

Nanotechnologie als universelle Basis industrieller Produktion

U. Hartmann

FR Experimentalphysik, Universität des Saarlandes

1. Einleitung

Vor ca. einem Jahrzehnt wurde die Bedeutung der Nanotechnologie als Querschnittstechnologie mit hoher volkswirtschaftlicher Relevanz zunehmend von Wirtschaftsfachleuten und Politikern erkannt. Die erhebliche Bedeutung im Sinne einer potentiellen Grundlage für einen umfassenden industriellen Umbruch deutete sich aus naturwissenschaftlicher Sicht bereits in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts an. Heute herrscht ein allgemeiner Konsens darüber, dass die Nanotechnologie mittel- bis langfristig Einfluss auf praktisch alle Lebensbereiche gewinnen und damit zu einem der bedeutsamsten Wirtschaftsfaktoren werden wird. Die Grundlagen zur zukünftigen Freisetzung dieses Wirtschaftsfaktors müssen heute in zunehmendem Maße gelegt werden, da der Wettbewerb bevorzugt über wissenschaftlich-technische Erkenntnisse, strategische Allianzen und intellektuelle Besitzstände erfolgen wird und nicht primär über Produktionsverfahren und die Wirtschaftsgüter selbst.

In Anbetracht der sich abzeichnenden Bedeutung der Nanotechnologie mag es nicht überraschen, dass der Informationsbedarf zu wissenschaftlich-technischen Grundlagen, aber auch zu zu erwartenden sozioökonomischen Implikationen außerordentlich hoch ist. Dies hat gegenwärtig zur Folge, dass Medien praktisch täglich über Aspekte der Nanotechnologie berichten und Fachkreise sich mit einer Flut von Workshops, Expertenhearings und prospektiven Studien konfrontiert sehen. Objektiv wird die wachsende wissenschaftliche Bedeutung der Nanostrukturforschung auch darin sichtbar, dass es bereits circa 200 spezifische Lehrbücher gibt und einen dramatischen Anstieg der Primärliteratur.

Eine Internetrecherche liefert derzeit etwa 100 deutschsprachige Einträge zum Begriff „Nanoprodukte“. Eine genauere Analyse zeigt, dass „Nano“ in Zusammenhang mit Wirtschaftsgütern positiv besetzt ist, Hochtechnologie impliziert und daher bevorzugt werbend verwendet wird. Andererseits gibt es allerdings auch erste Nanoprodukte, welche die Bezeichnung wirklich verdienen, weil sie auf genuinen Ergebnissen der Nanostrukturforschung basieren.

Fundierte Untersuchungen zur Bedeutung der Nanotechnologie im Allgemeinen wurden auf der Basis von Innovations- und Technikanalysen und aus wirtschaftlicher Sicht auf Basis von Analysen der nanotechnologischen Aktivitäten von Unternehmen unterschiedlichster Größe aus den unterschiedlichsten Branchen weltumspannend durchgeführt. Zur Ausprägung des öffentlichen Bewusstseins finden überall auf der Welt in vergleichsweise großer Anzahl Informationsveranstaltungen zum Thema Nanotechnologie statt, die zeigen, dass das Gebiet transportierbar ist und im Allgemeinen positiv besetzt wird. Hingegen wird nur vereinzelt - aber umso mahnender - auf die unterschiedlichsten Gefahren der Nanotechnologie hingewiesen.

Insbesondere aus Sicht kleiner und mittlerer Unternehmen ist eine umfassende Information darüber, ob nanotechnologische Produkte oder Verfahren für ein Unternehmen je nach Branche von Bedeutung sein könnten, und, wenn ja, auf welcher Zeitskala dies der Fall wäre, von starkem Interesse. Bei der Diskussion dieser Frage müssen natürlich die spezifischen regionalen wirtschaftlichen und wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen mit einbezogen werden. Bezogen auf das Saarland lassen sich Letztere insbesondere aus der Innovationsstrategie der Landesregierung hinsichtlich der Nanotechnologie zweifelsfrei positiv bewerten.

2. Was ist Nanotechnologie?

„Nano“ leitet sich vom griechischen Wort *Nanos* für Zwerg ab und bezeichnet im Sinne der Quantifizierung einen milliardstel Teil. Ein Nanogramm wäre dementsprechend ein Milliardstel Gramm, ein Nanometer (nm) ein milliardstel Meter oder ein millionstel Millimeter. Maßgeblich für die Nanotechnologie ist nun im engeren Sinne die Längenskala. Es geht um charakteristische Abmessungen im Bereich von 1-100 nm. Dieser Bereich ist produktionstechnisch im Allgemeinen mittels konventioneller Herstellungsverfahren nicht mehr zugänglich. Allerdings erlauben in speziellen Fällen auch konventionelle Herstellungsverfahren, etwa im Bereich der Mikroelektronik, durchaus punktuell das Erreichen dieses Längenmaßstabes.

Vielfach wird fälschlicherweise angenommen, dass Nanotechnologie nichts weiter sei als eine Fortschreibung der Miniaturisierung, d. h. ein Ergebnis der ständigen Verkleinerung funktionaler Elemente, etwa aus dem Bereich der Elektronik oder Mechanik. Dem gegenüber ist es

allerdings so, dass der Nanotechnologie völlig andere Paradigmen zu Grunde liegen als bisherigen Miniaturisierungstrends.

Auf Grund grundsätzlicher physikalischer Sachverhalte führt eine Miniaturisierung bis in den Nanobereich dazu, dass sich die Eigenschaften eines Materials oder eines Bauelements bei gegebener Zusammensetzung und gegebener Architektur stark ändern. Ein nur noch aus wenigen Dutzend Atomen bestehender Metallpartikel weist im Allgemeinen nicht mehr die typischen Eigenschaften eines Stücks Metall auf, d. h. er schimmert nicht mehr metallisch, ist nicht mehr in der ursprünglichen Form elektrisch leitfähig und hat einen stark veränderten Schmelzpunkt. Die Größe eines physikalischen Objekts, also eines Partikels, einer funktionalen Einheit oder eines Bauelements, hat also einen direkten und qualitativen Einfluss auf das Verhalten. Der Nanotechnologie liegt nun als Konstruktionsparadigma zu Grunde, dass Produkte mit völlig neuen Eigenschaften über einen kausalen Zusammenhang zwischen Eigenschaft und Größe konzipiert werden. Die dazu nötige Verfahrenstechnik leitet sich nicht aus heute im Allgemeinen verwendeten Verfahren ab. Ein weiteres besonders Merkmal der Nanotechnologie besteht in ihrer ausgeprägten Multidisziplinarität, die beispielsweise enge Verknüpfungen zwischen traditionell völlig separierten Disziplinen wie etwa Biologie und Materialwissenschaft mit sich bringt.

Akademisch präzise beschreibt der Begriff Nanotechnologie die Lehre von der Entwicklung der Nanotechniken und ihren gesellschaftlichen Implikationen. Nanotechniken sind dabei Verfahren, welche die Herstellung von Produkten erlauben, in denen nanoskalige Komponenten eine maßgebliche Bedeutung haben oder Verfahren, die zur Herstellung bestimmter Produkte nanoskalige Komponenten einsetzen. Nanoskalig wiederum bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Strukturelemente im Bereich von 1-100 nm kausal für die jeweils erzielten Eigenschaften verantwortlich sind.

Häufig wird diese sehr breit ausgerichtete Definition, unter die beispielsweise das Rubinglas auf Grund der darin enthaltenen nanoskaligen Goldpartikel als Nanoprodukt anzusehen wäre, drastisch eingeschränkt, indem zusätzlich vorausgesetzt wird, dass wirkliche Nanotechniken die „Adressierbarkeit individueller nanoskaliger Funktionseinheiten gewährleisten müssen. Damit wäre ein Kolloid aus nanoskaligen Partikeln kein nanotechnisches Produkt, wohl jedoch eine Anordnung von Halbleiter-Quantenpunkten, in der die einzelnen Punkte angesteuert werden können. In der Praxis hat sich im intuitiven Gebrauch der Begriffe durchgesetzt, von

Nanotechnologie zu sprechen, wenn entsprechende geometrische Abmessungen für bestimmte, zumeist neuartige physikalische, chemische oder biologische Stoffe kausal verantwortlich sind. „Technologie wird dabei meist auf die Bedeutung der „Verfahrenskunde“ eingeschränkt.

3. Warum ist Nanotechnologie universell?

Das der Nanotechnologie zugrundeliegende Paradigma besteht darin, neue Funktionalitäten durch hinreichende Kleinheit der funktionellen Einheiten zu realisieren. Dies kann in der Tat als universelles Konstruktionsprinzip angesehen werden, weil Anwendungsfelder in den unterschiedlichsten Branchen bestehen. Die Nanotechnologie ist damit in beispielhafter Weise eine Querschnittstechnologie. „Top-down-Ansätze“, bei denen beispielsweise mittels moderner lithografischer Verfahren, etwa mittels Nanostempelverfahren, dünne Filme strukturiert werden oder „Bottom-up-Ansätze“, bei denen mittels neuer Ansätze der supramolekularen oder Precursor-Chemie große organische oder anorganische Funktionseinheiten synthetisiert werden, sind übertragbar auf die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche. Damit kommt sowohl der Verfahrensentwicklung als auch den Eigenschaften nanoskaliger Funktionseinheiten in der Regel eine universelle Bedeutung zu.

Die universelle Bedeutung nanoskaliger Funktionseinheiten lässt sich am besten an Hand beispielhafter Eigenschaften nanotechnologischer Materialien, Bauelemente, Systeme oder Verfahren erkennen: Nanoskalige Partikel oder Funktionseinheiten in Materialien weisen eine große partikuläre Oberfläche bei kleiner Masse bzw. kleinem Volumen auf und können damit als Grundlage völlig neuartiger Werkstoffe dienen. In aller Regel lassen sich unter Verwendung nanoskaliger Funktionseinheiten konventionell nicht kombinierbare Materialeigenschaften oder Bauelementeeigenschaften kombinieren. Im Bauelementebereich führt eine höhere Integration und Komplexität zu schnelleren Abläufen, geringerem Energiebedarf und höherer Zuverlässigkeit. Grundsätzlich ist eine hohe Material- und Kostenersparnis durch parallele Fertigung, hoher Stückzahlen, identischer Funktionselemente bei einer drastischen Verringerung von Entsorgungsproblemen zu erwarten. Nanotechnologie wird kurzfristig zu einer Optimierung bekannter Verfahren und Produkte und mittel und langfristig zur Realisierung gänzlich neuer Verfahren und Produkte führen. Allgemein liegen die industriellen Anwendungsfelder der Nanotechnologie in den Bereichen

- Medizin, Pharmazie, Biologie,
- Feinmechanik, Optik, Analytik,
- Chemie, Materialien,
- Elektronik, Informationstechnik,
- Automobiltechnik.

Sozioökonomische Bedeutung besitzt die Nanotechnologie in den Bereichen

- Ökologie,
- Ressourcenschonung,
- Energieerzeugung,
- Prozesssicherheit,
- Gesundheit,
- Information/Kommunikation.

4. Perspektiven für nanotechnologische Produkte

Aus Sicht der Visionäre werden natürlich langfristig völlig neue Produkte und damit auch völlig neue Märkte denkbar sein. Insbesondere die Vorstellung, dass Funktionseinheiten eines Materials, Bauelementeinheiten oder ganze Bauelemente sukzessive Atom für Atom durch gesteuerte Selbstorganisation aufgebaut werden können, zeigt, dass zumindest im Rahmen des naturwissenschaftlich Machbaren der Phantasie keine Grenzen gesetzt sind. Eine entscheidende Frage ist allerdings, auf welcher Zeitskala die Nanostrukturwissenschaft die bislang bestehenden gewaltigen Wissensdefizite im Bereich der molekularen Selbstorganisation reduzieren kann.

Hauptmerkmale langfristig entwickelbarer Produkte werden darin bestehen, dass ein heute nicht vorstellbares Maß an Effizienz beim Einsatz der Produkte erzielt werden wird und dass traditionelle Herstellungsverfahren und auch Materialien komplett substituiert werden. Bei den Produkteigenschaften ist davon auszugehen, dass bereits mittelfristig bislang nicht vereinbare technische Eigenschaften komplett untereinander kombinierbar sein werden. Im Bereich von Werkstoffen wird das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von zunehmender Bedeutung sein sowie auch das physikalische, chemische oder biologische Verhalten der Grenz-

flächen zwischen Material und Umgebung. Funktionelle Einheiten, wie beispielsweise Arzneimittelträgersysteme, Teile elektronischer Bauelemente oder ganze Bauelemente werden durch die Verwendung traditionell nicht kombinierter Materialien, wie beispielsweise organische oder biologische Moleküle auf der Oberfläche von Festkörpern, charakterisiert sein. Abgesehen von der heute noch nicht vorstellbaren Leistungsfähigkeit, die nanotechnologische Produkte langfristig auszeichnen wird, besteht ihr Charme darin, dass zumindest die „Bottom-up-Ansätze“ a priori ressourcen- und umweltschonend sind, da im Idealfall genau das Material benötigt wird, welches hinterher zum Einsatz kommt. Eine Entsorgung entsprechender Produkte würde dann wiederum darin bestehen, dass das Produkt in seine molekularen oder sogar atomaren Bestandteile zerlegt würde, welche dann komplett wieder für neue Produkte einsetzbar wären.

Kurz- bis mittelfristig deuten sich die Perspektiven für Nanoprodukte wesentlich konkreter an, als dies aus langfristig prospektiver Sicht möglich ist. Zwei nanotechnologische Bereiche sind schon heute unter allen möglichen Anwendungsfeldern von überragender Bedeutung: Die Werkstoffentwicklung auf der Basis nanoskaliger Strukturelemente und der Einsatz von Nanopartikeln als Arzneimittelträgersysteme.

Häufig ist bei Werkstoffen die Eigenschaft der Oberfläche bzw. diejenige der Grenzfläche des Werkstoffs zum umgebenden festen, flüssigen oder gasförmigen Medium von großer Bedeutung. Ein Beispiel, in dem die Eigenschaften der Oberfläche erst auf den zweiten Blick von hoher Relevanz sind, ist die Brennstoffzelle, in der beispielsweise durch Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser Energie freigesetzt wird, die dann zur Erzeugung von elektrischem Strom nutzbar ist. Der wirtschaftliche Erfolg der Brennstoffzelle hängt nun in entscheidendem Maße davon ab, ob Wasserstoff, z. B. unter Einsatz von Algen oder Bakterien durch Spaltung von Wasser genügend kostengünstig erzeugt werden kann. Andere Brennstoffe, wie Methanol oder „Synfuel“ werden diskutiert. Viel versprechende Katalysatoren bestehen aus Platin-Nanopartikeln, die eine Größe von etwa 2 nm haben. Ein Gramm dieser Partikel besitzt eine Oberfläche von circa 250 m². Die Partikel, die in geeigneter Weise die Werkstoffoberfläche funktionalisieren, könnten unter Beibehaltung der Katalysatoreffizienz keinesfalls durch eine herkömmliche Werkstoffoberfläche ersetzt werden.

Neben katalytischen Anwendungen spielen nanostrukturierte oder nanokomponierte Materialien auch bei der Konzeption neuartiger Filter und Festkörperspeicher eine Rolle. Auch Far-

ben als Grundlage einer speziellen Oberflächenfunktionalisierung sind in diesem erweiterten Kontext zur Werkstoffentwicklung zu zählen.

Auch die Fähigkeit von Werkstoffoberflächen, Stoffe gezielt zu attrahieren oder abzuweisen, ist technisch gesehen von großer Bedeutung und kann mittels nanofunktionaler Beschichtungen stark gesteuert werden. So lässt sich das Wasser abweisende Verhalten von Textilien oder Tondachziegeln, das Fett abweisende Verhalten von Edelstahlblechen oder das Schmutz abweisende Verhalten von Keramikziegeln durch geeignete Beschichtungen, die eine chemische Funktionalität mit topographischen Elementen im Sub- μm -Bereich aufweist, perfekt steuern. Eine besondere Bedeutung im Bereich des gesteuerten Ober- und Grenzflächenverhaltens kommt der Biofunktionalität von Oberflächen zu. Durch nanotechnologische Maßnahmen können Oberflächen „biokompatibel“ gemacht werden. Das Wachstum von Zellen kann forciert oder reduziert werden. Ein „Biokorrosionsschutz“ verhindert biologische Ablagerungen. Bestimmte Schichten können Viren, Bakterien oder Pilze abtöten. Es ist evident, dass steuerbare Oberflächeneigenschaften damit neue Möglichkeiten im Bereich der Medizinwerkstoffe eröffnet, die wiederum verbesserte Produkte zur Diagnostik und Therapie, wie etwa medizinische Instrumente oder Prothesen, nach sich ziehen.

Nanopartikel, insbesondere dann, wenn sie an ihrer Oberfläche organisch oder anorganisch funktionalisiert sind, unterliegen anderen Gesetzmäßigkeiten beim Transport im und durch den Körper als Mikropartikel. Dies eröffnet die Möglichkeit, dass mittels Arzneimittelträgersystemen aus Nanopartikeln biologische Barrieren überwunden werden können, die mittels herkömmlicher Methoden nicht ausreichend überwindbar sind. Nanopartikel können dabei an ihrer Oberfläche oder auch in ihrem Inneren Arzneimittel transportieren. Sie können extracorporal (auf der Haut, Kosmetika) oder intracorporal (z. B. als diffundierende Arzneimittelträger) appliziert werden. Auch Nanopartikel, die nicht durch Arzneimittel funktionalisiert sind, können im Rahmen diagnostischer Maßnahmen (Kontrastmittel) oder auch therapeutischer Maßnahmen (z. B. Hyperthermie) eingesetzt werden. Erste klinische Tests erfolgen derzeit.

Neben ihrer direkten Bedeutung haben bereits bestehende oder zu entwickelnde nanotechnologische Produkte auch eine indirekte Bedeutung, die bereits heute zunehmend zu einem ernst zu nehmenden Wirtschaftsfaktor wird. Kurzfristig wird Nanotechnologie zu einer Steigerung der Qualität heute bekannter Produkte und Verfahren führen. Konventionelle Produkte und Verfahren werden aber zur Entwicklung nanotechnologischer Produkte gleichzeitig auch in

Form einer beachtlichen Zulieferung benötigt. Nanotechnologie bietet ein extrem hohes „Start-up“- und Umstrukturierungspotential. Schließlich besteht seitens der Nanotechnologie ein hoher Bedarf an wissenschaftlicher und technischer Bildung sowie Fortbildung, was wiederum Impulse für die Bildungsindustrie liefert.

Eine grobe Vorstellung davon, was im Hinblick auf nanotechnologische Produkte kurz-, mittel- und langfristig bedeutet, liefert eine Betrachtung der typischen Phasen technischer Innovation. Die erste forschungsnah Phase, in der der „Take-off“ noch völlig ungesichert ist, beinhaltet viele Varianten eines möglichen Produktes, eine unsichere Herstellungstechnologie und mangelnde Kompatibilität zu Anwenderstrukturen. Diese Phase ist dadurch charakterisiert, dass nur sehr risikobereite Investoren bei einem Nutzerpotential von maximal 2,5 % Interesse zeigen. Dies ist die Phase, in der sich gegenwärtig die Entwicklung diverser nanotechnologischer Produkte befindet. Die Phase 2 ist dadurch gekennzeichnet, dass sich „Early Adoptors“ der Entwicklung annehmen. Es gibt eine verminderte Anzahl von Produktvarianten; die Erwartungen in das Produkt steigen. Auf Grund erster Referenzen wird seitens der Konsumenten die Kompatibilität eingefordert. Der „Take-off“ rückt näher. In der dynamischen Wachstumsphase 3 gibt es ein dominantes Produktdesign. Der „Take-off“ wird erreicht. Das Nutzerpotential steigt auf 50 %. Schließlich wird in der Phase 4 ein Nutzerpotential von 100 % erreicht. Es tritt eine Sättigungsphase ein. Nachzügler erreichen den Markt und auf Grund eines mehr oder weniger starken Wettbewerbs erfolgt eine Verdrängung bestimmter Produkte durch innovative Alternativen. Dieses typische, in vier Phasen eingeteilte Szenarium umfasst für die unterschiedlichsten High-Tech-Produkte, die jeweils auf einem gänzlich neuen Forschungsbefund beruhen, mit erstaunlicher Reproduzierbarkeit circa 10 Jahre. Selbstverständlich muss bei vielen visionären nanotechnologischen Produkten berücksichtigt werden, dass entsprechende Forschungsergebnisse noch gar nicht zur Verfügung stehen. Damit umfassen einige Visionen eher den Zeitraum eines halben Jahrhunderts als einen Zeitraum, der von der Verfügbarkeit entsprechender Forschungsergebnisse ausgeht. Andererseits lehrt uns die Technikentwicklung immer wieder, dass vorsichtige Schätzungen bezüglich des Bedarfs an und der Realisierbarkeit von bestimmten Technologien durch die Realität in rasantem Tempo überholt werden. Ein permanentes Beispiel liefert hierfür die Computerindustrie.

5. Nanotechnologie in der Region

Das Saarland setzt konsequent auf Nanotechnologie und die Standortbedingungen sind auch im weltweiten Vergleich hervorragend. Dies hat zum einen seine Ursache in der frühen Ansiedlung entsprechender An-Institute und zum anderen in der konsequenten Stärkung nanotechnologischer Schwerpunkte in Forschung, Lehre und Wirtschaft im Rahmen der Innovationsstrategie für die Umstrukturierung des Landes. Die Dichte an Firmen, deren Produktpalette ausschließlich auf nanotechnologischen Produkten oder Verfahren basiert, ist beachtlich. Die Universität konzentriert Forschungsschwerpunkte konsequent auf den Bereich Nanotechnologie. Ein besonderes Spezifikum der Region ist die Bedeutung der Nanobiotechnologie als wichtiger Grenzbereich zwischen Nano- und Biotechnologie mit starker Orientierung an den Bauprinzipien der Natur. Besondere Anwendungsfelder nanobiotechnologischer Produkte sind der Bereich Gesundheit, die Lebensmittelindustrie und der Umweltsektor.

Seitens der Landesregierung wurde die wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Kompetenz im Bereich der Nano- und Biotechnologie unter dem Internetportal www.biokom.saarland.de subsumiert. Beispielhaft für die Entwicklung eines Kompetenznetzwerkes ist NanoBioNet (www.nanobionet.com). Dieses Netzwerk besteht aus Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Institutionen aus der Region Saarland-Rheinland-Pfalz im Verbund mit internationalen Partnern. NanoBioNet ist für die Landesregierung zu einem Leitprojekt geworden, das es ermöglicht hat, die Nanobiotechnologie in ihrer gegenwärtigen Bedeutung zu einem Alleinstellungsmerkmal der Region zu machen. Aus unternehmerischer Sicht ist NanoBioNet insbesondere eine Plattform zur umfassenden Information über nanotechnologische Verfahren und Produkte sowohl im Allgemeinen als auch im Speziellen die Region betreffend.

Zusammenfassend kann aus regionaler Sicht festgestellt werden, dass die Nanotechnologie zu einem wirklichen Standortfaktor geworden ist. Gerade kleine Unternehmen haben unter Beweis gestellt, dass bereits heute Nanotechnologie zu tragfähigen unternehmerischen Konzepten führen kann. Für mittlere und größere Unternehmen können nanotechnologische Verfahren und Produkte zu einer Optimierung der bestehenden Produktpalette und auch bereits heute zur Konzeption völlig neuer Produkte beitragen. Global betrachtet entwickelt sich die Nanotechnologie mit einer ebenso rasanten Geschwindigkeit wie es andere Hochtechnologien vorher ebenfalls getan haben. Im Unterschied zu letzteren besitzt aber die Nanotechnologie eben ein enormes Querschnittspotential, was sie in jedem Fall zu einem äußerst relevanten Wirtschaftsfaktor macht.