

# Status und Perspektiven im Programm Nanotechnologie

N. Fabricius, NANOMIKRO

## Einleitung

Die Nanotechnologie gilt allgemein als eine der wichtigsten Querschnittstechnologien des 21. Jahrhunderts. Sie umfasst alle technologisch relevanten Wissensgebiete, die sich mit nanoskaligen Objekten befassen. Damit ist Nanotechnologie ein Sammelbegriff für eine breite Auswahl an Einzeltechnologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala beschäftigen. Dazu gehören die Herstellung, Charakterisierung und Anwendung von Strukturen, molekularen Bausteinen und verfahrenstechnisch veränderten klassischen Materialien, wenn mindestens eine kritische Dimension oder Fertigungstoleranz unter 100 nm liegt. Auch wenn diese Grenze relativ willkürlich ist, so ist doch klar, dass damit Details des atomaren und molekularen Aufbaus der Materie von Bedeutung sind und neuartig auftretende Eigenschaften und Funktionalitäten nur mit den Gesetzen der Quantenmechanik vollständig zu beschreiben sind.

Objekte der Nanotechnologie sind neben lithographisch hergestellten Oberflächenstrukturen auch Nanopartikel und nanokristalline Materialien, die unter Verwendung physikalischer und chemischer Methoden aus klassischen Materialien hergestellt wurden. Die Verfahren dazu sind vielfältig und reichen von der Abscheidung nanoskaliger Partikel aus der Gasphase bis hin zur Herstellung von Nanopulvern durch verfahrenstechnische Bearbeitung fester Materialien. Dabei kommt man in Bereiche, in denen

Materialeigenschaften wegen der extremen Oberflächen/Volumen-Verhältnisse mehr durch äußere und innere Grenzflächen als durch Volumeneigenschaften bestimmt werden. Auf diese Weise werden funktionelle Materialien und Strukturen geschaffen und für die technische Anwendung erschlossen, die in der Natur nicht vorkommen. Darüber hinaus eröffnet die Fähigkeit zur Manipulation einzelner Atome, Moleküle und komplexer Nanostrukturen wie z.B. Kohlenstoff-Nanoröhrchen die Möglichkeit, auf Nanoebene konstruktiv tätig zu werden und völlig neue Systemkomponenten herzustellen. Der Nanotechnologie zugerechnet werden auch die Entwicklung der Werkzeuge zur Strukturierung, Manipulation von Molekülen und Charakterisierung von Nanoobjekten.

Besondere Faszination, insbesondere auch in der öffentlichen Diskussion, üben Visionen zur Konstruktion komplexer Maschinen (Nanoroboter) aus einzelnen Atomen und Molekülen aus, wie sie z.B. in dem 1986 erschienenen Buch „Engines of Creation“ von Eric Drexler beschrieben werden. Diesen Visionen steht ein Großteil der in der nanotechnologischen Forschung arbeitenden Wissenschaftler kritisch gegenüber. Viele bezweifeln, dass es möglich sein wird, die dort beschriebenen Verfahren der molekularen Fertigung jemals zu realisieren. Als Argument wird angeführt, dass die Herstellung von Nanomaschinen wegen der großen Anzahl der zu bewegendenden Atome zu aufwendig sei, um technisch realisiert werden zu

können. Außerdem wird oft darauf hingewiesen, dass grundsätzliche physikalische Gesetzmäßigkeiten, wie die Heisenbergsche Unschärferelation oder das thermische Rauschen, die Konstruktion solcher Maschinen grundsätzlich verbieten. Andererseits hat das bisher aber noch niemand schlüssig bewiesen und gerade die belebte Natur zeigt, wie präzise komplexe Prozesse auf der Mikrometer- und Nanometerskala ablaufen können. Daher rechtfertigt das enorme Potential die Forschung auf diesem Gebiet, wenn dabei die Grenze zwischen realistischen Visionen und Science Fiction beachtet wird.

Es werden heute Forschungsgebiete der Nanotechnologie zugerechnet, die schon seit Jahrzehnten in der Physik, Chemie und Biologie bearbeitet werden. Daraus könnte man schließen, dass versucht wird, Nanotechnologie als Trendwort zur Steigerung der förderpolitischen oder wirtschaftlichen Attraktivität klassischer Forschungsgebiete auszunutzen. Tatsächlich hat aber die Etablierung der Nanotechnologie als eigenständiges Forschungsthema zu einer neuen Qualität der Forschung geführt. Die auf der Nanometerskala verschwimmenden Grenzen zwischen den klassischen Disziplinen Physik, Chemie und Biologie haben ein neues interdisziplinäres Forschungsgebiet entstehen lassen, dessen Bedeutung für die zukünftige Entwicklung der Volkswirtschaften heute noch nicht abzusehen ist. Dieses Potential zu erschließen, ist ein vorrangiges Ziel der Nanotechno-

logie. Dazu müssen zunächst die Prinzipien des Nanokosmos verstanden werden, um die Basis für die Umsetzung in neue technische Anwendungen zu schaffen. Erst wenn aus dem Einsatz von Nanotechnologie in neuen oder verbesserten Produkten zusätzlicher Nutzen für den Endverbraucher entsteht, werden sich die Investitionen in die Nanoforschung in wirtschaftlichen Erfolg umsetzen lassen.

### **Wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie als Querschnittstechnologie**

Ihrem Charakter als Querschnittstechnologie entsprechend hat die Nanotechnologie einen großen Einfluss auf nahezu alle wichtigen Wirtschaftszweige. Auch wenn es mittelfristig für den Endverbraucher keine reinen Nanoprodukte geben wird, so werden doch die Eigenschaften und Funktionalitäten vieler Produkte maßgeblich durch Ergebnisse der Nanoforschung beeinflusst. Nach einer Studie der Nano Business Alliance aus dem Jahr 2001 wird bis 2015 ein Weltmarktvolumen von 1.100 Mrd. € erwartet. Die konservativere Betrachtungsweise von DG Bank und VDI extrapoliert bis 2015 zeigt immerhin noch ein Volumen von 350 Mrd. €. Wahrhaft beeindruckende Zahlen. Die großen Unterschiede bei den Prognosen sind nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass hier eine unterschiedliche Wertung des Einflusses der Nanotechnologie auf Produktumsätze vorliegt. Die Botschaft ist aber klar: Wer heute nicht in Nanoforschung investiert, wird morgen

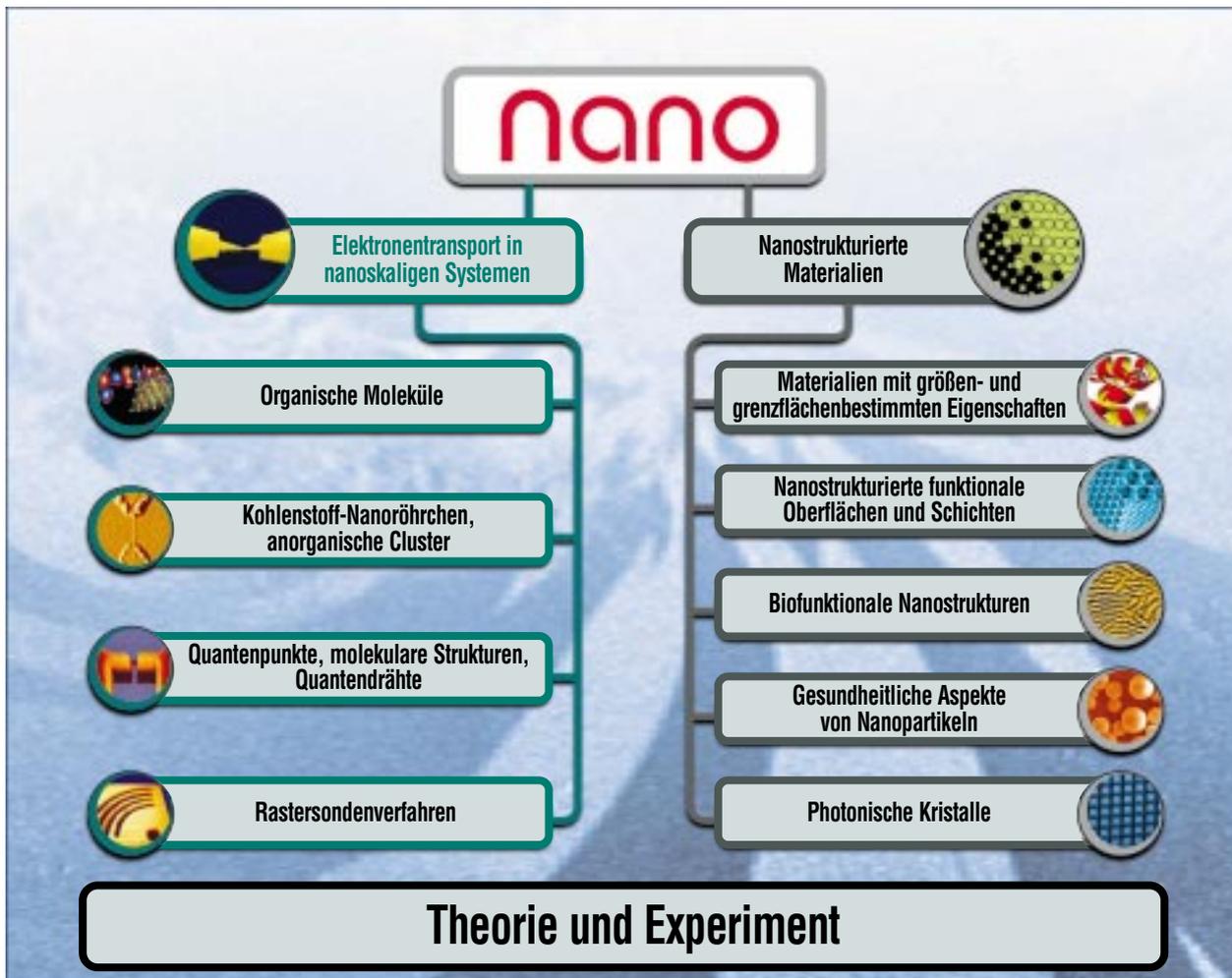
mit seinen Produkten nicht mehr am Weltmarkt bestehen können. Es ist daher nicht erstaunlich, dass alle westlichen Industriestaaten die Nanoforschung mit hohem Aufwand fördern. In Europa waren das 2004 740 Mio.€, davon 290 Mio.€ allein in Deutschland. Zum Vergleich: Die USA und Japan förderten die Nanotechnologie mit umgerechnet 850 Mio.€ bzw. 800 Mio.€ (Quelle VDI). Dahinter steckt die Erkenntnis, dass Arbeitsplätze in den westlichen Industrieländern zukünftig vor allem in den Wirtschaftszweigen entstehen, in denen langfristig angelegte Forschungsaktivitäten für die Entwicklung innovativer Produkte genutzt werden und gleichzeitig ein hoher Anspruch an die technologischen Fähigkeiten in der produzierenden Wirtschaft gestellt wird.

### **Das Programm Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe**

Keimzelle des Programms Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe war das Institut für Nanotechnologie, gegründet am 11.6.1998. In einer bemerkenswerten Aufbauleistung konnte erreicht werden, dass der Vorstand des Forschungszentrums bereits ein Jahr nach der Institutsgründung dem Aufsichtsrat berichten konnte, dass „das Institut für Nanotechnologie mit 41 Mitarbeitern voll arbeitsfähig ist“. Eine Besonderheit ist die enge Vernetzung des Instituts mit nahe gelegenen Universitäten. Die Vernetzung wurde durch die Installation weiterer Arbeitsgruppen er-

reicht, die unter der Geschäftsführung eines hauptamtlichen Institutsleiters von hervorragenden Wissenschaftlern dieser Universitäten geleitet werden. In den folgenden Jahren wurde der Ausbau des Instituts konsequent fortgesetzt und in das Programm Nanotechnologie weiterentwickelt. Auch heute noch bildet das Institut für Nanotechnologie die Basis der nanotechnologischen Forschung im Forschungszentrum Karlsruhe. Mittlerweile tragen neben dem Institut für Nanotechnologie weitere acht Institute, die sich mit nanotechnologischen Fragestellungen beschäftigen, mit insgesamt etwa 155 Mitarbeitern zum Programm Nanotechnologie bei. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Themen „Elektronentransport in nanoskaligen Systemen“ und „Nanostrukturierte Materialien“.

Das ProgrammtHEMA „Elektronentransport in nanoskaligen Systemen“ beschäftigt sich insbesondere mit der Wechselwirkung zwischen molekularen Bausteinen und elektrischen Festkörperkontakten. Durch Design von Molekülen, Clustern und komplexeren Nanobausteinen (z.B. Kohlenstoff-Nanoröhrchen) mit maßgeschneiderten Eigenschaften können vielfältige neue Funktionen auf molekularer Ebene realisiert werden, die das Potential für zukünftige Anwendungen in nanoskaligen Systemkomponenten haben. Ziel der Arbeiten ist es, die Mechanismen des Ladungstransports durch Moleküle einschließlich der Festkörperkontakte zu verstehen, elektronische Eigenschaften durch Verwendung geeigneter Moleküle zu steuern



**Abb. 1: Struktur des Programms Nanotechnologie.**

und nanoelektronische Systemkomponenten mit gewünschten Eigenschaften zu realisieren. Die Untersuchung von Methoden zum „self assembling“ von Nanostrukturen, die Perfektion von Messmethoden zur Charakterisierung molekularer Bausteine und die Modellierung der untersuchten Systeme komplettieren das Thema.

Im Programmthema „Nanostrukturierte Materialien“ werden Materialien untersucht, die durch ihre Nanostruktur im Vergleich zu ihrer konventionellen Struktur neuartige technologische Eigen-

schaften haben. Ziel der Forschung innerhalb dieses Themas ist das vollständige Verständnis der Zusammenhänge zwischen Strukturgröße und Materialeigenschaften als Basis für die Modellierung und das Design von maßgeschneiderten Materialien, die in zukünftigen Nanoprodukten kommerziell genutzt werden können. Das sind z.B. Materialien mit herausragenden mechanischen, magnetischen, optischen und katalytischen Eigenschaften. Faszinierend ist die Möglichkeit, diese Eigenschaften durch Beeinflus-

sung der Elektronenstruktur über äußere elektrische Felder zu steuern. Voraussetzung für diese Forschung ist die Fähigkeit, entsprechende Materialien reproduzierbar herzustellen. Dazu werden innerhalb des Programms eine Vielzahl von Herstellungsprozessen für Nanopartikel, nanostrukturierte Metalle und Legierungen, molekulare Cluster, funktionale Moleküle und Beschichtungsverfahren für Oberflächen und Nanopartikel genutzt. Von großer Bedeutung ist die Weiterentwicklung von Verfahren zur

Herstellung von nanostrukturieren Materialien, der Charakterisierung ihrer Eigenschaften und die Untersuchung ihrer Zuverlässigkeit. Abgerundet wird das Thema durch technologiebegleitende Vorhaben zur Technikfolgenabschätzung und den gesundheitlichen Aspekten der Nanotechnologie.

In beiden Themenbereichen hat das Programm Nanotechnologie eindrucksvolle Forschungsergebnisse geliefert, was in den Begutachtungen im Rahmen der programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft durch herausragende Beurteilungen bestätigt wurde. Eine Auswahl hervorragender Arbeiten aus beiden Themenbereichen wird im Rahmen von Einzelbeiträgen in diesem Heft dargestellt.

Entsprechend seiner Bedeutung als Querschnittstechnologie werden nanotechnologische Fragestellungen in mehreren Programmen innerhalb des Forschungsbereichs „Schlüsseltechnologie“ der Helmholtz-Gemeinschaft behandelt, wenn auch mit unterschiedlicher Grundausrichtung. Neben dem Programm „Nanotechnologie“ des Forschungszentrums Karlsruhe sind das die Programme „Informationstechnologie mit nanoelektronischen Systemen“ des Forschungszentrums Jülich und das Programm „Funktionale Werkstoffsysteme“ des GKSS-Forschungszentrums Geesthacht. Die Koordinierung der Arbeiten innerhalb des Lenkungsausschusses „Schlüsseltechnologie“ stellt sicher, dass identische Forschungsvorhaben nicht in mehreren Programmen gleichzeitig bearbeitet werden.

Überlappbereiche sind aber durchaus sinnvoll und erwünscht, wenn sichergestellt wird, dass sie in enger Kooperation bearbeitet werden.

### Profilausbau des Forschungszentrums Karlsruhe im Bereich Mikro-Nano-Bio

Es gab durch die Gutachtergremien eine Reihe strategischer Empfehlungen, die als Grundlage für eine strukturelle Weiterentwicklung des Programms Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe dienen. Dabei ist die Zusammenführung der Programme Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie die strategisch bedeutsamste Empfehlung der Gutachterkommissionen beider Programme. Es soll erreicht werden, dass durch den Einfluss der Mikrosystemtechnik eine Verstärkung des Anwendungsbezugs in der Nanotechnologie erfolgt. Das heute wissenschaftlich geprägte Programm Nanotechnologie soll sich dadurch zu einem technologisch geprägten Programm weiterentwickeln, ohne dass dabei die wissenschaftliche Qualität der Forschungsinhalte gefährdet wird. Das Programm Mikrosystemtechnik soll, unterstützt durch das Innovationspotential der Nanotechnologie, ergänzend zu den anwendungsorientierten Arbeiten wieder verstärkt wissenschaftlich basierte Themen aufgreifen. In beiden Teilprogrammen soll es einen großen Freiraum für die Bearbeitung ausschließlich grundlagenorientierter Fragestellungen geben. Auf diese Weise wird erreicht, dass die Mission der HGF, mit ihrer Forschung die Brücke

zwischen Grundlagenforschung und Anwendung zu schlagen, zukünftig noch besser erfüllt wird.

Die Gutachter haben darüber hinaus empfohlen, die interdisziplinäre Basis der Nanotechnologie durch stärkere Einbeziehung der Biologie zu erweitern. Dazu soll die biologische Forschung im Forschungszentrum Karlsruhe beitragen. Durch Fokussierung auf molekulare Phänomene an der Grenzfläche zwischen belebter und unbelebter Materie soll die exzellente biologische Kapazität des Zentrums eine unverzichtbare Dimension der Nanotechnologie erschließen. Dabei geht es u.a. um das wichtige Feld der Toxikologie von Nanopartikeln, die durch Grundlagenuntersuchungen der Wirkung von Nanopartikeln auf Zellen zu einem vertieften Verständnis geführt werden soll. Organisatorisch bedeutet das, dass auch Teile der Forschungsbereiche Umwelt und Gesundheit in die Umstrukturierung einbezogen werden. Das Ergebnis der Neustrukturierung stellt ein neues Schwergewicht in der Programmstruktur des Forschungszentrums dar und wird als wichtiges Standbein des Forschungszentrums eine breite Technologieplattform bereitstellen und weiterentwickeln. In zeitlich begrenzten anwendungsorientierten Flaggschiffprojekten soll der Nutzen der Technologie demonstriert werden, um sie dann in die industrielle Praxis zu transferieren.

Es ist geplant, die Zusammenführung aller Aktivitäten in zwei Schritten zu vollziehen. Im ersten Schritt werden die Programme Mikrosystemtechnik und Nano-

technologie zu einem Programm vereint. Dabei wird es erforderlich sein, nach dem formalen Zusammenschluss eine inhaltliche Diskussion der Programmt Themen zu führen, in der die Ergebnisse der Begutachtung der Programme zu berücksichtigen sind. So wird erwartet, dass die Verschmelzung der Programme entlang einer noch zu definierenden Roadmap erfolgt. Durch die Umsetzung dieser Empfehlung wird sichergestellt, dass alle beteiligten Wissenschaftler eine gemeinsame und abgestimmte Sichtweise der Zukunft entwickeln. Dazu gehören die erwarteten Trends innerhalb des Forschungsgebiets, Wechselwirkungen mit anderen Forschungsgebieten und die Identifikation neuer Forschungsaktivitäten und Anwendungen. Die Vorgehensweise unterstützt die Freisetzung von Synergien und verhindert die Zersplitterung der Ressourcen auf zu viele kleine Projekte.

In einem zweiten Schritt ist geplant, die restrukturierten Forschungsaktivitäten im Bereich der Biologie in das Programm zu integrieren. Von besonderer strategischer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das neu gegründete Institut für Biologische Grenzflächen, in das Teile des Instituts für Instrumentelle Analytik und des Institutes für Medizintechnik und Biophysik eingebunden wurden. Damit dieses Institut seine Ausrichtung finden kann, ist die Integration der biologischen Forschungsaktivitäten in das Programm erst 2007 geplant. Trotzdem wird bereits jetzt eine enge Kooperation durch gemeinsame FuE-Projekte angestrebt.

### Mikro-Nanofertigung

Die Gutachterkommission Nanotechnologie empfahl auch den Aufbau einer „Nanofertigung auf dem neuesten Stand der Technik“ zur Unterstützung der Forschungsaktivitäten innerhalb des Programms. Analog dazu wurde auch im Gutachten zur Mikrosystemtechnik ein „integriertes Konzept für Nanofertigung“ gefordert. Diese Anregungen werden kurz- und mittelfristig aufgegriffen. Das erfordert eine stärker anwendungsorientierte Arbeitsweise, durch die die Chancen zur Zusammenarbeit mit der Industrie und damit auch für die Anwendung der Ergebnisse verbessert werden sollen. Dazu bietet die bevorstehende Integration mit dem Programm Mikrosystemtechnik nicht nur technische, sondern auch methodische Chancen.

Das Forschungszentrum hat traditionell eine hohe Kompetenz im Bereich der Fertigungstechnik. Diese Stärke soll ausgebaut werden, indem vorhandene Fertigungstechniken darauf hin untersucht werden, ob Sie eine genügende Prozessstabilität haben, um in ein virtuelles Mikro-Nano-Fertigungszentrum (MNFZ) überführt zu werden. Abschließende Entscheidungen zu diesem Thema waren zum Zeitpunkt des Erscheinens dieses Beitrags noch nicht gefallen. Es ist aber absehbar, dass insbesondere Anlagen in den Instituten für Materialforschung, im Institut für Nanotechnologie und im Institut für Mikrostrukturtechnik Bestandteil des MNFZ sein werden. Darüber hinaus ist im Rahmen der 3. Ausbau-

stufe des Instituts für Nanotechnologie geplant, flexibel nutzbare Labor- und Fertigungsflächen aufzubauen. Interne (Institute des Forschungszentrums) und externe Arbeitsgruppen (Wissenschaft, Industrie, Start-up's) sollen über das Management des MNFZ geregelten Zugang zu Räumlichkeiten und Anlagen bekommen. Auch die Zukunft des Karlsruher Synchrotrons wird in die Überlegungen einbezogen, weil ein direkter Zugang sowohl für die Mikrosystemtechnik als auch für die Nanotechnologie von hoher strategischer Bedeutung ist. Insgesamt soll durch diese Vorgehensweise um das MNFZ herum ein Klima für Innovationen und deren kommerzielle Nutzung geschaffen werden.

Es bleibt also auch in Zukunft spannend rund um die Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie des Forschungszentrums Karlsruhe.