ist an der GmbH beteiligt, Mitglied im Aufsichtsrat und wird, soweit möglich, SusTech innerhalb ihres Ausbildungsauftrags nutzen. Die Hochschullehrer leiten als Kommanditisten die Projekte der SusTech und bringen ihre chemischen Konzepte ein. Henkel stellt das Projektmanagement und die betriebswirtschaftliche Unterstützung sowie, zusammen mit dem BMBF, die Anlauffinanzierung für die ersten fünf Jahre in Höhe von etwa 12,5 Millionen Euro. Die Eigenständigkeit von SusTech wird durch den Verkauf von Ergebnissen an interessierte Unternehmen oder durch die selbständige Weiterentwicklung von Produkten über eigene Spin-off- oder Start-up-Unternehmen realisiert.

Unternehmensgegenstand ist die Forschung auf dem Gebiet chemischer Produkte, Systeme und Technologien unter besonderer Berücksichtigung von wirtschaftlicher Nachhaltigkeit und integriertem Umweltschutz. Zur Erreichung dieser Ziele fokussiert sich SusTech auf die Nutzung nanotechnologischer Materialkonzepte. Vorrangiges Ziel ist insbesondere die beschleunigte Umsetzung von Forschungsergebnissen in wirtschaftlich verwertbare Produkte und Verfahren. Zum Beispiel werden Verfahren der Biomineralisation bei der Herstellung körperverträglicher Funktionsmaterialien für die Medizin erforscht. Hier ist es gelungen, die Nanostrukturen von Knochen und Zähnen analog zu den Bildungsprozessen der Natur – also biomimetisch – im Labor nachzubilden. Mit Hilfe solcher Techniken sollen nun Verfahren entwickelt werden, die eine schnellere und bessere Heilung von Zahn- und Knochendefekten ermöglichen. Auch im Bereich der »schaltbaren« Materialien, deren Anwendungseigenschaften über elektromagnetische Impulse gezielt verändert werden können, wird intensiv geforscht. Derartige Materialien sollen die Basis einer neuen Generation »intelligenter« Oberflächenbeschichtungen und Klebstoffe bilden, z. B. sich auf Kommando »entklebende« Klebstoffe. Die Anwendungspotenziale gerade im Recycling, mit dem Ziel einer sortenreinen Verwertung, sind enorm. Weitere Projekte betreffen die kontrollierte Wirkstofffreisetzung und die Herstellung nanopartikulärer Systeme. Bei der Herstellung liegt der Fokus darauf, dass die Nanopartikel auch im Endprodukt verwertbar sind, sich also bis auf Primärpartikelgröße fein verteilen lassen.

Die Ressourcen sparende Nutzung von Wertstoffen in industriellen Prozessen zur Schonung von Mensch und Umwelt gewinnt zunehmend an Bedeutung. Hierfür bietet der Einsatz feinstteiliger Partikel wegen

ihrer höheren »Ergiebigkeit« und Leistungssteigerung (eine Folge der physikalischen Eigenschaften von Partikeln im Nanometerbereich) gegenüber größerem Material außerordentlich gute prinzipielle Voraussetzungen. Aus der Winzigkeit der Nanopartikel resultiert eine Reihe interessanter Eigenschaften: Sie sind hoch reaktiv, extrem mobil, haben eine große Oberfläche, sind gut formulierbar und weisen besondere optische, elektronische oder magnetische Eigenschaften auf. Zwar werden bereits seit Mitte der achtziger Jahre Nanopartikel in wissenschaftlichen Publikationen und Patenten beschrieben, bis heute können diese jedoch nur in Nischenanwendungen industriell verwertet werden, keinesfalls jedoch in Großanwendungen mit Umweltrelevanz. Bei SusTech findet diese Kombination von Breitenwirkung und Umweltrelevanz durch geeignete Schwerpunkte in einer völlig neuen Form der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule ihren Ausdruck. Die Nanotechnologie bildet für SusTech so die Grundlage zur Entwicklung von Produkten, Verfahren und Systemen zum nachhaltigen Wirtschaften.

## Masterflex AG



Ein weiteres Beispiel für börsennotierte Unternehmen, die durch nanotechnologisches Engagement ihre Produkteigenschaften innovativ erweitern, ist die Gelsenkirchener Masterflex AG. Das Mitglied des Aktienindex SDAX ist im Wachstumsmarkt der Hightech-Spezialkunststoffe für industrielle und medizinische Anwendungen tätig. Hier hat sich das Unternehmen als Spezialist für innovative Produkt- und Systemtechnologien international erfolgreich positioniert. Die Masterflex AG konzentriert sich insbesondere auf die Entwicklung und Verarbeitung des Werkstoffes Polyurethan. Seit ihrer Gründung im Jahre 1987 hat die Masterflex AG ein enormes Know-how über Polyurethan aufgebaut, vom Einsatz des Werkstoffes über die Entwicklung eigener Fertigungsverfahren auf selbst erstellten Anlagen bis hin zur Produktion und dem Vertrieb der Produkte. Schon frühzeitig erfolgte die Expansion ins Ausland. 1991 wurde die erste Auslandstochter in Frankreich gegründet. Heute produzieren und vertreiben fünf Tochtergesellschaften in Europa und den USA die Produkte des Unternehmens. Die Tätigkeiten des Unternehmens gliedern sich in drei Geschäftsbereiche. Im ersten Bereich, den Hightech-Schlauchsystemen, hat das Unternehmen weltweit neue Standards gesetzt. Heute ist Masterflex in diesem Bereich einer der führenden Anbieter, zahlreiche Patente unterstreichen die herausragende Stellung des Unternehmens. Im zweiten Geschäftsbereich, der Medizin-

technik, bietet die Masterflex AG Polyurethan als hochwertigen Werkstoff für kundenindividuelle Lösungen an. Krankenhäuser, Kliniken und Herzzentren nutzen Polyurethan-Produkte in den Bereichen Anästhesie, Kardiologie und Radiologie. Im dritten Geschäftsbereich, dem innovativen Verschleißschutz, leistet Masterflex ebenfalls Pionierarbeit. Als weltweit erster Hersteller bietet Masterflex patentierte Lösungen für Rohre und Rohrbögen bei pneumatischen Fördersystemen an. Rohre und Rohrbögen sind in pneumatischen Fördersystemen die Achillesferse, denn sie sind besonders verschleißanfällig. Im Vergleich zu traditionellen Methoden kann die Lebensdauer der Rohrsysteme damit um ein Vielfaches erhöht werden.

Polyurethan ist ein vielseitiger Werkstoff mit hohem Innovationspotenzial, da er eine interessante Eigenschaftskombination aus Elastizität, Widerstandsfähigkeit und Alterungsbeständigkeit bietet und erst am Anfang seiner Entwicklungsmöglichkeiten steht. In einem Umfeld, in dem andere Werkstoffe nicht eingesetzt werden können, erweist sich Polyurethan häufig als die ideale Lösung, je nach Bedarf lässt sich ein neues Eigenschaftsprofil formen. Experten sind sich einig, dass Polyurethan in vielen Industriebereichen zunehmend traditionelle Werkstoffe wie beispielsweise Stahl, Gummi und PVC substituieren wird, da deren Entwicklungspotenzial weitgehend ausgeschöpft ist. Die Masterflex AG hat in der Vergangenheit immer wieder neue Rezepturen entwickelt und damit verschiedenartige Polyurethan-Varianten für die Herstellung verschiedener Produkte für Industrie und Medizin geschaffen. So entstehen Polyurethan-Schläuche, die auf Wunsch besonders abriebfest, elektrisch leitfähig, schwer entflammbar oder resistent gegenüber Mikroben sind. Mit diesen Merkmalen sind die Masterflex-Produkte weltweit einmalig geworden.

Künftig will das Unternehmen auch mit Hilfe der Nanotechnologie verstärkt technische Akzente in der Modifikation des Polyurethans setzen. Die Masterflex AG sieht insbesondere in dem Einsatz der Nanotechnologie in der Oberflächenbearbeitung ein zusätzliches Entwicklungspotenzial für diesen multitalentierten Werkstoff. Oberflächen werden heute bereits so beschichtet, dass Wassertropfen abperlen und Schmutzpartikel mitnehmen. Dieser Effekt bietet interessante Perspektiven für die Weiterentwicklung und Veredelung des Werkstoffs Polyurethan. Immer neue Bausteine und Eigenschaftsprofile können mit Hilfe der Nanotech-

nologie entwickelt werden und das Anwendungsspektrum von Polyurethan grundsätzlich steigern. So sind beispielsweise Schläuche mit extrem glatter Polyurethan-Antihaftoberfläche denkbar. In der Medizin könnten Produkte entwickelt werden, die resistent gegen Bakterien sind. Nanotechnologie ermöglicht der Masterflex AG eine Verbesserung ihrer Produkte und eröffnet ihnen neue Einsatzgebiete.

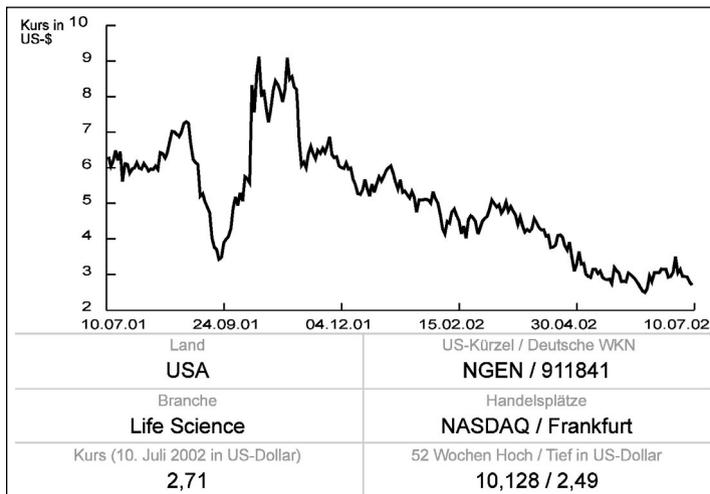
## > Nano Life Science & Health Care

Gerade im Bereich Life Science und Health Care ist die Nanotechnologie eigentlich nichts Neues. Schließlich kann man unter den Begriff Nanotechnologie die gesamte Biologie subsumieren, da jedes Lebewesen aus winzigen Zellen besteht, die in ihren Lebensvorgängen von Komponenten im Nanomaßstab beeinflusst werden. Dieser Umstand verdeutlicht eine klassische Abgrenzungsschwierigkeit. Auf dem Gebiet der Nanotechnologie verschwimmen die Grenzen zwischen Biologie, Physik und Chemie. Schon heute findet man im Tätigkeitsbereich vieler Biotech-Unternehmen nanotechnologische Anwendungen und Systeme, die noch nicht als solche kommuniziert werden. Durch interdisziplinäre Forschungsbemühungen entsteht aber aktuell unter dem Begriff »Nanobiotechnologie« ein neues Gebiet, das die Grenzen zwischen bisherigen Fachrichtungen und Branchen verschwinden lässt.

Die Einsatzgebiete der Nanotechnologie im Bereich Life Science sind vielfältig und entwickeln sich zügig. Mit Nanoteilchen als Marker lassen sich beispielsweise biologische Tests zum Nachweis bestimmter Substanzen oder ihrer Aktivität schneller, empfindlicher und vielseitiger gestalten. Nanopartikel können Medikamente im Körper auch gezielt dorthin transportieren, wo sie gebraucht werden. Dadurch lassen sich Nebenwirkungen verringern, die bei hochwirksamen Arzneimitteln oft auftreten. In Zukunft dürften künstliche Bausteine im Nanometerbereich die Reparatur von Geweben wie Haut, Knochen und Knorpeln vereinfachen. Sogar die Regeneration komplizierter innerer Organe könnte durch Nanopartikel unterstützt werden. Nanodimensionierte Geräte und Systeme können heutige Laborausrüstungen überflüssig machen und Proben schnell, platz- und zeitsparend analysieren. Der Nanotechnologie eröffnet sich im Bereich Life Science ein aussichtsreiches Betätigungsfeld.

&gt;&gt;

## Nanogen Inc.



Das amerikanische Unternehmen Nanogen Inc. ist ein Beispiel dafür, dass die Grenzen zwischen Nanotechnologie und Biotechnologie fließend sind. Nanogen wurde 1993 gegründet und verbindet die Mikroelektronik mit der Molekularbiologie. Das Unternehmen ist im Zukunftsmarkt der Biochips tätig. Während die Größe der von Nanogen hergestellten Chips definitiv nicht »nano« ist, sind die DNA-Moleküle, die sie bewegen, im Nanobereich. Biochips ermöglichen die Untersuchung von Proben mit biomolekularen Sonden, die sich auf einem Chip befinden. Nanogens vollautomatisches System, welches mit einem Halbleitermikrochip arbeitet, stellt ein flexibles Werkzeug für die schnelle Identifizierung und Analyse von Biomolekülen dar. Die Plattformtechnologie von Nanogen ist ein Analysewerkzeug mit möglichen kommerziellen Anwendungsgebieten im Bereich der ärztlichen Diagnose, der biomedizinischen Forschung, der Gentechnik, der Genanalyse sowie der Wirkstoffforschung bei Medikamenten. Die Biochips stehen dabei in Konkurrenz zu den bisherigen Laborausrüstungen, welche die gleichen Untersuchungen durchführen können. Biochips haben allerdings den Vorteil einer erhöhten Wirksamkeit; die Analyseergebnisse sind schon nach wenigen Stunden verfügbar. Ergebnisse von Analysen mit bisherigen Laborsystemen waren erst nach Tagen erhältlich. Ein weiterer Vorteil der Miniaturisierung ist zudem, dass weniger Platz für die Analyse und darüber hin-

aus auch weniger Material der Proben benötigt wird. Dies stellt einen Vorteil dar, aus dem beträchtliche Kosteneinsparungen resultieren. Durch die Nutzung von Mikroelektronik ermöglicht das System von Nanogen die aktive Bewegung und Konzentration von geladenen Molekülen zu und von bestimmten Mikropositionen oder Teststandorten auf dem Halbleitermikrochip.

Nanogen ist davon überzeugt, dass die Plattformtechnologie ein System darstellt, welches zu niedrigen Kosten hocheffiziente und vielseitige Anwendungsmöglichkeiten liefert und dadurch die Analysemöglichkeiten im Bereich Health Care bedeutend verbessert.

Das Ziel des Unternehmens ist es, seine Technologie als die Norm für molekulare Identifikation und Analyse zu etablieren. Als Schlüsselement der Unternehmensstrategie gilt die Entwicklung von Forschungs- und Gentechnikanwendungen.

Nanogen versucht, durch eine offene Plattformtechnologie den Endnutzern eine individuelle Anpassung der Mikrochips zu ermöglichen, um ihren jeweiligen Forschungsbedarf zu decken. Diese Möglichkeit für Endnutzer, sich einen »eigenen Biochip« herzustellen, kommt laut Nanogen dem Bedürfnis der Benutzer entgegen, schnell auf unvorhergesehene und geschäftlich attraktive Anwendungsmöglichkeiten zu reagieren und diese eigenständig zu entwickeln. Die Flexibilität des Systems ist Nanogens Vorteil gegenüber anderen Systemen, die oft nach Auftrag angefertigt werden müssen und dadurch neben Wartezeiten auch höhere Kosten verursachen. Nanogens Vorteil ist die Verwendung eines Halbleitermikrochips, welcher ohne Voreinstellungen auf einer auswechselbaren Cartridge angebracht wird. Mit Hilfe des Nanogen-Systems wird nun die gesuchte genetische Information entworfen und am Chip angebracht. Danach erfolgt die elektronische Adressierung des Chips gemäß den Vorgaben des Nutzers. Im nächsten Schritt werden die Proben auf den Chip gegeben, die Testvorgänge gestartet und das Lesegerät nimmt eine Auswertung der Ergebnisse vor. Die individuelle Konfiguration der Testanordnung nach eigenen Wünschen und die damit verbundene Möglichkeit, mehrere Tests über eine Testanordnung abzuarbeiten, reduzieren so nicht nur Kosten, sondern sorgen auch für erhebliche Zeiteinsparungen.

Nanogen beabsichtigt, kommerzielle Anwendungsgebiete für seine Technologie im Markt der Diagnose von Infektionskrankheiten zu ent-

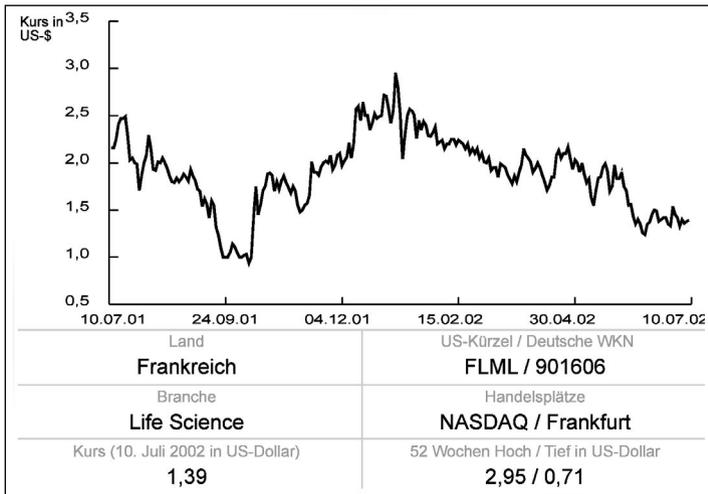
wickeln. Hier profitiert das Unternehmen von der wachsenden Verfügbarkeit von genetischen Informationen und deren Beziehung zu menschlichen Krankheiten. Das System von Nanogen kann so in der medizinischen Anwendung Krankheiten schneller und genauer diagnostizieren, den Verlauf der Therapie überwachen und genetische Risikofaktoren abklären. Nanogen beabsichtigt auch das Fremdfinanzieren seiner Technologie durch eine Nutzung der aktuell schnellen Entwicklung auf den Gebieten der Genanalyse sowie der Wirkstoffentdeckung bei Medikamenten. Bei Transplantationen kann das System zum Test von Abwehrreaktionen eingesetzt werden, selbst im Bereich der Kriminalistik existiert durch den »genetischen Fingerabdruck« ein weiteres Einsatzgebiet.

Als konstante Einnahmequelle erhofft sich das Unternehmen auch die Erlöse aus dem Verkauf von so genannten Cartridges, die für die Analyse benötigt und nach der Nutzung weggeworfen werden. Auf diesen Cartridges wird für die Dauer der Untersuchung der Halbleiterchip angebracht. Ein andauernder Bedarf an diesen Cartridges würde durch eine Marktdurchdringung des Analysesystems von Nanogen gefördert.

Weitere, bisher nicht erschlossene Anwendungsgebiete der Technologie befinden sich auf dem Gebiet der forensischen und pränatalen Genetik. Neben der Humanmedizin erstrecken sich für die Analysesysteme auch Anwendungsmöglichkeiten beispielsweise auf die Veterinärmedizin und die Lebensmittelanalyse.

Nanogen beabsichtigt, durch eine Reihe von Kooperationen mit diversen Unternehmen die Anwendungsgebiete seines Systems auszuweiten und die Kommerzialisierung seiner Produkte zu beschleunigen. Das Unternehmen arbeitet unter anderem mit der japanischen Hitachi zusammen; zu seinen Kunden kann Nanogen Unternehmen wie Aventis zählen. Aktuell besitzt Nanogen 40 Patente in den USA und 22 im Ausland, die dem Unternehmen eine Sicherung des firmeneigenen Know-hows gegenüber der Konkurrenz ermöglichen.

## Flamel Technologies



Die französische Flamel Technologies ist ein biopharmazeutisches Unternehmen mit nanotechnologischem Potenzial. Flamel wurde 1990 gegründet und wird seit seinem Börsengang im Juni 1996 an der NASDAQ gehandelt. Das Unternehmen hat neben dem Firmensitz in Venissieux nahe Lyon eine Produktionsstätte im französischen Pessac und seit 2000 ein Büro in Washington D. C. in den Vereinigten Staaten. An seinen drei Standorten verfügt Flamel über insgesamt 130 Mitarbeiter und erwirtschaftete im Jahr 2001 einen Umsatz von 13,9 Millionen US-Dollar.

Das Unternehmen entwickelt zwei auf Polymeren basierende, universell anwendbare Plattformtechnologien zum Transport von Arzneimitteln im Körper. Diese »Drug Delivery« genannten Systeme können Medikamente im Körper genau dort wirken lassen, wo sie gebraucht werden. Das von Flamel entwickelte Transportsystem »Medusa«, eine Nanokapsel-Technologie, kann therapeutisch wirksame Proteine und Peptide kontrolliert in den Körper des Patienten einschleusen, ohne sie dabei zu zerstören oder zu denaturieren. Die von Flamel entwickelte »Micropump«-Technologie ermöglicht die Verabreichung von kleinen therapeutisch wirksamen Molekülen, wobei die Micropump-Technologie eine kontrollierte Freigabe des Wirkstoffes an seinem Einsatzort im Körper ermöglicht. Während Medusa mit Nanopartikeln arbeitet, nutzt Micropump im Vergleich dazu größere Mikropartikel.

»Drug Delivery« ist das Gebiet der Pharmaindustrie, welches sich mit dem Transport und der gezielten Freigabe von therapeutischen Wirkstoffen im Körper beschäftigt.

Das Problem bei den herkömmlichen Methoden zur Verabreichung von Medikamenten (Schlucken, Einreiben, Spritzen etc.) besteht zum einen darin, dass die Wirkstoffe oft im ganzen Körper verteilt werden und so nicht nur dort wirken, wo sie es eigentlich sollen. Ein weiteres Problem der herkömmlichen Verabreichungsmethoden ist der Umstand, dass moderne Arzneimittel, die Proteine oder Peptide enthalten, nicht in Tabletten oder Kapselform oral verabreicht werden können. Die großen Moleküle werden meist im Darm verdaut. Überwinden einige dennoch die Darmwand und gelangen ins Blut, so wirkt die Leber als eine zweite Barriere. Eine Alternative eröffnen Drug-Delivery-Systeme, die einen neuen Weg zur Verabreichung von Medikamenten darstellen. Durch eine Verpackung des Wirkstoffes kann nicht nur der Weg des Arzneimittels in den Körper variiert werden, Wirkstoffe können so auch gezielter oder über einen bestimmten Zeitraum im Körper zur Verfügung stehen.

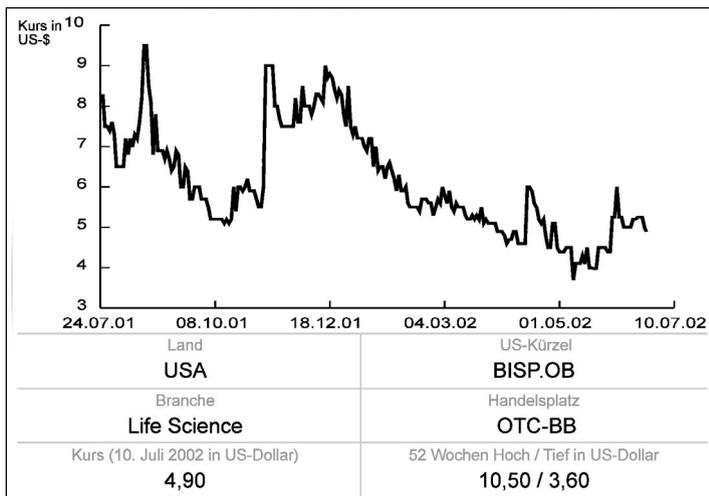
Das Transportsystem Medusa nutzt einen neuartigen Nanokapselprozess in Verbindung mit einem darauf abgestimmten Polyamino-säuren-Biopolymer. Flamel entwickelte ein Polyamino-säure-Polymer, welches einem Protein ähnelt und aus nur zwei verschiedenen Amino-säuren besteht. Dieses Polyamino-säure-Polymer ist in der Lage, in Wasser spontan Nanopartikel zu bilden. Diese Nanopartikel besitzen die Fähigkeit, Proteine einzuschließen. Dieser Effekt tritt ohne die Zugabe von Lösungsmitteln oder Tensiden auf. Spezielle therapeutische Proteine und Peptide können so in Nanopartikeln eingekapselt werden, ohne die zu transportierenden Moleküle dabei zu denaturieren. Die Medusa-Technologie hat verschiedene Vorteile: Die Proteine bleiben therapeutisch wirksam, sie können kontrolliert freigesetzt werden, und die Technologie ist insgesamt von einzigartiger Einfachheit.

Die erste Anwendung von Medusa ist der Transport und die Freisetzung eines lang anhaltenden Insulinpräparats für Diabetiker, welches in Zusammenarbeit mit dem dänischen Pharmakonzern Novo Nordisk in einer ersten klinischen Studie erfolgreich getestet wurde, weitere Anwendungsgebiete befinden sich in der vorklinischen Entwicklungsphase.

Neben Medusa und dem mit Mikropartikeln arbeitenden Micro-

pump-System nutzt Flamel seine Kenntnisse auf dem Gebiet der Polymere für eine Reihe weiterer Anwendungen. Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit des Unternehmens für Medusa in Kooperation mit anderen Pharmaunternehmen erlauben Flamel Technologies einen positiven Blick in die Zukunft, zumal der Markt für den Transport von therapeutischen Proteinen mit dem biotechnologischen Fortschritt wächst. Schon heute gilt die Disziplin der Erforschung von Proteinen, die so genannte »Proteomics« als Zukunftsmarkt im Life-Science-Sektor. Mit Medusa verfügt Flamel über eine aussichtsreiche Transporttechnologie, um in diesem Zukunftsmarkt mitzuverdienen.

### BioSante Pharmaceuticals Inc.



Auch dem jungen amerikanischen Pharmaunternehmen BioSante Pharmaceuticals könnte die Nanotechnologie zu zusätzlichem Kurspotenzial verhelfen. BioSante verfügt über eine solide Produktpipeline mit Hormonersatzprodukten zur Behandlung von Testosteronmangel bei Männern und Östrogenmangel bei Frauen. Zusätzlich entwickelt BioSante eine auf Nanopartikeln basierende Plattformtechnologie für neuartige Impfstoffe und Drug-Delivery-Systeme.

Der Grundbaustein dieser Technologie ist Calciumphosphat (im Englischen kurz »CAP« genannt) in Form von Nanopartikeln. Diese

Nanopartikel haben erfolgreich Tests bestanden, die ihre Harmlosigkeit im Körper belegen. Calciumphosphat ähnelt von seiner chemischen Natur her dem Material, aus dem unsere Knochen aufgebaut sind, und ist so im Gegensatz zu anderen Nanopartikeln im Körper fast natürlich. Die Grundlagenforschung für die Technologie wurde von der University of California School of Medicine geleistet und zielte prinzipiell darauf, extrem kleine, feste, gleichförmige Partikel als Komponenten zur Steigerung der Stabilität von Medikamenten und als Drug-Delivery-Systeme zu nutzen. Diese ultrafeinen Partikel wurden hergestellt aus trägen, biologisch geeigneten Materialien wie Keramik, kristallinem Kohlenstoff oder biologisch abbaubarem Calciumphosphat, jeweils mit Partikelgrößen im Nanometerbereich. Die Nanopartikel werden als Grundlage eines Transportsystems genutzt, unter Anwendung einer Schicht eines bindenden Anstrichs aus Cellobiose (dem Grundbaustein der Cellulose) oder einem anderen Kohlenhydratderivat. Die entscheidende Eigenschaft dieser beschichteten Nanopartikel ist, dass biologisch aktive Moleküle, Proteine, Peptide oder beispielsweise Inhaltsstoffe von Impfstoffen wie bakterielle oder virale Antikörper oder Proteine wie Insulin, wenn man sie an die Nanopartikel bindet, ihre Aktivität bewahren und so vor natürlichen Veränderungen an ihrer molekularen Struktur geschützt werden können, die bei ungünstigen Umgebungsbedingungen auftreten. In Studien konnte BioSante bereits nachweisen, dass die Substanzen in Kombinationen mit Nanopartikeln eine höhere biologische Aktivität aufwiesen als die Injektion der Moleküle allein in einer Lösung. Eine stärkere Immunreaktion bei Kombination von Wirkstoff und Nanopartikeln ist die Schaffung von mehr Antikörper-Molekülen, die dann dem Eindringen eines Virus oder einer Bakterie entgegenwirken können. Ferner kann ein Medikament im Organismus nur dann wirken, wenn es an bestimmten Rezeptoren auf der Oberfläche von Zielzellen (beispielsweise Tumorzellen) andocken kann.

Die Technologieplattform von BioSante verfügt über einige Vorteile: Die Nanopartikel als Träger des Wirkstoffes sind im Körper biologisch abbaubar und ungiftig. Durch natürliche Prozesse im Körper können die Nanopartikel so zerfallen, dass sie in ihrer Verwendung als sicher und absolut ungefährlich anzusehen sind. Darüber hinaus sind sie schnell, leicht und preisgünstig herzustellen und verfügen so über Eigenschaften in der Herstellung, durch die Kosten bei BioSante gering

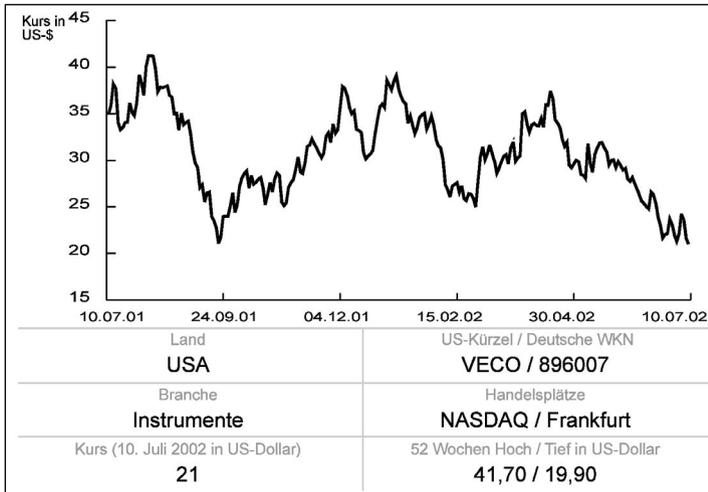
und Gewinnspannen attraktiv bleiben. Durch die Größe der Partikel im Nanometerbereich ist die Technologie von BioSante ideal geeignet, um Medikamente durch Aerosolsprühnebel oder Inhalation anstelle schmerzhafter Spritzen zu transportieren. BioSante plant die Entwicklung einer Reihe kommerzieller Anwendungen auf Basis ihrer Nanopartikel-Technologie, darunter die Entwicklung eines Impfstoffes zur Behandlung oder Vorsorge gegen Herpes-Viren und eine Methode, um therapeutische Proteine wie beispielsweise Insulin durch Inhalation zu verabreichen. Das Forschungsteam von BioSante arbeitet im Labor in Smyrna (Georgia, USA) an der Weiterentwicklung der Nanopartikel-Plattformtechnologie für weitere Anwendungsmöglichkeiten.

## > Nanoausrüster

Erst seit den achtziger Jahren existieren Instrumente, die es erlauben, nanodimensionierte Objekte zu betrachten und kontrolliert zu manipulieren. Parallel zur Entwicklung der Instrumente schafften die immer leistungsfähigeren Computer die Möglichkeit, das Verhalten von Materialien im Nanometerbereich zu simulieren. Verschiedene Anbieter ermöglichen heute mit ihren Instrumenten das Vordringen in den Nanokosmos und schaffen durch ihre Werkzeuge die Grundlage für die Erforschung nanotechnologischer Materialien und Systeme. Wie bei anderen neu entstehenden Technologien profitieren auch im Bereich Nanotechnologie zunächst die Ausrüster vom Bedarf der Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen an Werkzeugen und Instrumenten für den Nanokosmos. Im Bereich Nanotechnologie handelt es sich dabei in erster Linie um Instrumente zur Visualisierung und Messung von nanodimensionierten Objekten. Neuartige Systeme werden fortlaufend entwickelt und verhelfen den Nanowissenschaftlern zu immer neuen Erkenntnissen und Möglichkeiten. Auch in Zukunft werden innovative Produkte der Ausrüster die Nanotechnologie entscheidend voranbringen.

&gt;&gt;

## Veeco Instruments Inc.



Der führende Ausrüster im Wachstumsmarkt Nanotechnologie ist die amerikanische Veeco Instruments Inc. mit ihrem Hauptsitz in Woodbury (New York State). Die auf dem Gebiet der Nanotechnologie führenden Unternehmensbereiche der Veeco Group sind nur ein Teil des Konzerns, der sich auf die Ausrüstung der IT-Industrie spezialisiert hat.

Die Geschichte des Unternehmens geht zurück bis ins Jahr 1945, als zwei Wissenschaftler des Manhattan-Projekts Veeco gründeten. Der Firmenname Veeco steht für »Vacuum Electronic Equipment Company«. In den Sechzigern fusionierte Veeco mit Lambda, einem Hersteller von Stromversorgungsanlagen. In den späten Achtzigern kaufte die britische Unitech das Unternehmen von Lambda. Im Jahre 1990 wurde Veeco von Edward H. Braun und einer Reihe weiterer Mitarbeiter in einem Management-Buy-out von Unitech gekauft. Das Unternehmen nannte sich wieder Veeco Instruments und vollzog 1994 den Börsengang an die amerikanische NASDAQ. Seit dem Management-Buy-out und dem Börsengang formierte sich Veeco zu einem Ausrüster der IT-Industrie mit einem großen internen Wachstum und zahlreichen strategischen Akquisitionen. Heute entwickelt, fertigt, vertreibt und betreut die Veeco-Gruppe eine breite Auswahl von Geräten, die von Herstellern in den Bereichen optische Telekommunikation, Daten-

speicherung und im Halbleitersektor eingesetzt wird. Die Prozess- und Messgeräte von Veeco werden von namhaften Kunden aus der IT-Branche wie IBM, Seagate, Lucent Technology und Nortel Networks zur Herstellung einer ganzen Reihe von Hightech-Produkten verwendet, die Messgeräte von Veeco nutzen Wissenschaftler und Forscher weltweit. Mit etwa 1.500 Mitarbeitern an zwanzig strategischen Standorten ist die Veeco-Gruppe weltweit vertreten und konnte im Jahr 2001 einen Umsatz von 449,3 Millionen US-Dollar erwirtschaften, 19 Prozent mehr als im Vorjahr.

Ende Mai 1998 fusionierte Veeco mit der Digital Instruments Inc., einem der führenden Hersteller von Rastersonden- und Kraftmikroskopen. Mit den Unternehmenssparten Digital Instruments für Mikroskope und der Veeco Metrology Group für Messgeräte ist Veeco Ausrüster Nummer eins in der Nanotech-Community.

Die Unternehmenssparte »Digital Instruments« ist der Weltmarktführer auf dem Gebiet der Rastersondenmikroskope. Das heutige Unternehmen der Veeco-Gruppe wurde 1987 von zwei Wissenschaftlern mit dem Ziel gegründet, die Möglichkeiten der Rastersondenmikroskopie für Wissenschaftler und Ingenieure auf einfache Weise verfügbar zu machen. Sie entwickelten 1987 das erste kommerziell erfolgreiche Rastertunnelmikroskop und konnten es unter dem Markennamen »NanoScope« noch im selben Jahr ausliefern. Die von Digital Instruments hergestellten und vertriebenen NanoScopes sind mittlerweile das Handwerkzeug fast aller auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätigen Unternehmen und Universitäten und ermöglichen Wissenschaftlern weltweit die Erkundung von nanoskaligen Merkmalen und Strukturen.

Digital Instruments konnte bis heute mehr NanoScope-Rastersondenmikroskope verkaufen, als die gesamte Konkurrenz.

Seit der Produktion der ersten Instrumente im Jahr 1987 eröffnet die Rastersondenmikroskopie Wissenschaftlern eine neue Welt mit beispiellosen Anwendungsmöglichkeiten. Die dreidimensionalen Abbildungen befähigen Wissenschaftler, Atome, Moleküle und andere nanoskalige Merkmale mit ausgezeichneter Genauigkeit zu sehen und zu messen. Dies kann unter normalen Umgebungsbedingungen, in Flüssigkeiten und bei nur minimaler Vorbereitung der Probe geschehen. Zusätzlich verfügen die Geräte von Digital Instruments über die Fähigkeit, magnetische, elektronische oder andere Oberflächenkräfte

abzubilden und zu messen sowie elektrochemische Interaktionen zu generieren oder zu messen.

Im Jahr 1989 führte Digital Instruments das erste Kraftmikroskop ein und eröffnete der Technologie weitere Einsatzgebiete für Anwendungen mit nichtleitfähigen Materialien. Die Vielseitigkeit der Kraftmikroskope macht sie zu einem der Schlüsselwerkzeuge der Nanotechnologie. Kraftmikroskope haben Forschern unter anderem zu eingehenden Untersuchungen von Polymeroberflächen verholfen. Sie erlauben die hochauflösende Betrachtung von biologischen Proben in ihrer natürlichen, flüssigen Umgebung wie lebenden Zellen, Chromosomen und DNA. Sie werden in der Mikromechanik, bei extrem dünnen Oberflächen und in der Optik angewandt. Kraftmikroskope halfen, elektrochemische Reaktionen zu definieren, welche schwierig zu untersuchen und zu quantifizieren sind. Viele nanotechnologische Anwendungen wurden erst durch Kraftmikroskope ermöglicht.

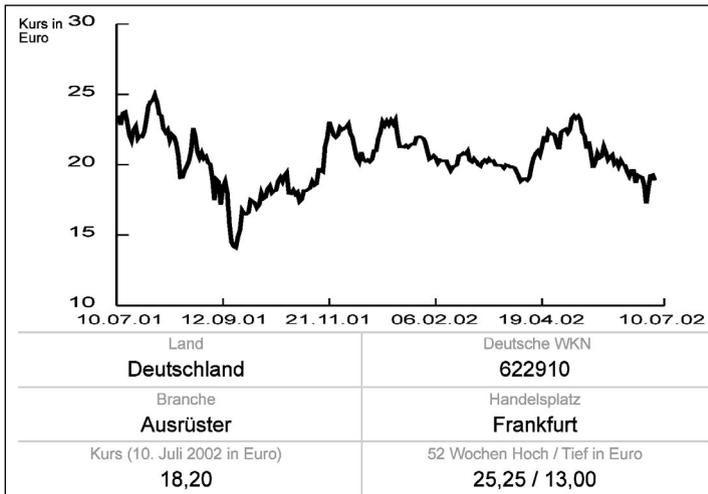
Neben Digital Instruments ist die Unternehmenssparte »Veeco Metrology Group« als führender Anbieter von 3-D-Oberflächenmessgeräten das zweite nanotechnologische Standbein des Unternehmens. Mit einer einzigartigen Produktvielfalt bietet die Veeco Metrology Group mehr 3-D-Messgeräte mit unterschiedlichen Messtechnologien für eine größere Anzahl von Anwendungen an als jedes andere Unternehmen der Welt. Von der immer schneller und kleiner werdenden Welt der Mikroelektronik bis zu den spannendsten Herausforderungen der heutigen Forschung in den Gebieten der Biomedizin und Materialwissenschaften versorgt die Veeco Metrology Group die verschiedenen Branchen mit hochleistenden Mess- und Visualisierungswerkzeugen.

Die Forschung und Produktion heutiger Hightech-Komponenten benötigen die Messgeräte der Metrology Group zur klaren und eindeutigen Bestimmung von Makro- und Submikron-Merkmalen und Prozessen. Wissenschaftlern wird so ein klares Verständnis biologischer Strukturen und Funktionen, elektrochemischer Reaktionen und Oberflächenmerkmale ermöglicht. Die Mess- und Visualisierungstechnologien der Veeco Metrology Group bilden auch die Basis für automatische Produktionsabläufe bei der Herstellung von Datenspeichern, Halbleitern und anderen Anwendungen. Von der Messung von Disketten und Wafern bis zur automatisierten Vermessung von

Halbleitereigenschaften mit dem Kraftmikroskop versorgt Veeco die IT-Industrie mit den notwendigen Werkzeugen von der Grundlagenforschung bis zur Kontrolle des Endprodukts. Doch Datenspeichersysteme und Halbleitertechnologien sind nur zwei Beispiele für die anhaltende Mikrominiaturisierung und die damit verbundene Verfeinerung von Herstellungsprozessen der heutigen Weltwirtschaft. Die Zukunft wird noch weitaus kleiner, und Veeco ist mit seinen Produkten für diese Entwicklung bestens gerüstet. Wissenschaftliche und industrielle Anwendungen auf dem Gebiet der Polymere, der Optik, der Biomedizin, der neuartigen Materialien, Metalle, Farben und Coatings sowie der Elektrochemie bedürfen mehr und mehr der Fähigkeit, mit ultrahoher Auflösung ihre Morphologie, Struktur und Funktion zu bestimmen. Die nanoskalige Auflösung ist eine der neuen Anforderungen an wissenschaftliche und industrielle Messwerkzeuge. Die Veeco Metrology Group ist diesen Anforderungen bereits mehr als gewachsen. Die Kraftmikroskope, Sondenmikroskope und optischen Messsysteme sind bereits jetzt die Grundlage wissenschaftlicher und industrieller Anwendungen für Forschung und Entwicklung, Herstellung, Qualitätskontrolle und Fehleranalyse.

»Veeco wird als der führende Player der Nanotechnologie angesehen«, bringt es Debra Wasser, Vizepräsidentin der Investor-Relations bei Veeco auf den Punkt. »Praktisch jede weltweit auf dem Gebiet der Nanowissenschaften oder der Nanotechnologie tätige Universität und Gesellschaft besitzt ein Veeco-Kraftmikroskop.«

## Jenoptik AG



Auch die aus Jena stammende Jenoptik AG engagiert sich stark auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Die Jenoptik AG ist im Jahr 1991 aus der Jenoptik Carl Zeiss Jena GmbH hervorgegangen. Seit Juni 1998 ist das Unternehmen an der Börse in Frankfurt notiert und wird im MDAX geführt. Der Technologiekonzern erzielte im Geschäftsjahr 2000 einen Umsatz von mehr als 1,57 Milliarden Euro. Der Jahresüberschuss betrug 86,6 Millionen Euro. Das Unternehmen ist in über 20 Ländern präsent und hat weltweit über 6.000 Mitarbeiter.

Die heutige Jenoptik AG teilt sich in die drei Geschäftsbereiche Clean Systems Technologies, Photonics Technologies und Asset Management auf. Im Geschäftsbereich Photonics Technologies werden, bezogen auf den Einsatz von optischen Technologien und für optische Applikationen, Nanotechnologien entwickelt und genutzt. Die Unternehmen der Photonics-Gruppe zählen zu den Technologieführern in den Bereichen Lasersysteme, Elektrooptik und Elektromechanik. Der Unternehmensbereich Photonics liefert im Geschäftsfeld Elektro-Optik präzisionsoptische Komponenten sowie optische und Lasersensoren zum präzisen Messen, Analysieren, Strukturieren und Bearbeiten auf der Basis von Licht. Außerdem werden branchenspezifische Systeme für industrielle Handling- und Montageprozesse und für automatisierte Laseranwendungen entwickelt und gefertigt. Zur Produktpalette zählen darüber

hinaus Hochleistungsdiodenlaser, hochauflösende Mess- und Spezialobjekte sowie CCD-Kameras für die professionelle Digitalfotografie. Die Komponenten werden weiterentwickelt zu Mess- und Prüfsystemen sowie lasergestützten Entfernung- und Geschwindigkeitsmessgeräten. Zu den Produkten des Geschäftsfelds Elektromechanische Systeme zählen elektrische Antriebs-, Stabilisierungs- und Stromversorgungssysteme für Flugzeuge, Schiffe, Panzerfahrzeuge und Züge. Auf dem Gebiet der Nanotechnologie sind in der Photonics-Gruppe vorrangig die Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH (eine hundertprozentige Tochter der Jenoptik AG) und ihre Tochterunternehmen aktiv. Die nanotechnologischen Hauptaktivitäten konzentrieren sich hier auf den Bereich der Optik.

Die Jenoptik AG arbeitet mit vier der sechs deutschen Kompetenzzentren zusammen.

So werden auf dem Gebiet der Nanoanalytik verschiedene nanoanalytische Verfahren, wie die Elektronenmikroskopie, oberflächenanalytische Techniken, im Wesentlichen als interne Metrologietools für die Entwicklung und die Charakterisierung von Nanostrukturen in der Jenoptik eingesetzt. Darüber hinaus werden Interferometerobjektive produziert, die interferometrische Messgenauigkeiten bis in den Nanometerbereich zulassen.

Neben der klassischen refraktiven und reflektiven Optik werden in modernen optischen Applikationen immer mehr diffraktive, mikrooptische und binäre optische Elemente eingesetzt. Für die Herstellung derartiger Komponenten oder zumindest der Urformen werden lithographische Prozesse genutzt (optische und Elektronenstrahlolithographie). Für Massenanwendungen können von den Urformen über Replikationstechniken, wie Prägen, Gießen oder Spritzgießen, kostengünstige Komponenten abgeformt werden. Die Anwendungen reichen von anspruchsvollen Komponenten wie computergenerierten Hologrammen zur nanometergenauen Messung von asphärischen, zylindrischen und Freiformflächen, Teststrukturen für Messsysteme zur nanometergenauen Positionierung von beispielsweise Wafer-tischen, diffraktiven Komponenten für die Informationstechnologie und Telekommunikation und geprägten Hologrammen zum Fälschungsschutz. Während im Geschäftsbereich Optik der Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH hochwertige binäre Optiken für optische Messaufgaben ent-

wickelt und produziert werden, stellt die Jenoptik Mikrotechnik GmbH Ausrüstungen zum Heißprägen lateraler Nanostrukturen her.

Durch den Einsatz immer kürzerer Arbeitswellenlängen in der optischen Lithographie für die Herstellung von Halbleiterbauelementen wachsen die Präzisionsanforderungen an die optischen Komponenten dramatisch und erreichen Nanometergenauigkeiten. Der Bereich Optik entwickelt und fertigt erfolgreich entsprechende optische Hochleistungskomponenten und Systeme für die Lithographie, aber auch für die Mikromaterialbearbeitung, beispielsweise Objektive zur Mikrostrukturierung durch Excimerlaserablation.

Optisch wirksame Funktionsschichten sind als so genannte Vergütungen optischer Funktionsflächen wie beispielsweise Entspiegelungen, spektral breitbandige Verspiegelungen, aber auch als eigenständige interferenzoptische Bauelemente wie beispielsweise Hochleistungslaserspiegel oder Interferenzfilter aus der modernen Optik nicht wegzudenken.

## Lambda Physik AG



Das NEMAX-50-Unternehmen aus Göttingen wurde bereits im Jahre 1971 als Spin-off im Rahmen eines Forschungsprojektes des Max-Planck-Institutes gegründet. Lambda Physik ist eine Tochtergesellschaft des amerikanischen Lasergiganten Coherent, Inc. und zählt zu den welt-

weit führenden Anbietern von gepulsten UV-Lasern für eine breite Palette von Anwendungen wie Lithographie, Industrie, Medizin und Wissenschaft. Die kurze Wellenlänge dieser im ultravioletten Spektralbereich emittierenden Laser ermöglicht es, extrem kleine Strukturen im Nanometerbereich mit einer Präzision herzustellen, die dem neuesten Stand der Technik entspricht. Obgleich die Laser von Lambda Physik in vielen Anwendungsbereichen einsetzbar sind, konzentriert sich Lambda Physik auf wachstumsstarke Branchen, in denen UV-Laser als Schlüsseltechnologie zum Erreichen kleinster Strukturen eingesetzt werden. Die Lithographie weist in der Wertschöpfungskette der Halbleiterindustrie das höchste Wachstum auf. Lambda Physik ist der Markteintritt in der Lithographie mit der neuen Generation von Excimerlasern im Bereich der Wellenlänge von 248 Nanometern gelungen. Bei Lasern der nachfolgenden Generation in den Wellenlängenbereichen 193 und 157 Nanometer hat Lambda Physik bereits zahlreiche Laser zur Evaluierung geliefert und sich eine gute technologische Grundlage für weiteres Wachstum geschaffen.

Die wichtigsten Teilmärkte für industrielle Anwendungen der Laser von Lambda Physik sind die Produktion von Flachbildschirmen für Laptops, GPS-Systeme und Handys sowie die Herstellung von Tintenstrahldruckköpfen für Tintenstrahldrucker. Lambda hat mit seinen Lasern in diesen Anwendungsbereichen eine führende Marktstellung und besitzt nach eigenen Schätzungen einen Marktanteil von mehr als 80 Prozent im Bereich der Tintenstrahldruckköpfe sowie von mehr als 90 Prozent im Bereich der Flachbildschirme. Starkes Wachstum wird auch dem Markt für optische Komponenten in der Telekommunikation vorausgesagt. Lambda Physik gehört zu den führenden Anbietern von Lasern für die Herstellung von Glasfasergittern für die Telekommunikation.

Im Bereich medizinischer Anwendungen generiert die optische Chirurgie (die so genannte Ophthalmologie) erhebliches Wachstum. Das Marktvolumen für Excimerlaser in der Ophthalmologie wächst kontinuierlich. Excimerlaser von Lambda Physik haben beim Einsatz zu medizinischen und wissenschaftlichen Zwecken den Vorteil einer sehr hohen Auflösung und einer hohen Leistungsfähigkeit im UV-Bereich.

In den wissenschaftlichen Märkten, die von der Messung der Ozonschicht in der Antarktis und der Messung von Schadstoffen in Gewäs-

sern im Bereich der Umweltforschung über zahlreiche Anwendungen in der Spektroskopie und physikalischen Chemie bis hin zur Photochemie und Biotechnologie reichen, ist Lambda Physik überragend vertreten und verfügt nach eigenen Schätzungen über einen Marktanteil von mehr als 95 Prozent.

Die Lambda Physik AG kontrolliert und koordiniert als Muttergesellschaft die weltweiten Verkaufstätigkeiten der Gruppe. In Deutschland und Österreich erfolgt der Absatz direkt über die Gesellschaft, in anderen europäischen Ländern durch Vertriebshändler und Vertretungen. In Asien und Amerika obliegt der Vertrieb den eigenen Tochtergesellschaften Lambda Physik USA, Inc. und Lambda Physik Japan Ltd. Zusätzlich werden in Asien und Amerika sowie in den übrigen Regionen der Welt unabhängige Vertreter eingesetzt.

Lambda Physik verfolgt die Strategie der Konzentration auf ihre Kernkompetenzen mit einem hohen Maß an Outsourcing, was zu einer hohen Flexibilität im Produktionsprozess beiträgt. Die Gruppe greift in zunehmendem Maße auf außen stehende Lieferanten für die Herstellung von Komponenten und Bauteilen zurück, die sie für ihre Laserprodukte benötigt. Produktionsvorgänge werden nur dann intern ausgeführt, wenn sie mit der Schlüsseltechnologie oder mit Kernkompetenzen verbunden sind, wie etwa die Herstellung der Laserröhren und die endgültige Konfiguration der Laser.

Forschung und Entwicklung spielen bei Lambda eine große Rolle. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sind am Sitz der Gesellschaft in Göttingen und bei der Lambda Physik USA, Inc. in Fort Lauderdale/Florida konzentriert. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in Göttingen liegt auf dem Gebiet der fortlaufenden Entwicklung neuer Generationen von Excimerlasern. Das Team in Fort Lauderdale konzentriert sich auf diodengepumpte Festkörperlaser.

Gegenwärtig beschäftigt Lambda Physik weltweit rund 400 Mitarbeiter, davon sind auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung etwa 23 Prozent tätig. Lambda Physiks Wettbewerbsfähigkeit hängt davon ab, wie erfolgreich sie ihre Technologien durch gewerbliche Schutzrechte sichert. In der Konsequenz hat Lambda Physik einen erheblichen Bestand an Patenten entwickelt, um ein Höchstmaß an Patentschutz zu sichern. Mitte 2000 war die Lambda Physik AG Inhaberin von 102 Patenten und hatte 104 Entwicklungen zum Patent angemeldet.

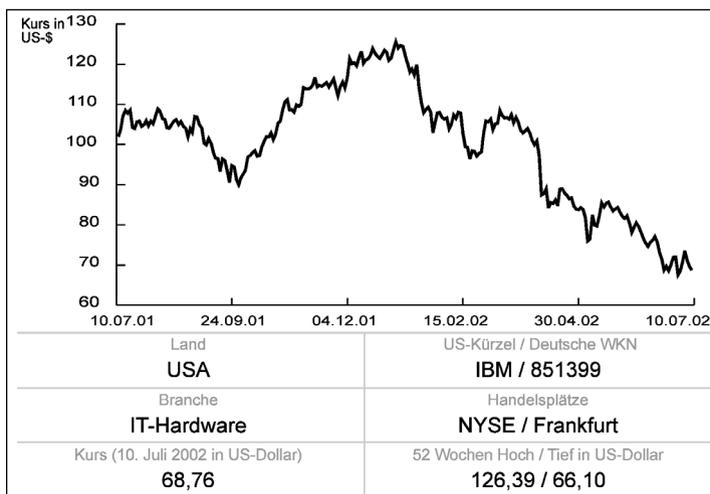
Lambda Physik konnte seinen Umsatz von 100,16 Millionen Euro im Jahr 2000 um 38 Prozent auf 137,95 Millionen Euro im Jahr 2001 steigern. Das Ergebnis wurde jedoch stark durch ungeplante Wertberichtigungen auf Lagerbestände im Bereich der Lithographie belastet, was sich auch deutlich im Kurs der Aktie widerspiegelte.

## > Nanoelektronik

Auf dem Gebiet der Nanoelektronik ist auf Grund der Möglichkeit, Systeme und Komponenten in Nanodimensionen herzustellen, der größte Innovationsschub zu erwarten. Da gerade bei der Chipherstellung jede weitere Miniaturisierung der Bauelemente eine höhere Leistungsfähigkeit bewirkt, bildet die Nanoelektronik einen Ausweg aus der technologischen Sackgasse, der sich das Siliziumzeitalter ohne Nanotechnologie nähern würde. Die Nanoelektronik, die auch als Molekularelektronik bezeichnet wird, bringt der IT-Branche neben kleineren, leistungsfähigeren, energiesparenden und kostengünstigen Prozessoren auch eine Reihe weiterer Innovationen: Datenspeichertechnologien von unvorstellbarer Speicherfähigkeit, neuartige Displaytechnologien und Hochleistungsbauelemente für die Datenübertragung sind nur die nahe liegenden Beispiele für einen tief greifenden Innovationsschub durch den nanotechnologischen Fortschritt. Etablierte Konzerne investieren bereits jetzt bis zu 50 Prozent ihrer langfristigen Forschungsgelder in die Nanotechnologie.



## International Business Machines Corporation (IBM)



Berichtet man über die Unternehmen der Nanotechnologie, so kommt man an einem Namen nicht vorbei: der International Business Machines Corporation, kurz IBM, dem größten Computerhersteller der Welt und dem zweitgrößten Softwarehersteller nach Microsoft. IBM erwächst durch seine gigantische nanotechnologische Forschung und Entwicklung ein zusätzliches Kurspotenzial, welches von den meisten Investoren noch nicht annähernd wahrgenommen wurde. Der Hightechgigant IBM ist schon seit jeher in allen Bereichen der Computerbranche tätig. IBM entwickelt und vertreibt eigene Hard- und Softwareprodukte, bietet aber auch im IT-Bereich verschiedene Dienstleistungen und Beratung an.

Das Unternehmen kann auf eine lange Geschichte zurückblicken. IBM ging aus einem Zusammenschluss von drei Unternehmen hervor, die sich mit der Herstellung von Waagen, Fleisch- und Käseschneidern sowie Zeiterfassungssystemen für die Industrie bis hin zu Tabelliermaschinen und Lochkarten beschäftigten. Diese Unternehmen, die zumeist aus dem späten neunzehnten Jahrhundert stammten, gingen im Jahre 1911 als Computing-Tabulating-Recording Company, kurz C-T-R genannt, zusammen. Das neu zusammengeführte Unternehmen hatte seinen Sitz in New York und wurde 1924 in »International Business Machines Corporation« umbenannt.

Die heutige IBM beschäftigt über 319.000 Mitarbeiter, setzte im Jahr

2001 weltweit 85,9 Milliarden Dollar um und erwirtschaftete einen Reingewinn von 7,7 Milliarden Dollar. Das Unternehmen ist in 164 Ländern der Erde mit Forschungs- und Entwicklungszentren, Produktionsstätten und Vertriebsniederlassungen vertreten. IBM gliedert sich heute in die Bereiche Research, Software, Hardware, Component Technology, Services und Sales. Die IBM Research Division wurde bereits im Jahr 1945 gegründet und ist für die Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung bestehender Technologien und Lösungen zuständig. Weltweit sind im Bereich Research 2.600 Mitarbeiter an sieben Standorten tätig. Sitz der Forschungsleitung und zugleich das größte Laboratorium ist das T. J. Watson Research Center nördlich von New York City in Yorktown Heights in den USA. Dazu gehören das Almaden Research Center in San José und das Austin Research Laboratory im texanischen Austin. Weitere Laboratorien der Research Division befinden sich in China, Israel, Japan und der Schweiz. Das Schweizer IBM-Forschungslabor Zürich in Rüschlikon ist der europäische Zweig der IBM Research Division. Die weltweiten Forschungsgebiete reichen von Computersystemen und deren Anwendungen über Kommunikations- und Speichersysteme bis hin zur Systemtechnologie, Physik, Mathematik und der interdisziplinären Nanotechnologie. Die intensive Forschungsarbeit verhilft IBM zu einer technisch führenden Position, die sich unmittelbar im geschäftlichen Erfolg des Unternehmens widerspiegelt.

Die aus der Forschungsarbeit hervorgehenden Patente bringen dem Unternehmen Lizenzeinnahmen und erhöhen die Aktionsfreiheit durch Lizenztausch mit anderen Firmen. Rund ein Viertel der weltweit 30.000 IBM-Patente hat seinen Ursprung in der Research Division. Das durch Patente gesicherte Know-how ist in vielen Fällen von grundlegender Bedeutung für die gesamte Industrie der Informationstechnologie.

Als eines der ersten Unternehmen hat IBM die große Bedeutung der Nanotechnologie erkannt. Folglich stellt IBM heute die umfangreichsten, die am längsten existierenden und die wohl auch erfolgreichsten Bemühungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie an. Das Ziel der Wissenschaftler besteht darin, funktionelle Geräte wie Transistoren aus den Grundbausteinen der Natur herzustellen.

Die nanotechnologische Wissenschaft begann im Züricher Forschungslabor von IBM mit der bahnbrechenden Erfindung des Raster-

tunnelmikroskops. Für die Erfindung dieser neuen Technik zur Darstellung von Oberflächen bis zur detaillierten Erkennung einzelner Atome erhielten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer von IBM im Jahr 1986 den Nobelpreis für Physik. Zum ersten Mal wurde es den Wissenschaftlern ermöglicht, einzelne Atome zu sehen und, wenig später im Jahr 1989, sie sogar zu bewegen. Genauso bedeutend war die Erfindung des Atomkraftmikroskops von Gerd Binnig, Christoph Gerber und Calvin Quate Mitte der achtziger Jahre. Die Arbeit in diesem Forschungsbereich und die damit verbundenen Entwicklungen ermöglichten neuartige Anwendungsansätze, um Untersuchungsmethoden und andere Möglichkeiten zu erforschen, mit denen einzelne Atome und Moleküle manipuliert werden können, um Strukturen in Nanodimensionen herzustellen.

So gelang es Wissenschaftlern der Züricher IBM-Forschung und der Universität Basel, einen neuen Ansatz zur Verwendung von verschwindend kleinen biochemischen Maschinen aus Silizium zu entdecken. Diese winzigen »Finger« aus Silizium sind in der Lage, Fehler in der DNA wahrzunehmen, und könnten so schließlich zu neuen ärztlichen Behandlungsmethoden und Nanorobotern, den so genannten Nanobots, führen.

Die Forscher entdeckten, dass die DNA die Fähigkeit besitzt, winzig kleine Silizium-Finger zu biegen, die eine Dicke von weniger als einem Fünfzigstel eines menschlichen Haares haben. Das Forschungsteam verwendete einen Prozess, der sich molekulare Erkennung nennt, bei dem Moleküle nach dem Schlüssel-Schloss-Mechanismus eine Bindung eingehen. Ein Aufgebot an nanodimensionierten Fingern und Auslegern arrangiert sich hierbei wie die Zähne eines Kamms an bestimmte DNA-Codes und Proteine. Durch die Beobachtung, wie sich die verschiedenen Ausleger biegen, wenn sich die DNA an sie haftet, waren die Forscher in der Lage, die winzigsten möglichen Fehler in einer DNA-Folge, eine so genannte einzelne grundlegende Abweichung, wahrzunehmen. Die Vorteile dieser neuen Technologie sind die direkte Entdeckung der gesuchten Substanz und dabei eine hohe Empfindlichkeit sogar für kleinste Moleküle.

»Diese biomechanische Methode hat das Potenzial, um eine schnelle und billige biochemische Analyse zu ermöglichen, und könnte für mobile Anwendungen verwendet werden«, sagt Christoph Gerber von

IBM Research. »Zum Beispiel gibt es einen Bedarf für die rasche Diagnose der Bedingungen, die eine Ursache des plötzlichen Todes, des Herzinfarkts sind. Wenn die Technologie so entwickelt werden kann, wie wir es uns erhoffen, dann könnte eine Diagnose an Ort und Stelle erfolgen, ob ein Brustschmerz von einem Herzinfarkt oder einem nicht-lebensbedrohlichen Problem verursacht wird. So könnte Zeit gespart und wahrscheinlich auch Behandlungskosten verringert werden.«

Die Entdeckung des Forschungsteams, dass DNA und Proteine winzige Siliziumstrukturen biegen, hat weitreichende Auswirkungen und könnte es ermöglichen, Technologien zur Anwendung von Mikro- und Nano-Roboter Maschinen zu erweitern.

»Microbots und Nanobots wurden durch Science-Fiction-Geschichten und Filme popularisiert, aber die technologischen Begebenheiten bleiben ein Hindernis bis zu ihrer Realisierung«, sagt James Gimzewski von IBM Research. »Die Fähigkeit, die Biologie zu verwenden, um bestimmte mechanische Aufgaben im Nanometerbereich mit Silizium auszuführen, liefert einen völlig neuen Ansatz, um Maschinen autonom ohne externe Kraft- oder Computerkontrolle zu bedienen. Wir haben einen Weg gefunden, die DNA so für uns arbeiten zu lassen, dass wir keine Batterien, Motoren oder Ähnliches benötigen, um eine winzige Maschine zum Laufen zu bekommen.«

Die Fähigkeit der DNA und anderer Biomoleküle, Maschinen wie beispielsweise Ventile durch Ausnutzung des spezifischen molekularen Codes oder der Biochemie zu bedienen, könnte Anwendungsgebiete in der Medizin haben. »Beispielsweise könnten wir uns ein System vorstellen, das Krebswachstum angreifen könnte: Die Freisetzung gerade der benötigten Dosis von Chemikalien im entsprechenden Standort im Körper könnte mit Hilfe von winzigen Mikrokapseln erreicht werden, die mit Nano-Ventilen ausgerüstet wären«, sagt Gimzewski. »Sie könnten chemisch so programmiert werden, nur zu öffnen, wenn sie biochemische Signale der gesuchten Tumorart erhalten. Dies würde die richtige Therapie zur richtigen Zeit an der richtigen Stelle mit minimierten Nebenwirkungen und ohne invasive Chirurgie ermöglichen.«

Die zugrunde liegende Technologie dieser speziellen neuen Anwendungen entspringt der Entwicklungsarbeit an nanomechanischen Geruchssensoren, denen Forschungsteams von IBM in Zürich und an der Universität in Basel nachgehen. Im Moment sind die Einsatzgebiete

dieser Sensoren noch hauptsächlich in der Qualitäts- und Prozesskontrolle, wo die Technologie ihren Einsatz in Sensorgeräten für die Gasanalyse von beispielsweise Lösungsdämpfen findet. Diese Sensorgeräte sind nicht auf ein gasförmiges Einsatzgebiet beschränkt, sie funktionieren auch in Flüssigkeiten. Dadurch ist der Weg für die Forschung frei, die biomechanischen Sensoren in der biochemischen und medizinischen Diagnose einzusetzen.

Nanotechnologische Forschungsansätze finden sich bei IBM auch auf anderen Gebieten. Den Forschern vom kalifornischen IBM Research Almaden in San José ist es gelungen, mit einer so genannten Quantum Mirage atomgroße Verbindungen zu ermöglichen. Es handelt sich dabei um eine nanotechnologische Kommunikationsmethode. Die IBM-Wissenschaftler entdeckten einen Weg, um Informationen in atomarer Größe zu transportieren. Hierbei werden anstelle der konventionellen elektrischen Leitungen die Welleneigenschaften von Elektronen zum Transport von Informationen genutzt. Das neue Phänomen, das die Wissenschaftler Quantum Mirage (deutsch: Quanten-Fata-Morgana) nennen, kann Datenübertragungen innerhalb zukünftiger Nanoschaltkreise ermöglichen, die zu klein für die Verwendung von Leitungen wären.

»Dies ist ein fundamental neuer Weg, Informationen durch einen Festkörper zu leiten«, sagt der IBM-Forschungsleiter des Projekts, Donald M. Eigler. »Wir nennen es Mirage, da wir Informationen über ein Atom an eine andere Stelle übertragen, wo kein Atom ist.«

Während die Computerschaltkreise in atomare Dimensionen schrumpfen, hat sich das Verhalten von Elektronen von den von der klassischen Physik beschriebenen Partikeleigenschaften zu wellenartigen Eigenschaften, wie sie durch die Quantenmechanik beschrieben werden, geändert. In diesen kleinen Skalen transportieren winzige Leitungen beispielsweise auch keine Elektronen, wie dies von der klassischen Theorie vorhergesagt wird. Es müssen demnach Quantenparallelen für viele traditionelle Funktionen verfügbar sein, wenn die begehrten Vorteile der Nanoschaltkreise erreicht werden sollen. Die IBM-Quantum-Mirage-Technik könnte sich als Ersatz für Leitungsverbindungen in Nanoschaltkreiskomponenten erweisen.

Die Quantum Mirage wurde von drei Physikern im Almaden Research Center der IBM entdeckt: Hari C. Manoharan, Christopher P.

Lutz und Eigler. Sie benutzten dasselbe Rastertunnelmikroskop, mit dem Eigler und Erhard Schweizer zehn Jahre zuvor zum ersten Mal einzelne Atome positionierten. Damals stellten sie die Buchstaben I-B-M mit 35 Xenonatomen dar, was für weltweites Aufsehen sorgte.

Um die Quantum Mirage zu erschaffen, bewegten die Wissenschaftler zunächst mehrere Dutzend Kobaltatome auf einer Kupferoberfläche in einen ellipsenförmigen Ring. Wie Michael Crommie (der heute Professor an der renommierten University of California in Berkeley ist), Lutz und Eigler bereits 1993 zeigten, wirkt der Ring aus Atomen als eine »Quantenhürde«, in der die Oberflächenelektronen des Kupfers innerhalb des Rings in einem von der Quantenmechanik vorhergesagten Wellenmuster reflektiert werden. Die Größe des elliptischen Rings bestimmen seine »Quantenzustände« – die Energie und räumliche Verteilung der eingepferchten Elektronen. Die IBM-Wissenschaftler verwendeten einen Quantenzustand, der eine hohe Elektronendichte an jedem Fokuspunkt innerhalb des elliptischen Rings konzentrierte. Als die Wissenschaftler ein Atom aus magnetischem Kobalt in einen Fokus stellten, erschien eine Fata Morgana am anderen Fokus: Dieselben elektronischen Stadien in den Oberflächenatomen, die das Kobaltatom umgaben, wurden wahrgenommen, obwohl kein magnetisches Atom tatsächlich dort war. Die Intensität der Fata Morgana entsprach etwa einem Drittel der Intensität um das Kobaltatom herum.

»Wir sind Quantenmechaniker geworden – wir konstruieren und erkunden die Eigenschaften von Quantenzuständen«, so Eigler. »Wir pflastern den Weg für die Zukunft der Nanotechniker.«

Auch im Bereich der Forschung und Weiterentwicklung von neuen Speichermedien ist IBM technologisch führend. Die Geschichte der Festplatte wurde von IBM geprägt, und auch heute arbeiten IBM-Wissenschaftler daran, weitere neue Ansätze für zukünftige Datenspeichertechnologien zu entwickeln. Ein nanotechnologischer Ansatz brachte IBM-Wissenschaftlern und dem Züricher IBM-Nobelpreisträger Gerd Binnig kürzlich einen entscheidenden Durchbruch bei der Verbesserung der Speicherdichte von Festplatten. Ein Team von IBM Research in Zürich konnte in Zusammenarbeit mit den amerikanischen Kollegen vom IBM Almaden Research Center eine neue Technologie entwickeln. Das System, welches unter dem Codenamen Millipede entwickelt wurde, speichert im Vergleich zu aktuellen Festplattentechnologien

hundertmal mehr Daten auf derselben Plattendichte. Möglich macht dies eine Technik, die auf dem von den Forschern Binnig, Gerber und Quate entwickelten Atomkraftmikroskop basiert. Auf 1.024 winzigen Auslegern balancieren 1.024 Spitzen, die winzige Abdrücke in einer Polymer-Schicht erzeugen. Diesen kleinen »Füßchen« verdankt die Technologie ihren Codenamen Millipede – der Tausendfüßer. Die Datenträgeroberfläche wurde auf ein Silizium-Plättchen aufgetragen, das auf eine Fingerspitze passt.

Das Millipede-System gebraucht dieselbe Konfiguration von winzigen Auslegern mit Spitzen, die durch ein Plastiksubstrat fahren, wie die Nadel eines alten Plattenspielers durch die Aufzeichnungsrillen einer Vinylschallplatte fährt. Die Spitzen des Millipedes sind jedoch beheizt und haben einen nanotechnologisch klein dimensionierten Radius von 40 Ångström. Ein Ångström hat den Radius eines einzelnen Atoms. Jede Spitze ist an einem winzigen Ausleger befestigt, so dass tausend Spitzen auf drei Quadratmillimeter passen.

Alle Spitzen sind beheizt und schreiben die Daten auf das Substrat durch das Formen von nanometergroßen Vertiefungen. Um die Daten zu lesen, dienen die Spitzen als fein eingestellte Thermometer. »Man kann wirklich Kälte messen«, erklärt Binnig. »Wenn man aus der Vertiefung draußen ist, geht der Ausleger hoch und es ist wärmer. Wenn die Spitze in einer Vertiefung drin ist, wird es kühler, weil es einen effizienteren Hitzetransport von der Spitze zum Substrat gibt, je geringer die Entfernung zwischen beiden Elementen ist.«

Schätzungen gehen davon aus, dass der Millipede Datenlagerdichten fünfundzwanzig- bis einhundertmal höher als heutige Highend-Festplatten erreicht, ohne an die physikalischen Grenzen zu gelangen, an die heutige Speichersysteme in den nächsten zwei Jahrzehnten stoßen werden.

Eine der gegenwärtigen Herausforderungen ist die Steigerung des Datenübertragungstempos eines Millipedes, so dass er mit der magnetischen Speicherung konkurrieren kann.

»Diese Technologie könnte von praktisch jedem Audio/Video-Produkt eingesetzt werden. Sie unterstützt gleichzeitig die Entwicklung von Computern, die Sie am Körper tragen können, etwa in der Hosentasche oder am Arm wie eine Uhr«, meint Peter Vettiger, IBM-Projekt-Manager für Millipede. »Sie können auf diese Weise Ihre persönliche

Datenbibliothek mit sich tragen: Ein Millipede-System von der Größe eines Quadratcentimeters und einen halben Zentimeter dünn könnte zehn Gigabyte Daten speichern.«

Erste Produkte, die diese Technologie einsetzen, könnten bereits in zwei bis drei Jahren zur Verfügung stehen. Das Millipede-System von IBM ist somit ein klassisches Beispiel dafür, dass fantastische Nanotech-Produkte weitaus näher sind, als man es allgemein vermutet.

Eine Reihe weiterer Erfolge ist IBM-Wissenschaftlern auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung von Computerchips gelungen. IBM-Forschern gelang es zum ersten Mal weltweit, eine Anordnung von Transistoren aus Kohlenstoff-Nanotubes herzustellen. Diese Nanotubes sind winzige Zylinder aus Kohlenstoffatomen, die von der einen zur anderen Seite zehn Atome messen und fünfhundertmal kleiner als die heutigen auf Silizium basierenden Transistoren sind. Die Nanotubes sind darüber hinaus tausendmal härter als Stahl. Der Forschungserfolg umgeht den langsamen Prozess, einzelne Nanotubes der Reihe nach zu manipulieren, und ist somit für zukünftige Herstellungsprozesse besser geeignet.

Das Ergebnis ist ein wichtiger Schritt auf der Suche nach Materialien, aus denen Computerchips gebaut werden können, wenn die aus Silizium bestehenden Chips nicht mehr kleiner gemacht werden können. Es handelt sich hierbei um ein Problem, dem sich die Chiphersteller in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren stellen müssen.

»Dies ist ein großer Schritt in unserem Bestreben, elektronische Geräte von molekularer Größe zu bauen«, sagt Phaedon Avouris, der zuständige Projektleiter und Manager von IBMs Nanoscale Research Department. »Unsere Studien beweisen, dass Kohlenstoff-Nanotubes mit Silizium in Bezug auf Leistung konkurrieren können, und da sie uns ermöglichen, Transistoren viel kleiner zu machen, sind sie erfolgversprechende Kandidaten für eine zukünftige nanoelektronische Technologie.«

Kohlenstoff-Nanotubes können demnach als Transistoren in Chips verwendet werden.

Abhängig von ihrer Größe und Form können die elektrischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanotubes die von Metallen oder Halbleitern sein. Den Wissenschaftlern begegnete das Problem, dass bei der Nutzung von Kohlenstoff-Nanotubes als Transistoren alle synthetischen Methoden der Herstellung eine Mischung aus metallischen und halbleitenden Nanotubes ergaben, die zusammenhängen und seil- oder

bündelartige Gebilde formten. Dies gefährdete ihre Nutzbarkeit, da nur halbleitende Nanotubes als Transistoren verwendet werden können. Wenn sie zusammenhängen, überwältigten die metallischen Nanotubes die halbleitenden Nanotubes.

Außer die Nanotubes einzeln herzustellen, was einen langen und ermüdenden Prozess darstellt, gab es keine praktische Möglichkeit, die metallischen von den halbleitenden Nanotubes zu trennen. Dies stellte ein Hindernis in der Anwendung von Kohlenstoff-Nanotubes zum Bau von Transistoren dar.

Das Team von IBM überwand dieses Problem mit der so genannten Constructive Destruction (deutsch: konstruktive Zerstörung), einer neuartigen Methode, die den Wissenschaftlern erlaubt, nur halbleitende Nanotubes am gewünschten Ort mit den gewünschten elektrischen Eigenschaften, die zur Verwendung in einem Computerchip gebraucht werden, herzustellen.

Die Grundprämisse der Constructive Destruction ist, dass die metallischen Nanotubes zerstört werden müssen, um eine dichte Anordnung von halbleitenden Nanotubes zu erhalten. Dies wurde durch eine elektrische Schockwelle erreicht, die alle metallischen Nanotubes zerstört und nur die halbleitenden übrig lässt, welche zur Transistorenherstellung benötigt werden.

Bei Transistoren handelt es sich um einen der Schlüsselbausteine von elektronischen Systemen. Sie sind eine Art Brücke, die Daten von einer Stelle im Innern des Computers an eine andere überträgt. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit von Daten steigt mit der Anzahl der Transistoren auf einem Chip. Der Forschungserfolg der Wissenschaftler könnte so eine weitreichende Wirkung auf die zukünftige Chipleistung haben. Nach Moore's Law verdoppelt sich die Anzahl der Transistoren, die auf einen Chip gepackt werden können, alle 18 Monate. Wissenschaftler gehen davon aus, dass Silizium seine physikalischen Grenzen in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren erreicht und so die Fähigkeit, immer mehr Transistoren auf einen Chip zu packen, ins Stocken bringen würde. Heute kämpfen Chiphersteller damit, die Leiterbahnen in Transistoren kleiner und kleiner zu machen. Die Leiterbahnen sind die Wege, die die Daten von einem Ort zu einem anderen auf dem Chip zurücklegen. Das IBM-Team hat erfolgreich Kohlenstoff-Nanotubes als Leiterbahn in den von ihnen gebauten Transistoren eingesetzt.

Bei IBM Research laufen parallel weitere Arbeiten mit Kohlenstoff-Nanotubes, die auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauen. So ermöglichen die durch »Constructive Destruction« gewonnenen Nanotubes, den kleinsten Computerschaltkreis der Welt herzustellen, der nur aus einem Molekül besteht. Die IBM-Wissenschaftler demonstrierten so einen Weg, der zu kleineren und sparsameren Computern der Zukunft führen könnte. Die Forscher entwickelten aus einem Kohlenstoff-Nanotube einen so genannten Spannungsumkehrer. Es handelt sich hierbei um einen der drei Logik-Schaltkreise, welche die Grundelemente für die Berechnungen heutiger Computer darstellen. Bei der Entwicklung des Spannungsumkehrers, auch bekannt als »NOT-Gatter«, gelang es den Forschern, die gesamte logische Umkehrfunktion innerhalb eines einzelnen Kohlenstoff-Nanotubes unterzubringen. Die Forscher erzeugten so den ersten intramolekularen logischen Schaltkreis.

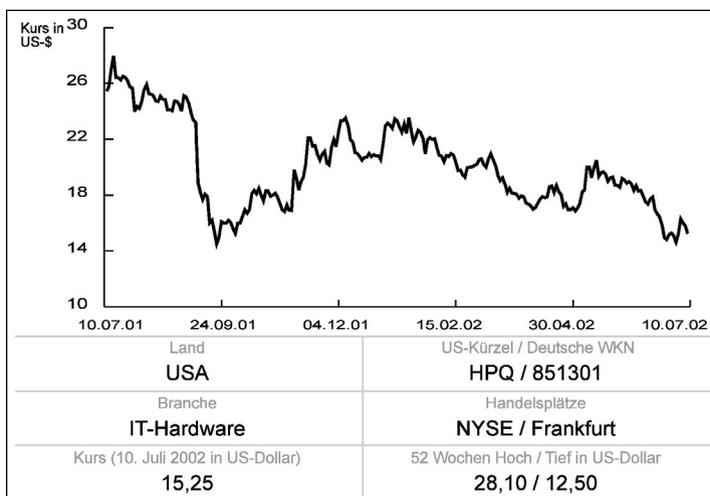
In der binären digitalen Welt von »Nullen« und »Einsen« ändert ein Spannungsumkehrer eine »1« in eine »0« und eine »0« in eine »1« im Inneren eines Computerchips.

Die Prozessoren im Herzen heutiger Computer sind grundsätzlich leistungsstarke und komplizierte Kombinationen des »NOT-Gatters« mit zwei anderen Grundbausteinen, den »AND-« und »OR-Gattern«, welche andere Berechnungen ausführen. Spannungsumkehrer umfassen normalerweise zwei Arten von Transistoren mit verschiedenen elektronischen Eigenschaften. Alle bislang hergestellten Nanotube-Transistoren waren so genannte »p-type«-Schaltkreise, der von IBM entwickelte ist ein »n-type«-Schaltkreis. Die bisherigen Nanotube »p-type«-Schaltkreise eigneten sich zwar hervorragend für wissenschaftliche Zwecke, waren aber für logische Computerschaltkreise ungeeignet.

Zusätzlich weist der Nano-Spannungsumkehrer von IBM ein stärkeres Eingangssignal als das Ausgangssignal auf. Dieses als »Gewinn« bezeichnete Phänomen ist eine wesentliche Eigenschaft, um Gatter und andere Schaltelemente zu einem Mikroprozessor zusammzusetzen. Schaltkreise mit einem Gewinn von weniger als eins sind letztlich nutzlos, denn das elektrische Signal wird so schwach, dass es nicht wahrgenommen werden kann. Da der Nanotube-Schaltkreis von IBM einen Gewinn von 1,6 hat, ist IBM voller Hoffnung, komplexere Schaltkreise mit einzelnen Nanotubes zu entwickeln.

Durch solche komplexeren Schaltkreise befindet sich IBM auf dem besten Weg zum molekularen Computer. Wenn man die Kohlenstoff-Nanotubes auf die Größe von Silizium-Transistoren bringen würde, so wäre ihre Leistung die gleiche. Dies beweist, dass die kleineren Kohlenstoff-Nanotubes es erlauben, auf dem Pfad von Moore's Law weiterzugehen, wenn man mit Silizium nicht kleiner werden kann. IBM eröffnet so der Branche eine vielversprechende Aussicht für zukünftige Computer und demonstriert eindrucksvoll das Innovationspotenzial des Unternehmens. Durch die Nutzung der Nanotechnologie wird IBM mit Hilfe einer intensiven Forschung seinem Branchenstatus als Pionier weiterhin gerecht.

## Hewlett Packard



Ein weiteres Unternehmen, dessen Aktien durch nanotechnologisches Engagement zusätzliches Kurspotenzial entwickeln könnten, ist der amerikanische Konzern Hewlett Packard, kurz HP. Das Unternehmen gilt als Wiege der heutigen Hightech-Schmiede Silicon Valley. HP wurde 1939 von William R. Hewlett und David Packard, beides Absolventen der Stanford University, in einer Garage im kalifornischen Palo Alto gegründet. Der Aufstieg des Unternehmens aus den Anfängen in einer Garage zum weltumspannenden Konzern ist zum Symbol für Pioniergeist und

Unternehmertum der Computer- und Elektronikbranche geworden. Das Unternehmen verkauft neben PCs, Druckern und Servern auch Netzwerk-Hardware und Computer-Software. Neben Mess-, Test-, und Grafiksystemen bietet HP eine weitreichende Produktpalette von Servicediensten wie Finanzierung, Kundenunterstützung, Training und Unternehmensberatung an. Im Geschäftsjahr 2000 verzeichnete HP Umsatzerlöse von 48,8 Milliarden Dollar und beschäftigte weltweit 88.500 Mitarbeiter. HP ist mit über sechshundert Geschäftsstellen in mehr als hundertzwanzig Ländern vertreten. Anfang September 2001 gaben HP und die Compaq Computer Corporation eine verbindliche Fusionsvereinbarung bekannt, welche die beiden Unternehmen mit einem Umsatz von insgesamt 87 Milliarden US-Dollar zu einem der Marktführer auf dem IT-Sektor macht. Bei dieser Transaktion wird es sich um eine Fusion durch Aktientausch handeln, deren Abschluss noch im ersten Halbjahr 2002 erwartet wird. Das neue Unternehmen wird unter dem Namen HP firmieren und Niederlassungen in mehr als 160 Ländern mit über 145.000 Mitarbeitern besitzen.

Die Chancen der Nanotechnologie hat HP bereits frühzeitig erkannt und ist nun auf dem Gebiet der nanotechnologischen Forschung im Bereich der molekularen Elektronik sehr aktiv. Das Laboratorium der HP Labs, in dem Wissenschaftler das Reich der nanodimensionierten Technologien erkunden, wurde nach dem Nobelpreisträger und Physiker Richard Phillips Feynman benannt und kann erste Erfolge vorweisen.

Ähnlich wie IBM gelang es einem Forschungsteam unter der Führung des Chemikers Stan Williams und des Computerarchitekten Phil Kuekes, ein auf Molekülen basierendes Logisches Gatter zu erschaffen. Letztendlich hoffen die Forscher, ganze Speicherchips herzustellen, die eine Größe von einhundert Nanometern haben und somit kleiner als eine Bakterie wären. Gelingt dies dem Team, so ist der Weg zu Prozessoren gepflastert, die leistungsfähiger als heutige Chips sind und dies zu einem Bruchteil ihrer Größe und Kosten.

Stan Williams bringt es auf den Punkt: »Unser Ziel ist die Herstellung von Chips so kostengünstig und einfach, dass jeder Zwölfjährige dies auch mit einem Chemiebaukasten machen könnte.«

Diese molekularen Computerprozessoren könnten in Supercomputern mit der Größe einer Armbanduhr eingesetzt werden. Der extrem

geringe Platzbedarf würde es zulassen, die Prozessoren in Kleidung zu weben oder sie sogar in Fingernagellack einzufügen. Schließlich könnten sie die integrierten Schaltkreise in PCs ersetzen. Chemische Prozessoren wären in der Lage, neue Anwendungsgebiete zu erschließen, für die Silizium nicht geeignet ist. Zum Beispiel würde der Verlust von Elektrizität nicht mehr gleichzeitig den Verlust von Informationen bedeuten. Phil Kuekes sieht neue Möglichkeiten in zahlreichen biomedizinischen Anwendungen. »Sie könnten an Bakterien andocken und feststellen, ob es Tuberkulose ist und sogar welche Art von Tuberkulose«, ist Kuekes überzeugt. Das Ergebnis der Forschungsarbeit dieser Gruppe könnte die Lösung für die Probleme der physischen und finanziellen Grenzen von konventionellen Siliziumchips sein. Um Computer leistungsfähiger zu machen, mussten Chiphersteller die Prozessoren bislang mit immer mehr Transistoren und Leitungen voll stopfen. Dies erfordert zunehmend komplexere Methoden, die dafür sorgen, dass die Kosten für die Chipherstellung steil hinaufklettern. »Lassen Sie uns die Regeln des Spiels komplett ändern«, sagt Stan Williams über die Grundidee hinter der nanotechnologischen Forschung bei HP. »Wir erfinden noch einmal ganz neu, wie man Elektronik macht. Wir wollen wirklich klein werden.«

Die Gruppe um Laborchef Williams arbeitet an einem ganzen Universum aus molekülgroßen Leitungen und Schaltern, die zu winzig sind, um sie zu sehen.

Die Leitungen werden in einem Bereich der Nanometerskala zusammengesetzt, der einer Größe von etwa drei Atomen entspricht. Am erstaunlichsten ist jedoch, dass sich diese Leitungen selbst zusammensetzen, was einen Durchbruch auf dem Gebiet der Nanotechnologie darstellt. Dieser Durchbruch ist ein Schritt in die Richtung des »Computers der Zukunft«, in dem Komponenten kleiner, schneller, energieeffizienter und kostengünstiger in der Herstellung werden.

Bei der Chipherstellung wurden große Fortschritte gemacht, Prozessoren immer kleiner werden zu lassen. Gegenwärtig hängt dieser Fortschritt noch von einem Herstellungsprozess ab, bei dem durch Lithographie Schaltkreise auf eine Siliziumplatte geätzt werden. Dieser Herstellungsvorgang muss perfekt und exakt sein, um eine einwandfreie Leistung des Chips zu erbringen.

Die Quantenmechanik diktiert gegenwärtig die Grenze, wie klein

und genau Transistoren werden können. Aber auch ökonomische Faktoren spielen bei der Chipproduktion eine Rolle. Durch den Umstand, dass kleinere Chips einen höheren Aufwand benötigen, um sie herzustellen, steigen ihre Herstellungskosten exponentiell an. Die kleinsten Leiterbahnen auf kommerziellen Siliziumchips sind gegenwärtig Leitungen von 130 Nanometern. Wenn die Transistoren selbst so klein wie 25 Nanometer sind, hören sie auf zu funktionieren, da sie ihre Quantengrenzen erreicht haben.

Dies war die leitende Herausforderung der Wissenschaftler, um den gegenwärtigen Prozess der Chipherstellung neu zu definieren, und führte zu erstaunlichen Innovationen in der Nanotechnologie.

Die HP-Wissenschaftler haben in Zusammenarbeit mit einem Team aus Wissenschaftlern der University of California in Los Angeles, USA völlig neue Chiparchitekturen untersucht, die äußerst preisgünstig in ihrer Herstellung sind. Die Wissenschaftler entwickelten außerdem Schaltgeräte, die Quantenphänomene ausnutzen und so Moore's Law um die Nanometerskala erweitern.

So fanden die Wissenschaftler einen Weg, um eine Reihe paralleler Leitungen herzustellen, von denen jede nur zwei Nanometer breit ist. Die Leitungen wurden durch einen Prozess der Selbsterstellung (self-assembly) gewonnen und bilden sich auf natürliche Weise durch eine chemische Reaktion zwischen den Elementen Silizium und Erbium.

Mit der gleichzeitigen Entwicklung eines aktiven Schalters auf molekularer Größe sind HP und die University of California auf dem besten Weg, einen Computer aus Nanoressourcen zu bauen.

»Dieser Computer der Zukunft würde viel mehr Berechnungskraft als ein gegenwärtiger Workstation-Rechner haben und könnte einfach in das Innere einer Armbanduhr oder einer anderen Sache passen«, ist sich Williams sicher.

Ein solcher Computer würde einen erstaunlichen Fortschritt bedeuten, da es sich um eine selbstzusammensetzende, fehlernachsichtige Maschine handelt, die preisgünstig in der Herstellung und tausend-, vielleicht sogar millionenmal energiesparender als die heutigen Computer wäre.

Das Erfinden von Nanoressourcen durch Selbsterstellung verlässt sich auf zufällige chemische Prozesse, die entstehenden Schaltkreise enthalten aber manchmal fehlerhafte Bestandteile. Diese Fehler könn-

ten das Ziel gefährden, die Computerherstellung preisgünstig und schnell zu machen, so dass Williams und sein Team einen Weg finden mussten, um diese Fehler zu kompensieren.

Die Antwort auf dieses Problem könnte in einem neuen, von HP entwickelten Prototyp eines Supercomputers liegen. Erschaffen durch eine Gruppe von HP-Computerarchitekten und -ingenieuren unter der Führung von Phil Kuekes, wurde ein kühlschrankgroßer Computer mit konventioneller Siliziumtechnologie erbaut. In diesem Computer wurden gezielt fehlerhafte Chips genutzt, um bei seinem Bau Kosten zu sparen. Gegenwärtige Computerkonfigurationen ähneln den Zweigen eines Baums. Wenn ein fehlerhafter Bestandteil in einem konventionellen Computer existiert, wird die Information nicht über diesen fehlerhaften Zweig hinausgeführt. Durch Verwenden eines Gitternetzes von Leitungen kann dieser Supercomputer Informationen um fehlerhafte Bestandteile herumführen, um letztendlich die funktionierenden Bestandteile zu erreichen.

Ein zusätzlicher Nutzen neben der Fehlertoleranz ist, dass dieser Computer andere komplexe Probleme mit der hundertfachen Geschwindigkeit eines konventionellen Computers beheben kann.

Die wichtigste Erkenntnis aus der Entwicklung dieses Computers für die Nanotechnologie ist, dass ein System nicht perfekt sein muss, um leistungsfähig zu sein. Je mehr Fehler ein solches System tolerieren kann, desto billiger wird dessen Herstellung sein.

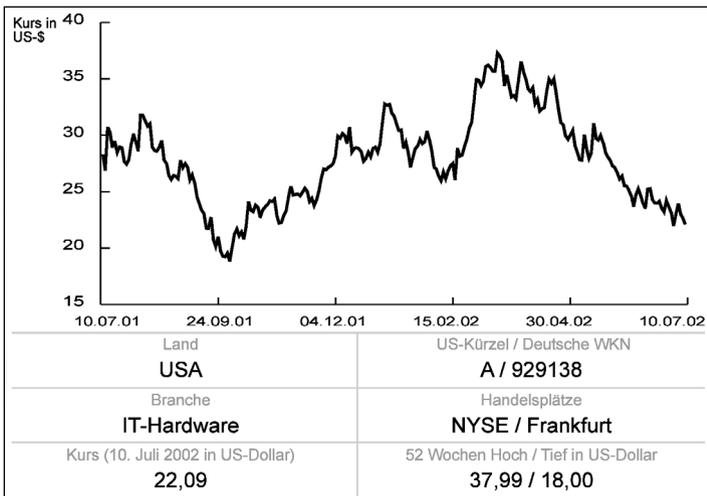
HP-Forscher Williams sagt voraus, dass die Fähigkeit, selbstherstellende Komponenten innerhalb fehlernachsichtiger Systeme anzuwenden, die Computerindustrie revolutionieren wird. »Die sozialen Auswirkungen sind auch enorm«, erklärt er. »Schon im Jahre 2010 werden Geräte mit konventionellen Siliziumchips beginnen, die Verarbeitungskapazität eines menschlichen Gehirns zu erreichen.«

Auch die Erfindung der selbstherstellenden Leitungen und der molekularelektronischen Schalter bei HP und der University of California sind zwei bedeutsame Durchbrüche. Diese mikroskopisch-chipartigen Geräte befördern die Nanotechnologie in die nächste Entwicklungsphase – die Erschaffung eines Nanocomputers.

Stan Williams geht davon aus, dass ein einfaches Nanosystem, welches als erkennbarer Computer dient, mindestens ein Jahrzehnt entfernt ist, aber Geräte wie Datenspeicher früher anwendbar werden.

Mit dem Aufkommen der Nanokomponenten werden Computer theoretisch preisgünstiger herstellbar sein als gegenwärtige, auf Silizium basierende Technologien. Mit einer tausendmal höheren Effizienz werden sie Anwendungen ermöglichen, die einstmals nur in Träumen existierten.

## Agilent Technologies



Auch ein börsennotiertes Spin-off von Hewlett Packard, die amerikanische Agilent Technologies, ist im Bereich Nanotech tätig. Agilent ist ein globales, diversifiziertes Technologieunternehmen mit Firmensitz in Palo Alto, Kalifornien, im Herzen des Silicon Valley. Das Unternehmen ist in den Wachstumsmärkten Kommunikation, Elektronik, Life Science und Health Care tätig. Die Trennung von HP markierte für Agilent die Neuausrichtung des Unternehmens. Am 18. November 1999 wurde Agilent an die New Yorker Börse gebracht. Der Börsengang mit einem Volumen von 2,1 Milliarden US-Dollar war zu diesem Zeitpunkt der größte in der Geschichte des Silicon Valley. Agilent teilt sich in die vier Geschäftsbereiche Prüfung und Messung, Halbleiterprodukte, Health-Care-Lösungen und chemische Analyse auf. Das Unternehmen hat sich darauf spezialisiert, Technologien anzuwenden, um Produkte zu entwickeln, die Daten wahrnehmen, analysieren, anzeigen und übermit-

teln. Zu den Kunden von Agilent zählen viele der weltweit führenden Hightech-Firmen, die durch Agilents Produkte und Services profitabler und konkurrenzfähiger werden. Agilent ermöglicht seinen Kunden, den Markteintritt zu beschleunigen sowie hohe Produktionszahlen und Spitzenqualität zu erreichen. Einer der Gründe für die große Nachfrage nach Produkten von Agilent ist die durchdringende Transformation von der analogen zur digitalen Technologie. Da digitale Technologien eine höhere Präzision erfordern und sich mehr auf Miniaturschaltkreise verlassen als analoge Technologien, ist die Rolle von Tests und Messungen entscheidend für die schnelle Kommerzialisierung von heutigen Produkten. Agilent bedient mit 47.000 Angestellten und Einrichtungen in mehr als 40 Ländern seine meist marktführenden Kunden in über 120 Ländern. Größere Produktentwicklungs- und Herstellungsstandorte befinden sich in den Vereinigten Staaten, in China, Deutschland, Japan, Malaysia, Singapur, Australien und England. Mehr als die Hälfte der Nettoeinnahmen von Agilent wird außerhalb der Vereinigten Staaten erwirtschaftet.

Gemeinsam mit der Harvard University forscht Agilent zurzeit an einem neuen nanotechnologischen Verfahren, um Nukleinsäuren zu analysieren. Nukleinsäuren wie die DNA sind die Blaupausen aller lebenden Organismen und bestimmen die Entwicklung und den Verlauf von Krankheiten und ihrer Behandlung. Die von Agilent und der Harvard University entwickelte Technologie trägt den Namen Nanopore. Nukleinsäure-Sequenzen werden durch Nanopore direkt in elektronische Signaturen konvertiert. Nanopore konvertiert so im Vergleich zu anderen Technologien einzelne DNA-Moleküle mit Chromosomenlänge bei hoher Geschwindigkeit zu niedrigen Kosten. Mit dem Nanopore-System könnte ein einziger Wissenschaftler das menschliche Genom mit derselben Geschwindigkeit wie die riesigen Forscherteams sequenzieren, die sich gegenwärtig auf diesem Gebiet bemühen.

Für biomedizinische Forscher und Health-Care-Spezialisten stellt die Nanopore-Technologie einen Durchbruch in der Analyse der Nukleinsäuren dar. Es wird erwartet, dass die potenzielle Geschwindigkeit und Einfachheit dieser Technologie den Zugang zu genetischer Information für den Einsatz in der Medikamentenentdeckung und -entwicklung sowie bei der Vorhersage, Diagnose und Behandlung von Krankheiten stark verbessert. Mit der Verwendung von konventionellen Methoden

sammeln pharmazeutische Unternehmen gegenwärtig genetische Informationen, die ihnen ermöglichen, Medikamente herzustellen, die auf bestimmte Gene zugeschnitten sind. Es wird erwartet, dass die Nanopore-Technologie die Fortschritte in der personalisierten Medizin beschleunigt, bei der Therapien auf die Patienten und ihre besondere Form der Krankheit zugeschnitten sind. Zukünftig könnte eine einfache Analyse des genetischen Materials direkt in der Praxis des Arztes verwendet werden, um festzustellen, ob ein besonderes Medikament beim Patienten wirkt und welche Nebeneffekte es haben oder nicht haben wird. Letztendlich wird gehofft, dass Nanopore für die Analyse eines breiten Bereichs von Biopolymeren, einschließlich der Proteine, angewandt werden kann.

Die Funktionsweise der Nanopore-Technologie lässt sich leicht erklären. Eine Membran mit sehr kleinen Kanälen, die einen Durchmesser von wenigen Nanometern haben (den so genannten Nanoporen), trennt zwei Flüssigkeiten. Wenn nun an die Membran eine Spannung angelegt wird, wandern geladene Biomoleküle kontrolliert durch die Poren. Gibt man beispielsweise einen Nukleinsäurestrang, der negativ geladen ist, auf die negative Seite der Membran, so wird eine Einheit (ein Nukleotid) auf einmal durch die Pore auf die positive Seite gezogen. Mit dem Passieren der Nukleotide durch die Pore wird eine elektronische Signatur produziert, die genutzt werden kann, um es zu charakterisieren. Die Größe der Nanoporen lässt es nur zu, dass einzelne Nukleinsäurestränge die Pore passieren. Dies ermöglicht der Technologie, sequenziell die Eigenschaften eines Biopolymers entlang seiner Länge zu messen.

Die Forschung auf dem Gebiet der Computerbiologie wird eine signifikante Rolle in der Entwicklung der Nanopore-Technologie spielen. Sie wird dazu benötigt, um experimentelle Strategien und Pläne zu optimieren und mathematische Methoden zu schaffen, die helfen, generierte Daten zu interpretieren.

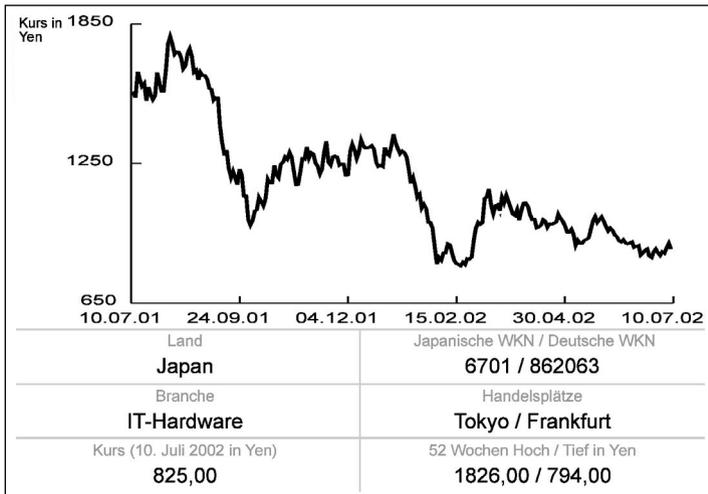
Die potenziellen Fähigkeiten der Nanopore-Technologie sind breit gefächert. Nanopore kann zwischen einer Vielfalt von verschiedenen Molekülen in einer komplexen Mischung unterscheiden oder diese zählen. So kann Nanopore beispielsweise zwischen einem genetisch veränderten und nicht veränderten RNS- und DNA-Molekül unterscheiden, bei denen nur ein einziges Nukleotid anders ist. Verglichen

mit vorhandenen Methoden wird erwartet, dass die Nanopore-Technologie eine direkte Charakterisierung von einzelnen Nukleinsäuren und Eiweißmolekülen liefert, die direkt biologischen Proben entnommen wurden. Dadurch würde eine Anwendung des Nanopore-Systems für eine Vielzahl von Analysen möglich.

Da sich die Nanopore-Technologie noch in einer sehr frühen Phase ihrer Entwicklung befindet, sind ihre Vorteile noch nicht vollständig charakterisiert. Da es sich bei diesem System um eine direkte Messmethode handelt, wird durch Nanopore eine schnellere Entschlüsselung erwartet als von konventionellen Methoden. Die Forscher gehen auch davon aus, dass auf Nanopore basierende Geräte sehr kompakt sein werden, da diese Technologie, im Gegensatz zu gegenwärtigen Methoden, keine sperrigen Elemente wie Laser oder optische Bauteile benötigt. Wenn sich die Nanopore-Technologie als schnell, kompakt und einfach anwendbar herausstellt, dann könnte sie ebenfalls sehr kostengünstig arbeiten. Die Forscher von Agilent und der Harvard University werden diese und andere potenzielle Vorteile der neuen Technologie weiterverfolgen. Die Forschungszusammenarbeit zwischen Agilent und der Universität ist auf mehrere Jahre angelegt und kann darüber hinaus noch erweitert werden. Forschung wird an beiden Standorten mit dem Austausch von wissenschaftlichen Mitarbeitern betrieben. Die grundlegende Arbeit zielt jetzt auf die reproduzierbare Herstellung der Nanopore-Strukturen, die Interpretation und Steuerung der elektronischen Signaturen und das physikalische Verhalten von Biomolekülen im Nanopore-System.

Die Zusammenarbeit zwischen der Harvard University und den Agilent Labs bezeichnet Stephan Laderman, Manager im Molecular Diagnostics Department der Agilent Labs, als exzellent. Laderman ist von den Professoren der Universität begeistert: »Sie teilen die Vision der Labs von einer Zukunft, geschaffen aus einer Kreuzung von Biologie, Informationstechnologie, Elektronik und Nanotechnologie.«

## NEC Corporation



Die japanische NEC Corporation hat sich in den vergangenen Jahren konsequent als global führender »Internet Solution Provider« ausgerichtet. In seinen drei Geschäftsbereichen Information Technology, Netzwerke und elektronische Bauelemente nimmt das Unternehmen jeweils eine Spitzenposition in der Forschung, technologischen Entwicklung und bei neuen Dienstleistungen ein. Mit knapp 150.000 Mitarbeitern konnte die NEC Corporation im Geschäftsjahr 2000 einen Umsatz von 5.409 Milliarden japanische Yen, etwa 46,3 Milliarden Euro, verbuchen. Das mittlerweile über hundert Jahre alte Unternehmen wurde im Jahr 1899 als Nippon Electric Company, Ltd. gegründet. Von den wechselnden Chancen und Möglichkeiten neuer Innovationen konnte das Unternehmen im Laufe der Jahre durch eine führende internationale Forschung immer wieder profitieren.

Auch auf dem Gebiet der Nanotechnologie ist NEC ein Pionier und kann hier bereits zahlreiche Erfolge vorweisen. So entdeckte der NEC-Wissenschaftler Sumio Iijima im Jahr 1991 die Kohlenstoff-Nanotubes, den klassischen Rohstoff der Nanotechnologie. Das Unternehmen verfügt über eine ganze Reihe von Patenten auf Kohlenstoff-Nanotubes, die es ihm beispielsweise ermöglichen, führend an der Entwicklung von Brennstoffzellen für mobile Computer, Handys und Automobile teilzunehmen. Die Arbeit von Iijima führte vor vier Jahren

auch zur Entdeckung einer einzigartigen Nanotube-Struktur, die »Carbon-Nanohorn« genannt wird. Im Sommer 2001 konnte NEC zusammen mit der Japan Science and Technology Corporation und dem Institute of Research and Innovation die erfolgreiche Entwicklung von winzigen Brennstoffzellen für mobile Anwendungen verkünden. Die kleinen Brennstoffzellen nutzen Carbon-Nanohorns und können so zehnmal mehr Energie als vergleichbare Lithium-Batterien speichern.

Die Brennstoffzellen, die die chemische Reaktionsenergie zwischen Wasserstoff und Sauerstoff direkt in elektrische Energie transformieren, werden als die Energiequelle der nächsten Generation betrachtet. Mit ihrer umweltfreundlichen Energiegewinnung und hoher Effizienz werden sie als zukünftige Energiequelle für Automobile und Häuser erforscht und entwickelt.

Die für die Herstellung der winzigen Brennstoffzellen verwendeten Nanotubes werden auf Grund ihrer ungewöhnlichen Form Nanohorns genannt. Nanohorns haben dieselbe Atomstruktur wie normale Kohlenstoff-Nanotubes. Das Hauptmerkmal der Nanohorns ist, dass sie die Form eines sekundären Partikels von etwa 100 Nanometern erschaffen, wenn sie sich gruppieren. Der Vorteil bei der Verwendung dieser sekundären Partikel als Elektrode für Brennstoffzellen ist, dass die so geschaffene Oberfläche nicht nur extrem groß ist, sondern Gas und Flüssigkeit auch einfacher ins Innere dringen können.

Der Durchbruch der NEC-Forscher ermöglicht es beispielsweise, Autos mit einer unglaublich leistungsstarken Batterie zu betreiben, die so eine höhere Reichweite erlauben als die gegenwärtigen Elektro-Autos. Ein Laptop-Computer könnte tagelang in Dauerbetrieb sein, ein Handy für einen Monat. NEC erwartet, diese Brennstoffzellen in der nahen Zukunft produzieren zu können.

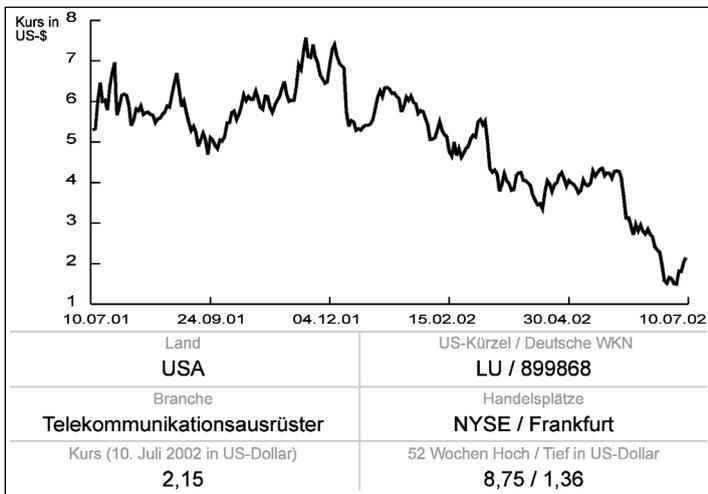
Die Entwickler bei NEC beschäftigen sich auch mit der Verbesserung von Geschwindigkeit und Effizienz bei Computern. Ein NEC-Forscher entwickelte einen Weg zur Herstellung von Festkörper-Quanten-Bits, oder »Qubits«, die zur Entwicklung des Quanten-Computers führen könnten. Quantencomputer stellen den nächsten großen Schritt im Bereich Computer und Kryptographie dar.

Aus Sicht von NEC werden die praktischen Anwendungen der Kohlenstoff-Nanotubes die nanotechnologische Entwicklung anführen.

Auch Quantencomputer und der Bereich Life Science werden sich aus Unternehmenssicht neben nanotechnologischen Durchbrüchen im Halbleitersektor und bei Computern zügig entwickeln.

Die NEC Corporation ist von den grenzenlosen Möglichkeiten der Nanotechnologie überzeugt: »NEC fördert und stärkt seine nanotechnologische Forschung, so dass die Technologie schnell für kommerzielle Produkte genutzt werden kann«, sagt Dr. Jun'ichi Sone, General Manager der NEC Fundamental Research Laboratories. »In der nanoskaligen Welt wird die Technologie, die Fortschritte bei Life Science und Informationstechnologie ermöglicht, zusammenwachsen«, so Dr. Sone. »Nanotechnologie ist der Schlüssel.«

### Lucent Technologies



Auch eines der weltweit führenden Unternehmen der Telekommunikationsindustrie, die amerikanische Lucent Technologies, ist mit ihrer renommierten Tochter, den Bell Labs, auf dem Gebiet der Nanotechnologie engagiert.

Lucent ist mit Firmensitz in Murray Hill (New Jersey, USA) weltweit die Nummer eins unter den Anbietern von integrierten Kommunikationssystemen und beliefert 27 der 30 größten Betreiber von Kommunikationsnetzen. Datenkommunikation, Software, optische und Mobil-

funknetze, einschließlich deren Planung und Betrieb, gehören ebenso dazu wie Telefonanlagen für Geschäftskunden, Call-Center und mikroelektronische Komponenten für Gerätehersteller im Kommunikationsbereich. Lucent Technologies ist seit dem 30. September 1996 ein unabhängiges, börsennotiertes Unternehmen.

Den Kern von Lucent Technologies bildet seine Forschungs- und Entwicklungsabteilung, die so genannten Bell Labs. Dort werden heute 30.000 Mitarbeiter beschäftigt, die mehr als vier Patente pro Werktag hervorbringen. 40.000 Patente, elf Nobelpreisträger und bahnbrechende Erfindungen wie Telefon, Transistor, Solarzelle, Laser und nicht zuletzt die mobile Telefonie gehören zu den beeindruckenden Referenzen dieser kreativen Denkfabrik. Und das Unternehmen ruht sich keineswegs auf seinen Lorbeeren aus. Lucent investiert zwölf Prozent vom Umsatz in Forschung und Entwicklung, das entspricht etwa einer halben Millionen Euro pro Stunde. Das Unternehmen beschäftigt weltweit etwa 62.000 Mitarbeiter und erzielte im Geschäftsjahr 2001 einen Umsatz von 21,3 Milliarden US-Dollar.

Lucent verfügt über Niederlassungen und Vertriebspartner in mehr als 65 Ländern. Die Forschungszentren der Bell Labs befinden sich in mehr als 30 Ländern, auch in Deutschland.

Die Bell Labs sind ein Beispiel für interdisziplinäre Forschungsarbeit. Das Unternehmen erforscht und entwickelt hauptsächlich die nächste Generation von kostengünstigen und hochleistenden Elementen für das optische und kabellose Geschäft. Die Forschung konzentriert sich in einigen Bereichen allerdings auch auf bahnbrechende Entwicklungen, die zur Strategie des Unternehmens passen. Dazu zählen zum Beispiel Highspeed-Elektroniken für optische Netzwerke.

Spezielle Gebiete der Forschungsarbeit umfassen die Nanotechnologie, in der sich das Unternehmen sehr engagiert.

So ist es Wissenschaftlern der Bell Labs und der Universität von Oxford gelungen, DNA-Motoren zu entwickeln.

Die Idee zum Bau der DNA-Motoren kam dem Physiker Bernard Yurke von den Bell Labs durch die Erkenntnis, dass Proteinmotoren molekularer Größe in lebenden Organismen für Muskelkontraktionen und den Transport von Substanzen in Zellen sorgen. Die DNA-Motoren ähneln motorisierten Pinzetten und sind einhunderttausendmal kleiner als ein Stecknadelkopf. Würde man die Herstellungsmethoden bei der

Produktion von Computern verwenden, so lassen sich eintausendmal leistungsfähigere Systeme als heute herstellen.

Die Wissenschaftler sind der Meinung, dass mit Nanogeräten Computerchips mit bis zu einer Milliarde Transistoren möglich sind und nicht nur Millionen wie bei der heutigen Halbleitertechnologie.

»Diese Technologie hat das Potenzial, die bestehenden Fertigungsmethoden für integrierte Schaltungen zu ersetzen. Schließlich erreichen diese innerhalb der nächsten zehn Jahre ihre praktischen Grenzen, wenn wir mit dem Mooreschen Gesetz an eine Mauer aus Ziegelsteinen stoßen«, erklärt Bernard Yurke. Die DNA, die den Bauplan für alle lebenden Zellen auf molekularer Ebene enthält, ist das ideale Werkzeug für den Bau von Nanogeräten. »Wir haben einfach eine Art und Weise genutzt, wie sich Teile der DNA – mit Milliarden möglicher Variationen – nach einem bestimmten Muster zusammenfügen wie die Teile eines Puzzles«, so Yurke weiter.

Die Forscher entwarfen Teile aus synthetischer DNA, die sich während der einzelnen Schritte zum Bau von DNA-Motoren gegenseitig erkennen. Da die DNA als Brennstoff für diese Motoren fungiert, arbeiten sie völlig autonom und benötigen für den Betrieb keine weiteren Chemikalien. Die Selbstmontage der DNA-Motoren ist daher auch ein entscheidender Aspekt für die Herstellung von Nanogeräten. In Anbetracht der Größenverhältnisse erscheint kein anderes Konzept als praktikabel. So lassen sich unter Umständen Nanofertigungstechnologien entwickeln, bei denen im Reagenzglas komplexe Strukturen allein durch die geordnete Aneinanderreihung von Molekülen entstehen. Die Funktionsweise des DNA-Motors lässt sich schnell erklären. DNA besteht aus einem Doppelstrang und ähnelt im Aussehen einer verdrehten Leiter. Die Forscher begannen ihre Arbeiten mit drei einzelnen Strängen, die jeweils aussahen wie die Hälften einer in der Mitte durchgetrennten Leiter. Strang A besaß die richtige DNA-Sequenz, die jeweils zu einer Hälfte von Strang B und C passte und somit die Stränge B und C verbinden konnte. Außerdem besaß Strang A eine Art Scharnier zwischen den Teilen, mit denen die Stränge B und C verbunden wurden, so dass die beiden »Arme« AB und AC frei beweglich waren.

Bei dieser DNA-Struktur sind die beiden Arme geöffnet. Schließen lassen sie sich durch Hinzufügen eines DNA-Brennstoffstrangs, der so konzipiert ist, dass er sich an die freien Abschnitte der Stränge B und C

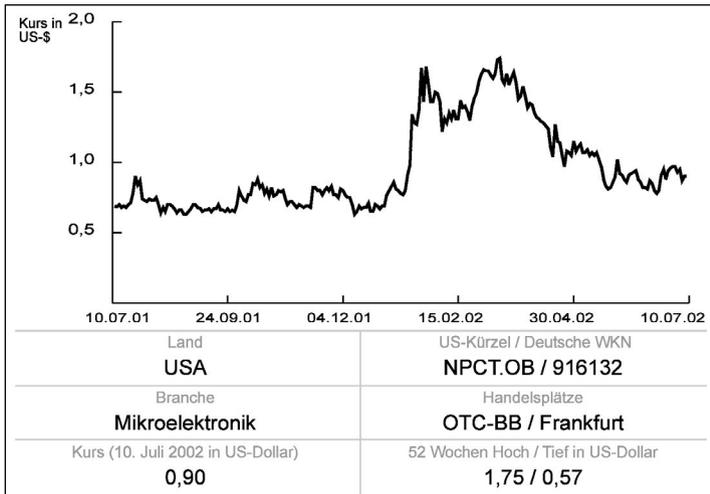
anhängt. Um diese Pinzette wieder zu öffnen, wird der Brennstoffstrang durch Hinzufügen eines weiteren Strangs mit der passenden DNA-Sequenz entfernt.

»Die gesamten 30 Trillionen DNA-Pinzetten in ein paar Tropfen einer entsprechenden Lösung lassen sich wiederholt öffnen und schließen, indem man nacheinander Stränge hinzufügt, die entweder als Brennstoff dienen oder diese Brennstoffstränge wieder binden«, erläutert Andrew Turberfield, der als Physiker an der Universität von Oxford arbeitet und kürzlich ein Forschungssemester bei den Bell Labs absolviert hat. Die übrigen Wissenschaftler, die an den Forschungen beteiligt waren, sind der Physiker Allen Mills, der aus Deutschland stammende Friedrich Simmel von den Bell Labs sowie Jennifer Neumann, Absolventin an der Rutgers University.

Da die DNA-Motoren zu klein sind, um sie mit herkömmlichen Mikroskopen erkennen zu können, mussten die Forscher das Öffnen und Schließen der DNA-Strukturen mit Hilfe des Fluoreszenzeffektes beobachten. Dabei wird ein Paar von Färbemolekülen an den Enden der DNA-Motoren befestigt. Werden diese Moleküle durch Laserlicht erregt, lässt sich anhand der Menge des entstehenden fluoreszierenden Lichts der Abstand zwischen den beiden Enden ermitteln.

Für den nächsten Schritt arbeiten die Wissenschaftler in den Bell Labs bereits daran, DNA-Strukturen an elektrisch leitenden Molekülen zu befestigen und so elektronische Schaltungen im molekularen Maßstab zu entwickeln.

## NanoPierce Technologies Inc.



Auch bei der amerikanischen NanoPierce Technologies, Inc. handelt es sich um einen interessanten Nanostock. Das Unternehmen mit Hauptsitz in Denver, Colorado Springs und dem deutschen Firmensitz bei München wurde im Juni 1996 in den Vereinigten Staaten im Bundesstaat Nevada gegründet.

NanoPierce möchte die Mikroelektronik mit einer neuartigen Technologie zur Herstellung von elektrischen Verbindungen revolutionieren. Statt konventioneller Lötverbindungen setzt NanoPierce auf ein Gemisch aus Industriediamantenstaub und Nickel. Die Basis bildet hierbei ein Nickelbad, mit dessen Hilfe die Partikel aufgetragen werden. Nanoskopische Diamantsplitter werden mit geringem Kraftaufwand auf die Oberfläche gepresst und anschließend mit einem Kleber dauerhaft mechanisch fixiert. Der harte Diamantsplitter bohrt sich in das Material hinein. Das System von NanoPierce kann daher auch außerhalb von Reinstäumen verwendet werden, da eventuelle Fremdpartikel vom Diamantsplitter einfach durchstoßen werden. Dieser Vorteil lässt einen erheblichen Kostenfaktor entfallen. Zudem wird durch die Verbindung auch eine für Elektronikkomponenten sehr wichtige Hochfrequenzleitfähigkeit sichergestellt. Der wohl interessanteste Punkt ist jedoch, dass zur Herstellung der Verbindungen weder besondere Maschinen noch spezielle Kleber benötigt werden. Diese einfache Handhabung trägt ebenfalls

zu einer Kostenreduzierung bei, die das NanoPierce-Verfahren als interessante nanotechnologische Alternative zum bisherigen Lötvorgang macht. Außerdem werden bei heutigen Verbindungstechniken bis zu zehnmals größere Flächen für die Lötunkte benötigt; das Verbindungssystem von NanoPierce dagegen benötigt nicht mehr als den Platz unter der Komponente selbst und ermöglicht so eine fast tausendprozentige Verkleinerung des Platzbedarfs für die Verbindung.

Die Vorteile des Verbindungssystems von NanoPierce sind vielfältig. Zu den geringeren Kosten und der Größenreduzierung auf fast ein Zehntel der bisherigen Lötverbindungen kommt noch eine Verbesserung der Anwendungshandhabung, da die Verbindungen von NanoPierce problemlos in bestehende Herstellungsverfahren integriert werden können. Das System von NanoPierce ermöglicht darüber hinaus einen sofortigen Testlauf der Verbindungen, da dieser »kalte« Prozess ein Abkühlen der Lötunkte überflüssig werden lässt.

Auch aus umwelt- und arbeitstechnischen Gesichtspunkten ist dieser Kontaktprozess interessant, denn das NanoPierce-Patent ist ein wichtiger Schritt in Richtung »bleifreie Verbindungen«, der auch später unter anderem ein leichteres Recyceln der Produkte ermöglicht. Das Verfahren von NanoPierce lässt sich in zahlreichen Anwendungen einsetzen, da der Industriediamantenstaub in vielen Körnungsstufen erhältlich ist.

Der NanoPierce-Technologie steht eine Reihe von Einsatzgebieten offen, so zum Beispiel den in Mobiltelefonen verwendeten Smartcards, flexiblen Leiterplatten, Smart-Labels oder beim so genannten Waferpiercing. Das vielseitig einsetzbare Verfahren kann dem Unternehmen in Zukunft die Freiheit sichern, nicht nur von einem Markt abhängig zu sein.

Das ultimative Anwendungsgebiet der Verbindungstechnologie von NanoPierce sind allerdings Wafer. Bei Wafern handelt es sich um Siliziumscheiben, die als Trägermaterial für integrierte Schaltkreise (die »Chips«) dienen. NanoPierce hat sein Verbindungssystem erfolgreich für die Verwendung auf Chips und Wafern entwickelt und getestet. Die Ergebnisse sind so erfreulich, dass sich verschiedene Konzerne in Gesprächen mit NanoPierce befinden, um das Potenzial für ihre Anwendungen zu nutzen.

NanoPierce befindet sich auf dem Weg, systematisch seine Verbindungstechnologie für mikroelektronische Anwendungen zu entwickeln

und zu vermarkten. Das endgültige Ziel der Gesellschaft ist, mit seiner Verbindungstechnik einen kommerziellen Erfolg zu erreichen und seinen Wert für die NanoPierce-Aktionäre nachhaltig zu steigern.

Um die Kommerzialisierung seiner neuen Technologie voranzutreiben, verfolgt das Unternehmen zwei verschiedene Ansätze: Eine Strategie konzentriert sich auf die Vergabe von Lizenzen an andere Gesellschaften, die gegen Lizenzgebühren die Verbindungstechnologie von NanoPierce nutzen dürfen. Dieser Ansatz kann dahin gehend erweitert werden, dass NanoPierce seinen Lizenznehmern auch weitere Zusatzleistungen wie Schulungen und Kundenbetreuung anbietet. Ein anderer Ansatz widmet sich der Schaffung von strategischen Partnerschaften. NanoPierce zielt hierbei auf Vereinbarungen über Gemeinschaftsaktivitäten mit anderen Unternehmen ab, die letztlich zu Gründungen von Gesellschaften führen könnten, welche darauf spezialisiert sind, das NanoPierce-Verbindungssystem zu verwenden. Diese Strategien würden es NanoPierce erlauben, sowohl Lizenzgebühren als auch Erlöse und Gewinne aus unterschiedlichen anderen Aktivitäten zu erwirtschaften.

Mit der deutschen ExypnoTech GmbH hat NanoPierce im Frühjahr 2002 erstmals eine Tochtergesellschaft für eine spezielle Produktanwendung gegründet. Das Unternehmen soll kostengünstige RFID-Inlays herstellen. Die Abkürzung RFID steht für Radio Frequency Identification. Es handelt sich hierbei um Etiketten, die über elektromagnetische Signale (Radiofrequenzen) angesprochen werden können. Dadurch kann mit diesen Etiketten über gewisse Distanzen (aktuell von einigen Millimetern bis zu einem Meter) kommuniziert werden. RFID-Inlays bestehen aus einer Antenne und einem Transponderchip, der die Informationen enthält und gegebenenfalls verarbeitet, sowie aus einem Papier- oder Kunststofflabel. Den über Radiofrequenzen identifizierbaren RFID-Inlays eröffnet sich ein breites Anwendungsspektrum in den unterschiedlichsten Industriebereichen, das jedoch erheblich vom Preis der Inlays abhängt. Mit Hilfe des NanoPierce-Systems soll eine Leistungssteigerung der RFID-Inlays bei gleichzeitiger Reduzierung der Herstellungskosten erreicht werden. Der Beginn der kommerziellen Produktion wird für Mitte 2002 erwartet. Es ist wahrscheinlich, dass NanoPierce in Zukunft weitere Tochtergesellschaften gründet, um seine Möglichkeiten bei anderen Anwendungen zu nutzen.

Der Schlüssel zum Erfolg von NanoPierce soll das Schaffen einer kri-

tischen Masse in jedem Marktsegment sein, um durch solche Erfolge möglichst schnell das Vordringen in andere Segmente zu finanzieren. Die Vorteile der Verbindungstechnologie von NanoPierce haben durchaus das Potenzial, den etablierten Prozess für elektronische Verbindungen, deren Leitfähigkeit und Leistung zu revolutionieren. Es gilt, zu beobachten, ob dem Unternehmen der entscheidende Durchbruch gelingt, zumal es sich bei elektronischen Verbindungen um einen Milliarden-Dollar-Markt handelt.

## > Nano Pre-IPOs

Weltweit sind nicht nur die börsennotierten Nanotech-Unternehmen interessant. Zahlreiche Unternehmen, die zum Teil kurz vor ihrem Börsengang stehen, werden die Investoren zu einem späteren Zeitpunkt an ihrer aussichtsreichen Entwicklung teilhaben lassen. Gerade auf dem Gebiet der nicht börsennotierten Nanotech-Unternehmen hat sich in den letzten Jahren eine Menge getan. So wurden weltweit etwa einhundertfünfzig Nanotech-Start-ups gegründet, von denen ungefähr dreißig Prozent bei entsprechender Marktlage in den nächsten drei Jahren an die Börse gehen wollen. Die Szene ist bunt gemischt: Es handelt sich um Unternehmen aus verschiedenen Branchen, die zum Teil Spin-offs von Universitäten oder großer Konzerne sind. Auch die Venture-Capital-Gesellschaften haben die Nanotechnologie mittlerweile als aussichtsreiches Betätigungsfeld erkannt. Als erste börsennotierte VC-Gesellschaft hat die amerikanische Harris & Harris Group, Inc. Anfang 2002 bekannt gegeben, ihre Tätigkeit in Zukunft ausschließlich auf die »kleinen Technologien« zu konzentrieren. Die Gesellschaft konnte ihre ersten Erfahrungen im Nanotechnologie-Sektor schon 1994 mit einer Beteiligung an Nanophase Technologies machen. Ihr NASDAQ-Börsenkürzel hat die Harris & Harris Group bereits im März 2002 in »TINY« umgewandelt.

&gt;&gt;

## Carbon Nanotechnologies Inc.

Ein Beispiel für ein aussichtsreiches Unternehmen, das noch nicht börsennotiert ist, ist Carbon Nanotechnologies Inc., kurz CNI. Das Unternehmen wird nach eigenen Angaben der erste Anbieter sein, der kommerzielle Mengen von Kohlenstoff-Nanotubes bestehend aus einer einzelnen Wand, den so genannten Buckytubes, auf den Markt bringt. Das texanische Unternehmen profitiert von den neuesten Entdeckungen und kann auf ein reichhaltiges Angebot an geistigem Eigentum zurückgreifen, welches in den Laboratorien von Professor Richard E. Smalley an der Rice University (Houston, Texas) entwickelt wurde. Die Buckytubes sind Kohlenstoffzylinder mit dem Durchmesser von einem Milliardstel Meter. Diese nanodimensionierten Moleküle sind einhundertmal härter als Stahl, haben die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer und die thermische Leitfähigkeit eines Diamanten. Sie haben die chemische Vielseitigkeit eines Polymermoleküls, sind aber tatsächlich nanoskalige Strukturen, die als Grundbausteine in revolutionären Flachbildschirmen, elektromagnetischen Abschirmanlagen für elektronische Ausrüstung, Lithiumionenbatterien, neuartigen Kondensatoren, radarabsorbierenden Elementen für Stealth-Flugzeuge, hochfesten Fasern, Solaranlagen, Elektronik und anderen zusammengesetzten Materialien mit beispiellosen Merkmalen eingesetzt werden können.

Einer der Gründer von CNI ist Professor Richard E. Smalley, der 1996 den Nobelpreis für die Entdeckung der Fullerene erhielt. Ein weiterer Gründer ist Bob Gower, der früher Vorstandsvorsitzender bei Lyondell Petrochemical war, einem der größten Erzeuger und Verarbeiter der Petrochemie in den USA. Das Gründerteam wird abgerundet durch Dr. Ken Smith und Dr. Dan Colbert, beide von der Rice University und Mitglieder des Teams, das die von CNI genutzten Technologien entwickelte. Die Rice University liefert CNI eine exklusive weltweite Lizenz zu allem Fulleren-relevanten geistigen Eigentum, welches in Smalleys Labor an der Rice University entdeckt wurde. Die Universität erhält im Gegenzug einen Anteil am Unternehmen in Form einer Minderheitsbeteiligung.

Bis heute sind Buckytubes ein Laborphänomen mit ungeheuren Aussichten, aber von geringem kommerziellem Wert, da sie nur in winzigen Mengen produziert werden konnten. Smalleys Forschungsgruppe

entwickelte das so genannte HiPCO-Verfahren, durch das Buckytubes in Tonnen produziert werden können. Durch dieses neue Verfahren werden Anwendungen möglich, von denen vor Monaten nur geträumt werden konnte. Dieser einfache, einstufige Gasphasenprozess nutzt preisgünstige Rohstoffe (Eisen- und Kohlenstoffmonoxid) und ermöglicht die Produktion von fast reinen Buckytubes. Das Anfangsprodukt wird voraussichtlich für 500 US-Dollar pro Gramm verfügbar sein, aber da CNI das Herstellungsverfahren kontinuierlich optimiert, wird ein Produktpreis von mehreren hundert Dollar pro Gramm oder letztendlich viel weniger erwartet. Mit der Abnahme des Preises erhöht sich die Anzahl der Anwendungen, für die Buckytubes eingesetzt werden könnten. Das Marktvolumen der potenziellen Anwendungen könnte sich so auf einhundert Milliarden US-Dollar jährlich belaufen.

Die Geschäftsstrategie von CNI sieht vor, das HiPCO-Herstellungsverfahren durch eine Pilotanlage weiterzuentwickeln und parallel die Anwendungen und Märkte für Buckytubes sowohl durch eigene Forschung als auch durch strategische Bündnisse mit einigen anderen Gesellschaften zu fördern. Mit der Entwicklung der Märkte wird CNI eine vollendete Chemieanlage fertig stellen, um so die Nachfrage nach Tonnen von Buckytubes befriedigen zu können. CNI wird zunächst ausgewählte Produkte in der Elektronik und spezielle Polymere adressieren, um eine Vorarbeit zu leisten, bevor Buckytubes eine in bedeutsamen Mengen erhältliche Chemikalie für den breiten Markt wird.

Die Buckytubes leiten sich von Professor Smalleys mit dem Nobelpreis gekrönten Entdeckung der Fullerene ab. Fullerene sind hohle Kohlenstoffmoleküle und somit die dritte bekannte Modifikation des Kohlenstoffs neben den beiden längst bekannten Modifikationen Graphit und Diamant. Ihren Namen erhielten die Fullerene durch den Architekten Buckminster Fuller, der seine Kuppelbauten aus Sechseck und Fünfecken zusammensetzen pflegte. Smalley und seine Mitarbeiter gaben den neu entdeckten Kohlenstoffmolekülen den Namen Buckminster-Fullerene. Das herausragendste Fulleren hat die Form eines Fußballs und besteht aus sechzig Kohlenstoffatomen. Dies brachte ihm im englischen Sprachgebrauch den Namen Buckyball ein.

Auch Buckytubes, die zylinderförmige Variante der Buckyballs, sind Fullerene. Sie sind perfekte, hohle Moleküle aus reinem Kohlenstoff, der, zusammen in einem sechseckigen Netzwerk, einen hohlen

Zylinder formt. Die chemischen Bindungseigenschaften des Kohlenstoffs bewirken das stärkste existierende molekulare Netz. Die Röhren sind nahtlos mit offenen oder verschlossenen Enden. Der Durchmesser eines aus einer einzelnen Wand bestehenden Buckytubes, der durch das HiPCO-Verfahren hergestellt wurde, beträgt 0,7 bis 1,2 Nanometer. Dies ist eine Dimension, die dem hunderttausendstel Durchmesser eines menschlichen Haares entspricht. Die Länge eines durch das HiPCO-Verfahren hergestellten Buckytubes beträgt normalerweise ein Hundertfaches des Durchmessers. Die elektronischen Eigenschaften eines Buckytubes hängen von seiner genauen Geometrie ab. Buckytubes können hochsymmetrisch und damit metallisch leitend sein, andere Geometrien der Röhren ermöglichen halbleitende Eigenschaften, die beispielsweise Silizium ähneln. Buckytubes haben somit die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer oder Silizium, die thermische Leitfähigkeit des Diamanten und eine Stärke, Zähigkeit und Härte, die alle anderen Moleküle übersteigt. Ein Buckytube ist eine kleine, starre mechanische Struktur mit erstaunlichen physikalischen Merkmalen, aber gleichzeitig auch ein großes Kohlenstoffpolymer, eine Eigenschaft, die seine Manipulation durch hoch entwickelte und gut verstandene Chemie ermöglicht. Diese einzigartige Verbindung von physikalischen Merkmalen und chemischer Befähigung ermöglicht bemerkenswerte Anwendungen.

Ein interessantes Beispiel für die Anwendungsmöglichkeiten von Buckytubes sind Flachbildschirme. Buckytubes können in Flachbildschirmen als Kathoden eingesetzt werden. Durch diese Methode könnte der Bildschirm nicht nur ultraflach, sondern das produzierte Bild auch extrem hochauflösend und lichtstark sein. Tests am Prototypen haben bereits gezeigt, dass nur ein Bruchteil eines Gramms an Buckytubes für eine relativ große Anzeige ausreicht und der kommerzielle Markt für Nanotubes in Anzeigen bei einem Preis von 15.000 US-Dollar pro Pfund Buckytubes im Jahre 2006 sich schon auf einen Bedarf von zweitausend Pfund pro Jahr belaufen könnte.

Ein ebenfalls hoher Bedarf kann sich für Buckytubes im Bereich der Polymere erschließen. Zusätzlich zu ihrer guten Leitfähigkeit sind Buckytubes die steifsten Moleküle, die bekannt sind. Werden sie einem sonst elektrisch isolierenden Polymer beigemischt, bleiben die Nanotubes harte, elektrisch leitfähige Stäbe. Obwohl die Nanotubes nur

den Bruchteil eines Prozents vom Volumen des polymeren Materials einnehmen, verändert die Kombination ihre Länge und Härte, so dass sie sich oft aneinander lagern und ein elektrisch leitfähiges Netz innerhalb des isolierenden Polymers formen. Die Forschung hat gezeigt, dass schon winzige Beigaben von Buckytubes (es genügt der Bruchteil eines Prozents) genügen, um isolierendes Plastik antistatisch zu machen. Dies bedeutet, dass ein so verändertes Plastik keine elektrische Ladung aufnehmen kann und so elektronische Ausrüstung geschützt wird.

Wenn man die Beimischung von Buckytubes auf ein paar Prozent erhöht, erhält man ein Material, das gegen Radiowellen und elektromagnetische Störungen schützt. Andere Zusätze für Plastik, die denselben Effekt haben, müssen in sehr hohen Mengen beigemischt werden und beeinflussen die mechanischen Eigenschaften des Plastiks. Die im Gegensatz dazu niedrige Konzentration von Buckytubes, die benötigt wird, um einen gleichen Schutz zu erreichen, stellt sicher, dass ein so verbessertes Polymer formbar ist und fest bleibt, nachdem es ausgehärtet ist. Eine Abschirmung gegen Radiowellen und elektromagnetische Strahlung ist eine Notwendigkeit in Laptopcomputern, Mobiltelefonen, Pagern und anderen tragbaren elektronischen Geräten. Gegenwärtig gibt es kein passendes Plastikmaterial für diesen Zweck, und Metalle (in verschiedenen Formen) werden normalerweise hinzugefügt, um diese Funktion in elektronischer Ausrüstung zu erfüllen. Das Resultat sind höhere Kosten und ein höheres Gewicht, welches durch die Buckytubes vermieden werden könnte.

Bedeutsamen Einfluss könnten Buckytubes auf dem Polymermarkt bei einem Preis von etwa 2.000 US-Dollar pro Pfund haben. Einen Durchbruch hätten Buckytubes bei einem Preis von 300 US-Dollar pro Pfund, und in einer Preisspanne von 50 bis 200 Dollar pro Pfund würde sich ein Markt mit einem Bedarf von Millionen Pfund Buckytubes pro Jahr erschließen.

Die starke Reaktion auf elektromagnetische Wellen macht Buckytubes auch für exotische elektronische Materialien interessant. Neuartige Antennenstrukturen und Elemente in der Außenhülle von Stealth-Flugzeugen, die für Radare unsichtbar sind, erschließen sich den Buckytubes. Vorläufige Tests in diesem Bereich haben eine kommerzielle Nutzung von Buckytubes bei einem Preis von 10.000 US-Dollar pro Pfund demonstriert.

Auch im Bereich der Energiespeicherung sind Buckytubes einsetzbar. Die Oberfläche von Buckytubes ist unglaublich. Ein Gramm Buckytubes hat dieselbe Oberfläche wie ein Fußballfeld. Die unübertroffene Kombination von einem hohen Oberflächenbereich und ausgezeichneter elektrischer Leitfähigkeit gibt solchen Nanotubes einzigartige Möglichkeiten als Kondensatorelektroden und Anoden für verbesserte Lithiumionenbatterien. In Kondensatoren und Ionenbatterien wird Energie gespeichert, die sich auf einer Oberfläche befindet. Je größer diese Oberfläche ist, desto größer das Maß an Energie, das sie speichern kann. Es gibt schon vorläufige experimentelle Erfolge, die beweisen, dass Nanotubes sehr wirksam in solchen Anwendungen sind. Auf diesem Gebiet ist aber eine weitere wesentliche Entwicklungsarbeit erforderlich. Das Marktvolumen erschließt sich für einen Bedarf von Millionen Pfund pro Jahr bei Preisen zwischen 50 und 200 US-Dollar für ein Pfund Buckytubes.

In naher Zukunft sind die kombinierten thermischen und elektrischen Leitfähigkeiten von Buckytubes eine erfolversprechende Lösung bei elektronischen Verbindungen. Der Umgang mit Thermik ist ein kritisches Anliegen in heutigen Hochleistungsschaltkreisen aus Silizium. Es ist sehr wahrscheinlich, dass auch auf diesem Gebiet Buckytubes eine Rolle spielen werden.

Längerfristig eröffnen die leitenden und halbleitenden Eigenschaften den Buckytubes Einsatzmöglichkeiten in der molekularen Elektronik. Buckytubes könnten als Schlüsselemente in einer molekularen Elektronik eingesetzt werden, die Moleküle als aktive Geräte (Transistoren, Schalter, Dioden) oder Verbindungen verwendet. Die Forschung des Konkurrenten IBM hat gezeigt, dass Nanotubes als Transistoren verwendet werden können, aber eine kommerzielle Nutzung der molekularen Elektronik befindet sich noch in ferner Zukunft. Da auf diesem Gebiet noch viel geforscht werden muss, lässt sich ein Marktvolumen für Buckytubes noch nicht abschätzen.

Ähnlich sieht dies im Bereich hochfester Materialien aus. Als einzelne Moleküle sind Buckytubes die stärksten, steifsten und zähesten Fasern der Welt. Es ist noch eine Menge Forschungsarbeit zu leisten, bevor makroskopische Materialien mit denselben Eigenschaften hergestellt werden können, die Nanotubes im nanoskaligen Bereich auszeichnen. Bereits bekannt ist, dass die Beimischung von Buckytubes in

Polymere bei einer Menge von wenigen Prozent den Härtegrad des Polymers deutlich erhöhen kann. Nanotubes werden wahrscheinlich das Material sein, aus dem die nächsten fortschrittlichen Hochleistungsmaterialien entwickelt werden, die zäher, stärker und leichter als heutige sind. Die Stärke von Nanotubes, die aus einer Wand bestehen, ist einzigartig, da sie über zusätzliche elektrische und thermische Eigenschaften verfügen, die anderen hochfesten Materialien fehlen.

Bei seiner Geschäftsstrategie setzt CNI voll auf kontinuierliches Wachstum. CNI verfügt aktuell über die exklusiven Rechte auf alles an der Rice University entwickelte geistige Eigentum auf dem Gebiet der Buckytubes. Außerdem verfügt das Unternehmen über eine Vereinbarung, dass CNI mit moderaten Mengen an Buckytubes versorgt wird. Im Moment verkauft CNI dieses Material und verwendet es für die Erschließung neuer Märkte. In vielen Fällen handelt es sich hierbei um anwendungsspezifische Partnerschaften mit etablierten Unternehmen.

CNI beabsichtigt, sich sehr schnell in die Richtung kommerzieller Größenordnungen zu bewegen. CNI hat Räume in einer Labor- und Pilotanlage gemietet, wo ein neuer Forschungsreaktor und eine Pilotanlage gebaut werden, die einige Pfund Buckytubes pro Tag produzieren können. CNI plant, seine fertige und endgültige Produktionsanlage Anfang 2005 in Betrieb nehmen zu können, und CNI geht davon aus, dass die Entwicklung der Märkte für Buckytubes und die Entwicklung des Unternehmens und der ausgereiften Produktionsanlage mit der zu erwartenden Produktnachfrage zusammenfallen. Während sich die Märkte für Buckytubes entwickeln, studiert CNI auch die Parameter des HiPCO-Verfahrens. Im Moment wird davon ausgegangen, dass es noch substantielle Möglichkeiten der Verfahrensverbesserung gibt. Diese könnten in den Bereichen der Umwandlung pro Vorgang und der Einsammlung des Nanotube-Produkts liegen. Diese Bereiche werden der spezielle Fokus des Unternehmens sein, mit dem Ziel, das Verfahren zu vereinfachen und die Produktionskosten zu reduzieren.

CNI arbeitet mit mehr als einem Dutzend an privaten Gesellschaften daran, Märkte für Nanotube-Produkte zu entwickeln. Das Unternehmen bezieht in seine Bemühungen auch staatliche Institutionen der USA ein wie die NASA, das Department of Energy und das Department of Defense.

Die Marketingstrategie von CNI ist darauf ausgerichtet, die Entwicklung der kommerziellen Nutzung von Nanotubes zu beschleunigen. Dieser Beschleunigungsvorgang bringt kooperative Forschung und gemeinsame Entwicklungen mit anderen Gesellschaften mit sich. Bis jetzt wurden die Forscher in ihrer Arbeit auf Grund des Mangels an Verfügbarkeit von Nanotubes, die aus einer einzelnen Wand bestehen, beschränkt. Wegen der nicht ausreichenden Mengen konnte an kommerziellen Anwendungen nicht gearbeitet werden. Die wichtigste Aufgabe von CNI ist daher die Versorgung der Gesellschaften und Forscher mit Buckytubes, damit die erforderliche Forschung und Entwicklung weitergeführt werden können. Um dieses Ziel zu erleichtern, wird CNI seine aus einer Wand bestehenden Nanotubes der Forschung zu einem Preis anbieten, der dazu geeignet ist, die Forschung und Entwicklung anzuspornen.

CNI wird sich anfangs auf die Märkte konzentrieren, die höhere Margen haben und voraussichtlich früher kommerzialisiert werden. Diese Märkte benötigen entweder die von CNI produzierten Nanotubes, welche aus einer einzelnen Wand bestehen, oder können mit diesen speziellen Nanotubes bedeutend besser arbeiten als mit Alternativprodukten. Gleichzeitig versucht CNI, eine Rolle bei strategischen Partnerschaften mit ausgewählten Kunden und Produktentwicklern zu spielen. Es ist das Ziel von CNI, seine einzigartige Versorgungsposition und neuartige Technologie in finanzielle Beteiligung bei Endverbrauchern einzusetzen. CNI errechnet sich so Einnahmeströme sowohl aus dem Verkauf seiner eigenen Produkte als auch aus dem Verkauf der Endprodukte durch Gesellschaften mit Hilfe von CNI-Nanotubes.

CNI ist noch nicht börsennotiert und konnte gerade seine erste Finanzierungsrunde abschließen. Dem Unternehmen flossen 15 Millionen Dollar von zwei Investoren zu, die zur Finanzierung des Forschungsreaktors und der Pilotanlage verwendet werden.

Bei CNI handelt es sich um einen zukünftigen Nanostock, dessen Wachsen man als Investor schon jetzt mit Interesse verfolgen sollte. Das Unternehmen befindet sich zwar noch in einem frühen Stadium, man kann CNI jedoch schon jetzt zu einem der interessantesten Unternehmen auf dem Gebiet der Nanotechnologie zählen. Wenn CNI in wenigen Jahren an die Börse geht, bietet sich auch Anlegern die Chance, an der erfolversprechenden Entwicklung des Unternehmens teilzuhaben.

## NanoFocus AG

Ein zukünftiger Börsenkandidat aus Deutschland ist die Duisburger NanoFocus AG. NanoFocus entwickelt, produziert und vertreibt optoelektronisch basierte Systeme zur dreidimensionalen Vermessung von Strukturen im Mikro- bis Nanometerbereich und deren bildlicher Darstellung. Mit 28 Mitarbeitern erwirtschaftete das Unternehmen im Jahr 2001 einen Umsatz von 3,1 Millionen Euro.

Die heutige NanoFocus AG wurde 1994 durch ein Expertenteam aus den Bereichen Optik, Elektronik, Messtechnik, Softwareentwicklung und Innovationsmanagement im MicroElectronicCentrum MEC in Duisburg gegründet. Die Gründer erkannten schon damals den wachsenden Bedarf in den unterschiedlichsten Industriebereichen und öffentlichen Forschungseinrichtungen nach hochauflösenden berührungsfreien, optischen 3-D-Qualitätssicherungssystemen im Mikro- und Nanometerbereich. Die Produkte der NanoFocus AG geben Anwendern die Möglichkeit, bisher nur durch langsamere oder fehlerbehaftete Methoden zu beobachtende und kontrollierende Fertigungsprozesse schneller, genauer und kostengünstiger zu überwachen und zu steuern. Die modular aufgebauten Systeme bestehen in der Regel aus einer optoelektronischen Einheit, die Flächen, Proben oder Objekte vermisst und die Daten digitalisiert, sowie der Software-basierten Komponente, die für die grafische Darstellung der Oberflächen und den Vergleich von Ist- mit Soll-zuständen sorgt. Die Marken und das Know-how des Unternehmens werden durch 30 Schutzrechte gesichert.

Die Systeme finden derzeit primär Einsatz in der Qualitätssicherung und -kontrolle im Mikro- bis Nanometerbereich. Das Unternehmen ist auf diesem Gebiet deutscher Marktführer und nimmt auch international eine Spitzenposition ein. Im Fokus liegt dabei klar die Halbleiterindustrie (Back-End-Bereich), vielversprechende Einsatzfelder in unterschiedlichen Branchen (Automobil- und Zulieferindustrie, Elektrotechnik, Leiterplattenhersteller, Maschinen und Werkzeugbau, Medizin, Life Science, Mikrosystemtechnik, IT) werden sukzessive erschlossen.

Nach dem Erreichen der Produktreife im Jahr 1999 ist NanoFocus in sehr kurzer Zeit der erfolgreiche Markteintritt gelungen. »Mit dem Verkauf von über achtzig 3-D-Qualitätssicherungssystemen auf Basis

der NanoFocus Technologien an renommierte Kunden im In- und Ausland, hat NanoFocus die Markteinführung seiner innovativen Produkte erfolgreich unter Beweis gestellt«, erklärt der promovierte Chemiker und Vorstandsvorsitzende der NanoFocus AG, Hans Hermann Schreier. »Nunmehr gilt es, die erkannten Marktsegmente in den verschiedenen Wirtschaftsbranchen fokussiert zu vertiefen und als wichtigste Quelle des Wachstums zu nutzen.«

Zu den Kunden von NanoFocus zählen namhafte internationale Konzerne aus verschiedenen Branchen, die Hauptabnehmer der Messsysteme kommen derzeit aus der Elektronik- und Automobilindustrie. Unternehmen wie DaimlerChrysler, BMW, Infineon, Motorola und Siemens finden sich genauso auf der Kundenliste des Unternehmens wie Forschungseinrichtungen renommierter Universitäten. Die Messsysteme werden branchenübergreifend in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt. So verwenden Automobilkonzerne die Systeme, um die Zylinder-Innenwände ihrer Hochleistungsmotoren zu vermessen, selbst Formel-1-Motoren werden mit Messsystemen der NanoFocus AG auf Produktionsfehler untersucht. Chiphersteller nutzen die Systeme in der Halbleitertechnik, Pharmaunternehmen verwenden die Messtechnik des Unternehmens zur Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit bei Tabletten. Auch bei exotischeren Anwendungen, wie beispielsweise dem Vermessen von versteinerten Orang-Utan-Zähnen, kommt die Technologie des Duisburger Unternehmens zum Einsatz.

Da der globale Trend zur weiteren Miniaturisierung vom Mikro- in den Nanometerbereich in den Industrienationen an Fahrt gewinnt, eröffnet das wachsende Betätigungsfeld dem Unternehmen immer neue Anwendungsgebiete.

Bereits jetzt werden rund 40 Prozent der Produkte ins Ausland verkauft. Mit den geplanten Mehrheitsbeteiligungen an Partnerunternehmen in den Vereinigten Staaten, Taiwan und Japan ist das Unternehmen bereits auf ein globales Wachstum ausgerichtet. »NanoFocus will den fortschreitenden Trend der Miniaturisierung komplexer Strukturen mitgestalten«, so Schreier. »Dies verlangt nach Highend-3-D-Qualitätssicherungssystemen, die berührungsfrei optisch arbeiten und trotz der Komplexität zuverlässig und bedienfreundlich sind.«

Im Jahr 2002 wird die NanoFocus AG ihre vierte Finanzierungsrunde abschließen. Durch diese Finanzierungsrunde soll der globale

Ausbau des Marketings und Vertriebs weiter forciert werden. Neben der Weiterentwicklung der Phasenmikroskopie sowie der Marktsegmentierung und Leistungssteigerung der bestehenden Produkte wird auch der Erwerb der Mehrheitsbeteiligung am US-Vertriebspartner durch diese Finanzierungsrunde ermöglicht.

Als nächster Schritt ist für die NanoFocus AG der Gang an die Börse denkbar. Mit HSBC wurde bereits ein Konsortialvertrag geschlossen, um einen möglichen Börsengang sachgerecht vorzubereiten. Das Unternehmen ist für einen Börsengang bestens gerüstet und verfolgt die Lage an den internationalen Finanzmärkten daher relativ gelassen. Für ein IPO spricht aus Unternehmenssicht bei einer besseren Marktlage an den Börsen eine ganze Reihe von guten Gründen. Die Erweiterung der finanziellen Spielräume könnte beispielsweise dazu genutzt werden, die Marktführerschaft im Bereich der Qualitätssicherung im Mikro- und Nanometerbereich weiter auszubauen. Auch würde durch Auflage eines Mitarbeiterbeteiligungsmodells die Gewinnung neuer qualifizierter Mitarbeiter erleichtert und die Sicherung des Know-hows verbessert. »NanoFocus verfügt derzeit über eine ausreichende Kapitalausstattung«, so der Vorstandsvorsitzende Schreier. »Mittelfristig kann jedoch der Börsengang eine gute Alternative sein, um das zukünftige Wachstum in den bestehenden Marktsegmenten, das Erschließen neuer Marktsegmente, die internationale Expansion und die forcierte Produktentwicklung zu finanzieren.«

## Omicron NanoTechnology GmbH

Die Nanotechnologie zieht sich durch verschiedene Industriebereiche, und natürlich spielt gerade die Oberflächenphysik auf diesem Gebiet eine besondere Rolle. Die Oberflächenphysik ist in Deutschland stark vertreten und genießt auch international einen guten Ruf. Einer der Gründe für ein solch gutes Image sind auch die Aktivitäten der Firma Omicron NanoTechnology GmbH aus dem hessischen Taunusstein. Omicron ist weltweit marktführend auf den Gebieten der Rastersondenmikroskopie im Ultrahochvakuum und deren Kombination mit kompletten Multi-Technik-Oberflächen-Analytiksystemen.

Haupt Einsatzgebiet der von Omicron entwickelten und vertriebenen Geräte ist die Oberflächenforschung an Universitäten sowie in staatlichen und industriellen Forschungslaboratorien. Das Ultrahochvakuum ermöglicht Untersuchungen von Strukturen und Prozessen auf atomarer Skala unter vollständigem Ausschluss von störenden Einflüssen, beispielsweise durch oxidierende Umgebungsluft.

Eine besondere Stärke von Omicron sind komplexe Systemlösungen, die durch Integration verschiedener Analysemethoden eine vollständige strukturelle und chemische Oberflächencharakterisierung erlauben. Am Firmensitz im Taunusstein arbeiten etwa einhundert Mitarbeiter; Tochterfirmen in den USA, Großbritannien, Frankreich und der Schweiz sowie ein internationales Vertriebs- und Servicenetz lassen die Mitarbeiterzahl auf insgesamt einhundertfünfzig belaufen. Die starke Weltmarktposition von Omicron zeigt sich im hohen Exportanteil: circa 75 bis 80 Prozent der Produkte gehen ins Ausland, mit Schwerpunkten Japan und USA. Im Geschäftsjahr 2000 erreichte Omicron einen Umsatz von rund 25 Millionen Euro.

Die Nanotechnologie stellt laut Firmengründer und Geschäftsführer Norbert Nold ein bedeutendes Geschäftsfeld für die Entwicklungsaktivitäten von Omicron dar. »Die Methoden der Oberflächenanalytik und der Rastersondenmikroskopie haben nicht nur die Grundlage zum Verständnis der besonderen Phänomene in der Nanowelt geschaffen, sondern werden auch in Zukunft unersetzliche Werkzeuge der Nanotechnologie sein«, so der Geschäftsführer. Auch zum Thema Börsengang bestehen bei Omicron schon konkrete Pläne: »Ein Börsengang von Omicron wird auf Sicht von zwei bis drei Jahren in Erwägung gezogen. Zum Thema Börsengang besteht allerdings eine ambivalente Haltung. Als Vorteile werden der Zugang zum Kapitalmarkt, die geeignete Basis zur Trennung von Eigentümern und Management und die Erhöhung der Attraktivität des Unternehmens für die Personalbeschaffungsmaßnahmen gesehen«, so Nold weiter. Andererseits erkennt der Geschäftsführer von Omicron auch die kurzfristige Sichtweise des Kapitalmarktes als Problem für dynamische, zyklische Prozesse in innovativen Hightech-Unternehmen.

Um fit für die Börse zu sein, wird der Schwerpunkt der Unternehmensentwicklung in den nächsten Jahren auf der Verbesserung der internen Strukturen und der Stärkung des Managements liegen, so dass

die zusätzlichen Voraussetzungen für einen möglichen Börsengang geschaffen werden. »Die endgültige Entscheidung für oder gegen einen Börsengang wird hauptsächlich durch den Kapitalbedarf in der Zukunft bestimmt werden.«

## Nanogate Technologies GmbH

Eines der spannendsten deutschen Nanotechnologie-Unternehmen ist die Nanogate Technologies GmbH. Das Unternehmen mit Hauptsitz in Saarbrücken hat sich auf das Segment der chemischen Nanotechnologie fokussiert und bietet Unternehmen ohne eigene Nanotechnologiekompetenz die Möglichkeit, die Potenziale dieser Technologie in Produktinnovationen und Wettbewerbsvorteile umzusetzen. Im universitären Umfeld in Saarbrücken gegründet, startete die Nanogate GmbH nach dem Einstieg der 3i Group plc. Mitte 1999 operativ. Seitdem wächst das Unternehmen erfolgreich und hat sich mittlerweile eine solide strategische Ausgangsposition für sein weiteres Wachstum erarbeitet. Im November 2000 erfolgten der Zusammenschluss mit der Colloid Surface Technologies GmbH, Wiesbaden und die Umfirmierung zur Nanogate Technologies GmbH. Im Februar 2001 wurde die hundertprozentige Tochter Nanogate Coating Systems GmbH gegründet, die für den Bereich der Endanwenderprodukte zuständig ist. Mitte Juni 2001 schloss Nanogate seine bislang letzte Finanzierungsrunde erfolgreich ab. Die von Sal. Oppenheim geführte Finanzierungsrunde mit einem Volumen von bis zu 9,3 Millionen Euro wurde unter Beteiligung von 3i- und equinet-VenturePartners durchgeführt. Die schwierige Transformation von wissenschaftlichen zu unternehmerischen Erfolgen hat Nanogate bereits vollzogen und nimmt mit seinem Unternehmenskonzept als »fully integrated Enabler« für chemische Nanotechnologie weltweit eine einzigartige Position ein. Je nach Anforderung entwickelt Nanogate sowohl für Industriekunden als auch für Endanwender spezifische Lösungen mit Hilfe neuer Werkstoffe, stellt programmierte Oberflächen oder Schlüsselmaterialien für Hightech-Produkte her. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf werkstoffbasierten Verfahren zur Entwicklung, Produktion und Vermarktung multifunktionaler Materialien. Diese Materialien besitzen, je nach Anforderung, vielfältige Funktionen wie beispielsweise

Transparenz, Haftfestigkeit, Abriebfestigkeit oder Korrosionsschutz. Nanogate bietet Komplettlösungen sowie systemoptimierte Einzelleistungen, dabei reicht das Leistungsspektrum von der Innovationsberatung über Werkstoff-Engineering, Produktion, Applikation bis hin zu umfassendem Support.

Bereits wenige Monate nach dem operativen Start brachte Nanogate gemeinsam mit Industriepartnern Produktinnovationen auf den Markt. Die Nanogate-Produkte sind typische Beispiele für das nanotechnologische Potenzial – heute und morgen. Schon heute existieren vielseitige Anwendungen, die Nanogate auf Basis seiner Werkstoffplattformen gemeinsam mit Kooperationspartnern entwickelt und auf den Markt gebracht hat: Die Produktpalette reicht von Antihaftbeschichtungen für Keramik- und Glasprodukte bis hin zu transparenten, leitfähigen Schichten. Auch bereits eingebaute Solaranlagen lassen sich beispielsweise mit Hilfe eines Nachrüstsystems optimieren, da Schmutz, Regen und Schnee leichter abgespült werden. Durch andere optimierte Oberflächen können Druckwalzen umweltverträglicher und kostengünstiger gereinigt werden, und auch Skier und Snowboards können mit Hilfe von selbstorganisierenden Polymeren bessere Fahreigenschaften erzielen. Mit einer breiten Patentbasis, etwa 70 Mitarbeitern blickt Nanogate optimistisch in die Zukunft. Der Umsatz des Unternehmens wuchs von etwa 1 Millionen Euro in 1999 auf über 2,5 Millionen Euro im Jahr 2000 und mehr als 4 Millionen Euro in 2001. Im Rahmen der Internationalisierung ist ein Börsengang zwar mittelfristig denkbar, wird allerdings nur als eine Finanzierungsmöglichkeit eingestuft. Die Unternehmensvision, »Nanogate als den weltweit führenden branchenübergreifenden Enabler für marktprägende Produktinnovationen auf Basis der chemischen Nanotechnologie« zu etablieren, verdeutlicht das Ziel, unter welchem sich die weitere Unternehmensentwicklung vollziehen soll.

## Quantum Dot Corporation

Ebenfalls erfolgversprechend ist die Quantum Dot Corporation, kurz QDC, mit Firmensitz in Hayward/Kalifornien. QDC hat sich auf Nanopartikel konzentriert, die auf Halbleitern basieren. Das Unternehmen entwickelt und vertreibt so genannte Quantum Dots. Diese »Quanten-

punkte« sind kleine halbleitende Kristalle, die in Zusammenarbeit des Lawrence Berkeley National Laboratory, des Massachusetts Institute of Technology, der University of Melbourne und der Indiana University entwickelt wurden. Diese nanodimensionierten Partikel haben einzigartige, begehrenswerte Eigenschaften, die sie zu einer hervorragenden Erforschungsplattform für Nukleinsäuren und Proteine machen. Die von QDC hergestellten Partikel bieten eine Reihe von einfachen und preisgünstigen Lösungen für zahlreiche Probleme auf dem Gebiet der Medikamentenentdeckung und -entwicklung. Zu diesen Problemen gehört der Bedarf nach weiteren biologisch relevanten Informationen und einer höheren Sensibilität, genau wie das Verlangen nach anwenderfreundlichen, kostengünstigen Prüfungen.

Quantum Dots sind weder kleine Moleküle noch sperrige Festkörper. Ihre Zusammensetzung und geringe Größe, die nur einige hundert bis einige tausend Atome beträgt, geben diesen Partikeln außergewöhnliche optische Eigenschaften, die durch Änderung der Größe oder Zusammensetzung der Partikel angepasst werden können. Quantum Dots absorbieren Licht und emittieren es kurz darauf wieder in einer anderen Farbe. Auch andere organische und anorganische Materialien zeigen dieses Phänomen, die so genannte Fluoreszenz. Das ideale Molekül, welches eine fluoreszierende Emission produziert, wenn es mit Licht einer bestimmten Wellenlänge erregt würde, wäre allerdings hell, nicht bleichend, mit einem engen, symmetrischen Emissionsspektrum und hätte eine Vielzahl von Farben, die durch eine einzelne Anregungs-Wellenlänge erregt werden könnten. Die Quantum Dots kommen diesem Ideal sehr nahe.

Quantum Dots kombinieren die begehrten Merkmale wie mehrfache Farben und Helligkeit, wie sie sonst nur bei fluoreszierenden Farben oder bei Halbleiter-LEDs vorzufinden sind. Außerdem haben Quantum-Dot-Partikel viele einzigartige optische Eigenschaften, wie sie nur in diesem Material zu finden sind. Die durchschlagendste Eigenschaft ist, dass die Farbe der Quantum Dots sowohl bei der Absorption als auch bei der Ausstrahlung auf jede gewählte Wellenlänge durch einfaches Ändern der Größe eingestellt werden kann. Das Prinzip hinter dieser einzigartigen Eigenschaft ist die Wirkung der »Quanten-Beschränkung«. Dieser Effekt führt dazu, dass verschiedene Größen von Quantum Dots verschiedene Wellenlängen an Licht emittieren. Mit

der Verwendung einer kleinen Anzahl von Halbleitermaterialien und einem Aufgebot an verschiedenen Größen kann QDC Quantum Dots herstellen, welche das Spektrum des Lichts (von Ultraviolett bis Infrarot) umspannen.

Quantum Dots haben eine hydrophile Oberfläche und können daher auch in wässrigen Lösungen eingesetzt werden. Man kann sie als Markierungssystem nutzen, und sie konkurrieren mit den traditionellen Methoden wie speziell angewandten Farben. Die Quantum Dots können an der DNA, an Proteinen oder an verschiedenen Arten von biologischen Molekülen wie beispielsweise Antikörpern angebracht werden. Sie können auch innerhalb einer Vielzahl von mikroskopischen Trägerpartikeln als Codierungsmethode eingesetzt werden.

Den Quantum Dots eröffnet sich eine große Zahl von möglichen Anwendungsgebieten im Bereich der Biologie und ein Markt mit einem riesigen Potenzial. QDC beabsichtigt ein Entwickler, Hersteller und Anbieter von biologischen Prüfungen zu werden. Das Unternehmen zielt auf die Technologieentwicklung mit Partnern, die Optimierung des Produkts und dessen Herstellung ab. Gegenwärtig werden erst kleine Mengen des Materials benötigt, aber QDC ist sich sicher, bald Quantum Dots in einer extremen Größenordnung, in Mengen von mehreren Kilogramm herstellen zu können.

Noch ist das Unternehmen nicht börsennotiert, Anleger können einen Börsengang jedoch in wenigen Jahren erwarten. Laut Carol Lou, Vizepräsidentin der Quantum Dot Corporation, plant das Unternehmen aktuell keinen Börsengang. Ein Börsengang ist jedoch ein langfristiges Ziel des Unternehmens. »Wir haben uns noch keine Gedanken über ein Datum für einen Börsengang gemacht und konzentrieren uns gegenwärtig auf die wissenschaftliche Entwicklung unserer Technologie«, so Carol Lou. »Wenn man sich den gegenwärtigen Zustand der Aktienmärkte anschaut, ist es schwierig, vorherzusagen, wann wir mit unseren Planungen für einen Börsengang beginnen.«

## California Molecular Electronics Corporation

Auf einem spannenden Gebiet ist die California Molecular Electronics Corporation, kurz CALMEC, tätig. CALMEC ist ein klassisches Unter-

nehmen aus dem Silicon Valley mit Büros in San José/Kalifornien, in Tucson/Arizona und Huntsville/Alabama. Der Businessplan der Firma ist auf das Ziel ausgerichtet, die Gesellschaft als führenden Konzern auf dem Gebiet der molekularen Elektronik zu positionieren.

Gegründet wurde das Unternehmen im März 1997 mit der Aufgabe, das Gebiet der molekularen Elektronik kommerziell zu entwickeln. In ihrem Businessplan definiert CALMEC den Begriff »molekulare Elektronik« als das Verwenden einzelner Moleküle, um Funktionen elektronischer Geräte auszuführen. CALMEC glaubt, dass diese einzelnen molekulargroßen Geräte das Potenzial haben, elektronische Schaltkreise zu produzieren, die viele hundertmal kleiner sind als gegenwärtige. Das Unternehmen geht ferner davon aus, dies zu bedeutend geringeren Kosten als die gegenwärtige Halbleiterindustrie zu ermöglichen. Mit diesen Aussichten erhofft sich CALMEC, die fast hundert Milliarden Dollar umsetzende Halbleiterindustrie zu revolutionieren. CALMECs Businessplan ist darauf ausgerichtet, möglichst schnell durch eigene sowie erworbene Forschungsergebnisse und Patente das neue Feld der molekularen Elektronik zu beherrschen. Das Unternehmen möchte dadurch zwei Geldquellen erschließen: Umsatz soll zum einen durch die Vermarktung und Lizenzvergabe eigener Patente auf von CALMEC patentierte Verfahrenstechniken generiert werden. Zum anderen möchte CALMEC Produkte selbst entwickeln und diese von Dritten produzieren und vermarkten lassen. Aktuell besitzt CALMEC eine Reihe an Patenten sowie Rechte auf diverse Technologien im Bereich der Molekularelektronik. Ein Beispiel hierfür ist ein von CALMEC patentiertes einzelnes Molekül, das die klassischen Eigenschaften eines Transistors aufweist. Ein weiteres interessantes von CALMEC erforschte Gebiet ist die Gas- und Dampfsensorik. Um den heutigen industriellen Standards zu genügen, wurden zur Analyse von Dämpfen hochkomplexe und vor allem teure Systeme entwickelt, um einen zuverlässigen, dauerhaften und vor allem flexiblen Einsatz zu ermöglichen. Die von CALMEC patentierte Technologie kann diese organischen Dämpfe analysieren, und das zu extrem günstigen Preisen. Die Sensorik ist extrem einfach, denn normale Oberflächen werden mit dem nanoskaligen Pulver beschichtet, das den eigentlichen Sensor darstellt. Unter verschiedenen Gegebenheiten wird ein Kontakt mit dem zu analysierenden Gas durch einen Farbumschlag angezeigt, wobei sich Emissionsgrad und die Geschwin-

digkeit der Analyse nahezu beliebig einstellen lassen. Auch eine Anzeige, ob die Luft wieder frei von Emissionen ist, ist je nach Sensortyp möglich. CALMEC vergibt für andere Firmen Lizenzen an diesem und ähnlichen Patenten, wodurch eine zusätzliche Einnahmequelle erschlossen, aber auch eine schnellere Verbreitung dieser nanotechnologischen Entwicklung ermöglicht wird.

CALMEC hat Anfang 2001 eine von der US-Börsenaufsicht SEC autorisierte Privatplatzierung abgeschlossen. Dabei wurden eine Million Anteile aus dem Firmenbesitz zu einem Anteilspreis von sechs Dollar ausgegeben. Es handelte sich hierbei um eine direkte Platzierung, die Anteile wurden von CALMEC direkt an interessierte Investoren verkauft. Noch machte die Unternehmensführung keine Anstalten, das Unternehmen an einer Börse zu notieren. Der Präsident und CEO der Firma, James J. Marek, jr., war höchstzufrieden mit dem Ergebnis der Privatplatzierung, die über das Internet abgewickelt wurde.

## Argonide Corporation

In einem jungen Stadium befindet sich die Ende 1994 in Pittsburgh/Pennsylvania gegründete Argonide Corporation. Bei Argonide handelt es sich um einen führenden Nano-Metall-Pulver-Lieferanten und den wahrscheinlich Einzigen, der Nano-Metall-Pulver in Kilomenen bereitstellen kann. Das Unternehmen wurde gegründet, um die Forschungs- und Entwicklungsbemühungen einer russischen Gruppe auf dem Gebiet der so genannten Nanopowders zu unterstützen. Die ersten Verkäufe von Nanopowders zu Forschungszwecken in Raketenantrieben erfolgten 1997, und der Verkauf von Nanopowder für andere Einsatzgebiete begann Mitte 1999.

Während die Zahl der Angestellten am heutigen Firmensitz in Sanford/Florida lediglich fünf Personen beträgt, so profitiert das Unternehmen von einem Team aus 60 Angestellten in Russland, die für Argonide forschen und entwickeln. Laut Firmengründer und Präsident Frederick Tepper schaffen es nur 5 Prozent der finanzierten Forschungsprojekte zur Herstellung von Nano-Metall-Pulver in das Stadium der kommerziellen Nutzung. Doch die Forschungs- und Entwicklungsabteilung in Russland hat für das Unternehmen große Vorteile. Die russi-

schen Forscher erhalten, obwohl die Arbeit als risikoreich und bisweilen sogar gefährlich einzustufen ist, nur etwa 10 Prozent vom Gehalt eines westlichen Wissenschaftlers. Langfristiges Ziel von Argonide ist es, eine Infrastruktur zur Herstellung dieser Nanomaterialien sowohl in Russland als auch in Florida aufzubauen, anstatt die Technologie in Russland zu entwickeln und sie in die Staaten zu importieren.

### Physical Sciences Inc.

Ebenfalls eigenständig ist die amerikanische Physical Sciences Inc., die sich auf Vertragsforschung und Entwicklungen in verschiedenen technischen Bereichen spezialisiert hat. Das Unternehmen hat seinen Firmensitz in Andover/Massachusetts, nördlich von Boston. Die Tätigkeitsfelder des Unternehmens reichen von der Grundlagenforschung bis zur Technologieentwicklung, mit einem Schwerpunkt bei angewandter Forschung. Fortschrittliche Technologien für die Luftfahrt, die Energieindustrie, den Umweltschutz, das produzierende Gewerbe und für medizinische Anwendungen sind die Spezialgebiete des Unternehmens. Seit seiner Gründung im Jahre 1973 leistete Physical Sciences Forschungs- und Entwicklungsdienste sowohl für die Regierung als auch für industrielle Kunden. Physical Sciences ist eine Entwicklungsfirma für neuartige Technologien, die danach strebt, ihre Produkte an kommerzielle Organisationen zu exportieren.

Das aktuelle Projekt von Physical Sciences ist eine Zusammenarbeit mit der Colorado State University zur Entwicklung einer verbesserten Membran aus Kohlenstoff-Nanotubes zum Einsatz in Methanol-Brennstoffzellen. Die amerikanische National Science Foundation beauftragte das Unternehmen mit diesem nanotechnologischen Projekt.

Physical Sciences erweitert seine Sachkenntnis bei der Herstellung von Hochleistungs-Elektrokatalysatoren und Elektroden für einen Einsatz auf dem Gebiet der Methanolpermeation. Gegenwärtig ist eines der größten Hindernisse, welches die Leistung von direkten Methanol-Brennstoffzellen hemmt, das Phänomen des Methanolübergangs durch die Polymerelektrolytenmembran. Dieses Phänomen verursacht eine Kathodendepolarisation und führt letztendlich zu einem Leistungsverlust. Der Ansatz von Physical Sciences soll Gebrauch von den einzigar-

tigen strukturellen und elektrischen Eigenschaften der Kohlenstoff-Nanotubes machen, um eine zusammengesetzte Membranstruktur zu schaffen. Eine solche Membranstruktur könnte den Methanol-übergang hemmen, während sie gleichzeitig eine hohe elektrische und Ionenleitfähigkeit ermöglicht. Physical Sciences arbeitet mit der Colorado State University zusammen, um die von der Universität entwickelte Nanotube-Membran in die von Physical Sciences entwickelte direkte Methanol-Brennstoffzellen-Technologie zu integrieren. Diese Bemühungen könnten zu einer Zunahme der Kraftdichte von 20 Prozent für die direkte Methanol-Brennstoffzelle führen und würden so die Leistungsfähigkeit und den Kosteneffekt für sowohl militärische als auch kommerzielle Anwendungen beträchtlich verbessern.

### Nanotherapeutics, Inc.

Ein weiteres Unternehmen mit einem interessanten Tätigkeitsfeld im Bereich Nanotech ist die amerikanische Nanotherapeutics, Inc. Im Jahr 1999 wurde das Unternehmen von Dr. James D. Talton und Dr. James M. Fitz-Gerald in Florida gegründet. Ziel des Unternehmens ist es, ausgewählte Life-Science- und andere Materialien für den Einsatz in medizinischen, pharmazeutischen und elektronischen Anwendungen zu entwickeln und zu kommerzialisieren. Der Schwerpunkt von Forschung und Entwicklung liegt bei Nanotherapeutics gegenwärtig auf dem Gebiet der Entwicklung von nanodicken Hüllen für mikroskopische und makroskopische Strukturen mit Hilfe einer neuartigen Puls-Laser-Depositionstechnologie. Nanotherapeutics führt aktuell Studien mit sechs großen Pharmakonzernen durch, unter anderem mit GlaxoSmithKline und AstraZeneca. Bei diesen Machbarkeitsstudien geht es um die Entwicklung von neuen Inhalations- und Injektionsflüssigkeiten. Nanotherapeutics hat gegenwärtig zehn Angestellte und verfügt über zehn weitere Berater, die sich auf unterschiedliche Gebiete spezialisiert haben. Der Fokus liegt aktuell auf einer patentierten Umhüllungstechnologie, die unter Verwendung einer schnellen thermischen Verarbeitungsmethode Partikel mit Feststoffen umhüllen kann. Diese Technik kann nanoskalige Umhüllungen, so genannte Coatings, mit einer Größe von zehn bis tausend Nanometern auf Partikeln deponieren, die eine Größe von 0,5 bis tau-

send Mikrometer haben. Diese Technik kann mit zahlreichen Materialien, wie Polymere, Keramik, Metalle und Biomaterial, genutzt werden. Dieses Nanocoating zeigt beachtliche Erfolge in Anwendungen mit zeitlich andauernder Freisetzung von Arzneimitteln und als Umhüllung von verschiedenen Technikpulvern sowie als supraleitender, pulverisierter Überzug für verschiedene elektronische Geräte.

Nanotherapeutics befindet sich laut Präsident und CEO Dr. James D. Talton aktuell in Verhandlungen über eine Eigenkapitalinvestition durch ein Pharmaunternehmen, die in den nächsten Monaten durchgeführt werden könnte. »Wenn wir nicht die Akquisitionsrouten einschlagen, erwarte ich einen Börsengang in den nächsten zwei bis vier Jahren«, so Talton.

## Nanofilm Technologie GmbH

Auch die in Göttingen ansässige Nanofilm Technologie GmbH ist auf dem Gebiet der Oberflächenanalytik tätig. Nanofilm entwickelt, produziert und vertreibt Instrumente für die optische Oberflächenanalytik und beansprucht im Bereich der Abbildenden Ellipsometrie die Technologieführerschaft. Das Unternehmen wurde 1991 als Spin-off des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie in Göttingen gegründet. Im gleichen Jahr wurde das erste Produkt, ein Brewster-Winkel-Mikroskop, in Paris vorgestellt. Nach weiteren Produkten im Langmuir-Blodgett-Bereich und einem Forschungsprojekt »Brewster-Winkel-Mikroskopie am Auge« im Jahre 1994 wurde 1997 ein »Abbildendes Ellipsometer« auf dem Material Research Society Meeting in San Francisco in den Markt eingeführt. Mit diesem einzigen kommerziellen »Abbildenden Ellipsometer« verfügt Nanofilm über einen Entwicklungsvorsprung gegenüber den bisher etablierten Firmen. Das Ellipsometer ist mit einem Mikroskop gekoppelt. Dadurch ist es möglich, ein ellipsometrisches Echtzeitbild einer Probenoberfläche zu erhalten. Somit kann die Probe in einem großen Sichtfeld untersucht werden, und man kann erstmals bei gleichzeitig hoher Ortsauflösung feststellen, ob die Beschichtung homogen ist oder Defekte aufweist.

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Produkte von Nanofilm sind Biochips (Protein- und DNA-Chips), Displays, organische LEDs,

Micro Contact Printing, Polymere, Kolloide und LB-Filme sowie diverse allgemeine Anwendungen von Schichtdickenmessungen. Nanofilm vertreibt seine Produkte vor allem in die Bereiche Materialforschung und Biotechnologie. Die Zielkunden des Unternehmens sind die ersten Adressen internationaler Hightech-Konzerne sowie Forschungseinrichtungen. Zu den Kunden in der Industrie zählen bereits heute unter anderem IBM, Canon, Epson, Mitsubishi, Philips und die Bayer AG. Zu den Kunden unter den Forschungseinrichtungen zählen das Los Alamos National Laboratory, die Universitäten von California, Los Angeles, Berkley und unter anderem die Max-Planck-Institute in Deutschland. Die Exportquote von Nanofilm beträgt über 80 Prozent und verdeutlicht die internationale Ausrichtung des Unternehmens. Bereits 1996 war das Unternehmen mit einer Niederlassung in den Vereinigten Staaten in Los Angeles vertreten. Zum besseren Auftreten auf dem amerikanischen Markt wurde im Februar 2000 das Joint Venture Accurion LLC im Silicon Valley, USA eröffnet. Im Jahr 2001 betrug der Umsatz des Unternehmens über 1,7 Millionen Euro.

Bei Nanofilm wird aktuell über die Möglichkeit einer Börsennotierung diskutiert. Obwohl sich das Management noch nicht definitiv zu einer Zusage oder einem Termin äußern wollte, sollte mit einem Börsengang in den nächsten Jahren gerechnet werden können.

## Zyvex

Von einem Börsengang weit entfernt ist die amerikanische Zyvex. Trotzdem handelt es sich gerade bei Zyvex aus dem texanischen Richardson zweifellos um eines der spannendsten Nanotechnologie-Unternehmen überhaupt.

Zyvex wurde 1997 mit dem Ziel gegründet, Technologien der molekularen Nanotechnologie zu entwickeln. Wenn die Forschungs- und Entwicklungsarbeit des Unternehmens erfolgreich ist, will Zyvex ein Gerät konstruiert haben, das zur molekularen Herstellung eingesetzt werden kann. Dieses Gerät, welches Assembler genannt wird, wäre dann prinzipiell in der Lage, aus einem gewissen Vorrat an chemischen Bausteinen eine Vielzahl von Materialien, Bestandteilen und Maschinen herzustellen.

Das Ziel von Zyvex ist die Herstellung und der Vertrieb eines solchen

Universalherstellungssystems an Firmen, die jede Art von Produkten herstellen. Wenn sich die Möglichkeit bietet, möchte Zyvex mit dem Assembler auch exklusive Produkte selbst produzieren.

Die ersten Produkte, die Zyvex selbst herstellen möchte, könnten so genannte »Fast-Perfekte-Materialien« sein, die alle erdenklichen Eigenschaften, wie zum Beispiel extrem fest, leicht oder unverwüstlich, vereinen könnten und neben diesen Eigenschaften in jeder gewünschten Form hergestellt werden könnten.

Zyvex strebt als erste Produkte Computer an, die mit einer Anzahl an zugrunde liegenden Technologien hergestellt werden könnten. Verbesserte Batterien, Solarzellen, Displays und ultrakleine Maschinen betrachtet das Unternehmen auch als mögliche frühe Einsatzgebiete des Assemblers.

Was sich wie aus einem Science-Fiction-Roman liest, ist bei Zyvex erklärtes Firmenziel.

Die Strategie des Unternehmens ist zunächst, als erstes Unternehmen überhaupt einen Assembler herzustellen. Der Zyvex-Assembler soll dann dazu genutzt werden, um Produkte mit der höchsten Präzision, dem besten Design und den geringsten Kosten in allen erdenklichen Produktkategorien herzustellen. Zyvex erwartet, dass der Assembler aus einem Computer bestehen wird, der die Kontrolle über eine Vielzahl von Manipulatoren hat, welche durch die Anweisung des Computers die eigentliche Herstellung chemisch vollziehen.

Das Unternehmen geht davon aus, dass ein Manipulator aus einer geringen, ihm zur Verfügung stehenden Anzahl chemischer Stoffe eine Vielzahl von gewünschten Komponenten herstellen kann, indem er einfach die Zusammensetzung der molekularen oder atomaren Bausteine variiert.

Durch Änderung des vom Computer gesteuerten Programms könnte der Manipulator verschiedene Objekte zusammensetzen und somit verschiedene Komponenten herstellen.

Als wichtigstes Produkt sieht Zyvex den Assembler an, der die eigene Assemblerproduktion aufnimmt. Den ersten Assembler herzustellen ist zweifellos ein schwieriges Unterfangen, doch das Ziel, mit diesem Assembler zunächst weitere Assembler herzustellen, vereinfacht den Prozess. Im Gegensatz zur Halbleiterindustrie, wo sich mit jeder neuen Produktgeneration die Herstellungskosten erhöhen, geht Zyvex davon

aus, dass sich mit jeder neuen Assemblergeneration die Herstellungskosten verringern. Diese Annahme beruht auf dem Gedanken, dass bei der molekularen Herstellung die Assemblerkomponenten selbst hergestellt werden könnten und somit die Assembler-Selbstproduktion genauso viel Kosten pro Gramm verursacht wie die von ihnen hergestellten Produkte.

Der intellektuelle Aufwand bei der Herstellung jeder neuen Assemblergeneration mag wachsen, der Zeitaufwand und die Produktionskosten würden aber mit wachsendem Produktionsvolumen ins Unbedeutende tendieren.

Erklärtes Ziel von Zyvex ist natürlich, zahlreicher Gründe wegen, die Assembler so zu gestalten, dass sie nicht imstande sind, sich außerhalb ihrer Produktionsstätte selbst zu replizieren.

Obwohl das Unternehmen auf dem Weg zum Assembler viele Produkte entwickelt, die kommerziell vertrieben werden könnten, gibt es aktuell kein Produkt, das von Zyvex verkauft wird. Trotz der Tatsache, dass Zyvex schon eine Reihe von einfachen Nanomanipulatoren entwickelt hat, betrachtet das Unternehmen den Verkauf von diesen als kontraproduktiv zum eigentlichen Unternehmensziel.

Obwohl die Nanomanipulatoren ein wichtiger Bestandteil von Zyvex' zukünftigem Assembler sind und potenzielle Kunden das Unternehmen dazu animieren könnten, noch bessere Nanomanipulatoren herzustellen, ist der Markt für solche Nanomanipulatoren zu klein, und die personelle Belastung wäre für Zyvex zu groß. Außerdem bestehen solche Manipulatoren aus konventionellen Komponenten und stellen somit keine signifikante Wertschöpfungsmöglichkeit für Zyvex dar.

Zyvex arbeitet mit einer Reihe von akademischen Forschungsteams in den Vereinigten Staaten zusammen. Das Unternehmen finanziert diese Forschungsteams, um primär die Forschung voranzutreiben und zu unterstützen, um neue Forscher zu kontaktieren (Personalbeschaffung) und um das Unternehmen in der akademischen sowie wissenschaftlichen Szene zu etablieren.

Als Fundament einer erfolgreichen Entwicklungstätigkeit sieht das Unternehmen Patente, Rechte und allgemeines Know-how auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Bei Zyvex stehen im Moment acht Patentanmeldungen in den Vereinigten Staaten an. Viele von diesen Patenten werden, direkt nach der Erteilung des Patents in den Vereinigten

Staaten, auch international patentiert. Natürlich ist es aktuell schwierig, abzuschätzen, welche von diesen Patenten für Zyvex' Erfolg ausschlaggebend sein werden.

Für die Zukunft strebt Zyvex an, jährlich, je nach Entwicklungserfolgen, acht bis zehn Patente anzumelden.

Ernsthafte Wettbewerber auf dem Weg zum ersten Assembler sind laut Zyvex wahrscheinlich nicht vorhanden. Am nächsten kommt dem von Zyvex aufgegriffenen Ziel des Assemblers die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit von IBM, die sich allerdings auf das Interesse am Verständnis von fundamentalen physikalischen Prinzipien und der Entwicklung von besseren elektronischen Geräten reduziert.

Zyvex beschäftigte im Jahr 2001 etwa 35 Mitarbeiter und stellt kontinuierlich neue Mitarbeiter ein. Allein in den folgenden zwölf Monaten sind für Wissenschaftler, Ingenieure und Softwareentwickler etwa zwanzig neue Stellen vorgesehen.

Das Unternehmen ist in privater Hand und plant auch vorerst keinen Börsengang. Da ein Erfolg bei der Entwicklung des Assemblers noch ungewiss ist, wurden von Zyvex bislang keine Anstalten unternommen, sich Kapital aus den traditionellen Quellen, wie beispielsweise von Venture-Capital-Firmen, zu organisieren. Für die meisten Venture-Capital-Firmen ist das Geschäftsmodell von Zyvex zu lang und risikoreich, da sich eine Investition in das Unternehmen erst in vielen Jahren auszahlen könnte. Da die molekulare Nanotechnologie aber langsam als große Chance erkannt wird, beginnen Subventionsprogramme der US-Regierung, an denen sich Zyvex auch beteiligen wird.

Das Risiko für Zyvex, an dieser großen Aufgabe zu scheitern, ist enorm. Es spricht für das Unternehmen, einen Börsengang erst dann in Betracht zu ziehen, wenn der Erfolg in Form des Assemblers in greifbare Nähe gerückt ist und realisierbar wird. Wie viel Zeit bis dahin vergehen wird, ist ungewiss. Optimisten hoffen auf erste Erfolge in fünf bis zehn Jahren, Pessimisten halten diese molekulare Nanotechnologie für nicht durchführbar.

In jedem Fall handelt es sich bei Zyvex um ein Unternehmen, dessen Entwicklung man weiter aufmerksam verfolgen sollte. Zyvex versucht, einen Traum der Menschheit zu verwirklichen: aus einer Grundsubstanz an Chemikalien jedes Produkt in jeder möglichen Form herzustellen. Ob und wann dies gelingt, wird uns die Zukunft zeigen.





Wer sich intensiv mit der Nanotechnologie beschäftigt, wird feststellen, wie atemberaubend schnell die Entwicklung voranschreitet. Als die Idee zu diesem Buch entstand, ging man von einem Zeitraum von 10 bis 15 Jahren aus, bis hochkomplexe nanotechnologische Produkte ihre Anwendung finden würden. Heute erwartet man, dass bereits in drei bis sieben Jahren die ersten Nanotechnologie-Produkte den IT- oder Health-Care-Sektor grundlegend verändern werden. Die Nanotechnologie befindet sich längst auf dem Weg; sie wird sich immer stärker in unser Leben einbringen. Dies wird sich nicht nur in innovativen und faszinierenden Produkten für die Allgemeinheit äußern, auch als Anleger wird man finanziell am Fortschritt teilhaben können. Sicher ist es heute schwierig, abzuschätzen, wie man am erfolgreichsten von dieser Entwicklung profitieren kann. Visionen werden sich bewahrheiten, aber auch relativieren. Wichtig ist, dass man sich heute nicht zukünftigen Trends verschließt und offen für neue Denkansätze ist. Wer im jetzigen Anfangsstadium die Nanotechnologie unterschätzt, der hat aus den Entwicklungen der Vergangenheit wenig gelernt. Die Nanotechnologie ist facettenreicher als alle bisherigen Technologieformen. Sie ist mit ihren interdisziplinären Anwendungsgebieten eine umfassende Entwicklung, der man sich gerade als Anleger nicht entziehen kann.

Die wichtigste Basis für erfolgreiche Investitionen ist eine weiterführende Auseinandersetzung mit dieser neuen Technologie. Das umfassende Thema »Nanotechnologie« wird in nächster Zeit immer intensiver von den unterschiedlichsten Medien aufgegriffen werden. Heute bietet sich jedem Anleger dank des Internets direkt oder indirekt die Möglichkeit, sich schnell und umfassend zu informieren. Wer sowohl die zügige Entwicklung als auch die langfristige Entfaltung der Nanotechnologie mit den Augen eines Investors aufmerksam verfolgt, kann von dieser Revolution profitieren. Wichtig ist es, auch als Anleger den Mut zu visionärem Denken zu haben. Noch steht die Entwicklung am Anfang, niemand hat etwas verpasst, niemand ist zu spät auf das

Zukunftsthema Nanotechnologie aufmerksam geworden. Alle Möglichkeiten liegen in Ihrer Hand. Sicher ist es gerade in einem solchen Anfangsstadium einer neuen Technologie am schwierigsten, sich für eine Investition zu entscheiden. Die Hoffnungen auf den technologischen Fortschritt werden von Zweifeln überschattet. Doch wer hatte schon Erfolg mit einer Investition, über die keine Zweifel bestanden? Die Rückbesinnung auf längst vergessene Werte wie den »langfristigen Anlagehorizont« und eine »Diversifikation« spielt auch und gerade bei Investitionen im Bereich Nanotech die zentrale Rolle. Wer sich ausreichend informiert und seine Anlageentscheidungen gut vorbereitet, wird mit seinen Investitionen gewiss die größte Freude haben. Niemand kann mit Sicherheit sagen, wie uns die Nanotechnologie in zehn, zwanzig oder fünfzig Jahren beeinflussen wird. Das ist im Grunde auch unerheblich: Schon jetzt bieten sich aussichtsreiche Anlagemöglichkeiten und Innovationen, von denen jeder profitieren kann. Eines ist sicher: Es hat gerade erst richtig angefangen, und es wird weitergehen. Wichtig ist, die Geschehnisse weiterzuverfolgen und seine Schlüsse zu ziehen. Mit diesem Buch haben Sie den Grundstein gelegt, sich Ihr eigenes Bild von der Zukunft zu gestalten. Es liegt nun in Ihrer Hand, das Beste daraus zu machen.



## Danksagung

---

Dieses Buch wäre nie ohne die Beteiligung einer ganzen Reihe von Personen zustande gekommen, die uns bei der Arbeit der vergangenen Jahre großartig unterstützt haben. Von der ersten Idee bis zum vorliegenden Buch war es ein langer Weg, der ohne die Hilfe vieler nicht bewältigt worden wäre. Allen Beteiligten aus den Bereichen Industrie, Wissenschaft und Investment an dieser Stelle zu danken würde den Rahmen bei weitem übersteigen.

Viele haben uns zahlreiche Stunden ihrer Zeit geopfert und uns mit Informationen geholfen, dieses Buch entstehen zu lassen. Zahlreiche Interviews wurden geführt und fanden sich nur allzu oft mit einem oder zwei Sätzen in diesem Buch wieder. Die große Leistung aller Beteiligten bedeutet uns sehr viel und verhalf diesem Buch maßgeblich zu seiner jetzigen Form. Wir möchten uns dafür ganz herzlich bedanken.

Ein ganz besonderer Dank geht an Julia Schössler vom Bertelsmann Content Network in Hamburg. Ohne ihre Begeisterung und ihr großartiges Engagement wäre das Buch in seiner jetzigen Fassung nie entstanden. Ihr Einsatz für das Projekt hat es uns letztlich ermöglicht, das Buch beim renommierten FinanzBuch Verlag in München herausgeben zu dürfen.

Bedanken möchten wir uns auch bei dem Präsidenten der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz, Herrn Hans-Olaf Henkel. Sein Vorwort bedeutet uns sehr viel und war für uns die Krönung der jahrelangen Arbeit an diesem Projekt.

Besonderer Dank gilt unserem Verleger Christian Jund. Sein Vertrauen in das Projekt und seine Unterstützung mit Rat und Tat haben das Buch in der jetzigen Form maßgeblich geprägt. Durch seine herausragenden Leistungen als Verleger hat er sich und den FinanzBuch Verlag an die Spitze der deutschsprachigen Finanzliteratur gebracht. Es war uns eine besondere Freude, mit ihm arbeiten zu dürfen.

Der größte Dank gilt unseren Freunden und Familien. Ihnen allen haben wir in den vergangenen Monaten viel abverlangt. Ihre tatkräftige Unterstützung und ihr moralischer Beistand haben uns den nötigen Rückhalt gegeben, das Projekt erfolgreich umzusetzen.

Herzlichen Dank euch allen.



# Anhang



## > Lexikon für Nanotechnologie-Investoren

---

> A >>

**Absoluter Nullpunkt** > Auf der absoluten Temperaturskala die niedrigste theoretisch mögliche Temperatur. Der absolute Nullpunkt bei 0 Kelvin entspricht  $-273,15$  °C. Elementarteilchen bewegen sich hier gar nicht mehr und ruhen in ihrer Position. Nahe dem absoluten Nullpunkt herrscht auch Supraleitung, und Flüssigkeiten können in einem supraflüssigen Zustand vorliegen.

**Aerosil** > Nanopulver, das zur Steuerung der Eigenschaften von Lacken und als Verstärkerfüllstoff in Silikonkautschuk zum Einsatz kommt.

**Ångström** > Nach dem schwedischen Physiker Anders Jonas Ångström benannte Einheit zur Messung der Wellenlänge des Lichts. Ein Å entspricht  $10^{-10}$  m.

**Antikörper** > Antikörper sind ein wichtiger Bestandteil des Immunsystems. Millionen verschiedener Antikörpertypen verteidigen einen Organismus gegen Fremdkörper wie Bakterien und Viren.

**Assembler/Nanobot** > Der Assembler wurde als Gedankenexperiment vom Prinzip her von Richard Phillips Feynman geschaffen und durch Eric Drexler weiterverfolgt und konkretisiert. Milliarden dieser Maschinen für Arbeitsprozesse auf molekularer oder atomarer Ebene sollen durch gezieltes Zusammensetzen von Atomen makroskopische Gegenstände herstellen. So ließen sich absolut identische Kopien von Materie herstellen, oder nutzlose Abfälle könnten zu wertvollen Rohstoffen werden. Der Assembler besteht bisher nur als Gedankenexperiment. Verschiedene Firmen und Institutionen sind mit der Erforschung beschäftigt, wobei die Machbarkeit dieses Konzeptes nach wie vor umstritten ist.

Mit Nanobots werden prinzipiell alle Roboter in nanoskaligen Dimensionen bezeichnet. Also auch das Gedankenexperiment eines U-Boots, das durch die Blutbahnen eines Menschen reisen würde, wäre ein Nanobot.

**Atom** > »Atom« stammt als Begriff aus dem Griechischen, womit die Philosophen bereits vor rund 2000 Jahren die kleinste Einheit beschrieben, in die man Gegenstände aufspalten konnte. Durch verschiedene moderne Atommodelle wurde der Begriff weiter definiert, bis das heutige Atommodell entstand.

Atome sind die kleinsten chemischen, elektrisch neutralen Einheiten und können nur durch physikalische Eingriffe gespalten werden. Radioaktive Atome zerfallen unter Strahlungsaussendung. Atome bestehen aus einem Kern mit Neutronen und Protonen sowie einer Atomhülle, die aus Elektronen besteht. Atome können sich mit gleich- oder andersartigen Atomen zu Molekülen zusammensetzen. Alle bekannten Atome sind im Periodensystem aufgeführt. Elektrisch nicht neutrale »Atome«, die zu viele oder zu wenige Elektronen besitzen, werden als Ionen bezeichnet.

## > B >>

**Binär** > Binärsystem, auch Dualsystem genannt. Im Binärsystem kommen nur zwei Zahlen vor; Computer beschreiben hier mit 0 und 1 die Zustände Aus und Ein. Durch Aneinanderreihung der beiden Zustände lassen sich auch Zahlen des normalen Dezimalsystems oder Texte beschreiben.

**Biochip** > Diese Chipart besteht gegenwärtig aus einer Glas- oder Siliziumplatte, auf die so genannte Mikroarrays aufgebracht sind. Mikroarrays sind eine definierte Anordnung von biomolekularen Sonden auf der Oberfläche der Platte. Diese biomolekularen Sonden sind die bisher einzige existierende Verknüpfung zwischen Biomolekülen und elektronischen Bauteilen. Heute werden Biochips genutzt, um verschiedene Proben zeit- und platzsparend zu analysieren. In Zukunft soll ein Biochip auf Basis von Biomolekülen wie ein Halbleiterchip arbeiten. Der aus Nukleinsäuren und Proteinen aufgebaute Biochip soll dann gegenüber dem Halbleiterchip eine höhere Leistungsdichte aufweisen.

**Biomimetik/Bionik** > (griech.: mimesis = Nachahmung) Die Bionik versucht, durch das Nachvollziehen natürlicher Bildungsprozesse neue und optimierte Werkstoffe herzustellen, beispielsweise in der Medizin oder Energietechnik.

**Bit** > **B**inary Digit, binäre oder zweiwertige Zahl. Ein Bit stellt in der Computertechnik die kleinste Einheit dar und kann entweder den Wert 0 als falsch oder 1 als wahr annehmen, der durch eine (nicht) anliegende Spannung dargestellt wird. Durch Aneinanderreihen von Bits in Achtergruppen entsteht ein Byte. Durch Bytes lassen sich dann auch komplexere Zahlen oder Buchstaben beschreiben.

**Bootstrap-Problem** > Bedeutet ungefähr so viel wie Anlaufschwierigkeiten. In Bezug auf den Assembler stellt es die Problematik da, den ersten Assembler (der sich dann replizieren könnte) zu bauen. Dieses Problem wird gerne mit der Frage verglichen, ob die Henne oder das Ei zuerst existierte, da in der Theorie der Assembler selbst Grundlage für den Assembler ist.

**Bottom-up** > Grundlegendes Konzept, aus kleinen Einzelteilen (nanotechnologisch betrachtet also einzelnen Atomen oder Molekülen) ein größeres System zusammenzubauen, im Gegensatz zu Top-down-Ansätzen. Gegenwärtig wird oft eine Verknüpfung der gegensätzlichen Konzepte zur Realisierung von Projekten verwendet. Langfristig gesehen bietet die Bottom-up-Variante ein größeres Potenzial zur Umsetzung nanotechnologischer Konzepte. Momentan beschränkt sich dieses Konzept hauptsächlich auf Selbstorganisation von Atomen und Molekülen. Der von Eric Drexler erdachte Assembler soll künftige Produkte »von Grund auf« aus einzelnen Atomen bauen.

**Brennstoffzelle** > Kontinuierlich arbeitendes System, das aus chemischer elektrische Energie erzeugt. Durch die Oxidation eines Brennstoffs (i. d. R. Wasserstoff) fließen Elektronen über einen elektrischen Leiter und reagieren mit dem zugeführten Oxidationsmittel (i. d. R. Sauerstoff). Wenn Wasserstoff und Sauerstoff als Brenn- bzw. Oxidationsmittel verwendet werden, entsteht als einziges Reaktionsprodukt Wasser.

**Brewster-Winkel-Mikroskop** > Viele Lebensvorgänge spielen sich an organischen Grenzflächen, beispielsweise Membranoberflächen ab. Mit Hilfe der Brewster-Winkel-Mikroskopie ist es möglich, die charakteristischen Strukturen dieser Systeme detailliert zu untersuchen. Das Grundprinzip der Messung basiert auf dem Brewsterschen Gesetz. Ein Lichtstrahl, der unter einem beliebigen Winkel auf eine flüssige Grenzfläche

trifft, wird normalerweise teilweise von der Oberfläche reflektiert. Ein anderer Anteil des Lichts wird auch ins optisch dichtere Medium gebrochen. Beim Brewster-Winkel, der bei der Wasser-Luft-Grenzfläche bei 53,1 Grad liegt, wird ein linear polarisierter Lichtstrahl aber nicht mehr reflektiert. Eine Videokamera wird dann eine dunkle Flüssigkeitsoberfläche detektieren. In Anwesenheit grenzflächenaktiver Substanzen ändert sich der Brewster-Winkel geringfügig, und diese Substanzen werden daher als helle Partikel auf dunklem Untergrund dargestellt. Mit Hilfe dieser mikroskopischen Technik lassen sich Tensidaggregate untersuchen, die einen Nanomometer dick sind und eine laterale Größe von einem Mikrometer überschreiten. Neben statischen Informationen lassen sich auch dynamische Phänomene, wie die Bildung oder Zerstörung dieser Strukturen, detailliert analysieren.

**Buckyball/Buckminster-Fulleren** > Anordnung von 60 Kohlenstoffmolekülen in Fünf- und Sechsecken, ähnlich wie die Struktur eines Fußballs, daher auch Fußballmolekül. Der Terminus wird vom Namen des Architekten Richard Buckminster Fuller abgeleitet, dessen Konstruktionen den Fußballmolekülen ähneln.

**Byte** > siehe Bit

> C >>

**CAD** > (engl.: computer-aided design) Entwicklung oder Herstellung von Produkten mit Hilfe von Computerunterstützung. CAD-Systeme stellen zwei- oder dreidimensionale Baupläne virtuell dar, die sich anschließend praktisch ausführen lassen.

**Carrier/Drug Delivery** > Nanotubes oder Fullerene können für Medikamente als Carriers dienen. Diese können einen medizinischen Wirkstoff in ihrem Hohlraum aufnehmen und an den Wirkungsort transportieren. Die Eigenschaften eines solchen Carriers lassen sich entsprechend seinem Anwendungsgebiet anpassen. Solche Systeme, die Medikamente gezielt an ihren Wirkungsort ausliefern, werden auch als Drug-Delivery-Systeme bezeichnet und finden bereits erste Anwendungen in der Praxis.

**CCD** > (engl.: charge-coupled device) Diese »ladungsgekoppelte Vorrichtung« verschiebt Ladungen durch ein von außen anliegendes Signal. In der Bildbearbeitung werden CCD-Schaltkreise für digitale Fotografie und Videoaufnahmen benutzt.

**CEO** > Englische Abkürzung für »Chief Executive Officer«, in Deutsch: Geschäftsführer bzw. Vorstandsvorsitzender.

## > D >>

**Diffraktiv** > Begriff aus der Physik, der die Strahlenbrechung bzw. Beugung des Lichts beschreibt. Diffraktive- oder Beugungsoptiken finden Anwendung bei verschiedenen optischen Geräten als Bestandteil von Linsensystemen. Für andere Strahlungsarten gibt es beispielsweise Röntgenbeugungsoptiken.

**Diode/LED** > Eine Diode ist ein elektronisches Bauteil, das Strom nur in einer Richtung (von der Kathode zur Anode) fließen lässt. Damit kann man beispielsweise in Stromnetzen üblichen Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln. Heute werden hauptsächlich Dioden aus Halbleitern gefertigt. Spezielle Anwendung finden Dioden als Solarzellen, bei denen durch Lichtbestrahlung ein Strom fließt. Außerdem sind LEDs (light emitting diodes) heute weit verbreitet. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung strahlt diese Halbleiterdiode Lichtwellen aus.

**Diodenlaser** > Diodenlaser sind die effizienteste künstliche Lichtquelle überhaupt. Auf Grund ihres hohen Wirkungsgrades und ihrer langen Lebensdauer haben sie sich in vielen Anwendungen bewährt. Die äußerst kompakten Diodenlaser gewinnen zunehmend an Bedeutung als Strahlquellen für eine direkte Bearbeitung in der Industrie oder Medizin und als hocheffiziente Pumpquellen in Festkörperlasern. Die eigentliche Strahlquelle ist ein so genannter »Laserbarren« in den Abmessungen 10 mm x 0,6 mm x 0,1 mm, der auf einen Kühlkörper aufgebracht ist. Durch eine geeignete Stapelung dieser Barren zu so genannten »Stacks« addieren sich die Laserleistungen durch optische Überlagerung der einzelnen Strahlenbündel.

**DNA/DNA-Sequenz/Nukleinsäure-Sequenzen** > Desoxyribonukleinsäure. Eine von zwei Arten der Nukleinsäuren (neben der RNA). Die DNA speichert die Erbinformationen eines Lebewesens und ist in jedem Zellkern vorhanden (daher auch der Name: Nucleus – Zellkern). Außerdem sind Nukleinsäuren auch ein Mittel zur Kommunikation innerhalb der Zelle. Zellen können bei der Zellteilung die Informationen des Zellkerns eigenständig kopieren. Retroviren besitzen nur RNA und haben keine Möglichkeiten, sich selbst zu vermehren. Dafür verwenden sie Wirtszellen, die die Viruserbinformationen vermehren und daran sterben.

DNA besteht aus einer Doppelhelixstruktur, in die verschiedene Moleküle (Basen) eingelagert werden, deren Abfolge die Erbinformationen darstellt. Die Doppelhelix ist ein Riesenmolekül mit einem extrem hohen Molekulargewicht.

In der modernen Genomforschung spielt die DNA eine wichtige Rolle. Manche Krankheiten werden anscheinend durch defekte DNA-Strukturen ausgelöst. Durch Forschung könnten hier neue Medikamente entstehen.

In der Technik könnte die DNA als hochdichtes Speichersystem Anwendung finden. Genauso hat ein DNA-Computer bereits als Laborexperiment ein hochkomplexes mathematisches Problem gelöst. Dieses Prinzip könnte in weiterentwickelter Form eine nutzbare Anwendung finden.

**Dotierung** > Die Dotierung bezeichnet das kontrollierte Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiter wie Silizium oder Germanium. Dadurch wird die elektrische Leitfähigkeit dieses Stoffes gezielt verändert, was für die Halbleiterindustrie Grundlage für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen ist.

**Duallisting** > Das Duallisting bezeichnet die Aufnahme eines bereits börsennotierten Unternehmens an einer weiteren Börse.

> E >>

**Elektrischer Lichtbogen** > Erstmals 1812 von Sir Humphry Davy beobachteter Effekt. Zwischen zwei Elektroden entsteht bei genügend starkem Strom in Luft oder anderen Gasen bei niedrigem Druck ein grell leuchten-

der Lichtbogen. Darin können bei Normaldruck in Luft Temperaturen um 3500 °C erzeugt werden.

**Elektrode/Kathode/Anode** > Elektroden dienen als Mittel, um eine Verbindung zwischen herkömmlichen Schaltkreisen und anderen leitenden Stoffen wie Gasen oder Flüssigkeiten (Elektrolyten) herzustellen. Ein Beispiel für eine Elektrode ist Graphit. Die positive Elektrode wird als Anode, die negative als Kathode bezeichnet.

**Elektrolumineszenz** > Lumineszenz beschreibt die Emission von Licht, ohne dass eine Verbrennung stattfindet. Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen mit Ausnahme der Metalle können durch Energiezufuhr zum Leuchten angeregt werden. Ein Teil der Energie wird von den Stoffen als Licht wieder abgegeben. Wird die Energie durch ein elektrisches Feld zugeführt, spricht man von Elektrolumineszenz, wie sie beispielsweise bei Gewitterblitzen oder Leuchtstoffröhren vorliegt.

**Elektromagnetisches Feld** > Bezeichnung für das gesamte Spektrum elektrischer und magnetischer Felder.

**Elektron** > Elementarteilchen, das im Gegensatz zu Protonen einfach negativ geladen und auch ein Baustein der Atome ist. Elektronen sind ein sehr wichtiger Faktor für viele naturwissenschaftliche Phänomene. Elektrischer Strom, Wärmeleitung, chemische Reaktionen, überall spielen Elektronen als freie Elementarteilchen oder durch ihren Übergang zwischen Atomen eine wichtige Rolle.

Quantenmechanische Eigenschaften der Elektronen werden für zukünftige Anwendungen wie beispielsweise den Quantencomputer eine wichtige Rolle spielen. Der Spin eines Elektrons als quantenmechanische Eigenschaft beschreibt den Drehimpuls eines Elektrons.

Das Gegenstück des Elektrons ist das Positron. Während das Elektron als Elementarteilchen ein Baustein der Materie ist, wird das Positron der Antimaterie zugeordnet. Antimaterie besteht aus den gegensätzlichen Bausteinen der Materie (Antiprotonen, Antielektronen, Antineutronen).

**Elektronenmikroskop/TEM** > Das Durchstrahlungselektronenmikroskop (TEM – Transmissionselektronenmikroskop) unterscheidet sich vom

Rasterelektronenmikroskop dahin gehend, dass es nicht die Oberfläche einer Probe mit einem stark gebündelten Elektronenstrahl abtastet, sondern die Probe wird von Elektronenstrahlen durchleuchtet. Für die Elektronenmikroskopie werden meistens Elektronenstrahlen mit einer Wellenlänge von rund fünf Nanometern verwendet. Die Probe darf nur wenige tausendstel Millimeter dick sein und kann bis um das Einmillionfache vergrößert werden. Zur Serienreife wurde das Elektronenmikroskop bereits Ende der 30er Jahre gebracht, die Erfindung wird nach langem Streit mittlerweile Ernst Ruska zugeschrieben.

Ein Elektronenmikroskop kann Proben nur im Vakuum untersuchen, da die Elektronenstrahlen sonst durch die Umgebung abgelenkt würden.

**Elektrooptik** > Mit »Elektrooptik« wird ein Gebiet bezeichnet, das sowohl etwas mit Elektrotechnik (Elektronik) als auch mit Optik zu tun hat. Der Begriff ist jedoch nicht fest definiert oder genormt. Unter Optik versteht man die Lehre vom Licht, wobei jedoch auch angrenzende Spektralbereiche (Infrarot- und Ultraviolettbereich) einbezogen werden. Ältere Arbeitsgebiete der Elektrooptik sind z. B. die Beleuchtungstechnik und die Fernsehtechnik, und zu den neueren Gebieten gehören die Lasertechnik, die optische Nachrichtentechnik und die optische Messtechnik (Messung mechanischer, elektrischer oder magnetischer Größen mit Hilfe optischer Methoden). Es ist zu beobachten, dass die moderne Elektronik, die Nachrichtentechnik und die Datentechnik sich in zunehmendem Maße optischer Methoden und Verfahren bedienen. Es existieren allerdings auch andere Gebietsbezeichnungen mit gleicher oder ähnlicher Bedeutung.

**Ellipsometer** > Die Ellipsometrie ist die genaueste Methode zur Bestimmung der Dicke von nicht elektrisch leitenden Schichten. Das Verfahren ist sehr empfindlich, genau und zerstörungsfrei. Ein Laserstrahl fällt unter einem bestimmten Winkel und mit definierter Polarisation auf die Probenoberfläche, wird dort reflektiert und anschließend auf Polarisationsänderungen untersucht. Aus den gewonnenen Messwerten lassen sich optische Konstanten und die Dicke der obersten Schicht berechnen. Ellipsometer sind in der Lage, Schichtdicken mit Genauigkeiten bis zu Bruchteilen eines Atomdurchmessers zu bestimmen. Es ist möglich, gleichzeitig Schichtdicke und Brechungsindex am jeweiligen Messpunkt zu bestimmen, das heißt der Brechungsindex muss nicht über die ganze Fläche konstant sein.

**Emitter** > Ein Emitter ist Teil eines Transistors und dient hier als Elektronenquelle.

**Erbgut** > siehe DNA

**Excimerlaser** > Der Name Excimerlaser kommt von »excited dimer«, was für zweiatomige angeregte Moleküle steht. Elektroden, die von einem elektrischen Hochleistungsschalter immer gleichmäßig impulsartig mit Hochspannung versorgt werden, regen das Gasgemisch an, ionisieren die Atome also und überführen sie in einen höheren Energiezustand. Das Gasgemisch entlädt sich, wobei Energie in Form von Licht frei wird und die Gasteilchen in den Ausgangszustand zurückfallen. An beiden Enden der Laserröhre befinden sich spezielle Spiegel, einer teildurchlässig, einer undurchlässig, die die Energie des Lichtes verstärken. Am teildurchlässigen Ende tritt der Laserstrahl aus. Je länger die Gasentladungseinheit ist, desto höher ist auch die Laserausgangsenergie. Die Laserstrahlstärke kann durch die Hochspannungsentladungseinheit computergesteuert variiert werden. Der Laserstrahl liegt im ultravioletten Bereich, ist also sehr energiereich und hat Wellenlängen unter 400 nm, wobei die Wellenlänge abhängig vom Gasgemisch ist. Die Gasentladungen haben eine Pulsfolgefrequenz von bis zu 500 Entladungen pro Sekunde.

> F >>

**Fullerene** > Erst 1985 von Richard Smalley, Harold W. Kroto und Robert Curl, jr. entdeckte neue Modifikation des Kohlenstoffs, neben den bekannten Diamant und Graphit. Anordnung von 60 oder mehr Kohlenstoffatomen in einer kugel- oder röhrenförmigen Struktur, die einen Hohlraum bildet. Gemeinsam haben alle Fullerene die Anordnung der Atome in Fünf- und Sechsecken. Der Name stammt von dem amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller, dessen geometrischen Bauten den Fullerenen in der Struktur ähneln. Eine Anwendung der Fullerene ist besonders bei Drug-Delivery-Systemen interessant.

## &gt; G &gt;&gt;

**Gasphasen-Reaktionen** > In der Materialwissenschaft interessiert man sich seit geraumer Zeit vor allem für das Verhalten von Gasphasenreaktionen bei der Materialsynthese. Hierbei kann durch eine geeignete Prozessführung die molekulare Struktur der Endprodukte in gezielter Weise beeinflusst werden. Besonders die Abscheidung von Partikeln aus der Gasphase, die allgemein unter dem Namen CVD-Prozess (engl.: chemical vapor deposition) geführt wird, hat bereits eine breite und industrielle Bedeutung bei der Herstellung von z. B. Industriekeramiken und Halbleiterbauelementen gefunden. Im Bereich der Nanotechnologie sind die Gasphasenprozesse auf Grund ihrer Vorteile, das heißt der hohen Reinheiten der Endprodukte und der Generierung feinsten Nanopartikel, besonders interessant.

**Gatter** > So genannte Gatter sind die elementarsten Operationen digitaler Computer. Gatter sind im Prinzip Schalter, die geöffnet oder geschlossen sein können und so die Zustände 0 und 1 verkörpern. Ein NICHT-Gatter verändert den Wert 0 in 1 und umgekehrt. Ein Kontrolliert-NICHT-Gatter arbeitet im Prinzip genauso, allerdings muss ein zweites (Kontroll-)Bit gesetzt (1) sein. Für einen Quantencomputer reichen diese beiden Schaltungen aus, um sämtliche Rechenoperationen durchzuführen. Herkömmliche Computer arbeiten mit solchen zu tausenden verknüpften Schaltungen und bringen so die heute weit verbreiteten Leistungen, da solche Schaltungen von ihnen millionenfach in der Sekunde durchgeführt werden.

**Gen** > Grundeinheit der Erbinformation. Ein Gen besteht aus einem DNA-Abschnitt, der die Information zur Synthese einer RNA enthält. In einigen Fällen ist die RNA selbst das Endprodukt. Meist dient sie aber dem Transport der genetischen Information zu den Ribosomen, wo dann Proteine gebildet werden.

**Genom** > Summe der Erbanlagen eines Organismus

**Gigabyte** > Bezeichnung für ein Speichervolumen von Computersystemen. Je nach Bedeutung eine Milliarde Bytes oder  $2^{30}$  Bytes, was von dem zugrunde liegenden binären System abgeleitet ist.

**Gigahertz** > Die Geschwindigkeit von heutigen Computern wird mittlerweile in Gigahertz angegeben. Ein Gigahertz beschreibt eine Milliarde Zustandsänderungen des Mikroprozessors pro Sekunde, also eine Milliarde Takte.

**GMR-Effekt/Giant Magnetoresistance** > Der GMR-Effekt ist ein Magnetowiderstandseffekt. Unter Magnetowiderstandseffekt versteht man, dass sich der Widerstand eines Materials durch Anlegen eines Magnetfeldes oder, wenn das Material in ein Magnetfeld gebracht wird, ändert. Bei ursprünglichen Verfahren ist diese Änderung nur relativ klein. Der GMR-Effekt erreichte eine Steigerung von rund 400 Prozent. Für den GMR-Effekt nutzt man mindestens zwei magnetische Schichten, die parallel zueinander angebracht werden, und eine Zwischenschicht, deren Dicke jeweils im unteren Nanometerbereich liegt.

Anwendung findet der GMR-Effekt bei Festplatten zum Datenschieben und Auslesen. Allerdings können hiermit auch Sensoren (beispielsweise für das ABS) optimiert werden.

**GPS-System** > (engl.: global positioning system) Das globale Positionssystem ermöglicht durch Satellitennavigation mit 24 Satelliten und bodengestützten Relais, an jedem Punkt der Erde die genaue Lage, auch in Bezug auf die Höhe, sowie die Geschwindigkeit zu bestimmen. Neben der militärischen Anwendung gibt es auch zivile GPS-Systeme, die neben einer Positionsbestimmung und somit Zielführung auch die Ortung von Fahrzeugen oder Gegenständen ermöglichen.

**Gray Goo** > (brit. engl.: grey goo) Bedeutet ungefähr so viel wie graue Schmiere. Geprägt von Eric Drexler, der damit ein Schreckensszenario von außer Kontrolle geratenen Assemblern beschreibt. Diese sich unkontrolliert selbstvermehrenden Maschinen würden jede Art von Materie in eine graue Schmiere verwandeln, große Teile der Erde als eine staubige Wüste hinterlassen. Dieses Szenario ist allein aus technischer Sicht innerhalb dieses Jahrhunderts kaum denkbar. Aber auch entsprechend realisierte Assembler werden nach Expertenmeinung bei entsprechender Forschung nie eine solche Macht erreichen können.

## &gt; H &gt;&gt;

**Halbleiter** > Materialien, die sich bei niedrigen Temperaturen wie Isolatoren verhalten (Glas, Kunststoffe), bei normaler Temperatur schlecht leiten und durch weitere Temperaturerhöhung, Lichteinfluss oder gezielte Verunreinigungen (Dotierung) Strom fast wie ein Leiter (Aluminium, Kupfer) leiten können. Beispiele für Halbleiter sind Silizium und Germanium. Die modernen Mikroprozessoren basieren alle auf entsprechend bearbeitetem Silizium.

**HealthCare** > Englischer Begriff für »Gesundheitsversorgung«, wird neu-deutsch auch als Synonym für den »Gesundheitsbereich« verwendet.

## &gt; I &gt;&gt;

**Infrarotstrahlung** > 1800 von William Herschel entdeckte elektromagnetische Strahlung, die eine etwas größere Wellenlänge als die des elektrischen Lichts hat. Die Wellenlängen gehen bis in den Bereich mehrerer hundert Mikrometer.

**Integrierter Schaltkreis/IC/Chip** > (engl.: *integrated circuit*) Integrierter Schaltkreis meint zusammenfassend miniaturisierte Bauteile wie Transistoren oder Widerstände auf einem einzelnen Chip, wobei dieser Begriff mittlerweile oft mit der gleichen Bedeutung versehen wird wie IC. Moderne Chips werden auf einem Halbleiterkristall, üblicherweise Silizium, hergestellt, wobei durch verschiedene Verfahren wie Lithographie die eigentlichen Leiterbahnen aus Kupfer oder Aluminium aufgetragen werden. Moderne Mikrochips (Mikroprozessoren) haben zehn und mehr Millionen Transistoren auf einer Fläche von wenigen Quadratzentimetern. Solche Chips ermöglichen heute neben logischen und arithmetischen Operationen auch das Speichern von Informationen.

**Interferenz** > Interferenz ist ein physikalischer Effekt, der bei der Überlagerung von Wellen (alle möglichen Arten, wie Schall, Licht, Funk, etc.) auftritt. Konstruktive Interferenz beschreibt das Aufeinanderfallen von gleichartigen Wellen, die sich so gegenseitig verstärken. Destruktive

Interferenz beschreibt zwei nicht phasengleiche Wellen, die sich bei der Überlagerung gegenseitig abschwächen oder vernichten.

Im Bereich des sichtbaren Lichts kann das Schimmern von Ölfilmen oder Seifenblasen als Beispiel für Interferenz angesehen werden. Bei Holographien oder der Interferometrie findet dieser Effekt Anwendung.

**Interferometer** > Ein Interferometer kann extrem genau die Überlagerung (Interferenz) von Lichtwellen messen. Parallele Lichtstrahlen werden in einem Interferometer durch Spiegel und halbdurchlässige Optiken geführt und zur Messung überlagert. Die so entstehende Interferenz kann ausgewertet Aussagen über die Präzision von Oberflächen (bspw. Teleskopspiegel) treffen. Die Auswertung von kleinsten Winkeländerungen erlaubt auch die Vermessung von Sternen (Sterneninterferometrie).

**IPO** > Englische Abkürzung für initial public offering. IPO bezeichnet die Neuemission von Aktien bislang nicht börsennotierter Unternehmen.

## > K >>

**Karat** > (1) internationales, metrisches Karat: Maß für das Gewicht von Edelsteinen. 1 Karat entspricht 0,2 g. (2) Anteil von reinem Feingold an einer Goldlegierung. 24-karätiges Gold besteht aus reinem Gold.

**Katalysator** > Ein Katalysator ist in der Chemie ein Stoff, der durch seine bloße Anwesenheit eine Reaktion schon bei geringeren Temperaturen als eigentlich für die Reaktion nötig ablaufen lässt. Katalysatoren gehen unverändert aus der Reaktion hervor und können nur mögliche Reaktionen beschleunigen, entstehende Reaktionsprodukte würden bei entsprechenden Bedingungen auch ohne Katalysator entstehen.

Für Automobile wird Platin als technischer Katalysator eingesetzt, um giftige Stickoxide, Kohlenmonoxid und Benzinreste in unschädlichere Substanzen umzuwandeln.

Für Organismen sind Biokatalysatoren (Enzyme) die wichtigste Grundlage zur Synthese von lebenswichtigen Grundstoffen oder zum Abbau von giftigen Substanzen wie Wasserstoffperoxid.

**Kathodenheizung** > Bestandteil jeder herkömmlichen Fernsehöhre. Durch Erhitzung einer metallischen Kathode werden so Elektronen freigesetzt, die in einer Braunschen Röhre entsprechend abgelenkt das sichtbare Bild ergeben.

**Kolloid** > Bezeichnung für eine Suspension nanoskopisch kleiner Teilchen in einem Medium. Die Verteilung von kleinsten festen oder flüssigen Teilchen in einem Gas wird als Aerosol bezeichnet, eine Emulsion stellt eine feinst verteilte Flüssigkeit in einer anderen flüssigen Phase dar. Feste Teilchen in einer Flüssigkeit werden als Sol bezeichnet, wobei ein zähes und gleichzeitig elastisches Sol als Gel bezeichnet wird. Die winzigen Teilchen eines kolloidalen Systems können mit dem Lichtmikroskop nicht erkannt werden und stoßen sich auf Grund ihrer Größe innerhalb des Dispersionsmediums immer wieder so ab, dass die verteilte Phase nicht zu Boden sinkt.

**Kondensator** > Elektronisches Bauteil, das zur Speicherung von Ladungen dient.

**Kryptographie** > Schon in der Antike wurden durch Umstellen von Buchstaben Texte codiert, auch in der Bibel sind solche Chiffren nachgewiesen worden.

Unter Kryptographie versteht man allgemein das Ver- und Entschlüsseln von Informationen. Ein Klartext wird in einen Schlüsseltext verwandelt, indem die Zeichen nach einem bestimmten Schema vertauscht oder ersetzt werden. In der Datenübertragung wird der so genannte RSA-Algorithmus vom Grundprinzip her bisher als der sicherste Schlüssel angenommen. Durch die Multiplikation von zwei vielstelligen Primzahlen wird ein Produkt als Schlüssel erreicht, das von binären Computern ohne Schlüssel nur sehr schwer zu entschlüsseln ist. Diese Technik ist sicherer als andere Methoden, die von leistungsstarken Großrechnern relativ problemlos decodiert werden können, wäre allerdings für einen Quantencomputer eine relativ leicht zu bewältigende Aufgabe.

**Künstliche Intelligenz/KI/AI** > (engl.: artificial intelligence) Eigentlich ein Teilgebiet der Informatik, das die Fähigkeiten einer Maschine beschreibt, menschliches Denken und Handeln teilweise oder völlig nachzuahmen. In der heutigen Wissenschaft geht die KI-Forschung in zwei Richtungen, eine

Analyse des menschlichen Denkens sowie die Weiterentwicklung von Computersystemen, so dass sie eines Tages an die Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns heranreichen könnten. Ob jemals ein KI-System realisiert werden kann, ist momentan nicht absehbar.

## > L >>

**LASER** > (engl.: light amplification by stimulated emission of radiation) »Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsfreisetzung«. Das Prinzip eines Lasers wurde erstmals 1960 von Theodore Maiman experimentell umgesetzt. Ein Laser erzeugt idealerweise Licht von nur einer Frequenz. Prinzipiell breiten sich die Lichtwellen phasengleich aus, wodurch ein Laser eine sehr hohe Intensität erreicht.

**Laserablation** > Das Verfahren der Laserablation (Abtragung von Material durch Laserbestrahlung) mit dem Excimerlaser ermöglicht eine gute Bearbeitung von Materialien. Diese können durch flächenhaftes Abtragen markiert oder durch einen punktförmigen und in die Tiefe wirkenden Abtrag geschnitten und gebohrt werden. Die Ablation (lat.: ablatum = entfernt) beschreibt das Abschmelzen oder Verdunsten von Eis durch Wind, Wärmeeinfluss oder direkte Sonneneinstrahlung.

**Lateral** > lat.: seitlich

**Lichtmikroskop** > Mit seinen zwei Hauptbestandteilen Objektiv und Okular vergrößert das Lichtmikroskop mit Hilfe des sichtbaren Lichts Gegenstände, manche Geräte können so mehr als 2000fache Vergrößerungen erreichen. Besondere Lichtmikroskope können dreidimensionale Bilder erzeugen oder durch besondere Effekte (bspw. Fluoreszenz) normalerweise kaum oder nur schwer sichtbare Eigenschaften einer Probe erkennbar machen.

**Life Science** > Der angloamerikanische Begriff für »Lebenswissenschaften« ist ein Sammelbegriff für wissenschaftliche und technische Disziplinen wie Biochemie und Biotechnologie, die Lebensprozesse untersuchen, aber gleichzeitig auch beispielsweise durch Genmanipulationen zu steuern versuchen.

**Lithiumionenakkumulator** > Der Lithiumionenakku (auch Li-Ion) ist heute der beste und weit verbreitetste Akku. Einer seiner Vorteile ist, dass nicht wie beim NiMH-Akku der Memory-Effekt auftritt: Man kann den Akku zu jeder Zeit wieder aufladen und muss nicht warten, bis der Akku vollkommen leer ist, ohne einen Leistungsabfall zu riskieren. Außerdem besitzt der Akku eine relativ hohe mögliche Leistungsabgabe.

Nachteil dieser Akkutechnik ist neben den hohen Fertigungskosten im Vergleich zum NiMH-Akku auch die geringere Lebensdauer. Li-Ion-Akkus reagieren außerdem empfindlich auf extreme Temperaturen (Entladung).

**Lithographie/Photolithographie** > (griech. lithos = Stein, graphein = schreiben) Ursprünglich beschreibt die Lithographie herkömmliche Druckverfahren. Integrierte Schaltkreise in modernen Computerprozessoren werden durch Photolithographie mit UV-Licht als Leiterbahnen in Silizium hergestellt. Die heutige Technik erlaubt das Herstellen von vielen hundert identischen Schaltkreisen auf kleinsten Flächen.

**Lotusblüteneffekt** > Eigenschaft der Lotuspflanze, deren Blätter durch ihre Struktur Schmutz kaum anhaften lassen. Kleinste Noppen auf der Blattoberfläche erzielen diesen Effekt, der heute technisch nachgeahmt wird. Wasser kann so haftenden Schmutz mit geringer Kraft abwaschen. Anwendung findet der Lotusblüteneffekt bereits bei Glasflächen. Weitere Möglichkeiten wären imprägnierte Kleidungsstücke oder vor Graffiti geschützte Flächen.

## > M >>

**Makroskopisch** > (griech.: makro = groß, lang) Im Gegensatz zu mikroskopisch beschreibt makroskopisch große, sichtbare Strukturen. Alles mit dem bloßen Auge Sichtbare gehört zur makroskopischen Welt.

**massiv parallel** > Der Begriff beschreibt die Fähigkeit eines Computers, mehrere Aufgaben nebeneinander abarbeiten zu können. Quanten- oder DNA-Computer sollen in Zukunft eine deutlich höhere Leistung in diesem Bereich erbringen, weshalb gerade bei ihnen besonders von massiv paralleler Informationsverarbeitung gesprochen wird.

**Materie (Anti-)** > (lat.: materia: Stoff) Jeder Stoff beziehungsweise jede Substanz wird in der klassischen Physik als Materie bezeichnet, egal ob sie als Feststoff, Flüssigkeit oder Gas vorliegt. Im Gegensatz zur klassischen Physik kennt man heute den engen Zusammenhang zwischen Materie, Masse und Energie. Man kennt heute die Bestandteile der Materie, die Elementarteilchen. Diese Elektronen, Protonen und Neutronen sind ihrerseits nach neueren Erkenntnissen wieder aus Grundbausteinen wie Quarks aufgebaut. Alles, was auf der Erde existiert, besteht aus diesen Elementarteilchen. Der Gegenpart zur Materie ist die so genannte Antimaterie. Sie besteht aus den entsprechenden Antiteilchen wie Positronen statt Elektronen.

**MEMS/NEMS** > Mikroelektromechanische Systeme, in einer weiteren Steigerungsform der Miniaturisierung entstehen so genannte NEMS (Nanoelektromechanische Systeme). Systeme im Mikrometerbereich, die auf Kräfte ansprechen oder solche auslösen können, also praktisch als Mikroroboter dienen können. Miniaturisierte Beschleunigungsmesser sind Bestandteil zum Auslösen von Airbags. Zur Herstellung eines Assemblers über den Top-down-Ansatz verfolgen die Forscher unter anderem eine kontinuierliche Verkleinerung solcher MEMS-Roboter. Bis zum endgültigen Größenziel muss ein solches System noch um den Faktor Tausend schrumpfen.

**Mikroelektronik** > Zweig der Elektronik, der sich mit Entwicklung und Einsatz von integrierten Schaltungen befasst.

**Mikroskopisch** > (griech.: mikro = klein) Beschreibung für verschwindend kleine Strukturen, die nur noch durch Mikroskope betrachtet werden können. Für Nanostrukturen wäre eher der Name nanoskopisch passend.

**Molekulare Elektronik** > Mit dem Begriff der molekularen Elektronik bezeichnet man alle elektronischen Geräte mit Dimensionen im Nanometerbereich. Der Begriff bezieht sich insbesondere auf die aus molekularen Bauteilen gefertigten Geräte, die nicht aus den bislang in der Halbleiterindustrie üblichen Materialien hergestellt werden. Ein Beispiel für die molekulare Elektronik sind Transistoren aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen.

**Molekül** > (lat.: moles = Klumpen) Der Begriff Molekül wurde von dem deutschen Arzt Daniel Sennert erstmals 1618 eingeführt. Lange Zeit wurden die Begriffe Atom und Molekül synonym verwendet. Erst durch die Molekülhypothese des italienischen Physikers Avogadro 1811 wurde die Grundlage für einen endgültigen Beweis der Existenz von Molekülen geschaffen.

Ein Molekül besteht aus zwei oder mehr einzelnen Atomen und ist nach außen hin elektrisch neutral. Moleküle, die aus zwei gleichartigen Atomen bestehen, werden auch homonukleare Moleküle (Sauerstoff  $O_2$ , Wasserstoff  $H_2$ ) genannt, im Gegensatz dazu stehen heteronukleare Moleküle aus verschiedenen Atomen wie beispielsweise Wasser ( $H_2O$ ). Makromoleküle können aus mehreren hunderttausend einzelnen Atomen bestehen.

**Moore's Law** > 1965 von dem heutigen Intel-Seniorchef Gordon Moore aufgestellter Bezug über die Entwicklung der Transistorendichte auf Computerprozessoren. Zunächst ging er auf Grund der damals vierjährigen Entwicklung davon aus, dass die Transistorenzahl sich jedes Jahr verdoppeln würde. 1975 korrigierte er diesen Bezug dahin gehend, dass die Verdoppelung alle zwei Jahre eintreten würde. Heute wird meistens ein Zeitrahmen von 18 Monaten genannt. Mit den heute üblichen Lithographiemethoden wird nach Moore's Law deshalb in zehn bis 15 Jahren ein Ende der stetigen Verkleinerung und damit Leistungssteigerung erwartet. Sollte die Nanoelektronik die Mikroelektronik ablösen, ist davon auszugehen, dass das Kurvenverhalten sich zunächst prinzipiell weiter fortsetzen lässt.

**Morphologie** > Die Lehre von der äußeren Gestalt der Lebewesen. Die Morphologie ist als Forschungsrichtung bedeutungsgleich mit der Anatomie.

**Multitasking** > Die Fähigkeit, mehrere Aufgaben nebeneinander auszuführen. Besonders bei Computerbetriebssystemen spricht man von Multitaskingfähigkeit. Werden beispielsweise mehrere Aufgaben in verschiedenen kurzen Zeitfenstern nacheinander abgewickelt, erscheint das für den Nutzer auf Grund der langsamen Wahrnehmung parallel, also wie Multitasking.

## &gt; N &gt;&gt;

**Nano** > (griech.: nanos = Zwerg) In der Physik beschreibt die Vorsilbe nano den milliardsten Bruchteil einer Einheit. Im Gegensatz dazu wird Giga für das Milliardenfache einer Einheit verwendet.

**Nanocomposites/Nanokomposite** > Nanokomposite bilden neben Glas, Keramik, Metall und Polymeren eine neue Klasse von Hybrid-Werkstoffen. Sie werden als kleinste Strukturelemente auf Basis chemischer Syntheseprinzipien geschaffen und können die Eigenschaften von bisher bekannten Materialien in sich vereinen, die zum Teil bisher widersprüchlich waren, beispielsweise die Flexibilität von Polymeren und die Härte von Keramiken.

**Nanokristalline Materialien** > Nanokristalline Materialien können als Sonderfall der nanostrukturierten Materialien betrachtet werden. Nanokristallin bedeutet, dass das betreffende kristalline Material Korngrößen im Nanometerbereich besitzt. Gewöhnliche Metalle besitzen Korngrößen im Mikrometerbereich. Solche Metalle sind weicher, schwächer und brüchiger als nanokristalline Materialien.

**Nanometer** > Längenmaß, das den milliardsten Teil eines Meters bzw. den millionsten Teil eines Millimeters beschreibt. Auf einem Nanometer lassen sich fünf bis zehn Atome nebeneinander unterbringen. Ein menschliches Haar ist ungefähr um das Siebzigtausendfache dicker.

**Nanopartikel/Nanopulver** > Mit dem Begriff Nanopartikel werden kleine Teilchen mit einer Partikelgröße von 10 bis 1.000 Nanometern bezeichnet. Unter Nanopulver versteht man im allgemeinen Sprachgebrauch eine Anhäufung von Nanopartikeln.

**Nanostocks** > Mit dem Begriff Nanostocks bezeichnet man börsennotierte Unternehmen, die auf dem Gebiet der Nanotechnologie tätig sind. Es handelt sich bei Nanostocks sowohl um Unternehmen, die Forschung und Entwicklung betreiben, um nanotechnologische Verfahren und Produkte herzustellen, als auch um Unternehmen, die mit nanotechnologischen Materialien und Systemen ihre bestehenden Produkte verbessern.

**Nanostrukturierte Materialien** > Nanostrukturierte Materialien sind aus Nanopartikeln aufgebaut. Sie weisen häufig völlig veränderte Eigenschaften im Vergleich zu den Eigenschaften derselben Verbindung (bzw. desselben Elements) in anderer Form auf.

**Nanotechnologie/Molekulartechnologie** > Die Nanotechnologie beschreibt Arbeitsvorgänge auf molekularer Ebene, durch gezieltes Beeinflussen von einzelnen Atomen oder Molekülen werden große, komplexe Strukturen geschaffen. Diese Nanotechnologie in Perfektion wurde von Eric Drexler als molekulare Nanotechnologie beschrieben. Sollte sie jemals Realität werden, würde das dadurch verfolgte Konzept des Assemblers nahezu jedes Produkt zu geringen Kosten ermöglichen. Außerdem wären Produkte mit einer bisher nicht möglichen Präzision zu fertigen. Grundsätzlich werden alle produzierten Strukturen und Systeme bis einhundert Nanometer der Nanotechnologie zugerechnet. Allerdings müssen sich die Produkte durch spezielle chemische, physikalische oder biologische Eigenschaften auszeichnen, die sie so nur ihrem nanostrukturellen Aufbau verdanken. Der Begriff Molekulartechnologie wurde von Eric Drexler eingeführt und wird heute synonym zur Nanotechnologie verwendet.

Die Nanotechnologie verspricht Quantencomputer mit enormem Leistungspotenzial genauso wie neue Materialien und Geräte.

**Nanotubes/Nanoröhrchen/Kohlenstoffröhrchen** > 1991 durch den Japaner Sumio Iijima entdeckte Kohlenstoffatome als feinste Röhren angeordnet. Auch wenn Nanotubes eigentlich alle Nanoröhren bezeichnen, wird der Begriff nahezu ausschließlich im Sinne der Kohlenstoffröhrchen genannt. Ein anderes Beispiel wären Nanotubes aus Bornitrid. Der Durchmesser der hohlen Röhren reicht von 0,4 Nanometern bis zu mehreren Nanometern. Herstellbar sind neben einwandigen auch mehrwandige Nanotubes, wobei ein Herstellungsverfahren für industrielle Maßstäbe für Nanotubes mit gezielt gesteuerten Eigenschaften so noch nicht existiert. Nanotubes haben extreme Eigenschaften. Eine über zwanzigmal höhere Zugfestigkeit im Vergleich zu hochfesten Stahllegierungen gehört genauso dazu wie eine hohe Verformbarkeit, wobei die Nanotubes immer wieder in ihre Ausgangsform zurückkehren. Je nach Anordnung der Kohlenstoffatome können Nanotubes Leiter, Halbleiter oder Isolatoren sein. Leitende Nanotubes können mit zehnmals höheren Strömen belastet werden als

Kupferdrähte. Sowohl Wärmeleitung als auch Wärmestabilität sind teilweise deutlich besser als bei heute üblichen Materialien.

**NASDAQ** > NASDAQ ist die englische Abkürzung für National Association of Securities Dealers Automated Qotations. Die amerikanische NASDAQ wurde im Jahre 1971 als weltweit erster elektronischer Aktienmarkt gegründet. Die NASDAQ ist die erste Wahl für alle weltweit führenden Wachstumsunternehmen. Innerhalb des Gesamtmarktes existieren zwei Teilmärkte, der NASDAQ National Market und der NASDAQ Small Cap Market. Für jeden Teilmarkt existieren spezielle Voraussetzungen, die ein Unternehmen für ein Listing erfüllen muss. Diese Voraussetzungen betreffen Standards bezüglich der Rechnungslegung, der Unternehmensführung und nicht zuletzt der finanziellen Situation.

**Nasse/trockene Seite der Nanotechnologie** > Alle biologischen Prozesse auf Zellebene sind prinzipiell Nanotechnologie. Allerdings funktionieren diese Prozesse immer in einer wässrigen Umgebung, weshalb auch von der »nassen Seite der Nanotechnologie« (Prof. Richard Smalley) gesprochen wird. Jegliche technologische Nutzung mit elektrischen Bauteilen ist hier so nicht denkbar, da die Bauteile sofort kurzgeschlossen wären. Die aktuelle Forschung bezieht sich auf die wasserfreie, »trockene« Seite der Nanotechnologie.

**nm** > Abkürzung für Nanometer. Entspricht  $10^{-9}$  Metern.

**Nukleotid** > Grundbaustein der DNA. Ein Nukleotid besteht aus einer Zuckereinheit, die mit einer Base verbunden ist. An den Zuckereinheiten werden die Nukleotide durch Phosphatreste zu den DNA-Ketten verbunden.

> O >>

**Optoelektronik** > Die Hauptgebiete der Optoelektronik sind Displays (z. B. Flüssigkristallanzeigen), die optische Nachrichtentechnik, die optische Speichertechnik und die optische Drucktechnik (Kopierer, Laserdrucker usw.). Unter Bauelementen der Optoelektronik versteht man elektronische

Bauelemente, die etwas mit Optik zu tun haben (z. B. Photodioden, Photowiderstände, LEDs, CCD-Bildaufnahmeelemente usw.).

**OTC** > Englische Abkürzung für Over the Counter (Market). OTC ist der amerikanische Freiverkehrsmarkt für die nicht zum öffentlichen Börsenhandel zugelassenen Wertpapiere in den Vereinigten Staaten. Der Handel für Aktien und Anleihen im Interbankenhandel findet außerhalb der Verantwortung der Börse statt, unterliegt aber auch den gesetzlichen Bestimmungen für den Wertpapierhandel. In diesem Freiverkehrsmarkt werden üblicherweise kleine Unternehmen mit erhöhtem Kurspotenzial und Risiko gehandelt. Eine Reihe von namhaften Weltkonzernen der New Economy wurde zunächst im OTC-Markt gehandelt und wechselte nach erfolgreichem Unternehmenswachstum an die NASDAQ.

**Outsourcing** > Der englische Begriff für »Ausgliederung« und »Auslagerung«. Outsourcing bezeichnet die Verlagerung von betrieblichen Aktivitäten eines Unternehmens an Zulieferer oder Dienstleister. Ziel ist eine Verringerung von Gemeinkosten und die Konzentration auf das Kerngeschäft. Outsourcing wird vor allem seit Beginn der 1990er Jahre als Weg gesehen, Kostenvorteile zu realisieren und die Wettbewerbsfähigkeit und Flexibilität eines Unternehmens zu steigern. Bei der betrieblichen Organisation der Informationsverarbeitung ist Outsourcing oft bei komplexen Standardanwendungen (z. B. Kostenrechnung oder Gehaltsabrechnung) anzutreffen. Häufig werden aber auch ganze Unternehmensbereiche ausgegliedert und in selbständige Firmen umgewandelt, die so genannten Spin-offs.

**Oxid** > Ein Oxid entsteht bei der Reaktion eines chemischen Elements mit Sauerstoff. Dabei können Produkte wie Eisen- oder Aluminiumoxid entstehen. Allgemein versteht man in der Chemie unter einer Oxidation die Abgabe von Elektronen eines Elements.

> P >>

**Photon** > Auch als Licht- oder Strahlungsquant bezeichnete Elementarteilchen. Photonen sind die kleinsten Teilchen, die elektromagnetische Strahlung bilden. Die Energie eines Photons ist abhängig von der Frequenz

der Strahlung. Photonen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und besitzen daher keine Masse. Außerdem sind Photonen elektrisch und magnetisch neutral, lassen sich also nicht durch entsprechende Felder ablenken. Photonen besitzen sowohl den Charakter einer Welle als auch den eines Teilchens. Dieses Phänomen wird als Welle-Teilchen-Dualismus bezeichnet.

**Photonics** > Mit dem aus den USA kommenden Begriff wird in Deutschland das Gebiet der »Photonik« bezeichnet. Dieses umfasst die Bestrebungen, Photonen zu nutzen beziehungsweise Elektronen durch Photonen zu ersetzen. Hierbei denkt man an Anwendungen in der optischen Nachrichtentechnik, Computertechnik, Regelungstechnik, Informationsspeicherung und -verarbeitung. Die Photonik nutzt Techniken zur Erzeugung, Modulation, Fortleitung, Verstärkung und Detektion optischer Strahlung für Anwendungen in Systemen. Häufig benutzt man in der Photonik Halbleiterbauelemente (Halbleiterdiodenlaser und integrierte Optik auf Halbleitersubstraten). Man kann auch sagen, dass sich die Photonik mit der Erforschung und Herstellung von Materialien beschäftigt, die besonders starke Wechselwirkungen mit Licht aufweisen. Wir haben es hier mit einem Grenzgebiet zwischen Physik, Chemie, Elektrotechnik und technischer Optik zu tun.

**Pigment** > In der Biologie wird der Begriff Pigment (Farbstoff) für Moleküle verwendet, die bestimmte Frequenzen des Lichts absorbieren oder reflektieren. Pigmente arbeiten als Katalysatoren, indem sie chemische Reaktionen beschleunigen. Das wichtigste Pigment für Pflanzen ist das Chlorophyll, das Sonnenlicht durch die Reaktion von Wasser und Kohlenstoffdioxid in chemischer Energie speichert.

**Polymer** > (griech.: polys = viel, meros = Anteil) Künstliche oder natürliche Makromoleküle, die sich aus einzelnen Molekülen (Monomeren) zusammensetzen. Natürliche Polymere sind beispielsweise Holz oder Kautschuk, während durch Polymerisation o. ä. Vorgänge sämtliche bekannten Kunststoffe hergestellt werden.

**Polyurethan** > Gruppe technisch nutzbarer Kunststoffe. 1935 entwickelt, als Konkurrenzprodukt zur Nylonfaser, wozu es sich allerdings nicht eignete. Polyurethane können u. a. als Isolierschäume eingesetzt werden.

**Problem des Handlungsreisenden** > siehe TSP

**Protein** > (griech.: protos = erste) Proteine sind natürliche Eiweißstoffe, die unterschiedliche Funktionen und Größen haben können. Sie entstehen durch das Aneinanderketten von Aminosäuren, wie es durch die Ribosomen geschieht. Auf der einen Seite gibt es die riesigen, unlöslichen Moleküle, wie sie in Haaren oder im Bindegewebe vorhanden sind.

Im menschlichen Körper wird von dem Vorhandensein von rund 30.000 Proteinsorten ausgegangen. Proteine sind für Lebewesen zum einen für den Erhalt und Aufbau der Zelle von Bedeutung, können allerdings auch als Energiequelle dienen. Enzyme, Hormone und Antikörper sind Beispiele für die vielfältigen Funktionen der Proteine.

**Proteomics** > Die im Zusammenhang mit der Aufklärung des Proteoms stehende Technologie wird im Englischen mit »Proteomics« bezeichnet. Mit Proteom bezeichnet man die Gesamtheit der Proteine einer einzelnen Zelle, einer extrazellulären Flüssigkeit (zum Beispiel Blut) oder eines Organismus. Die Analyse des Proteoms ermöglicht Aussagen über Proteine und deren Funktionen. Sie befindet sich im transdisziplinären Forschungsumfeld von Nanotechnologie, Mikrobiologie, Biochemie, physikalischer Chemie, Robotik und Informatik.

**Pyrogene** > Aus dem Griechischen stammender Begriff für einen Fieber erzeugenden Stoff; eine Substanz, die durch Steigerung des Zellstoffwechsels Temperaturerhöhung (Fieber) bewirkt. Im engeren Sinne sind Pyrogene von verschiedenen Bakterien stammende Stoffe, die kurze Zeit nach Einbringung schon geringster Mengen in die Blutbahn Temperaturanstieg, Schüttelfrost, Benommenheit u. Ä. hervorrufen. Therapeutisch können manche Pyrogene auch zur Reizkörpertherapie (Fieberbehandlung) angewendet werden.

> **Q** >>

**Quantencomputer** > Quantencomputer sind theoretisch extrem leistungsfähig, da sie die Regeln der Quantenmechanik ausnutzen. Ein Quantencomputer nutzt nicht binäre Informationen zur Berechnung, sondern den Quantenzustand eines Teilchens stellt ein Bit (in Anlehnung: Qubit)

dar. Die ausgenutzten Quantenzustände können Spins eines Teilchens oder bestimmte Energiezustände sein. Da ein Quantencomputer unendlich viele Zwischenzustände seiner Qubits ermöglicht, können hochkomplexe Aufgaben in Teilen parallel und schnell abgearbeitet werden. Praktisch umgesetzt werden Quantencomputer bisher mit so genannten Ionenfallen. Stark abgekühlte und festgehaltene Ionen werden mit Laserpulsen in bestimmte Quantenzustände gebracht und anschließend wieder zurückgeführt. Dadurch von den Ionen ausgesandte Lichtblitze geben den Zustand 0 oder 1 an. Nicht getroffene Teilchen können in allen Zwischenzuständen sein. Eine andere Methode sind spezielle Moleküle, die in Flüssigkeiten gelöst sind und durch Magnetfelder ausgerichtet werden. So können die Spins der Moleküle entsprechend der Problemstellung programmiert werden. Durch Kernresonanzspektroskopie (die auch in der Medizin Anwendung findet) können so die ausgerichteten Moleküle abgebildet werden, wodurch das Ergebnis der Aufgabenstellung abgelesen werden kann.

**Quantenelektronik** > Bei der Quantenelektronik handelt es sich um die Ausnutzung quantenhafter Emission und Absorption, beispielsweise im Laser in Zusammenhang mit einer elektronischen Anregung.

**Quantenlaser** > Wie bei herkömmlichen Lasern entsteht auch bei einem Quantenlaser Laserlicht. Allerdings hat der Quantenlaser Nanometerabmessungen, und das Licht kommt durch Ausnutzung quantenmechanischer Effekte zustande.

**Quantenmechanik** > Die Quantentheorie beschreibt physikalische Vorgänge in nanoskopischen Dimensionen. Die grundlegende Aussage besteht darin, dass natürliche Vorgänge nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft erfolgen. Außerdem lassen sich diese Vorgänge nicht genau vorhersagen, sondern Aussagen sind nur über die Wahrscheinlichkeiten des Eintretens bestimmter Ereignisse möglich. Diese Betrachtung ist allerdings erst bei Beobachtung in entsprechenden Größenordnungen (einzelne Atome, Moleküle oder Elementarteilchen) möglich. Die »Regeln der Quantenmechanik« sind bis heute nicht absolut belegt und eine theoretische Betrachtung. Zu quantenmechanischen Effekten gehört beispielsweise der Tunneleffekt, eine quantenmechanische Betrachtung ist die Superposition eines Teilchens.

**Quantenpunkt** > Ein Quantenpunkt beschreibt als fachlicher Ausdruck gewöhnlich ein Halbleitermaterial wie Silizium, das auf die Größe eines Proteinmoleküls geformt wird, also ein Volumen von wenigen Kubiknanometern hat. Solche Halbleiter-Nanokristalle verhalten sich entsprechend den Regeln der Quantenmechanik und haben in der makroskopischen Welt unbekannte Eigenschaften. Die Eigenschaften der Quantenpunkte liegen zwischen dem Verhalten makroskopischer Produkte und rein quantenmechanischen Gesetzen unterworfenen Elementarteilchen. In der Praxis wurden Quantenpunkte bereits als Marker für biologische und medizinische Anwendungen beispielsweise in der Diagnose von Krankheiten eingesetzt. Anwendungen werden auch in elektronischen und optischen Bereichen gesehen.

> R >>

**Rasterelektronenmikroskop/REM** > Bei einem Rasterelektronenmikroskop tastet ein Elektronenstrahl die Oberfläche einer Probe zeilenweise ab. Dabei gestreute Elektronen bzw. aus der Probenoberfläche gelöste Sekundärelektronen geben entsprechend ausgewertet ein Abbild der Probe. Die so erhaltenen dreidimensionalen Bilder können mehr als 100.000fach vergrößert sein.

**Rasterkraftmikroskop/RKM/AFM** > Das Rasterkraftmikroskop (AtomForce Microscope) tastet mit einer Sonde die Oberfläche einer Probe ab. Dabei wird durch die Abstoßung zwischen Sonde und Probenoberfläche und eine Auswertung der Bewegungen der Sonde ein dreidimensionales Bild der Probenoberfläche simuliert. Das RKM ermöglicht die Untersuchung von leitenden und nichtleitenden Proben durch ein zeilenweises Abtasten der Probe durch die Sonde. Eine Berührung zwischen Sonde und Probe kann einzelne Atome herauslösen und an anderer Stelle wieder absetzen. Diese Möglichkeit soll in weiter verbesserten Stadien der Herstellung molekularer Systeme dienen.

**Rastertunnelmikroskop/RTM/STM** > Das 1981 erfundene Rastertunnelmikroskop (Scanning Tunneling Microscope) ermöglicht eine sehr präzise, dreidimensionale Analyse von Oberflächen. Das RTM kann nur Proben untersuchen, die elektrisch leiten, bedingt durch das Ausnutzen des

Tunneleffekts. Eine angelegte Spannung zwischen der zeilenweise abtastenden Sonde und der Probe lässt auf Grund des geringen Abstands quantenmechanische Effekte auftreten. Elektronen durchtunneln den Abstand zwischen Spitze und Sonde, wobei der Strom konstant gehalten wird, so dass die Sonde ihre Position der Oberfläche anpasst. Diese Bewegung wird von einem Computer in ein dreidimensionales, virtuelles Bild umgewandelt.

**Reflexion** > Rückstrahlung von Licht-, Schallwellen oder Wärmestrahlung an der Grenzfläche eines Stoffs. Bei der diffusen Reflexion werden die Strahlen gleichmäßig in alle Richtungen zurückgeworfen. Bei der Totalreflexion wird die Strahlung total zurückgeworfen. Erst durch die Reflexion werden Gegenstände überhaupt sichtbar, reflektiert ein Gegenstand gar kein Licht, erscheint er schwarz.

**Refraktion** > Begriff aus der Optik, der das Brechungsverhalten von Strahlen an der Grenzfläche von zwei Stoffen beschreibt.

**Ribosom** > Ribosomen sind die »Organe der Zellen«, so genannte Zellorganellen. Diese aus Nukleinsäuren und Proteinen bestehenden Zellbestandteile haben ein Volumen von wenigen Kubiknanometern. Ribosomen können durch Aneinanderkettung von Aminosäuren Proteine herstellen, indem sie chemische und physikalische Effekte ausnutzen. Ribosomen stellen ein Vorbild für den Assembler dar.

**Robotik** > Die Robotik befasst sich mit dem Bau komplexer Systeme, deren Subsysteme so konzipiert werden, dass sie die gestellten Aufgaben im Rahmen der Zusammenfügung zu einem Ganzen erfüllen können. Innerhalb der Robotik gibt es vier Forschungsschwerpunkte: Wahrnehmung, Lenkung, Programmierung und Simulation.

> S >>

**SEC** > Englische Abkürzung für Securities and Exchange Commission. Die SEC ist die Aufsichtsbehörde für das Wertpapiergeschäft in den Vereinigten Staaten. Die in Washington ansässige Behörde wurde gemäß dem Securities Act von 1933 gegründet. Die SEC ist für die Neuzulassung von

Wertpapieren im Börsenhandel zuständig. Auch für bereits börsennotierte Gesellschaften gelten von der SEC überwachte strenge Offenlegungsvorschriften. Ein weiterer Zuständigkeitsbereich der SEC ist die Überwachung des Börsenhandels im Hinblick auf Insidergeschäfte und Preismanipulationen.

**Sekundärelektronen** > Verschiedene Mikroskopietechniken bestrahlen eine Probe mit Elektronen, Röntgenwellen oder Ähnlichem. Dabei können aus den Atomen der Probenoberfläche Elektronen herausgelöst werden, die von einem Detektor ausgewertet werden. Diese Elektronen werden als Sekundärelektronen bezeichnet.

**Selbstorganisation** > Selbstorganisation beschreibt die Fähigkeit von einzelnen Molekülen oder Atomen, sich spontan zu komplexen Strukturen zusammzusetzen. In der Natur ist dieser Prozess Grundlage für viele Vorgänge und überhaupt die Existenz von komplexen chemischen Strukturen. Selbstorganisation ist ein klassisches Beispiel für einen Bottom-up-Ansatz zur Herstellung von komplexen Strukturen. Chemiker wollen durch gezieltes Zusammenbringen von Stoffen und Selbstorganisation so vielfältige nanotechnologische Produkte herstellen. Auch ein Assembler könnte auf diese Weise hergestellt werden. Die Selbstorganisation ist momentan eines der wichtigsten Werkzeuge, um nanotechnologische Strukturen herzustellen.

**SET/Single Electron Tunneling Transistor** > Von Theodore A. Fulton und Gerlad J. Dolan entwickelter Einzel-Elektronen-Transistor (SET – Single Electron Tunneling Transistor), der im Gegensatz zu herkömmlichen Transistoren nicht mit noch rund hunderttausenden, sondern mit einzelnen Elektronen schaltet. Der SET nutzt die beim Schalten mit einem einzelnen Elektron auftretenden Quanteneffekte aus.

**Smartcard** > Smartcards sind scheckkartengroße Karten mit integriertem Mikrochip, der eine Datenkapazität von bis zu 16 KByte hat. Durch Einführung in ein Smartcard-Lesegerät wird beispielsweise der Karteninhaber identifiziert. Gängig ist die Unterscheidung zwischen drei Typen von Smartcards: *Identifizierungskarten*, die dem Karteninhaber Zugang zu Gebäuden oder die Nutzung von Computerterminals erlauben; *Zahlungs-*

*karten*, die bargeldloses Bezahlen ermöglichen (Beispiel: »Geldkarte«); *Informationskarten*, die Informationen zum Karteninhaber beinhalten (Beispiel: »Krankenkassenkarte«). Große Verbreitung fand die Smartcard im Mobilfunkbereich. Hier ermöglicht sie neben der Identifizierung auch das Abspeichern von Telefonnummern auf dem Chip. Vorteil hiervon ist u. a., dass man bei einem Telefonwechsel seine ursprüngliche Telefonnummer behält und mit der Smartcard alle gespeicherten Informationen auf ein anderes Telefon überträgt. Die Smartcard gewinnt auf Grund ihrer fortschreitenden technologischen Entwicklung auch für neuartige Einsatzgebiete immer mehr an Bedeutung.

**Smart Label** > Smart Labels werden auch als RFID Tags bezeichnet (RFID= radio frequency identification). Es handelt sich hierbei um Etiketten, die über elektromagnetische Signale (Radiofrequenzen) angesprochen werden können. Dadurch kann mit diesen Etiketten über gewisse Distanzen (aktuell von einigen Millimetern bis zu einem Meter) kommuniziert werden. Smart Labels bestehen aus einer Antenne und einem Transponderchip, der die Informationen enthält und gegebenenfalls verarbeitet, sowie aus einem Papier- oder Kunststofflabel. Diese über Radiofrequenzen identifizierbaren RFID Tags eröffnen ein breites Anwendungsspektrum in den unterschiedlichsten Industriebereichen, das jedoch erheblich vom Preis der Labels abhängt.

**Solarzelle** > Eine Solarzelle ist ein großflächiges Photoelement, durch das Strahlungsenergie der Sonne direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Dies geschieht auf photoelektrischem Wege durch Freisetzen von Elektronen im Innern.

**Sol-Gel-Technik** > Bei der Sol-Gel-Technik, einem Reichspatent aus dem Jahre 1939, werden die handelsüblichen Ausgangsmaterialien in einer Flüssigkeit (Sol) gelöst. Anschließend sorgen chemische Verfahren bei moderaten Temperaturen dafür, dass die gelösten Stoffe zu nanoskopischen Teilchen kondensieren: Sie verdicken sich zu winzigen Klümpchen. Beim einfachen Auftragen des noch flüssigen Gels verdunstet das Lösungsmittel; zurück bleibt ein hauchdünnes Netzwerk aus Nanopartikeln, das als Oberflächenbeschichtung verschiedene Eigenschaften hat.

**Spektral** > Der lateinische Begriff für »das Spektrum betreffend«. Unter Spektrum versteht man ursprünglich die Aufspaltung weißen Lichts in Licht verschiedener Farben, das heißt Wellen verschiedener Wellenlänge beziehungsweise Frequenz (beispielsweise beim Durchgang durch ein Prisma oder ein Beugungsgitter), dann entsprechend erweitert auf alle elektromagnetischen Wellen. Das Spektrum dieser Wellen umfasst (der Wellenlänge nach geordnet): lange, mittlere, kurze und ultrakurze Rundfunkwellen, Mikrowellen, das Infrarot, sichtbares Licht (in der Folge Rot, Gelb, Grün, Blau, Violett; Wellenlängen 790 bis 380 nm), ultraviolettes Licht, Röntgen- und Gammastrahlen.

**Spektroskopie** > Analysemethode, besonders zur Analyse von Atomaufbauten, um durch ein charakteristisches Farbspektrum Stoffe zu analysieren. Durch Verwendung von UV-Licht können Strukturen bis in den Nanometerbereich analysiert werden. Eine Kamera als Auswertungsinstrument erlaubt eine Probenanalyse in Echtzeit.

**Spin-off** > Bei einem Spin-off wird von einer bestehenden Firma ein Teil des Unternehmens als eigenständige Firma ausgegliedert. Spin-offs bieten Unternehmen die Möglichkeit, durch Umwandlung eines Unternehmensteils in eine Beteiligung kurzfristig Kapital zu erlangen.

**Start-up** > Der Begriff Start-up kommt aus dem Englischen (to start up = anfangen, gründen) und bezeichnet die Neugründung eines Unternehmens.

**Stealth-Flugzeuge** > Der amerikanische Begriff »stealth« bezeichnet verschiedene technische Maßnahmen, die eine Ortung von Waffensystemen erschweren oder unmöglich machen. Die Stealth-Techniken gehen über die bloßen optischen und akustischen Möglichkeiten der Tarnung weit hinaus. Durch Oberflächenveränderungen bei militärischen Objekten kann man durch Stealth-Techniken Radarstrahlung zerstreuen und so beispielsweise ein Flugzeug für gegnerische Radarsysteme unsichtbar machen. Durch Spezialmaterialien kann eine verringerte Wärmeabstrahlung erreicht werden, die vor der Erfassung mit Infrarotsystemen schützt.

**Superposition** > Während die klassische Physik jedem Teilchen nur einen möglichen Zustand erlaubt, kann ein Teilchen entsprechend den Regeln der Quantenmechanik sich in einem Zwischenzustand befinden, der Superposition. Erst durch eine Interaktion mit der Umwelt wird der Zustand des Teilchens wieder eindeutig, also auch durch jede Messung.

Ein anschauliches Beispiel hierfür ist Schrödingers Katze. In einer verschlossenen Kiste befinden sich eine Katze, ein Atom, ein Detektor, ein Hammer und eine Giftflasche. Sobald das Atom zerfällt, löst der Detektor den Hammer aus, der die Giftflasche zerschlägt, die Katze stirbt. Solange der Deckel geschlossen ist, befindet sich die Katze in der Superposition; man weiß nicht, ob sie lebt oder tot ist.

**Supraflüssigkeit/supraflüssiger Zustand** > Zustand von Materie nahe dem absoluten Nullpunkt. Flüssigkeiten fehlt jegliche Viskosität, sie fließen ohne den geringsten Widerstand beispielsweise durch dünnste Rohre.

**Supraleitung/supraleitender Zustand** > Erstmals 1911 von der Physikerin Heike Kamerlingh Onnes beobachteter Zustand von Leitern, nahe dem absoluten Nullpunkt elektrischen Strom ohne jeglichen Reibungsverlust zu leiten. Die Supraleitfähigkeit ist materialabhängig und tritt erst unterhalb einer entsprechenden Sprungtemperatur auf. Leiter mit einem kleineren Durchmesser als 30 Nanometer verlieren auf Grund von Quanteneffekten allmählich ihre Supraleitfähigkeit; unterhalb von zehn Nanometern lässt sich keine Supraleitfähigkeit mehr feststellen.

**Suspension** > Eine Suspension beschreibt in einem Medium (Flüssigkeit) feinst verteilte Teilchen eines aufgeschwemmten Feststoffs.

**Synthese** > Bei der Synthese im chemischen Sinn handelt es sich um den Aufbau von chemischen Verbindungen aus einfacheren Verbindungen durch Umsetzung zwischen Verbindungen gleicher Größenordnung, durch Abbau größerer Verbindungen oder aus den Elementen.

## &gt; T &gt;&gt;

**Top-down** > Gegenteiliges Konzept im Vergleich zu dem Bottom-up-Ansatz. Kleine Strukturen werden von »oben herab« geschaffen. Der Fall ist das beispielsweise bei der heute üblichen Mikroelektronik, die kleinste Strukturen auf Siliziumchips mit Lithographieverfahren herstellt, also große Strukturen in kleinere Dimensionen überträgt. Bei der Entwicklung des Assemblers bedeutet dieser Ansatz eine kontinuierliche Verkleinerung der für nanoskopische Verhältnisse ausgelegten Assembler, so dass man von der makroskopischen langsam in die mikroskopischen Dimensionen vordringt und letztendlich einen Assembler aus wenigen komplexen Molekülen erreichen will.

**Transistor** > An den Bell Laboratories von Walter Houser Brattain, John Bardeen und William Bradford Shockley entwickeltes elektronisches Bauteil, das entweder als Verstärker oder Schalter arbeiten kann. Ein aus einem Halbleiter wie Silizium bestehender Transistor hat drei Anschlüsse (Basis, Emitter, Kollektor), die je mit einer Transistorschicht verbunden sind. Gezielten Verunreinigungen in den Siliziumschichten verdankt der Transistor seine Eigenschaften, als Verstärker oder Schalter in elektrischen Schaltungen dienen zu können. In Mikroprozessoren sind Transistoren als Millionen von Schaltern die Grundlage für die heutigen Computer.

**Travelling-Salesman-Problem/TSP/Hamiltonscher Pfad** > Das »Problem des Handlungsreisenden« beschreibt die Möglichkeiten eines Handlungsreisenden, der mehrere Klienten an verschiedenen Orten besuchen will, sich seinen Weg auszusuchen. Die vielen verschiedenen Straßen und ihre Kreuzungen bieten dem Vertreter eine Vielzahl von möglichen Wegrouen. Theoretisch wird dieses Problem mit dem Hamiltonschen Pfad beschrieben, der kürzeste Weg innerhalb eines Gitternetzes mit vielen Knotenpunkten.

Für herkömmliche Computer ist diese Aufgabenstellung zwar prinzipiell einfach zu lösen, allerdings nimmt die Berechnung des kürzesten Weges unter Berücksichtigung aller Möglichkeiten viel Zeit in Anspruch. Ein DNA-Computer kann eine solche Problemstellung wesentlich schneller lösen, was im Labor bereits geglückt ist.

**Tunneleffekt** > Der Tunneleffekt ist eine Regel der Quantenmechanik und lässt sich dementsprechend nicht durch die klassische Physik erklären. Einzelne Elementarteilchen wie beispielsweise Elektronen können durch atomare Wände hindurchwandern (durchtunneln), obwohl ihre Energie ihnen das eigentlich nicht erlauben dürfte. Der Tunneleffekt beziehungsweise der entstehende Tunnelstrom zwischen Sonde und Probe spielt bei Rastersondenmikroskopen eine grundlegende Rolle. Für die heute übliche Herstellung von integrierten Schaltkreisen bedeutet der Tunneleffekt eine natürliche Grenze der Miniaturisierung, da die Elektronen ab circa 30 Nanometern Leiterbahndurchmesser nicht mehr in den Schaltkreisen gehalten werden können und der Prozessor so kurzgeschlossen wird.

> U >>

**Ultradünne (funktionale) Schichten** > Ultradünne Schichten sind nur einige Nanometer dick und bestehen aus wenigen Atomlagen. Ihr Einsatzbereich erstreckt sich von der Mikroelektronik und Optik über die Medizin und Sensorik bis hin zum Verschleißschutz.

**Utility Fog** > Gegenteil des Gray Goo, auch eine von Eric Drexler erdachte Vision. Assembler sollen aus einzelnen Atomen als unsichtbarer »nützlicher Nebel« makroskopische Produkte herstellen. Als Beispiel wurde der Utility Fog genannt, der aus Gras, Wasser und Energie Fleisch herstellen kann und so eine Kuh ersetzen würde. Durch Datenübertragung könnte ein solcher Utility Fog an jedem Platz der Erde aus den entsprechenden Materialien Produkte nach den versendeten Bauplänen fertigen.

**UV-Licht** > Ultraviolettstrahlung. Elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im Bereich unterhalb des sichtbaren Lichts, mit Wellenlängen kleiner als 400 nm. Natürliche UV-Strahlung wird hauptsächlich von der Sonne erzeugt und ist für Lebewesen ungefiltert schädlich. Ein Großteil der UV-Strahlung von der Sonne wird durch die Ozonschicht absorbiert und damit für die Lebewesen auf der Erdoberfläche unschädlich gemacht. Unsichtbare UV-Strahlung kann bestimmte Stoffe (bspw.: Mineralien, Vitamine, Öle) zum Leuchten anregen.

## &gt; V &gt;&gt;

**Venture-Capital** > Auch kurz »VC« genannt ist die englischsprachige Bezeichnung für Risiko-, Chancen- oder Wagniskapital. Der aus den Vereinigten Staaten stammende Begriff für eine alternative Finanzierungsform, bei der Investoren – meistens Banken, Fondsgesellschaften, der Staat, Versicherungsgesellschaften, Industrieunternehmen oder Privatinvestoren – jungen Unternehmen Kapital zur Verfügung stellen. Es existieren eigens dafür entwickelte Venture-Capital-Beteiligungsgesellschaften. Venture-Capital dient Unternehmen mit einer zu geringen Eigenkapitalausstattung oder jungen Unternehmen in ihrer Gründungs- und Finanzierungsphase. Der Venture-Capital-Investor erhält keine Verzinsung für sein Engagement, sondern einen Ertrag durch Wertsteigerung und den Verkauf seiner Beteiligung nach fünf bis zehn Jahren an Mitgesellschafter, Dritte oder im Rahmen eines Börsenganges. Der Staat versucht, öffentliche Mittel als Venture-Capital konjunkturbelebend einzusetzen. In den letzten Jahren hat diese Form der Finanzierung auch in Deutschland stark an Bedeutung gewonnen.

**Verschränkte Teilchen** > Zwei verschränkte Teilchen sind voneinander abhängig. Wird ein Teilchen verändert, betrifft diese Änderung auch das andere Teilchen. Die Entfernung der beiden Teilchen spielt dabei keine Rolle. Wird beispielsweise ein Photon durch einen Kristall geleitet, entstehen dabei zwei Photonen halber Energie. Eine Polarisationsbestimmung des einen Photons hat für das andere zwangsläufig die entgegengesetzte Polarisation zur Folge.

## &gt; W &gt;&gt;

**Wafer** > (engl.: Oblate) bezeichnet eine Siliziumscheibe, die als Trägermaterial für integrierte Schaltkreise (Chips) dient. Sie hat einen Durchmesser von bis zu 300 mm. Wafer sind Einkristalle mit einem fast ungestörten Kristallaufbau und von größter Reinheit.

&gt; Z &gt;&gt;

**Zellorganellen** > Die »Organe der Zelle«. Chloroplasten oder Ribosomen sind Zellorganellen.





## Verzeichnis der zitierten Literatur

---

### > A >>

Alivisatos, A. Paul, *Nanopartikel im Kampf gegen Krankheiten*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 56.

Amato, Ivan, *Nanotechnology – Shaping the World Atom by Atom*, National Science and Technology Council – Committee on Technology, September 1999.

Ashley, Steven, *Molekularer Maschinenbau*, Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 74.

Audretsch, Jürgen; Mainzer, Jürgen, *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?* Spektrum Akad. Verlag, 1996.

Avouris, Phaedon; Hertel, Tobias; Martel, Richard, *Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication*, In: Chemical Physics Letters, Vol. 71, Nr. 2, Juli 1997, S. 287 ff.

Avouris, Phaedon; Hertel, Tobias; Martel, Richard; Schmidt, T.; Shea, H. R.; Walkup, R. E., *Carbon Nanotubes: Nanomechanics, Manipulation, and Electronic Devices*, in: Applied Surface Science, Nr. 141, 1999, S. 201 ff.

Avouris, Phaedon; Martel, R.; Hertel, T.; Sandstrom, R., *AFM-tip-induced and current-induced local oxidation of silicon and metal*, in: Applied Physics A, Nr. 66, 1998, S. 659 ff.

### > B >>

Bachmann, Gerd, *Innovationsschub aus dem Nanokosmos*, VDI TZ, Zukünftige Technologien, 1998.

Bai, Chunli, *Scanning Tunneling Microscopy and Its Application* (Springer Series in Surface Sciences Vol. 32), Springer Verlag, Heidelberg, 2000.

Bengu, E.; Marks, D., *Single-Walled BN Nanostructures*, in: Physical Review Letters, Bd. 86, 12. März 2001, S. 2385.

Binning, Gerd; Quate, C. F.; Gerber, Ch., *Atomic Force Microscope*, Physical Review Letters, Bd. 56, 3. März 1986, S. 930.

Blau, Werner J., *Molecular Materials and Functional Polymers*, Springer Verlag, Wien, März 2001.

Boeing, Niels, *Wunder der Nanotechnik*, in: MorgenWelt Wissenschaft, 20.08.2001.

Boese, Daniel, *Quantum Transport through Nanostructures: Quantum Dots, Molecules, and Quantum Wires*, Shaker Verlag, Januar 2002.

Borrmann, André, *Nanotechnologie*, Universität Weimar, 14. Januar 2002.

Brettar, Claudia, *Magnetische Prüfverfahren sollen die Wirtschaft ankurbeln*, Campus, April 2000.

Brown, David E., *Inventing Modern America*, MIT Press, November 2001

Budworth, D. W., *Overview of activities on Nanotechnology and related activities*, Study of the European Commission, April 1996.

> C >>

Cerutti, Herbert, *Allerley Ergötzliches*, in: NZZ Folio, Nr. 2, Februar 1999.

Chow, Gan-Moog, *Nanotechnology: Molecularly Designed Materials*, in: (Acs Symposium Series, No 622), American Chemical Society, Februar 1996.

Collins, Graham P., *Visionäre des Nanokosmos*, in: Spektrum der Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 76.

Collins, Philip G.; Arnold, Michael S.; Avouris, Phaedon, *Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown*, Science, Bd. 292, 27. April 2001, S. 706 ff.

Collins, Philip G.; Avouris, Phaedon, *Elektronik, atomar neu gestrickt*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 48.

Collins, Philip G.; Avouris, Phaedon, *Nanotubes for Electronics*, in: Scientific American, Dezember 2000, S. 62 ff.

Collins, Philip G.; Hersam, M.; Arnold, M.; Martel, R.; Avouris, Ph., *Current Saturation and Electrical Breakdown in Multiwalled Carbon Nanotubes*, in: Physical Review Letters, Vol. 86 Nr. 14, 2. April 2001, S. 3128 ff.

Coombs, Richard; Robinson, Dennis W., *Nanotechnology in Medicine and the Biosciences (Developments in Nanotechnology)*, Dunitz Martin Ltd., September 1996.

Crandal, B. C., *Nanotechnology: Molecular Speculations on Global Abundance*, MIT Press, 1996.

Cui, Yi; Lieber, Charles M., *Functional Nanoscale Electronic Devices Assembled Using Silicon Nanowire Building Blocks*, in: Science, Bd. 291, 2. Februar 2001, S. 851.

Cui, Yi; Wei, Qingqiao; Park, Hongkun; Lieber, Charles M., *Nanowire Nanosensors for Highly Sensitive and Selective Detection of Biological and Chemical Species*, in: Science, Bd. 293, 17. August 2001, S. 1289.

## > D >>

Dadmun, Mark D., *Computational Studies, Nanotechnology, and Solution Thermodynamics of Polymer Systems*, Plenum Pub. Corporation, 2001.

Danielmeyer, Hans G.; Takeda, Yasutsugu, *The Company of the Future: Markets, Tools, and Strategies*, Springer Verlag, Heidelberg, 2000.

Darling, David, *Beyond 2000: Micromachines and Nanotechnology: The Amazing New World of the Ultrasmall*, Dillon Press, 1995.

Dejung, Christof, *Geschichte der Mikroskopie*, in: BULLETIN, Magazin der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 269, April 1998, S. 6.

Denning, Peter J., *The Invisible Future: The Seamless Integration Of Technology Into Everyday Life*, Mc Graw-Hill, 2001.

Derycke, V.; Martel, R.; Appenzeller, J.; Avouris, Ph., *Carbon Nanotube Inter- and Intramolecular Logic Gates*, in: Nano Letters – American Chemical Society, August 2001.

Devoret, Michel H.; Glatli, Christian, *Single-electron transistors*, in: Physics World, September 1998.

Dittrich, Tanja, *Ein »Schachbrett« aus winzigen Goldkugeln*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 17. Januar 2001.

Dobson, Peter, *A quiet revolution*, in: Materials Today, Nov./Dez. 2001.

Dodgson, Mark, *The Management of Technological Innovation: An International and Strategic Approach*, Oxford University Press, 2000.

DPA, *Winzige Computer sind schon bald anwendbar*, DPA, 14. Februar 2002.

Dresselhaus, Mildred S., *Carbon Nanotubes. Synthesis, Structure, Properties, and Applications*, Springer Verlag, 2001.

Drexler, Eric, *Molecular Engineering*, in: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Bd. 78, Nr. 9, September 1981, S. 5275–5278.

ders., *Das molekulare Fließband*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 64.

ders., *Engines of Creation*, Anchor Books/Doubleday, 1987.

Drexler, Eric; Petersen, Chris; Pergamit, Gayle, *Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution*, Quill, New York, 1993.

> E >>

Ellis, David, *Technology and the Future of Health Care*, Jossey-Bass, 2000.

Endruschat, Uwe, *Mono- und bimetallische Edelmetall-Nanopartikel als Katalysatorvorläufer für die Anwendung in der Ethylenoxidation sowie in Brennstoffzellen*, BoD, 2000.

## &gt; F &gt;&gt;

Fabbrizzi, Luigi, *Chemistry at the Beginning of the Third Millennium. Molecular Design, Supramolecules, Nanotechnology and Beyond*. Proceedings of the German-Italian Meeting of Coimbra Group Universities Pavia, 7–10 October, 1999, Springer Verlag, Heidelberg, Juni 2000.

Fahey, Jonathan, *The Science of Small*, in: Forbes, 5. Februar 2001.

Favier, Frédéric; Walter, Erich C.; Zach, Michael P.; Benter, Thorsten; Penner, Reginald M., *Hydrogen Sensors and Switches from Electrodeposited Palladium Mesowire Arrays*, in: Science, Bd. 293, 21. Sept. 2001, S. 2227.

Fendler, Janos H., *Nanoparticles and Nanostructured Films. Preparation, Characterization and Applications*, Wiley VCH, 1998.

Feringa, Ben L., *Molecular Switches*, Wiley VCH, 29. Oktober 2001.

Feynman, Richard, *There's Plenty Of Room At The Bottom*, in: Engineering and Science, Februar 1960, S. 20 ff.

Fitzgerald, Edmund B., *Globalizing Customer Solutions: The Enlightened Confluence of Technology, Innovation, Trade, and Investment*, Praeger Publishing, 2000.

Foresight Institute, *Biography of Eric Drexler*.

Foresight Institute, *Curriculum vitae of Eric Drexler*.

Franklin, Brandon, *Nanotech – What is the State of the Art?*

Freitas, Robert A. jr., *Nanomedicine, Volume 1: Basic Capabilities*, Landes Bioscience, 1999.

Fujita, Makoto, *Molecular Self-Assembly. Organic Versus Inorganic Approaches*. With contributions by numerous experts (Structure and Bonding Vol. 96), Springer Verlag, Heidelberg, 2001.

## &gt; G &gt;&gt;

Gao, Yihua; Bando, Yoshio, *Carbon nanothermometer containing gallium*, in: Nature, Bd. 415, 7. Februar 2002, S. 599.

Geerlings, Harry, *Meeting the Challenge of Sustainable Mobility: The Role of Technological Innovations*, Springer Verlag, 1999.

Giessibl, F. J., *Rasterelektronenmikroskop*, in: Science, Bd. 267, 1995, S. 68.

Gross, Michael, *Travels to the Nanoworld: Miniature Machinery in Nature and Technology*, Perseus Books, 2001.

Grotelüschen, Frank, *Mit dem Roboter die Nanowelt ertasten*, in: Berliner Zeitung, 16. Februar 2000.

Guthöhrlein, G. R.; Keller, M.; Hayasaka, K.; Lange, W.; Walther, H., *A single ion as a nanoscopic probe of an optical field*, in: Nature, Bd. 414, 1. November 2001, S. 49.

Gutterman, Alan S.; Erlich, Jacob N., *Technology Development and Transfer*, Greenwood Publishing Group, 1997.

## &gt; H &gt;&gt;

Hatzor, A.; Weiss, P. S., *Molecular Rulers for Scaling Down Nanostructures*, in: Science, Bd. 291, 9. Februar 2001, S. 1019.

Haug, Rolf, *Interacting Electrons in Nanostructures* (Lecture Notes in Physics Vol. 579), Springer Verlag, Heidelberg, 2001.

Helvajian, Henry; Robinson, Ernest, *Micro- and Nanotechnology for Space Systems*, Armer Institute for Aeronautics, 1997.

Hertel, Tobias; Martel, Richard; Avouris, Phaedon, *Manipulation of individual carbon nanotubes and their interaction with surfaces*, in: Journal of Physical Chemistry B, Nr. 102, 1998, S. 910.

Hertel, Tobias; Walkup, Robert E.; Avouris, Phaedon, *Deformation of carbon nanotubes by surface van der Waals forces*, in: Physical Review B, Vol. 58, Nr. 20, 15. November 1998, S. 13870 ff.

Hobday, Michael, *Innovation in East Asia: The Challenge to Japan*, Edward Elgar Publishing, 1995.

Hoch, Harvey C., *Nanofabrication and Biosystems: Integrating Materials Science, Engineering and Biology*, Cambridge University Press, 1996.

Hodes, Gary, *Electrochemistry of Nanomaterials*, Wiley VCH, 2001.

Hörber, Heinrich; Früh, Thomas, *Die sanfte Sonde*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 24.

Huang, Yu; Duan, Xiangfeng; Wei, Qingqiao; Lieber, Charles M., *Directed Assembly of One-Dimensional Nanostructures into Functional Networks*, in: Science, Bd. 291, 26. Januar 2001, S. 630.

Hullmann, Angela, *Internationaler Wissenstransfer und technischer Wandel. Bedeutung, Einflussfaktoren und Ausblick auf technologiepolitische Implikationen am Beispiel der Nanotechnologie in Deutschland*, Physica Verlag, Heidelberg, 17. Juli 2001.

## > I >>

Ikezawa, Naoki, *Nanotechnology: Encounters of Atoms, Bits and Genomes*, Nomura Research Institute, Dezember 2001.

Interrante, Leonard V.; Hampden-Smith, Mark J., *Chemistry of Advanced Materials: An Overview*, VCH Publishing, 1997.

Ito, Takashi; Okazaki, Shinji, *Pushing the limits of lithography electronics*, in: Nature insight 'The future of microelectronics', Bd. 406, Nr. 6799, 31. August 2001.

## &gt; J &gt;&gt;

Joy, Bill, *Warum die Zukunft uns nicht braucht*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 6. Juni 2000.

## &gt; K &gt;&gt;

Kerber, Christian, *Erzeugung von Nanopartikeln durch Laserverdampfung*, Shaker Verlag, 1998.

King, Kenneth P., *Technology, Science Teaching, and Literacy: A Century of Growth (Innovations in Science Education and Technology)*, Plenum Pub. Corporation, 2001.

Knop, Carsten, *Die Nano-Roboter kommen*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 27. November 2000.

Köhler, Michael, *Nanotechnologie – Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik*, Wiley VCH, 2001.

Koruga, Djuro, *Fullerene C 60: History, Physics, Nanobiology, Nanotechnology*, Elsevier Science Ltd., 1993.

Krempl, Stefan, *Werden Maschinen schon in hundert Jahren den Menschen ersetzen?*, in: Telepolis, 3. April 2000.

Krummenacker, Markus; Lewis, James, *Prospects in Nanotechnology: Toward Molecular Manufacturing*, John Wiley & Sons, 1995.

Kurzweil, Ray, *Homo S@piens*, Kiepenheuer und Witsch, 1999.

## &gt; L &gt;&gt;

Lampton, Christopher, *Nanotechnology Playhouse: Building Machines from Atoms*, Waite Group Press, 1993.

Landau, Ralph, *Chemicals and Long-Term Economic Growth: Insights from the Chemical Industry*, Wiley-Interscience, 1998.

Landman, Uzi; Barnett, Robert N.; Scherbakov, Andrew G.; Avouris, Phaedon, *Metal-Semiconductor Nanocontacts: Silicon Nanowires*, in: Physical Review Letters, Vol. 85 Nr. 9, 28. August 2000, S. 1958 ff.

Lang, N. D.; Avouris, Ph., *Electrical Conductance of Parallel Atomic Wires*, in: Physical Review B, Vol. 62 Nr. 11, 15. September 2000, S. 7325 ff.

Lau, C. N.; Markovic, N.; Bockrath, M.; Bezryadin, A.; Tinkham, M., *Quantum Phase Slips in Superconducting Nanowires*, in: Physical Review Letters, Bd. 87, 2. November 2001.

Lehn, J.-M., *Supramolecular Chemistry*, VCH New York, 1995.

Lewis, James; Crandall, B. C., *Nanotechnology: Research and Perspectives. Papers from the First Foresight Conference on Nanotechnology*, Cambridge, MIT Press, 1992.

Lieber, Charles M., *Schaltkreise vom Aller kleinsten*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 40.

Lindackers, Dirk, *Erzeugung und Charakterisierung von oxidischen Nanopartikeln*, Shaker Verlag, 1999.

Lindinger, Manfred, *Eine winzige Kraft aus dem Nichts*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 28. Februar 2001.

ders., *Schnelles Rechnen mit Atomen*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 27. Dezember 2001.

ders., *Mit Kohlenwasserstoffen schalten*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 24. Oktober 2001.

Liu, K.; Avouris, Ph.; Martel, R.; Hsu, W. K., *Electrical Transport in Doped Multiwalled Carbon Nanotubes*, in: Physical Review B, Vol. 63, 6. April 2001.

Lorenz, Wolfgang J., *Electrochemical Nanotechnology*, Wiley VCH, 1998.

Ludwig, G., *Das EPR-Paradoxon als makroskopisches Experiment und seine Auswirkungen auf unsere Vorstellung von Physik*, in: Ann.Phys., Bd. 42, 1985, S. 150–168.

Luryi, Serge, *Future Trends in Microelectronics: Reflections on the Road to Nanotechnology*, in: Applied Sciences, Nr. 323, 1996.

Lyshevski, Sergey Edward, *Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering*, CRC Press, 2000.

> M >>

Malsch, Ineke, *Nanotechnology in Europe*, EC-JRC Sevilla, 1997.

Martel, Richard; Shea, Herbert R.; Avouris, Phaedon, *Rings formation in single-walled carbon nanotubes*, in: *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 103, Nr. 36, 9. September 1999, S. 7551 ff.

Martel, Richard; Shea, Herbert R.; Avouris, Phaedon, *Rings of single-walled carbon nanotubes*, in: *Nature* Nr. 398, 1999, S. 299.

Martel, Richard; Shea, Herbert R.; Hertel, Tobias; Avouris, Phaedon, *Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors*, in: *Applied Physics Letters*, Vol. 73, Nr. 17, 2. Oktober 1998, S. 2447 ff.

Masumoto, Yasuaki; Takagahara, Toshihide, *Semiconductor Quantum Dots. Physics, Spectroscopy and Applications*, Springer Verlag, 2002.

... dies., *Semiconductor Quantum Dots. Physics, Spectroscopy and Applications (NanoScience and Technology)*, Springer Verlag, Heidelberg, 2002.

Mejias, Jordan; Müller-Jung, Joachim; Schirrmacher, Frank, *Alles was der Mensch will, wird machbar sein, Verheißungen, Ängste, Geschäfte: Nanotechnologen erwarten die dritte industrielle Revolution – Ein Gespräch mit drei Pionieren einer neuen Technologie*, in: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 21. September 2000.

Milunovich, Steven; Roy, John M. A., *The Next Small Thing – An Introduction to Nanotechnology*, Merrill Lynch Research Report, September 2001.

Mitura, Stanislaw, *Nanomaterials*, Pergamon Press, April 2000.

## &gt; N &gt;&gt;

Nalwa, Hari Singh, *Nanostructured Materials & Nanotechnology Concise Edition*, Academic Press, 2001.

Nelson, Max; Shipbaugh, Calvin, *The Potential of Nanotechnology for Molecular Manufacturing*, Rand Monograph Report, Rand Corporation, 1995.

Nicolini, Claudio, *Molecular Manufacturing*, in: *Electronics and Biotechnology Advanced Forum Series*, Vol. 2, Plenum Pub. Corporation, 1996.

## &gt; O &gt;&gt;

Osawa, Eiji, *Perspectives of Fullerene Nanotechnology*, Kluwer Academic Publishers, 2000.

Otterstad, Jan-Erik; Brandreth, Dale A., *Small Particles Technology*, Plenum Pub. Corporation, 1998.

## &gt; P &gt;&gt;

Payson, Steven, *Economics, Science and Technology*, Edward Elgar Publishing, 2000.

Poizot, P.; Laruelle, S.; Grugeon, S.; Dupont, L.; Tarascon, J.-M., *Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries*, in: *Nature*, Bd. 407, 28. September 2001, S. 496.

## &gt; Q &gt;&gt;

Qing, Lin, *Zur Frühgeschichte des Elektronenmikroskops*, GNT Verlag, 1995.

## &gt; R &gt;&gt;

Regis, Ed., *Nano: the emerging science of nanotechnology: remaking the world – molecule by molecule*, Little, Brown and Company, 1995.

Rietman, Edward, *Molecular Engineering of Nanosystems*, Springer Verlag, Heidelberg, 2001.

Rink, Jürgen, *Meisterhafte Kleinarbeit*, in: c't, 21/98, S. 104.

ders., *Quäntchen für Quäntchen*, in: c't, 16/98, S. 150.

Rochefort, A.; Salahub, D. R.; Avouris, Ph., *The effect of structural distortions on the electronic structure of carbon nanotubes*, in: *Chemical Physics Letters*, Nr. 297, 1998, S. 45.

Rochefort, Alain; Avouris, Phaedon, *Electron Interference Effects on the Conductance of Doped Carbon Nanotubes*, in: *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 104 Nr. 44, 9. November 2000, S. 9807 ff.

Rochefort, Alain; Avouris, Phaedon; Lesage, Frédéric; Salahub, Dennis R., *Electrical and Mechanical Properties of Distorted Carbon Nanotubes*, in: *Physical Review B*, Vol. 60, Nr. 19, 15. November 1999, S. 13842 ff.

Rochefort, Alain; Di Ventra, Massimiliano; Avouris, Phaedon, *Switching Behavior of Semiconducting Carbon Nanotubes under an External Electric Field*, in: *Applied Physics Letters*, Vol. 78 Nr. 17, 23. Apr 01, S. 2521 ff.

Rochefort, Alain; Salahub, Dennis R.; Avouris, Phaedon, *Effects of Finite Length on the Electronic Structure of Carbon Nanotubes*, in: *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 103, Nr. 4, 1999, S. 641 ff.

Roco, Mihail C.; Alivisatos, Paul A.; Williams, R. S., *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report – Vision for Nanotechnology in the Next Decade*, Kluwer Academic Publishers, 2000.

Roco, Mihail C.; Bainbridge, William Sims, *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Kluwer Academic Publishers, 2001.

Ronzheimer, Manfred, *Die Entdeckung des GMR-Effektes*, in: *Berlin News*, 2. Dezember 1998.

Röthlein, B., *Die kleinsten Chips der Welt*, in: Chip, April 2000, S. 220.

Roukes, Michael L., *Unten gibt's noch viel Platz*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 32.

Ryan, Mary P.; Williams, David E.; Chater, Richard J.; Hutton, Bernie M.; McPhail, David S., *Why stainless steel corrodes*, in: Nature, Bd. 415, 14. Februar 2002, S. 770.

## > S >>

Savage, David, *Nanotechnology: Think Small, Win Big With These Cutting Edge Techniques*, John Wiley & Sons, 1998.

Scherge, Matthias, *Biological Micro- and Nanotribology. Natures's Solutions (NanoScience and Technology)*, Springer Verlag, 2001.

Schmidt, Arthur P., *Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts*, in: Telepolis, 26. Januar 1999.

Schmidt, Egon, *Billionen Bit auf kleinstem Raum*, in: Elektronik, März 1997. S. 34.

Schmidt, Oliver G.; Eberl, Karl, *Nanotechnology: Thin solid films roll up into nanotubes*, in: Nature, Bd. 410, 8. März 2001, S. 168.

Schröter, Joachim, *Classical Mechanics as a Limit of Quantum Mechanics*, in: Ann.Phys., Bd. 23, 1969.

Schulenburg, Mathias, *Nanotechnologie, Innovationsschub aus dem Nanokosmos*, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (Hrsg.), Köln, 1998.

Schulenburg, Mathias, *Nanotechnologie – Die letzte industrielle Revolution*, Insel, 1995.

Shah, Rahul R.; Abbott, Nicholas L., *Principles for Measurement of Chemical Exposure Based on Recognition-Driven Anchoring Transitions in Liquid Crystals*, in: Science, Bd. 293, 17. August 2001, S. 1296.

Shea, H. R.; Martel, R.; Avouris, Ph., *Electrical Transport in Rings of Single-Wall Nanotubes: One-Dimensional Localization*, in: Physical Review Letters, Vol. 84 Nr. 19, 8. Mai 2000, S. 4441 ff.

Siegel, Hu; Roco, Mihail C., *R&D Satus and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials and Nanodiveces in the US*, WTEC Workshop Report, 1998.

Simon, Michaela, *Kleiner geht's nicht*, in: Telepolis, 2. November 2000.

Smalley, Richard E., *Chemie, Liebe und dicke Finger*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 66.

Stahl, H.; Appenzeller, J.; Martel, R.; Avouris, Ph.; Lengeler, B., *Intertube Coupling in Ropes of Single-Wall Carbon Nanotubes*, in: Physical Review Letters, Vol. 85 Nr. 24, 11. Dezember 2000, S. 5186 ff.

Stix, Gary, *Geschäfte im Reich der Zwerge*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 6.

Stoddart, Fraser, *Angewandete Chemie, Bd. 112*, S. 3484.

ders., *Angewandete Chemie, Bd. 113*, S. 1771.

> T >>

Taniguchi, Norio, *Nanotechnology: Integrated Processing Systems for Ultra-Precision and Ultra-Fine Products*, Oxford Science Publications, 1996.

ten Wolde, Arthur, *Nanotechnology: Towards a Molecular Construction Kit*, New World Ventures, Oktober 1998.

Timp, Gregory, *Nanotechnology*, Springer Verlag, 1999.

Trogeler, William, *Angewandete Chemie, Bd. 113*, S. 2162.

Trueb, Lucien F., *Fabrikation von Silicium-Chips*, in: Naturwissenschaftliche Rundschau, November 1998, S. 438.

## &gt; V &gt;&gt;

Varga, Attila, *University Research and Regional Innovation – A Spatial Econometric Analysis of Academic Technology*, Kluwer Acad. Publishers, 1998.

## &gt; W &gt;&gt;

Watts, John F., *An Introduction to Surface Analysis by Electron Spectroscopy*, Oxford University Press, 1990.

Whitesides, George M., *Lernen von der ältesten Nanomaschine*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 68.

Whitesides, George M.; Love, J. Christopher, *Die große Kunst, klein zu bauen*, in: Spektrum d. Wissenschaft, Spezial Nanotechnologie, Februar 2001, S. 16.

Wiesendanger, Roland, *Scanning Probe Microscopy. Analytical Methods (NanoScience and Technology)*, Springer Verlag, Heidelberg, 1998.

ders., *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy – Methods and Applications*, Cambridge University Press, 1994.

Williams, R. Stanley, *Industrial Revolution in the 21st Century*, in: Physics World, Nr. 12, Dezember 1999, S. 49 ff.

Williams, R. Stanley; Birnbaum, J. *Physics and the Information Revolution*, in: Physics Today, Nr. 52, Januar 2000.

## &gt; Y &gt;&gt;

Yi-Ru Ying, Jackie, *Nanostructured Materials*, Academic Press, 2001.

## &gt; Z &gt;&gt;

Zey, Michael G., *The Future Factor: The Five Forces Transforming Our Lives and Shaping Human Destiny*, McGraw-Hill, 2000.





## Unternehmensindex

---

- > 3i Group plc. 191
- > AT&T 61
  - Agilent Technologies 165 ff.
  - Altair International Inc. 112 ff.
  - AMCOL International Corporation 114 f.
  - Argonide Corporation 196 f.
  - AstraZeneca 198
  - Aventis AG 92, 132
- > BASF AG 109 f., 121 ff.
  - Bayer AG 200
  - Bell Labs 57 f., 61, 171 f., 174, 242
  - BMW 188
  - BHP Minerals International 111
  - Biosante Pharmaceuticals Inc. 135 ff.
- > California Molecular Electronics Corporation 194 ff.
  - Canon 200
  - Carbon Nanotechnologies Inc. 180
  - Coherent Inc. 145 f.
- > DaimlerChrysler 188
  - Degussa AG 49, 106 ff., 111
  - Digital Instruments Inc. 140 f.
  - Flamel Technologies 133 ff.
  - GlaxoSmithKline 198
- > Harris & Harris Group, Inc. 179
  - Henkel KGaA 123 ff.
  - Hewlett Packard 160 ff., 165
- > IBM Corp. 30, 33, 36, 61, 140, 150 ff., 184, 200, 203
  - Infineon 188
  - Intel 57, 228
- > Jenoptik AG 143 ff.

- > Lambda Physik AG 139, 145 ff.  
Lucent Technologies 140, 171 ff.  
Lyondell Petrochemical 180
- > Masterflex AG 126 ff.  
Microsoft 20, 150  
Mitsubishi 200  
Mitsui & Co., Ltd. 119 ff.  
Motorola 188
- > Nanocor Inc. 114 f.  
Nanofilm Technologie GmbH 199 f.  
NanoFocus AG 187 ff.  
Nanogate Technologies GmbH 191 f.  
Nanogen Inc. 130 ff.  
Nanophase Technologies Corporation 108 ff., 179  
NanoPierce Technologies Inc. 175 ff.  
Nanotherapeutics, Inc. 198 f.  
NEC Corporation 35, 169 f.
- > Omicron NanoTechnology GmbH 189 ff.
- > Philips 200  
Physical Sciences Inc. 197 ff.
- > Quantum Dot Corporation 192 ff.
- > Siemens 188  
Sun Microsystems 81  
SusTech GmbH & Co. KG 123 ff.
- > Toray Industries 116 f.  
Toyota 115
- > Veeco Instruments Inc. 139 ff.
- > Zyvex 70, 200 ff.