

Nanowissenschaften und Nanotechnologie – Perspektiven der Forschung

Jörg P. Kotthaus, Sektion Physik und Center for NanoScience, München

9.1 Grundlagen der Nanowissenschaften – „Top-down meets bottom-up“

An der Schnittstelle zwischen Physik, Chemie und Biologie hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten mit den Nanowissenschaften ein von Natur aus interdisziplinäres Arbeitsfeld entwickelt, das sich mit der Erforschung und dem Maßschneidern von Eigenschaften und Funktionen auf der Nanometerskala befasst. Diese Skala reicht von etwa einem Nanometer (1 nm = ein Milliardenstel Meter), entsprechend wenigen Atomdurchmessern, bis hin zu kleinsten Abmessungen von Bauelementen auf hochintegrierten Chips der heutigen Mikroelektronik im Bereich von 100 nm. Erschlossen wurde dieses Forschungsgebiet einerseits durch die ständige Verfeinerung vorwiegend physikalischer Herstellungsmethoden in einer *top-down*-Strategie, die es heute auf der Basis lithografischer Verfahren erlaubt, verschiedenste Materialien gezielt bis herunter zu „mesoskopischen“ Abmessungen von wenigen Nanometern zu gestalten und zu strukturieren. Andererseits gestatten inzwischen Verfahren der synthetischen und supramolekularen Chemie in zunehmenden Maße, gezielt komplexe Moleküle bis hin zu makromolekularen Einheiten herzustellen, und geben uns so einen *bottom-up*-Zugang zu nanoskaligen Systemen. Dabei werden aus der Biochemie entwickelte Methoden der molekularen Erkennung und Selbstorganisation mit klassischen chemischen Synthesestrategien kombiniert, sodass man heute beispielsweise DNA-Moleküle maßgefertigt kaufen kann.

Möglich wurden viele der physikalischen, chemischen und biochemischen Fertigungsverfahren erst durch schier unglaublich präzise Mess- und Charakterisierungstechniken, die es uns heute gestatten, nanoskalige Einheiten bis hin zu einzelnen Molekülen und Atomen sichtbar zu machen und zu manipulieren. Ein breites Spektrum von Oberflächen abtastenden Rastersondenverfahren, basierend auf der bahnbrechenden Erfindung des Rastertunnelmikroskops durch Gerd Binnig und Heini Rohrer (ausgezeichnet mit dem Nobelpreis für Physik 1986), kann heute Oberflächenstrukturen mit Details unter einem Nanometer wiedergeben. Diese können mit abbildender optischer Elektronen- und Röntgenmikroskopie sowie mit auf Beugung beruhenden Strukturaufklärungsverfahren mit Photonen, Elektronen, Neutronen und Atomen kombiniert werden. Der Einsatz lokaler Sonden wie beispielsweise in der Fluoreszenzspektroskopie, der Kernspinresonanzspektroskopie und der Spektroskopie radioaktiver Marker verschafft uns außerdem Einblick in deren nanoskalige Umgebung, da die physikalischen Eigenschaften solcher Sonden von der räumlichen Umgebung messbar beeinflusst werden.

Die Kombination all dieser Herstellungs-, Untersuchungs- und Analyseverfahren erlaubt uns jetzt die Aufklärung der atomaren Struktur komplexer Materialien bis hin zu komplexen biologischen Molekülsystemen wie dem menschlichen Genom. Darüber hinaus geben diese Methoden uns auch Einblick in die Funktion nanoskaliger Systeme wie kleinster elektronischer oder magnetischer Speicherzellen der Informationstechnologie ebenso wie nanoskaliger biologischer Systeme. So können wir heute beispielsweise Lebensfunktionen steuernde einzelne Ionenkanäle in Zellwänden oder Bewegung ermöglichende molekulare Motoren in Muskelfasern auf ihre Arbeitsmechanismen erforschen. Gerade im Verständnis kleinster biologischer Funktionseinheiten befinden wir uns erst am Anfang einer spannenden Explorationsphase, bei denen die Nanowissenschaften unverzichtbarer Bestandteil zukünftiger Forschungsaufgaben sein werden. Da auf der Nanometerskala physikalische, chemische und biologische Funktionalität oft kaum noch voneinander trennbar ist, entwickeln sich dort die traditionellen naturwissenschaftlichen Disziplinen unaufhaltsam aufeinander zu. Dies lässt sich direkt an der ständig zunehmenden Bedeutung der Nanowissenschaften in interdisziplinären Journalen wie „Science“ und „Nature“ ablesen. Nanowissenschaft ist also mehr als nur die Erforschung einer Welt des Winzigen, sie ist von der Natur her ein Bindeglied zwischen den verschiedenen klassischen naturwissenschaftlichen Disziplinen. Nur als solches kann sie letztendlich erfolgreich sein.

Basierend auf solchen zunächst auf Erkenntnis zielenden Nanowissenschaften, entwickelt sich jetzt durch Kombination der *top-down*- und *bottom-up*-Verfahren ein breites Spektrum von Nanotechnologien. Diese machen es sich zur Aufgabe, das Verständnis nanoskaliger Systeme zur Entwicklung neuer Materialien, Funktionseinheiten bis hin zu hochintegrierten komplexen Systemen zu nutzen und anzuwenden. Dabei sind die verschiedenen Nanotechnologien noch weitgehend Zukunftstechnologien, die erst in Ansätzen existieren. Sie werden aber eine Schlüsseltechnologie der kommenden Jahrzehnte sein, die voraussichtlich unser Leben noch mehr beeinflussen kann als heute die in den 60er-Jahren des letzten Jahrhunderts begonnene Mikroelektronik.

9.2 Neue Wissens- und Technologiefelder

Da die Nanowissenschaften und -technologien sich aus verschiedenen Untersuchungs- und Herstellungsverfahren der Physik, der Chemie, den Materialwissenschaften und den Biowissenschaften entwickelt haben mit dem gemeinsamen Nenner, dass sie auf dem Verständnis und der Beherrschung des Winzigen, nämlich der Eigenschaften auf der Nanometerskala beruhen, ist es unmöglich, sie als einen geschlossenen Wissensbereich zu beschreiben. Vielmehr bestehen sie mosaikähnlich aus verschiedenen Wissens- und Technologiefeldern, deren Teilbereiche im Folgenden beispielhaft, aber sicher nicht umfassend beleuchtet werden sollen.

9.2.1 Nanoskalige Werkstoffe

Ein schon vergleichsweise reifer Zweig der Forschung und Technologieentwicklung auf der Nanometerskala widmet sich der Schaffung neuer Kompositmaterialien, in denen nanoskalige Strukturierung oder der Einbau nanoskaliger Untereinheiten zu Werkstoffen mit außergewöhnlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften führen kann. Diese finden beispielsweise erste Anwendung in stark schmutzabweisenden oder extrem harten Beschichtungen ebenso wie in neuen magnetischen Materialien zur effizienten Datenspeicherung. Möglich wird dies einerseits durch die breite Erforschung der Nanostruktur natürlicher und künstlicher Materialien sowie der spezifisch durch die Nanostruktur verursachten Materialeigenschaften. Jüngere Beispiele hierfür sind die Erforschung des nanoskaligen Aufbaus von besonders harten und bruchfesten Muschelschalen mit Rasterkraftmikroskopie ebenso wie der selbstreinigenden Wirkung der Lotusblume aufgrund ihrer nanoskaligen wasserabstoßenden Oberflächenstruktur. Andererseits erlauben physikalische Schichtabscheideverfahren, weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht, ebenso wie Legierungstechniken und Methoden der Polymer- und der Kolloidchemie zunehmend den kontrollierten Einbau nanoskaliger Untereinheiten in künstliche Materialien, die sich dann durch ungewöhnliche physikalische oder chemische Eigenschaften auszeichnen. Schon fast klassische Beispiele hierfür sind Gedächtnislegierungen mit ihrem mechanischen Gedächtnis, Halbleiterheterostrukturen mit ihren herausragenden, in der Informationstechnologie genutzten elektronischen und optoelektronischen Eigenschaften, Kohlefaserverbundwerkstoffe, die als leichte und widerstandsfähige Werkstoffe in vielfältiger Weise in unseren Alltag eingekehrt sind, wie auch nanoporöse Materialien (zum Beispiel Zeolithe), die schon seit Jahren Waschmitteln zur Reduktion der Waschmaschinenverkalkung und Erhöhung der Waschkraft beigemischt werden. Aktuelle, vorwiegend noch in der Forschung befindliche Beispiele sind Kohlenstoffnanoröhren, von denen man sich einen Einsatz in Wasserstoffspeichern oder als Elektronenemitter in Flachbildschirmen verspricht, ebenso wie kolloidale Nanokristalle, die möglicherweise als künstliche Leuchtstoffe in der Beleuchtungstechnik oder als fluoreszierende Marker in der biochemischen Analyse eingesetzt werden können. Großes Interesse, zunächst in der Grundlagenforschung, aber auch schon in ersten Anwendungen, finden auch Atomcluster wie beispielsweise die fußballartigen Fullerene aus zum Beispiel 60 Kohlenstoffatomen oder Metallcluster mit charakteristischem Atomaufbau sowie komplexere, chemisch synthetisierte Cluster. In allen Fällen führt die Beherrschung der nanoskaligen Struktur zu neuartigen, in natürlichen Stoffen nicht bekannten Eigenschaften. Daher ist es verständlich, dass der Nanotechnologie eine Schlüsselrolle bei der zukünftigen Entwicklung komplexer synthetischer Werkstoffe und neuartiger Bauelemente der Informationstechnologie zuteil wird.

9.2.2 Nanosysteme für die Informationstechnologien

Ein anderer Zweig der Nanowissenschaften befasst sich mit der Entwicklung von neuartigen Funktionselementen für die Informationstechnologien. Hier gilt es, elektronische, optische oder magnetische Schalteinheiten zu entwickeln, die besser Information mit hoher Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit verarbeiten können

als die auf Silizium basierende Mikroelektronik, deren durch ständige Verkleinerung bekannter Bauelemente getriebene Entwicklung voraussichtlich in etwa zehn Jahren ihr Ende findet. Hierbei ist die Nanotechnologie in Teilbereichen schon weit entwickelt. Beispielsweise basieren die heute in CD-Laufwerken und Laserdruckern verwendeten Halbleiterlaser ebenso auf nanoskaligen Halbleiterschichtsystemen, so genannten Quantentöpfen, wie die hoch empfindlichen Eingangsverstärker heutiger Mobiltelefone. Diese technologischen Entwicklungen fußen auf breiter Grundlagenforschung an Halbleiterheterostrukturen seit Beginn der 70er-Jahre des letzten Jahrhunderts, die im Jahr 2000 unter anderem durch den Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde. Entsprechend besteht die Hoffnung, dass so genannte Halbleiter-Quantenpunkte, die seit etwa zehn Jahren mit verschiedensten Verfahren hergestellt und in ihren elektronischen und optischen Eigenschaften intensiv erforscht werden, letztendlich zu technologischen Neuerungen bei der Datenspeicherung und -übermittlung führen können. Hier steht der technologische Durchbruch allerdings noch ebenso aus wie beim verwandten Ein-Elektronen-Transistor, der es ermöglicht, einen elektronischen Schaltvorgang mit nur einem Elektron auszulösen.

Ergänzend zur elektronischen Datenverarbeitung kann erwartet werden, dass die photonische Datenverarbeitung, das heißt die Datenverarbeitung mit Licht, in den nächsten Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnt. Allerdings sind hier grundlegende Fragen des photonischen Schaltens noch weitgehend ungelöst. Derzeit werden beispielsweise Lichtsignale bei der Datenübertragung in Glasfasern entweder durch mikromechanische Elemente geschaltet oder zunächst in elektronische Signale umgewandelt, elektronisch verarbeitet und anschließend wieder erneut durch Laser in Lichtsignale verwandelt. Hier erhofft man, durch Nanowissenschaft und -technologie letztendlich schnelle und hochintegrierbare photonische Schaltelemente entwickeln zu können, die als Grundlage für photonisch arbeitende Computer dienen. Die Hoffnung basiert einerseits auf der Weiterentwicklung von photonischen Schaltelementen, die auf elektrooptischen und nichtlinear optischen Effekten in Halbleiternanostrukturen beruhen, und andererseits auf der zurzeit sehr aktuellen Erforschung der besonderen optischen Eigenschaften so genannter photonischer Kristalle. Diese nutzen die periodische räumliche Modulation der optischen Konstanten durch dreidimensionale Nanostrukturierung. Beispielsweise gelingt es inzwischen, durch den gezielten Einbau von Störstellen in solche photonische Kristalle Licht innerhalb einer Lichtwellenlänge umzulenken. Auch werden die nanotechnologischen Herstellungsverfahren für photonische Kristalle derzeit ständig verbessert, sodass in den nächsten zehn Jahren mit ihrer Nutzung in technologisch relevanten Anwendungen gerechnet werden darf.

Die durch die Halbleiterforschung eingeleitete präzise Herstellung von kristallinen Schichtstapeln mit Schichtdicken auf der Nanometerskala hat auch zur Entwicklung neuartiger magnetischer Schichtsysteme geführt, die aufgrund ihrer besonderen Magnetowiderstandseigenschaften schon heute bei der Herstellung von Leseköpfen für magnetische Plattenspeicher verwendet werden. Auch bei der Herstellung verbesserter magnetischer Speichermedien werden derart nanotechnologische Fertigungsverfahren eingesetzt. Nanotechnologie widmet sich heute auch schon der Entwicklung neuer Darstellungsmedien, wie dem „elektronischen

Papier“, das auf einer dünnen Folie auf Wunsch per Funk abrufbare Text- und Bildinformation wiedergibt. Dabei nutzen die Herstellungstechniken solcher neuartiger Medien zunehmend auch nanotechnologische Verfahren, in denen molekulare Erkennung und Selbstordnung ausgenutzt werden. Dadurch können schließlich elektronische und elektrooptische Schaltkreise, die heute noch mit aufwändigen lithografischen Verfahren hergestellt werden, mit einem Tintenstrahldrucker oder in einem Stempelverfahren mit intelligenter Farbe aus organischen Halbleitern effizienter und kostengünstiger hergestellt werden. Hier kann man erwarten, dass durch die zunehmende Nutzung nanoskaliger molekularer Erkennung in Kombination mit der rapiden Entwicklung neuer organischer Halbleitersysteme, deren grundlegende Erforschung im Jahr 2000 mit dem Nobelpreis für Chemie gewürdigt wurde, bald völlig neue Industriezweige zur Herstellung von Displays und ähnlichen bildgebenden Medien bis hin zu neuen Leuchtmitteln entstehen. Vermutlich wird dadurch die schon über 100 Jahre alte Glühbirne in zehn Jahren ebenso Museumsobjekt sein wie die klobige Röhre heutiger Fernseher.

9.2.3 Sensorik, Aktorik und Robotik mit nanoskaligen Elementen

Schon heute haben die Herstellungsverfahren der Siliziummikroelektronik zu neuen extrem miniaturisierten sensorischen und aktorischen Systemen geführt, deren Abmessungen die eines daumennagelgroßen Computerchips nicht überschreiten und die Strukturen im Bereich weniger Mikrometer (1 Mikrometer = 1/1000 Millimeter = 1000 Nanometer) enthalten. Beispiele sind aus einem Stück Silizium gefertigte mikroelektromechanische Systeme (so genannte MEMS), die heute zum Beispiel als Beschleunigungssensor beim Aufprall eines Autos auf ein Hindernis in Bruchteilen von Sekunden das Aufblasen des Airbags auslösen. Besonders in der Automobiltechnik, aber auch in der Industrierobotik finden derartige MEMS-Bauelemente zunehmend Verwendung. Beispielsweise werden inzwischen auch auf MEMS basierende extrem miniaturisierte Spiegelarrays benutzt, um vergleichsweise schnell Lichtsignale von verschiedenen Eingängen zu verschiedenen Ausgängen zu schalten oder um mit Lasern die großflächige Projektion von Bildern zu ermöglichen.

Inzwischen arbeitet man in der Forschung bereits an nanoelektromechanischen Systemen (NEMS), in der Hoffnung, daraus noch kleinere und empfindlichere sensorische und aktorische Systeme aufbauen zu können. So kann man heute bereits Nanosaiten aus Silizium herstellen, die aufgrund ihrer winzigen Abmessungen gitarrensaitenähnlich mechanische Resonanzfrequenzen im Radiofrequenzbereich haben. Aufgrund ihrer nichtlinearen Schwingungseigenschaften kann man mit ihnen inzwischen Radiofrequenzen mechanisch mischen, eine Funktion, die bisher nur mit elektronischen Bauelementen möglich war. Verbunden mit geeigneter chemischer Sensibilisierung kann man sich gut vorstellen, dass darauf aufbauende NEMS-Systeme in zehn Jahren als künstliche Nasen beim Schadstoffnachweis dienen könnten, in denen die Absorption kleinster Schadstoffmengen durch Änderung der Resonanzfrequenz spezifisch sensibilisierter Nanosaiten empfindlich nachweisbar wird. Auch als in Silizium integrierbare und auf mechanischer Bewegung basierende elektronische Filterelemente, wie sie beispielsweise im Mobilfunk zur

Kanaltrennung benötigt werden, kann man sich solche NEMS-Systeme vorstellen. Selbst die Verwendung als extrem miniaturisierte mechanische Rechenmaschinen ist möglicherweise mehr als nur ein Hirngespinnst. Die Forschung auf diesem Gebiet, die derzeit weltweit noch von relativ wenigen Gruppen betrieben wird, wird mit großer Wahrscheinlichkeit ebenso zu neuen, noch nicht im Detail vorhersehbaren Technologien führen wie im Bereich der MEMS-Bauelemente, deren Verbreitung derzeit ständig wächst. Eine Kombination solcher nanoelektromechanischer Systeme mit nanoporösen oder nanokristallinen und chemisch empfindlichen Sensoren oder mit biochemisch aktiven Molekülen kann letztendlich zu kleinsten Nachweissystemen führen, die mögliche Anwendung in der Chemietechnologie ebenso wie in der Medizintechnik finden können.

Um auf der Nanoskala Materie gezielt manipulieren zu können, bedarf es roboterähnlicher Werkzeuge, mit denen Materie mit Nanometerpräzision bearbeitet und bewegt werden kann. Bereits existierende Werkzeuge basieren auf dem Prinzip der Rastersondenmikroskope, in denen eine feine Spitze mit bis zu atomarer Auflösung über eine Oberfläche bewegt wird. Mit Rastersondenmikroskopen ist es bereits gelungen, gezielt einzelne Atome auf einer Oberfläche zu verschieben und so künstliche nanoskalige Aggregate zusammenzubauen. Auch kann man bei Verwendung geeigneter Spitzen auf der Nanometerskala Objekte verformen, oberflächennahe Schichten pflügen und elektrochemische Prozesse wie beispielsweise die lokale Oxidation steuern. Derzeit konzentrieren sich mehrere Forschungsgruppen darauf, das an sich relativ langsame Verfahren der Rastersondenmanipulation durch Parallelisierung vieler Spitzen, die unabhängig angesteuert werden können, zu beschleunigen. Andere Gruppen bemühen sich, die hebelartigen Spitzen von Rastersondenmikroskopen weiter zu miniaturisieren und dadurch aufgrund der reduzierten mechanischen Trägheit die Arbeitsgeschwindigkeit wesentlich zu steigern. Chemische Funktionalisierung der Spitzen ermöglicht es inzwischen auch, die Spitzen als chemisch selektive Werkzeuge einzusetzen und beispielsweise nur an bestimmten Molekülen angreifen zu lassen. So kann man heute Bindungskräfte in einzelnen Molekülen messen und als Identifikationsmerkmale der Moleküle nutzen.

Eine andere Nanomanipulationsmethode, die so genannte Laserpinzette, benutzt den feinen Fokus eines Laserstrahls, um Moleküle einzufangen und zu bewegen. Durch das Anlegen elektrischer Spannungen an Nanoelektroden gelingt es inzwischen auch, einzelne größere Moleküle auf Oberflächen einzufangen und zu transportieren. Das chemische Anbinden von magnetischen Nanopartikeln an Moleküle ermöglicht mithilfe magnetischer Felder ebenfalls deren kontrollierte Bewegung auf der Nanometerskala. Selbst wenn derartige nanorobotische Systeme derzeit gerade am Beginn ihrer Entwicklung stehen, verspricht ihre Erforschung ein breites Spektrum möglicher technologischer Anwendungen, von denen viele derzeit vermutlich noch nicht einmal erahnt werden.

9.2.4 Nanoskalige Funktionssysteme in Chemie, Biologie, Medizin und Pharmakologie

Das Verständnis und die gezielte Beeinflussung von Strukturen im Nanometer-Maßstab sind für neue Technologien an der Schnittstelle von Physik, Chemie, Biologie und Medizin gleichermaßen von zentraler Bedeutung. Hier schafft nanotechnologische Forschung die Grundlagen für Fortschritte in Medizin, Pharmazie, Biotechnologie und Umweltanalytik. Die Innovation in der Biotechnologie wird schon heute vor allem durch die Synergie fächerübergreifender Forschung vorangetrieben. Parallelisierung und Miniaturisierung der biochemischen Verfahren in Kombination mit modernen physikalischen Messtechniken brachten in der Genomforschung den Durchbruch. Eine vor Jahren noch als unlösbar geltende Aufgabe ist bewältigt: Das menschliche Genom ist weitgehend entschlüsselt. Eine sinnvolle Nutzung dieser Information ist jedoch erst durch das Verständnis der Funktion und Regulation komplexer biologischer Systeme möglich. Ähnlich wie in der Informationstechnologie besteht auch hier der Fortschritt in der Miniaturisierung der biochemischen Analyseverfahren. Nicht nur Unternehmen der Pharmaindustrie, sondern auch Firmen, welche die Halbleiterindustrie geprägt haben (zum Beispiel IBM, Motorola), haben den Trend erkannt und wenden sich heute mit massivem Einsatz DNA-Technologien zu. Dies zeigt beispielhaft, dass gerade in der Verknüpfung der Informationstechnologie mit modernen Methoden der Chemie, der Molekularbiologie und der Halbleiterphysik zum empfindlichen Nachweis und zur Steuerung kleinster Stoffmengen bis herunter zu einzelnen Molekülen sich ein neues fachübergreifendes Arbeitsfeld von herausragendem technologischem Innovationspotenzial erschließt.

Andererseits werden nanotechnologische Verfahren auch beim Informationsaustausch zwischen Lebewesen und Maschinen eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. Beispielsweise ist eine lokale und schnelle biochemische Analyse am Patienten, die durch miniaturisierte Laborsysteme auf der daumennagelgroßen Fläche eines Biochips angestrebt wird, ebenso weitgehend auf nanotechnologische Entwicklungen angewiesen wie eine aktive Prothetik, in der Nervenzellen mit sensorischen und motorischen Elementen direkt verknüpft werden. Noch weiter in die Zukunft blickend erscheint es möglich, dass mit Nanotechnologie in Nachahmung natürlicher Viren und molekularer Motoren kleine Vesikel und Sonden entwickelt werden können, die pharmakologische Substanzen gezielt an den Ort ihrer gewünschten Bestimmung bringen. Auch hier befinden sich Nanowissenschaften und -technologien noch weitgehend am Anfang. Allerdings besteht gerade im medizinischen und pharmakologischen Bereich ein großer Bedarf an Verfahren, mit denen biologische Fehlfunktionen im frühen Stadium an kleinsten Stoffmengen erkannt werden können, ebenso wie an Methoden, mit denen Pharmaka möglichst ohne Störung anderer biologischer Funktionen gezielt an den Ort ihrer Wirkung transportiert werden können. Auch beim Screening neuer Medikamente sind nanotechnologische Verfahren wünschenswert, um weitgehend parallelisiert und mit möglichst kleinen Mengen oft sehr kostspieliger Reagenzien ein breites Spektrum möglicher neuer Pharmaka auf ihre spezifische Wirkung analysieren zu können. Hier können die Nanowissenschaften und -technologien langfristig einen enormen volkswirtschaftlichen Nutzen bei der Krankheitsbekämpfung wie auch bei der Pro-

thetik, insbesondere zum Ersatz von Sinnesorganen, entfalten. Natürlich ist dieser Bereich auch mit einer Vielfalt von ethischen Fragen verknüpft, deren befriedigende Beantwortung sicher nicht immer leicht sein wird.

9.3 Empfehlungen für die Forschung

In den oben beispielhaft diskutierten verschiedenen Bereichen der Nanowissenschaften und -technologien gibt es in Deutschland an vielen Stellen auch im internationalen Vergleich gute und teilweise herausragende Forschungs- und Entwicklungsleistungen. Dennoch sollten Förderinstrumente dahingehend weiterentwickelt werden, dass sie vorhandene Kreativität fördern und Forschergruppen noch mehr ermutigen, sich ohne Einschränkungen dem internationalen Wettbewerb zu stellen und sich dabei an den Spitzenleistungen in den jeweiligen Gebieten zu orientieren. Dazu kann vor allem die verstärkte Förderung des internationalen wissenschaftlichen Austauschs beitragen. Hier müssen die politischen Randbedingungen in Deutschland im internationalen Vergleich nach wie vor dringend verbessert werden. Das Anwerben von jungen Forschern aus dem Ausland ist durch Aufenthaltsbestimmungen und Arbeitsgenehmigungsverfahren, die wissenschaftliche Spitzenkräfte aus dem Ausland oft ähnlich wie Asylbewerber behandeln und die Weiterbeschäftigung erfolgreicher ausländischer Absolventen deutscher Hochschulen sehr erschweren, stark behindert. Hier ist eine Öffnung dringend erforderlich. Dabei müssen wir uns in der Förderung hoch qualifizierter junger Forscher, unabhängig von ihrer Nationalität, an den international besonders erfolgreichen Einrichtungen orientieren und früher als bisher in allen Forschungsinstitutionen mehr Eigenverantwortung und Selbstständigkeit ermöglichen.

Auch die Bewertung von Forschungsanträgen und -leistungen sollte in Deutschland mehr als bisher durch internationale Begutachtung erfolgen. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass Forschungsanträge und -berichte in der Regel in Englisch abgefasst werden, wie es außerhalb des englischen Sprachraums bereits in anderen europäischen Staaten durchaus üblich ist. Um den Begutachtungsaufwand nicht unnötig zulasten der Forschungsanstrengungen auszuweiten, sollte man verstärkt wissenschaftlich sinnvolle Antrags- und Berichtszeiträume von mindestens zwei Jahren anstreben und dadurch generell der Eigenverantwortung der Forscher mehr Freiraum geben. Überflüssiges und oft zu stark bürokratisiertes Begutachtungs- und Berichtswesen, wie es beispielsweise von der EU in oft unzumutbarem Maße praktiziert wird, führt letztendlich nur zu einer reduzierten Effizienz der Forschung und Entwicklung. Hier ist es sehr Besorgnis erregend, dass heute in Deutschland ein aktiver und erfolgreicher Forscher gerade in naturwissenschaftlich aktuellen Bereichen wie den Nanowissenschaften und -technologien oft mehr Zeit für ein ständig wachsendes Begutachtungs- und Berichtswesen aufwenden muss als für seine eigene kreative Forschungstätigkeit.

Die oben geschilderten Beispiele sollten auch deutlich gemacht haben, dass Nanowissenschaften und -technologien nicht einer der klassischen naturwissen-

schaftlichen Disziplinen zugeordnet werden können, sondern gerade von der interdisziplinären Zusammenarbeit besonders befruchtet, ja ohne diese fast unmöglich werden. Daher machen gerade die Nanowissenschaften Strukturänderungen in Ausbildung und Forschungsförderung dringend erforderlich, die weniger nach den klassischen Disziplinen trennen. Dies wird an vielen Stellen im Ausland wie auch in Deutschland erkannt, und es gilt gerade in den Nanowissenschaften, schnell Formen einer effektiven interdisziplinären Ausbildung und Zusammenarbeit zu finden. In den USA, aber auch in anderen Staaten entstehen derzeit mit hohem Förderungsaufwand auf dem Gebiet der Nanowissenschaften und -technologien offene, meist lokale Zentren Fächer übergreifender Zusammenarbeit. Leider erweisen sich gerade in Deutschland aufgrund sowohl kultureller als auch arbeits- und betriebsrechtlicher Randbedingungen die Strukturen etablierter Forschungsinstitutionen oft als zu rigide, sodass hier realistisch nicht mit schnellen Änderungen gerechnet werden kann. Man denke beispielsweise an die nun über 30 Jahre andauernden und nach wie vor erfolglosen Bestrebungen, die Habilitation in einem klassischen Fach als Regelzugang zu einer Hochschullaufbahn endlich abzuschaffen. Auch ist eine deutliche Flexibilisierung von Studienordnungen, durch die es möglich wäre, innerhalb eines naturwissenschaftlichen Grundstudiums leicht einen Fachwechsel oder eine Fächerkombination zu realisieren, nach wie vor ein Wunschtraum und scheitert an unserem Regelwerk von überflüssigen Ordnungen und institutionellen Schranken, die mehr der Erhaltung des Status quo dienen als dem Fortschritt in Wissenschaft und Technologie. Entsprechendes gilt auch für die klassischen Industrien und behindert uns im globalen Wettbewerb. Um trotz dieses Gestrüpps an Machtstrukturen und Regelwerken auch kurzfristig stärkere interdisziplinäre Ausbildung und Forschung möglich zu machen, scheint daher insbesondere in Deutschland eine „ungeordnete“ und auf Engagement und Freiwilligkeit beruhende Zusammenarbeit, wie sie beispielsweise am Center for NanoScience der Ludwig-Maximilians-Universität in München gefunden wurde, der effektivere und schneller zum Erfolg führende Weg zu einer stärkeren interdisziplinären Wechselwirkung zu sein. Aufgabe der Forschungsförderung sollte es dabei sein, solche von bestehenden Strukturen weniger behinderte Cluster und Netzwerke freiwilliger Zusammenarbeit verstärkt zu fördern. Natürlich bleibt es wünschenswert, auch die institutionellen Strukturen zu lockern, aber der Weg dahin erfordert vermutlich ein langfristig angelegtes Umdenken zulasten der deutschen Ordnungsliebe, zu dem uns der internationale Wettbewerb kaum Zeit lässt.

Ein weiteres Hindernis für Fächer übergreifende Zusammenarbeit sind auch ohne Zweifel die wissenschaftlichen Sprach- und Denkbarrieren zwischen den verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen. Hier kann die Forschungsförderung wichtige Beiträge zum Abbau dieser Barrieren durch eine flexible und unbürokratische Förderung offener und kommunikationsfördernder Seminare, Schulen und Workshops leisten, in denen zu fokussierten interdisziplinär angelegten Themen bevorzugt junge Forscher und Technologen aus verschiedenen Disziplinen eingeladen werden. Auch die Förderung lokaler Cluster gemeinsamer wissenschaftlicher Zusammenarbeit über disziplinäre und institutionelle Grenzen beispielsweise im Rahmen von Sonderforschungsbereichen und Graduiertenkollegs, aber auch in Wechselwirkung mit Industrieunternehmen kann dann bestens zum Abbau solcher Barrieren beitragen, wenn die Beteiligten sich dafür aktiv engagieren. Weniger

sinnvoll und effektiv scheinen die bevorzugt geförderten virtuellen Netzwerke aus vielen, über ganz Deutschland verstreuten Wissenschaftlergruppen zu sein, die sich vor allem auf die gemeinsame Drittmittelinwerbung konzentrieren, aber wenig zum Abbau von Barrieren zwischen Disziplinen und Institutionen beitragen.

Ein dritter Bereich, der in den Nanowissenschaften und -technologien entscheidend zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit beitragen wird, ist die verbesserte Wechselwirkung zwischen Forschung und Entwicklung an den Hochschulen sowie Forschungsinstituten und der industriellen Anwendung. Auch hier erschweren in Deutschland unzeitgemäße Regelungen und kulturelle Barrieren die verbesserte Zusammenarbeit mehr als in anderen Staaten. Ermutigend ist allerdings die in den letzten Jahren deutlich erhöhte Risikobereitschaft der akademischen Jugend, die sich in einer ständigen Zunahme von Start-up-Unternehmen aus Hochschulen und Forschungsinstituten niederschlägt. Gerade in den jungen Nanowissenschaften und -technologien sind derartige Start-ups wahrscheinlich besser in der Lage als traditionelle Industrien, Brücken zwischen Forschung und Anwendung zu schlagen und neue Anwendungsfelder zu erschließen. Eine Förderung dieser Start-up-Kultur durch Businessplan-Wettbewerbe, Inkubatoren und Verfügbarkeit von Venture-Kapital wird sowohl die wissenschaftliche Kreativität beflügeln als auch neue Nanotechnologien ermöglichen. Wichtig wird dabei sein, dass industrielles Consulting und effiziente Patentierung durch Hochschulen gefördert werden und nicht nur misstrauisch beäugt und zu sehr durch Nebentätigkeitsverordnungen oder überflüssige und nur für den öffentlichen Dienst gültige Regeln des Arbeitnehmererfindungsgesetzes (§ 40.1) erschwert werden. Auch darf die kreative Umsetzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in zukunftsorientierte Produkte und Verfahren, zu der nach meinen Erfahrungen der letzten Jahre junge Wissenschaftler in Deutschland auch in hohem Maße fähig und bereit sind, nicht durch kleinkariertes und demotivierendes Unverständnis behindert werden. Vielmehr sollten Kreativität und die Risikobereitschaft junger Wissenschaftler, die sich in neue industrielle Unternehmungen wagen, durch eine entsprechende Förderung belohnt werden. Nur dadurch kann Deutschland auf den Gebieten der Nanowissenschaften und -technologien im internationalen Wettbewerb an der Spitze mithalten.

Insgesamt bin ich überzeugt, dass in den Nanowissenschaften und -technologien das wissenschaftliche und technologische Potenzial in Deutschland hervorragend ist und problemlos einem internationalen Vergleich standhält. Die Instrumente der Forschungsförderung sollten sich darauf konzentrieren, dieser vorhandenen Kreativität mehr Raum zu geben, statt sie durch programmatische und bürokratische Regelungen einzuengen. Forschungsförderung kann dabei vor allem durch motivierende, vertrauensbildende und weitgehend flexible Fördermaßnahmen sowie mehr Freiraum für Eigeninitiative und Eigenverantwortung zum Fortschritt in Forschung und Technologieentwicklung beitragen.