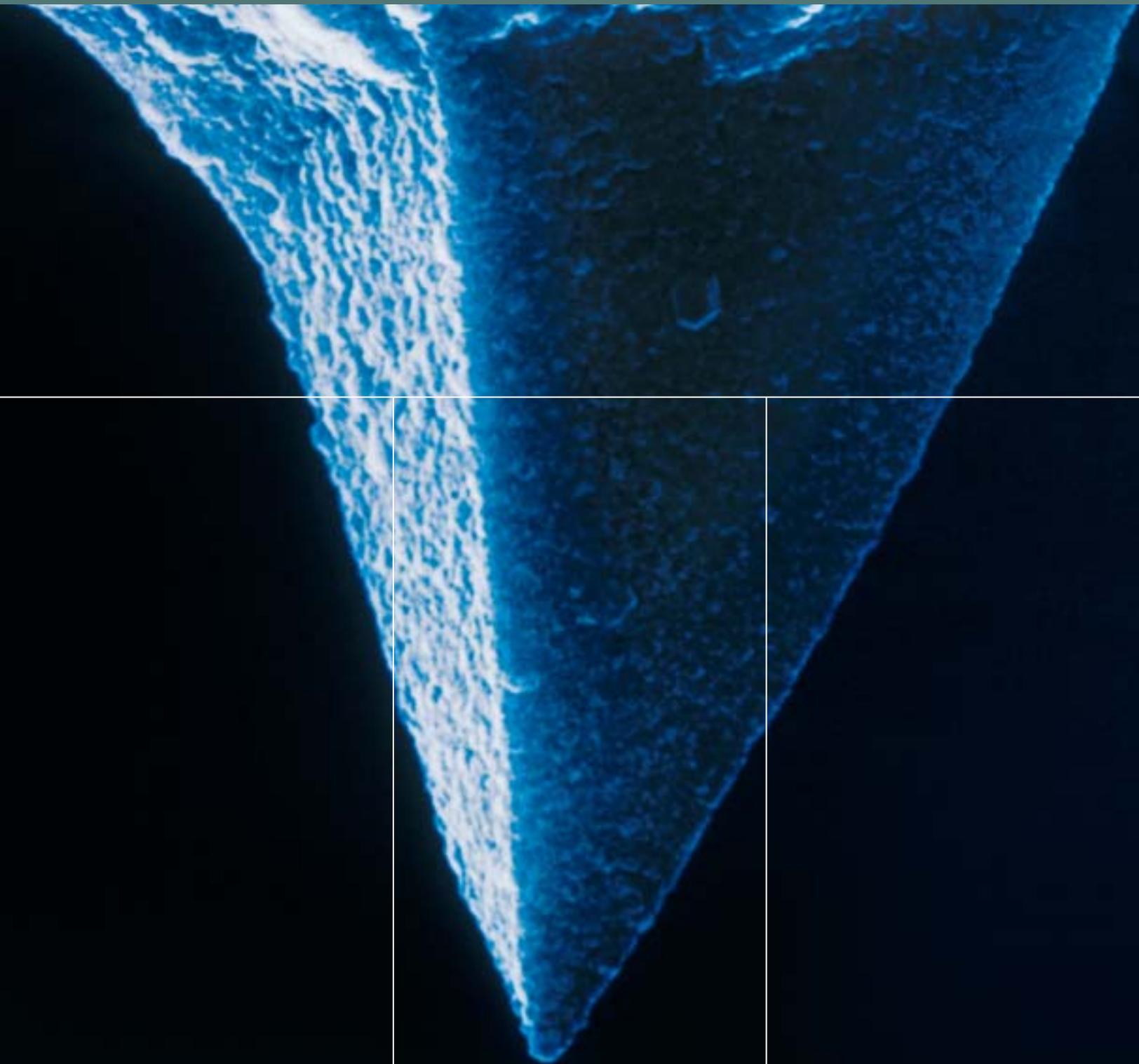


# Nanotechnologie Kleine Teile – grosse Zukunft?



Risk Perception

Nanotechnologie  
Kleine Teile – grosse Zukunft?

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	3
<b>1 Einführung</b>	5
<b>2 Nanotechnologie – primär eine Grössenbezeichnung</b>	11
2.1 Kleine Partikel mit grosser Oberfläche	12
2.2 Natürliche und künstliche Nanopartikel	13
<b>3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?</b>	15
3.1 Einatmung von Nanopartikeln	15
3.2 Partikelaufnahme durch die Haut	18
3.3 Partikelaufnahme über den Magen-Darm-Trakt	19
3.4 Nanopartikel im Körper	20
3.5 Interaktion mit biologischen Prozessen	24
<b>4 Nanopartikel in der Umwelt</b>	27
<b>5 Berufskrankheiten («occupational hazards»)</b>	33
<b>6 Regulatives Umfeld</b>	36
<b>7 Auswirkungen auf die Versicherung</b>	39
7.1 Asbest – ein zulässiger Vergleich?	42
7.2 Das Risk Management der Versicherer	44
7.3 Herausforderung für die Risikokommunikation	44
7.4 «Lesson learnt»	45
7.5 Das Vorsorgeprinzip («precautionary principle»)	47
7.6 Die Assekuranz als Partner	48
<b>Anhang</b>	50
<b>Quellen</b>	53
<b>Weitere Publikationen in der Reihe «Risk Perception»</b>	55

# Vorwort

Nanotechnologie ist eine grundlegend neue Entwicklung in der industriellen Produktion: Sie widerspiegelt den allgemeinen Trend der Verkleinerung und Miniatürisierung. Strukturen und massgeschneiderte Partikel von wenigen Millionstel Millimetern Grösse können kontrolliert hergestellt werden und ermöglichen die Herstellung von zum Beispiel schnelleren Computerchips, effizienteren Batterien, «Fähren» für Arzneien oder hauchdünnen Beschichtungen mit vielfältigen Eigenschaften.

All das klingt sehr positiv. Und doch führen neue Technologien immer auch zu neuen Schadensbildern. Der zunehmend kommerzielle Einsatz dieser Technik hat deshalb in letzter Zeit zu einer kontroversen Diskussion in Expertenkreisen über die potenziellen Vor- und Nachteile der Nanotechnologie geführt, und so taucht das Schlagwort «Nano» immer häufiger in den Medien und der Öffentlichkeit auf.

Wie ist die Nanotechnologie nun zu bewerten? Sind die unsichtbaren Partikel, die man zur Geruchsneutralisation in die Raumluft gibt, für unsere Atmung ungefährlich oder nicht? Können Nanopartikel in Sonnencremes ihren Weg über die Haut in den Körper finden und Schaden anrichten? Noch ist zu wenig über diese Art von Risiken bekannt, und so macht die dünne Datenlage viel Platz für undifferenzierte Schreckensszenarien und Ängste.

Da nanotechnologisch bearbeitete Materialien in der Industrie und im Konsumgüterbereich bereits vermehrt Anwendung finden, muss sich die Assekuranz ein Bild von potenziellen Risiken und Nutzen verschaffen. Um so früh wie möglich auf neue oder sich verändernde Risiken aufmerksam zu werden, hat Swiss Re deshalb in den vergangenen Jahren Expertenteams aufgebaut, die sich den unterschiedlichsten Themen widmen – Nanotechnologie ist eines davon.

Für die Rückversicherung ist es wichtig zu wissen, welche Schäden eine neue Technologie verursachen kann und wie das Ausmass und die Häufigkeit solcher Schäden sein werden. Können die Eckwerte einigermaßen bestimmt werden, ist die künftige Schadenlast abschätzbar, und man kann eine risikoadäquate Prämie berechnen und Versicherungsschutz gewähren.

Hinsichtlich der vielfältigen Nutzen der Nanotechnologie sucht Swiss Re den offenen Risikodialog mit allen beteiligten Parteien – Industrie, Wissenschaft, Regulierungsbehörden und Assekuranz –, um die damit einhergehenden Risiken und Chancen zu thematisieren. Wenn die Versicherungsindustrie in der Lage ist, das Risiko zu bewerten, kann sie definieren, was als Schaden zu gelten hat, und entscheiden, wie dieser optimal zu bewältigen ist.



Chief Risk Officer, Swiss Re

Fullerene C<sub>60</sub> Moleküle, Auflösung 10 Nanometer  
Mit dem Scanner-Tunnel-Mikroskop (STM) können Moleküle im Vakuum zur  
Lichtemission angeregt werden.



# 1 Einführung

Der Begriff «Nanotechnologie» leitet sich von dem griechischen Wort «nanos» ab, das «Zwerg» bedeutet. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter, oder in anderen Worten, ein Millimeter enthält eine Million Nanometer. Diese Grössenverhältnisse sind nur schwer vorstellbar; im Vergleich dazu beträgt die Grösse eines roten Blutkörperchens zirka 7000 nm. Bakterien sind mit etwa 1000 nm nochmals kleiner, während ein kugelförmiges Virus nur noch gerade zwischen 60 und 100 nm misst. Ein Floh dagegen ist mit einer Million nm geradezu riesig.

Die Nanotechnologie ist Thema der neuesten Technologiedebatte, die in letzter Zeit mehr und mehr in das Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt ist. Dabei ist die Nanotechnologie weniger eine Technologie als vielmehr ein Überbegriff für eine Vielzahl von Anwendungen und Produkten, die kleinste Partikel enthalten und dadurch ganz spezielle Eigenschaften bekommen. Nanopartikel sind mit dem blossen Auge nicht sichtbar; sie sind so klein, dass man ein menschliches Haar 80 000 Mal spalten müsste, bis es ein Nanometer dünn wäre.

Die Tendenz, Produkte zu verkleinern, ist nichts Neues: Viele Alltagsgegenstände wie zum Beispiel der portable Computer oder das Mobiltelefon sind mit der technischen Weiterentwicklung laufend verkleinert worden, während die Leistungsfähigkeit sehr oft markant gesteigert werden konnte. Denken wir zurück: Konnte man mit dem ersten Grossrechner Anfang der Fünfzigerjahre nur einfache Rechenübungen erledigen, so arbeitet man heute mit extrem schnellen PCs, die bequem auf einen Schreibtisch passen und viel komplexere Aufgaben erledigen als reine Rechenoperationen. Obwohl wir mittlerweile mit dem Computer auch Bilder anschauen oder bearbeiten sowie Musik hören können – die Basisfunktion ist immer noch die gleiche geblieben: nämlich die der digitalisierten Datenverarbeitung.

Hier liegt der fundamentale Unterschied zur Nanotechnologie: In dieser neuen Disziplin hat die Verkleinerung eine gewisse Schallgrenze überschritten, nach der die alten Gesetze nicht mehr unbedingt zutreffen. Ein beliebiges Material, das auf die Grösse von Nanopartikeln reduziert wird, kann sich auf einmal ganz anders verhalten als vorher. So zeigen zum Beispiel elektrisch isolierende Stoffe plötzlich ein leitendes Verhalten, und nicht lösliche Stoffe werden auf einmal löslich. Andere ändern ihre Farbe oder werden durchsichtig – völlig neue Eigenschaften, die Tür und Tor für neue Anwendungen und Produkte öffnen und damit sowohl für die Wirtschaft als auch für die Gesellschaft äusserst interessant werden.

Die Palette der neuen Produkte ist breit. Von selbstreinigenden Fensterscheiben, Trinkgläsern oder Flugzeugsitzen bis hin zu massgeschneiderten Medikamenten, Kosmetika, Verpackungsmaterialien, Lebensmittelzusätzen oder Elektronikprodukten und Haushaltswaren ist alles denkbar – und teilweise auch schon auf dem Markt. Seit einiger Zeit haben nanotechnologisch hergestellte Produkte ohne besondere Kennzeichnung durch den Gesetzgeber ihren Weg in die Läden gefunden; häufig ohne vom Konsumenten als solche erkannt zu werden. Im Rennen um neue Marktsegmente und Patente kämpfen weltweit nicht nur zahlreiche kleinere Firmen und Forschungsinstitute, sondern auch viele der «Fortune 500»-Unternehmen.

**«Jede Nation der Welt betrachtet die Nanotechnologie als Zukunftstechnologie, die ihre Wettbewerbsfähigkeit in der Weltwirtschaft beflügelt.»**

**Neal Lane, Professor für Physik,  
Rice University<sup>1</sup>**

## *Eine industrielle Revolution?*

Einige Experten halten den Einzug der Nanotechnologie für eine industrielle Revolution, die – ähnlich wie die Erfindung der Elektrizität – massive Auswirkungen auf Gesellschaft, Wirtschaft und das Leben insgesamt haben wird. Dabei folgt die Nano- der Bio- und Informationstechnologie, wobei die Grenzen fließend ineinander übergehen und sich die Disziplinen gegenseitig ergänzen. Auf der atomaren Ebene verschmelzen die Gesetzmässigkeiten der Physik, Chemie oder Biologie und ermöglichen dadurch interdisziplinäre Entwicklungen, die alle bisherigen Errungenschaften in den Schatten stellen sollen. Von diesen Veränderungen betroffen sind so ziemlich alle denkbaren Industriezweige, angefangen bei der Luft- und Raumfahrttechnik, über die Automobilindustrie, Chemie, Medizin, Elektronik, Computertechnik, Optik und den Maschinenbau bis hin zur Feinmechanik.

Nach dem E-Business wird die Nanotechnologie in der Industrie bereits als der nächste «Quantensprung» gefeiert und mit ihr die Chancen und Potenziale gepriesen. Wie viel Aufmerksamkeit der Technologie tatsächlich beigemessen wird, zeigt sich in den rasant steigenden Forschungsgeldern aus Wirtschaft und Politik. Nach Schätzungen summierten sich 2003 alleine die öffentlichen Forschungsgelder weltweit auf mehr als 3 Milliarden US-Dollar – mit steigender Tendenz im Hinblick auf die kommenden Jahre. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Wirtschaft im selben Zeitraum mindestens den gleichen Betrag investiert hat. Der Umsatz mit nanotechnologisch hergestellten Produkten erreicht heute schon einen zweistelligen Milliardenbetrag und soll nach Hochrechnungen bis 2010 dreistellige und bis 2015 sogar vierstellige Milliardenbeträge generieren. Dabei widerspiegelt diese rasante Entwicklung einen Trend, der nicht nur in einzelnen Ländern zu beobachten ist, sondern in der gesamten industrialisierten Welt.

Was sich heute Nanotechnologie nennt, wurde schon vor vielen Jahren in einigen Produktionsverfahren angewendet, nur war man sich dessen nicht unbedingt bewusst. Als in den Zwanzigerjahren zum Beispiel die ersten Reifen mit amorphem Kohlenstoff («carbon black») hergestellt wurden, um den Abrieb auf der Strasse zu reduzieren, wusste man noch nicht, dass die verbesserte Reifenqualität den beigefügten ultrakleinen Partikeln zu verdanken war. Weder liess sich zu jener Zeit eine bestimmte Partikelgrösse konstant herstellen noch verstand man die ursächlichen Zusammenhänge. Neu ist also heute die systematische Nutzung und Manipulation von einzelnen Nanopartikeln, die erst durch die Erfindung spezieller Werkzeuge wie dem Rastertunnel- und dem Rasterkraftmikroskop (*AFM, Atomic Force Mikroskop*) und deren Weiterentwicklungen in den Achtzigerjahren möglich wurden. Erst die fortgeschrittenen Visualisierungs- und gezielten Manipulationsmöglichkeiten machten es möglich, das breite Potenzial einzuschätzen und vermehrt in der Produktion umzusetzen.

Nach einer relativ kurzen Forschungs- und Entwicklungsphase ist eine Vielzahl von neuen Nanoprodukten schnell im Markt eingeführt worden. Zu schnell? Nun liegt es an allen beteiligten Parteien, Erfahrungen zu sammeln und Daten zu analysieren, um die langfristigen Eigenschaften und die generelle Zuverlässigkeit dieser Produkte sowie ihre Wirkung auf Verbraucher und Umwelt zu ermitteln. Denn wie bei jeder neuen technologischen Entwicklung haben Spezialisten noch kein fundiertes Wissen aus der Vergangenheit und keine geeignete Methode, um die Folgen möglicher Veränderungen für die Zukunft definitiv abschätzen zu können.

<sup>1</sup> Thayer, Ann (2002): «Nanotech meets market realities» in: *Chemical & Engineering News*, S. 17.

**«Diese Wissenschaft vom verschwindend Kleinen ist in der Tat der Anfang von etwas ganz Großem. Aber wie weit kann es gehen? Wie schnell? Welche Auswirkungen hat es auf Gesellschaft, Umwelt, Gesundheit und Wirtschaft?»**  
*Simon Waddington, Beirat der European Nanobusiness Association (ENA)<sup>2</sup>*

Überraschungen, die durch die Verkleinerung von Material auf Nanopartikelgrösse entstehen, gibt es einige: Möglich ist nicht nur eine Veränderung im Verhalten der kleinen Partikel, sondern auch in ihrer Mobilität. Im Gegensatz zu den grösseren Mikropartikeln haben Nanopartikel fast unbeschränkten Zugang zum menschlichen Körper. Die Möglichkeit einer Aufnahme über die Haut wird derzeit diskutiert, während der Eintritt von gewissen Nanopartikeln in die Blutbahn durch das Einatmen über die Lunge als gesichert gilt. Auch über den Verdauungstrakt können manche der winzigen Partikel in den Körper gelangen. Einmal in der Blutbahn, bewegen sie sich praktisch ungehindert im gesamten Körper. Auch sonst schwer überwindbare Schranken wie die *Blut-Hirn-Schranke* (siehe Seite 23) scheinen kein grösseres Problem darzustellen. Im Gehirn lassen sich einige der zuvor zu Testzwecken verabreichten Partikel laut Laborberichten bereits nach kurzer Zeit nachweisen.

In der Umwelt können beschichtete Nanopartikel äusserst mobil sein. Einmal in der Luft, vermögen sie sich quasi endlos weiterzubewegen, da sie sich – anders als grössere Partikel – nicht auf Oberflächen absetzen, sondern erst zum Stillstand kommen, wenn sie beispielsweise eingeatmet oder in ihrer Verbreitung eingeschränkt werden. Auf dem Land, in der Erde oder im Wasser zeigt sich ein ähnliches Bild: Kleinste Partikel werden durch verschiedene Erdschichten geschwemmt und verteilen sich ungehindert im flüssigen Medium – und passieren dadurch die meisten gängigen Filtermethoden. Bei der üblichen Trinkwasseraufbereitung würden Nanopartikel zum Beispiel nur unvollständig herausgefiltriert.

Nun stellt die blossе Präsenz der Partikel, auch wenn sie überall auftreten sollten, noch keine Bedrohung dar. Erst wenn sich gewisse Eigenschaften der Partikel für den Menschen oder die Umwelt als schädlich herausstellen sollten, könnte man von einer Gefahr sprechen. Ob und inwiefern Nanopartikel oder damit hergestellte Produkte eine konkrete Gefahr darstellen, lässt sich ohne fundierte Studien schwer sagen, und Langzeit- oder toxikologische Studien sind zurzeit kaum vorhanden.

Doch einige Fragen zeichnen sich jetzt schon ab. Wie werden sich die veränderten chemischen Eigenschaften der Nanopartikel auf den menschlichen Körper auswirken, wenn sie in Form von Medikamenten oder Sprays konzentriert angewendet werden? Was passiert mit den akkumulierten Partikeln, die in einigen Organen bereits nachgewiesen wurden? Können sie die normalen Abläufe im Körper beeinflussen? Und wie viel wird auf welchem Wege wieder ausgeschieden?

Für den Menschen ist die Palette der nanotechnologisch möglichen Produkte und Anwendungen etwas fundamental Neues: Evolutionstechnisch hat sich der Mensch mit dieser Art und Menge von industriell hergestellten Partikeln noch nie wirklich auseinandersetzen müssen. In welche Richtung wird die Reise also gehen? Sind wir für die breite Einführung dieser Technologie genügend vorbereitet?

Das Problem ist, dass wir auf diese Frage so schnell keine zufrieden stellende Antwort erhalten werden. Selbst wenn wissenschaftliche Zell- oder Tierexperimente beendet sein werden, können sie keine endgültigen Ergebnisse liefern, da Tierexperimente nur im begrenzten Masse aussagekräftig sind – nicht alle Resultate lassen sich ohne weiteres auf den Menschen übertragen. Um herauszufinden, wie sich Nanopartikel im menschlichen Körper verhalten, müsste man Studien am Menschen durchführen, was jedoch nicht möglich ist. Da potenzielle Gefahren für Mensch und Umwelt durch die Nanotechnologie nicht ausgeschlossen werden können, müssen aufgrund dieser latenten Unsicherheit nach dem Vorsorgeprinzip mindestens nahe liegende Schutzmassnahmen sowie weitere Abklärungen für eine Risikoanalyse getroffen werden.

<sup>2</sup> Venture Capital Magazine, November 2002. S. 4.

## 1 Einführung

**«Die Nanotechnologie hat uns die Werkzeuge gegeben (...), um auf der ultimativen Spielwiese der Natur zu spielen: den Atomen und Molekülen. Alles besteht daraus (...). Die Möglichkeiten, Neues zu schaffen, scheinen grenzenlos zu sein.»**  
*Horst Störmer, Träger des Nobelpreises für Physik 1998<sup>3</sup>*

Als bedeutender Risikoträger kann die Assekuranz die Einführung einer neuen Technologie nur dann verantwortungsvoll begleiten und unterstützen, wenn sie die damit verbundenen Risiken evaluieren und berechnen kann. Angesichts der spartenübergreifenden Produktpalette und der globalen Verbreitung von nanotechnologisch hergestellten Produkten, die bereits verkauft werden und daher in den existierenden Verträgen in der Regel mitversichert sind, ist dies nicht einfach.

Wie bei jeder neuen Technologie gilt es jedoch auch hier, die Chancen und Risiken gegeneinander abzuwägen. Es ist unbestritten, dass die Nanotechnologie eine Vielzahl von innovativen Produkten ermöglicht, die für den Konsumenten attraktiv und für die Umwelt von Vorteil sein könnten. Auch liegt im Trend zur Miniaturisierung ein Wachstumspotenzial, das nach Angaben der Analysten in den nächsten Jahren von grösserer wirtschaftlicher Bedeutung sein soll. Wichtig ist daher, die Nanotechnologie differenziert zu betrachten, um herauszufinden, wo – wenn überhaupt – mögliche Probleme auftreten könnten.

### *«Advanced Nanotechnology»*

Auch in der Politik wird seit einiger Zeit eine kontroverse Debatte über die mit der Nanotechnologie assoziierten Risiken geführt. Erstaunlicherweise konzentrierte sich ein grosser Teil der Aufmerksamkeit besonders auf die so genannte «advanced nanotechnology». Dieser Bereich der Nanotechnologie beschäftigt sich mit Themen wie «künstliche Intelligenz», mit «Nanorobotern» und der «self assembly» (Selbstorganisation).

Von dieser Art der nanotechnologischen Selbstorganisation sind wir jedoch noch weit entfernt. Während Optimisten diesen Herstellungsweg grundsätzlich für möglich halten, glauben Pessimisten, dass diese Technologie den nächsten Generationen noch nicht zur Verfügung stehen wird, falls sie überhaupt jemals machbar sei. Obwohl viele Szenarien noch in ferner Zukunft liegen, bewegen sie schon seit einiger Zeit die Gemüter: Horrorszenarien mit intelligenten, sich selbst vermehrenden Partikeln, die die Welt überziehen und sie so für den Menschen unbewohnbar machen («grey goo»). Diese und ähnliche Vorstellungen sind denn auch Auslöser für viele der Debatten, die im sozialpolitischen Umfeld geführt werden.

Interessanterweise werden die inhärenten Risiken der Nanotechnologie fast automatisch mit sich verselbstständigenden Objekten assoziiert, die noch immer in die Science-Fiction-Welt gehören. Jedoch haben Gefahren, die von der Herstellung innovativer Materialien oder neuen Anwendungen ausgehen könnten, bislang eher wenig Aufmerksamkeit erregt. Aus Sicht der Assekuranz sind jedoch gerade solche Produkte interessant, die bereits kommerziell erhältlich sind oder in naher Zukunft im Markt eingeführt werden. Aus diesem Grund konzentriert sich die vorliegende Publikation auf das Gebiet der Nanopartikelherstellung und Materialentwicklung. Auch wird nur ein begrenztes Gebiet näher dargestellt: jenes, das die Versicherungsindustrie am meisten interessieren dürfte, weil es einmal für die Haftpflicht relevant werden könnte. Das Augenmerk richtet sich daher auf Produkte und Applikationen, die mit dem Menschen in Kontakt kommen, oder solche mit potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt.

<sup>3</sup> «Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom». [www.nano.gov](http://www.nano.gov)

Erst seit kurzer Zeit ist das Thema Nanotechnologie auch in das Bewusstsein des Gesetzgebers gelangt. Einige neu lancierte Studien sollen nun mit staatlichen Geldern potenzielle Risiken analysieren, die sich durch die zunehmende Verbreitung von nanotechnologisch hergestellten Produkten für die Gesellschaft ergeben können. Die amerikanische Umweltschutzbehörde *Environmental Protection Agency* (EPA), die *National Nanotechnology Initiative* (NNI) in den USA und einige von der Europäischen Kommission unterstützte Projekte beschäftigen sich bereits mit solchen Fragestellungen.

Weltweit tendieren einige Forschungsinstitute an renommierten Universitäten ebenfalls dazu, neben der anwendungsorientierten Forschung auch einen Teil der Ressourcen für Risikoabschätzungen zu verwenden.

### «Bottom-up»- und «Top-down»-Ansatz sowie die Selbstorganisation

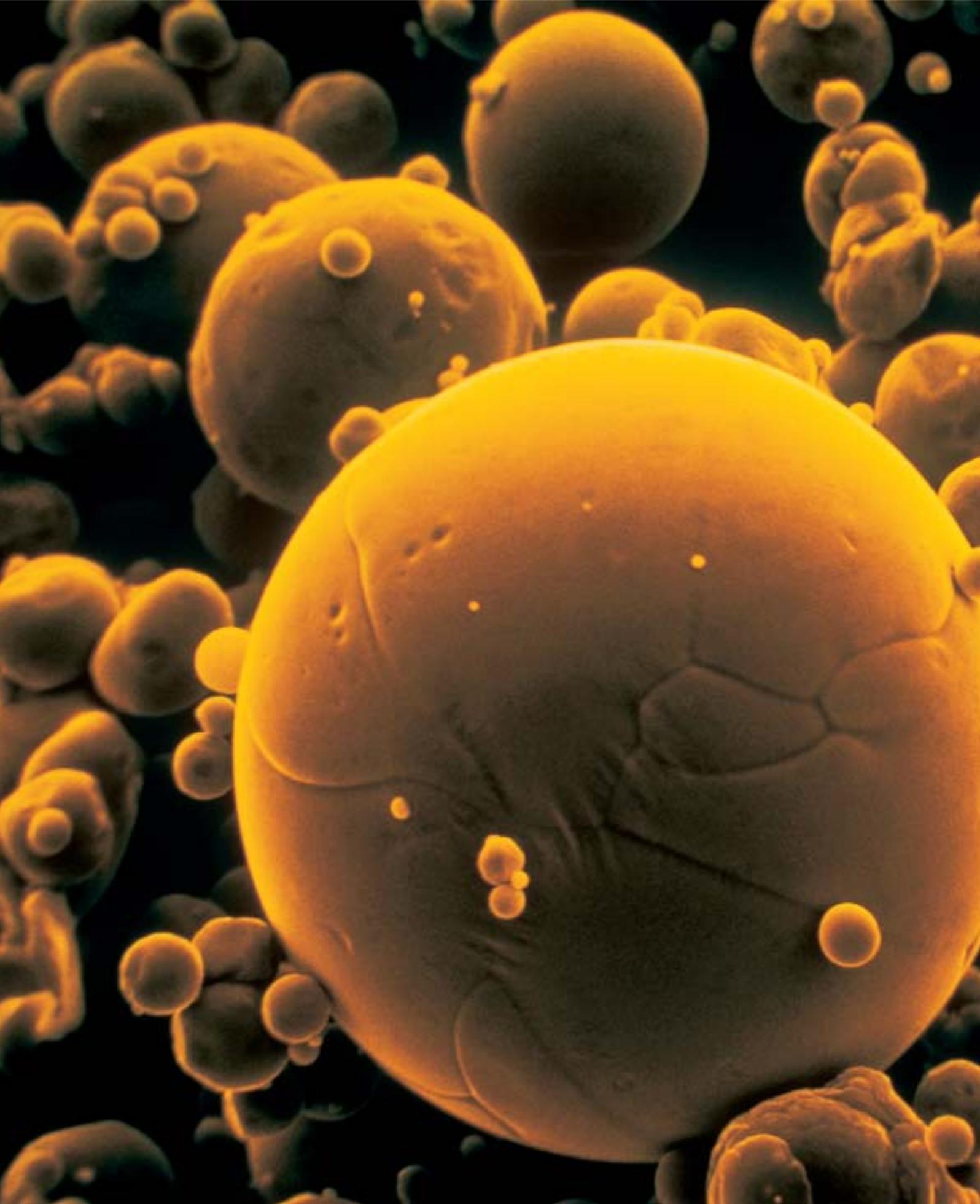
Bei der Nanotechnologie kann man grundsätzlich zwischen dem *Top-down*- (von Gross nach Klein) und dem *Bottom-up* (von Klein nach Gross)-Ansatz unterscheiden.

*Top-down* bezieht sich auf Prozesse, bei denen durch die Verkleinerung eines beliebigen Ausgangsmaterials nanometergrosse Partikel hergestellt werden, die dann entweder gezielt wieder zu grösseren Strukturen zusammengefügt oder anderen Materialien beigemischt werden. Dieser Prozess ist energieaufwändig, produziert viel Abfall und verschwendet daher Ressourcen. Allerdings können die hergestellten Materialien dank verbesserter Eigenschaften von grossem Nutzen sein.

Beim *Bottom-up*-Ansatz baut man Atom für Atom oder Molekül für Molekül zu grösseren Strukturen auf oder lässt diese durch Selbstorganisation und -vermehrung wachsen. Die Selbstorganisation und -vermehrung ist ein Ansatz, der vielen Wissenschaftlern Hoffnung auf völlig neue Wege in der industriellen Herstellung von Materie gibt. In Anlehnung an die biologischen Herstellungswege der Natur möchte man hier einige «Tricks» abschauen und für die Industrie nutzen. So ist eine lebende Zelle die erfolgreichste «Nanofabrik», die man kennt: Aus wenigen Zellen kann ein ganzer Mensch entstehen. In der Zelle ist die gesamte genetische Information enthalten, um sich selbst zu kopieren: Sie kann Rohstoffe verarbeiten, um zu wachsen, nutzt einen Teil davon zur Energiegewinnung und kann sich damit vermehren, selbst reparieren und fortbewegen. Dabei kann sie «Abfallprodukte» umbauen und wieder verwenden und braucht dafür nur sehr wenig Energie. Analog dazu träumen Experten davon, aus Nanopartikeln ganze Gegenstände «wachsen» lassen zu können.

*Selbstorganisation («self assembly»)*  
Eine Methode der Integration, bei der sich die Komponenten spontan in einer bestimmten Art und Weise anordnen, indem sie meist in einer Lösung oder Gasphase umherschwirren, bis eine stabile Struktur auf kleinstem Energieniveau erreicht ist. Die Selbstorganisation ist ein strukturbildender Mechanismus der biomolekularen Nanotechnologie und damit eine viel versprechende Methode für die atomgenaue Herstellung von Bauteilen. Komponenten in selbstorganisierten Strukturen finden ihre jeweilige Position ausschliesslich aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften (bzw. im Falle der atomaren oder molekularen Selbstorganisation aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften). Die Selbstorganisation ist jedoch keineswegs auf Moleküle oder die Nanoskala beschränkt, sondern lässt sich so gut wie in jedem Massstab nutzen und stellt deshalb eine ausgesprochen leistungsfähige *Bottom-up*-Methode für die Nanotechnologie dar.<sup>4</sup>

Titandioxid-Nanopartikel mit glatter Oberfläche werden als Antihafbeschichtung zum Beispiel für Fenster oder Brillengläser verwendet.



## 2 Nanotechnologie – primär eine Grössenbezeichnung

Die Nanotechnologie ist hauptsächlich eine Grössenbezeichnung und weniger der Begriff für eine konkrete wissenschaftliche Disziplin. Unter Nanotechnologie versteht man ganz allgemein die Visualisierung, Charakterisierung, Produktion und Manipulation von Partikeln, die kleiner als 100 nm sind. Dazu zählen neben der Herstellung von so genannten Nanomaterialien auch die Nanomanipulation, bei der mit Hilfe von speziellen Mikroskopen einzelne Nanopartikel gezielt verändert werden, sowie die molekulare Nanotechnologie, die sich primär mit «self assembly» befasst. Die Verwendung von Nanomaterialien ist jedoch die Form, die sich bisher am besten durchsetzen konnte und teilweise schon Marktreife erlangt hat.

### **Nanopartikel**

Ein Nanopartikel ist ein winziges Partikel, das meistens aus einem Element oder einer Verbindung besteht (wie ein Kern mit einer Hülle). Beispiele sind Titan-dioxyd-Partikel in Sonnencremes oder Eisenoxyd-Partikel als Kontrastmittel in bildgebenden Verfahren (zum Beispiel Röntgen). Nanopartikel haben häufig andere Eigenschaften als das Ausgangsmaterial, aus dem sie bestehen. Durch Beimischen von Nanopartikeln können gewisse Effekte wie Materialstärke, Leitfähigkeit, optische Eigenschaften oder Kratzfestigkeit erreicht werden. Allgemein lassen sich spezielle elektrische, magnetische, mechanische oder chemische Verhaltensänderungen erzielen.

### **Nanotube**

Ein hohlzylindrisches Nanopartikel mit nanoskaligem Durchmesser (1–100 nm), das aus reinem Kohlenstoff besteht oder aber noch andere Elemente enthalten kann.

### **Buckyball**

Buckyballs, auch Buckminster Fullerenes genannt, bestehen meist aus genau 60 Kohlenstoffatomen, die strukturell wie die Fünf- und Sechsecke auf einem Fussball aufgebaut sind. Da Buckyballs hohl sind, können sie mit Substanzen wie Kontrastmitteln gefüllt werden. Auch eine Aussenbeschichtung ist möglich, die die natürlichen Eigenschaften der Buckyballs verändert. Technisch gesehen fungieren sie als Halbleiter und sind in organischen Lösungsmitteln löslich.

Unter Nanomaterial versteht man ein beliebiges Material, das entweder einen gewissen Anteil an Nanopartikeln enthält oder ausschliesslich aus diesem besteht. Hier ist es wichtig, zwischen *Nanopartikeln* allgemein und den so genannten *Nanotubes* und *Buckyballs* zu unterscheiden. Nanopartikel sind sehr kleine Partikel, die bei der Zerkleinerung von irgendeinem beliebigem Material wie zum Beispiel Gold, Kohlenstoff oder Silikat entstehen. Sie machen den überwiegenden Anteil der verarbeiteten Nanomaterialien aus. Nanotubes und Buckyballs sind dagegen speziell hergestellte, nicht natürlich vorkommende Partikel mit einer typischen Kristallstruktur. Sie werden unter anderem in der Elektronik verwendet und sind heute noch aufwändig und relativ teuer in der Herstellung.

Die Nanotechnologie umfasst gegenwärtig ein breites Spektrum von Anwendungen und Produkten; verschiedene Definitionen werden verwendet und wenig Einigkeit herrscht über die Nomenklatur. Für diese Publikation wurde eine Definition gewählt, die ausschliesslich Nanopartikel, Beschichtungen oder Materialien umfasst, die kleiner als 100 nm sind und spezifische Eigenschaften aufgrund ihrer Grösse aufweisen. Damit sind Produkte und Anwendungen, die grösser als 100 nm sind, bewusst ausgeschlossen. Solche Materialien werden häufig ebenfalls unter dem Begriff Nanotechnologie aufgeführt, um Aufmerksamkeit zu erregen und Forschungsgelder zu erhalten. Hier gibt es aber leicht Überschneidungen zur schon länger bekannten Mikrotechnologie, die sich mit grösseren Partikeln befasst, die kaum spezifisch neue Eigenschaften aufweisen.

## 2 Nanotechnologie – primär eine Grössenbezeichnung

### 2.1 Kleine Partikel mit grosser Oberfläche

**«Ich würde nicht sagen, dass das Zeug gefährlich ist. (...) Wir wissen nicht, ob es gefährlich ist. Das Problem ist, niemand weiss das.»**  
*Paul Mooney, Executive Director der ETC Group<sup>5</sup>*

Was macht ein Nanopartikel so speziell? Partikel im Nanometerbereich haben zwei besondere Eigenschaften: Zum einen gelten unterhalb einer Grösse von ca. 50 nm nicht mehr die klassischen physischen Verhältnisse, sondern die Gesetze der Quantenphysik. Das führt dazu, dass Nanopartikel andere optische, magnetische oder elektrische Fähigkeiten annehmen können, was sie deutlich von ihren grösseren Partikelverwandten unterscheidet. Zum anderen ändert sich mit abnehmender Grösse das Verhältnis zwischen Masse und Oberfläche. Je kleiner nämlich ein Körper wird, desto grösser wird seine Oberfläche im Verhältnis zur Masse.

Durch ihre ausgesprochen grosse relative Oberfläche können Nanopartikel ausgeprägter auf ihre Umwelt einwirken beziehungsweise mit anderen Stoffen reagieren. Besonders Nanopartikel mit kristalliner Struktur haben mehr Atome auf ihrer Oberfläche, die weniger stark gebunden sind als solche im Inneren des Partikels. Die Atome in einer solchen instabilen Situation werden sich zu verändern versuchen: Sie sind reaktiv. Je kleiner die Partikel, desto grösser die relative Oberfläche; das heisst aber auch, dass sich anteilmässig mehr Atome an der Oberfläche und weniger im Inneren befinden.

Anders gesagt: Je kleiner die Partikel, desto reaktiver die Substanz. Dies kann zum Beispiel für katalytische Zwecke durchaus erwünscht sein. Werden solche Partikel jedoch eingeatmet, so könnte dieser Effekt schädliche Folgen haben. Durch die Verkleinerung und damit steigende Reaktivität können schädliche Wirkungen noch verstärkt und normalerweise harmlose Stoffe als Nanopartikel möglicherweise gefährlich werden. Die Meinungen der Experten zu den potenziellen Risiken von Nanopartikeln gehen weit auseinander. Während manche Wissenschaftler überzeugt sind, dass die Vorteile überwiegen, nehmen andere an, dass Nanopartikel allein durch ihre reduzierte Grösse Lebewesen schaden können – unabhängig davon, woraus sie bestehen oder wie sie hergestellt wurden.

<sup>5</sup> Patriquin, Martin: «Small matter provokes a major debate» in: Toronto Globe and Mail, 19. November 2003.

## 2.2 Natürliche und künstliche Nanopartikel

Sind denn Nanopartikel in unserem Alltag etwas grundsätzlich Neues? Nicht wirklich. In der Natur oder als technische Nebenprodukte kommen Partikel in dieser Grösse seit jeher vor. So befinden sich zum Beispiel in der Meeresluft Salznano-kristalle, und Dieselmotoren stossen Kohlenstoffnanopartikel aus. Auch der Rauch von Zigaretten, brennenden Kerzen und Kaminfeuern enthält Nanopartikel.

Und trotzdem sind diese künstlich hergestellten Nanopartikel mit den natürlichen nur begrenzt vergleichbar. Viele der natürlich vorkommenden Nanopartikel wie zum Beispiel salzartige sind wasserlöslich. Sobald sie eingeatmet werden und mit dem Gewebe in Kontakt kommen, lösen sie sich auf und verlieren ihre Partikel-form. Die Nanopartikel aus Verbrennungsprozessen – in Motoren, Zigaretten oder Kaminen – sind zwar nicht wasserlöslich, dafür aber sehr kurzlebig. Sie weisen eine sehr hohe Tendenz auf, sich zusammenzulagern. Damit bilden sie grössere Partikel und werden von Nano- zu Mikropartikeln mit einer anderen Grösse und anderen Eigenschaften.

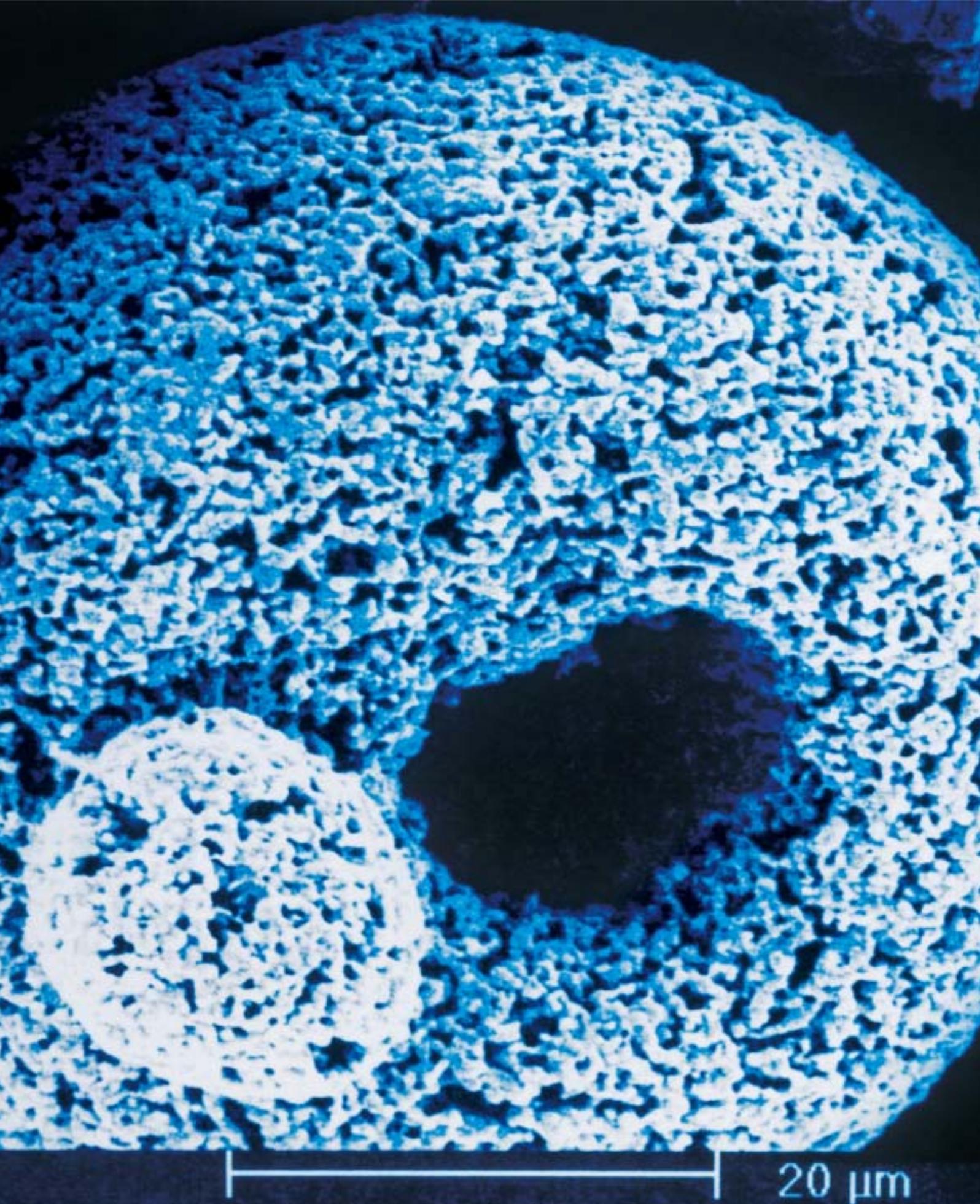
Anders verhalten sich dagegen künstlich, kommerziell hergestellte Nanopartikel, weshalb man diese nicht unbedingt mit den «altbekanntem» Partikeln (zum Beispiel aus Dieselabgasen) vergleichen kann.

Grundsätzlich geht man davon aus, dass Nanopartikel zur Agglomeration und Verklumpung neigen, wodurch sie sich dann in grössere Mikropartikel umwandeln. Diese sind aber weniger reaktiv, weniger mobil und weniger gut verteilt – und für die Hersteller und Käufer von Nanopartikeln somit weniger interessant. Der Grund ist einfach: Grössere Partikel können die für Nanopartikel typischen und erwünschten Eigenschaften und Vorteile verlieren. Um also eine Agglomeration der Nanopartikel zu verhindern, werden handelsübliche Nanopartikel laut Herstellerangaben oft speziell beschichtet. Folglich bleiben die Partikel in vielen handelsüblichen Produkten – wie zum Beispiel Sprays oder Pulvern – reaktiv und hochbeweglich.

**«Bei all ihren Unbekannten, bei all ihren Gefahren und Risiken: Wer würde denn Nein sagen zu Nano?»  
Ed Regis, wissenschaftlicher Autor<sup>6</sup>**

<sup>6</sup> Regis, Ed (1995): *Nano: The emerging science of Nanotechnology: remaking the world – molecule by molecule*. Little, Brown and Company.

Nanopartikel in poröser Kugelform in einer Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop (Massstab 20  $\mu\text{m}$ ).



## 3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?

Der Mensch kommt auf verschiedenen Wegen mit Nanopartikeln in Kontakt: Sie werden mit der Luft eingeatmet oder verschluckt und können möglicherweise über die Haut in den Körper eintreten.

Wie aber verhalten sich Nanopartikel am oder im Organismus? Versicherungstechnische Risikoanalysen beurteilen Produkte umso kritischer, je enger sie mit dem Körper in Kontakt kommen, da ihr Potenzial zur Beeinträchtigung der Gesundheit in der Regel grösser ist. Dabei wird unterschieden, ob der Stoff auf der Haut verweilt oder ob die Substanz Zugang zum Körper erhält und in die Blutbahn gelangt. Speziell gefährdeten Organen wie dem Gehirn wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Warum? Fremdstoffe, die in der Lage sind, in solch sensible Bereiche vorzudringen, werden mit Blick auf die Produkthaftpflicht als besonders exponiert erachtet. Daher ist es bei der Beurteilung der Nanotechnologie wichtig, mögliche Eingangsrouten in den Körper genau zu kennen.

### 3.1 Einatmung von Nanopartikeln

Eine Reihe von Produkten, die sprühhörmig angewendet und somit potenziell eingeatmet werden können, enthalten Nanopartikel. Dazu gehören nicht nur desinfizierende oder geruchsneutralisierende Raumsprays, sondern auch Farben und Lacke sowie Imprägniersprays für Kleidung oder für poröse Materialien wie zum Beispiel Holz oder Ton. Klar ist, dass Nanopartikel nicht nur von fertigen Produkten austreten, sondern bereits bei deren Herstellung entstehen. Besonders bei Sprühverfahren, die für Beschichtungen eingesetzt werden, können grössere Mengen an Partikelstaub freigesetzt werden.

#### *Ablagerung: tiefer und intensiver*

Man geht davon aus, dass Nanopartikel in den Atemwegen Schäden anrichten können, die sich von Mustern unterscheiden, die durch grössere Partikel hervorgerufen werden. Die Art der Schädigung beruht vermutlich auf Verhaltensweisen, die für alle Nanopartikel universell gelten – unabhängig von deren Zusammensetzung oder Form.

Wie tief Partikel tatsächlich in die Lunge eindringen können, hängt von ihrer Grösse ab: Die Lunge ist ein relativ gut geschütztes Organ. Eingeatmete Partikel passieren zuerst die Luftröhre und landen dann in den Lungenröhren und -röhrchen, die mit einer dichten Schleimschicht ausgekleidet sind. Hier werden die zuerst eindringenden – vor allem grösseren – Partikel abgefangen und dann durch die sich kontinuierlich nach oben bewegende Schleimschicht abtransportiert: Sie werden zum grössten Teil wieder ausgeatmet.

Partikel, die tiefer eindringen, gelangen bis in die Lungenbläschen, die sich am Ende der verzweigten Lungenröhrchen befinden und einen anderen Schutzschild bieten: die so genannten Makrophagen oder «Fresszellen». Diese spezialisierten Zellen nehmen fremde Stoffe auf und eliminieren sie. Nanopartikel werden von diesen Fresszellen aufgenommen. Ein grösserer Teil kann sich im Lungengewebe anlagern, ohne wieder ausgeatmet zu werden. In den Lungenbläschen findet der Sauerstoffaustausch mit dem Blut statt. Möglich wäre hier der Eintritt von Nanopartikeln in die Blutbahn.

### 3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?

#### *Kleinere Form = Grösserer Schaden?*

Werden gleiche Mengen von Nanopartikeln oder grösseren Partikeln der gleichen Substanz eingeatmet, so verursachen die kleineren Partikel eine um ein Vielfaches stärkere Reaktion im betroffenen Lungengewebe.

Je nach Grundmaterial des Partikels wurden unterschiedlich starke Veränderungen nachgewiesen: Erstaunlicherweise können sogar Substanzen, die an und für sich als völlig harmlos gelten – wie zum Beispiel Partikel aus Latex – durchaus schädlich wirken. Einige wissenschaftliche Studien deuten jedoch darauf hin, dass für alle Substanzen gleichermaßen gilt: je kleiner, desto schädlicher.

#### *Kleiner = Reaktiver*

Zwei Wirkungsmechanismen könnten für dieses Verhalten verantwortlich sein: Einerseits die Oberflächenreaktivität der Nanopartikel, die je nach Partikelbeschichtung das umliegende Gewebe durch chemische Aktivität schädigen kann. Andererseits die Überforderung der betroffenen Fresszellen, die für die Eliminierung der Partikel zuständig sind. Überschreitet die Anzahl der eintretenden Partikel ein gewisses Mass, so werden die «Aufräumer» überlastet: Ein «Overload» tritt ein. Diese Überlastung führt zu Stressreaktionen, die eine Entzündung im umliegenden Gewebe bewirken. Schlimmer noch: Die Fresszellen ziehen sich in tiefer liegendes Gewebe zurück und stehen somit im Aktionsfeld nicht mehr zur Verfügung. Weiter anfallende Partikel werden nicht mehr entfernt und können ihre reaktive Wirkung voll entfalten. Auch andere, zusätzlich eintretende Erreger wie Bakterien werden nicht mehr effektiv angegriffen. Während einer Erkältung wäre der Organismus also zusätzlich geschwächt, weil potenzielle Erreger nur zögernd inaktiviert werden. «Overload»-Erscheinungen treten auch bei äusserst harmlosen Substanzen auf, vorausgesetzt, sie sind körperfremd und nicht wasserlöslich. Grössere Partikel können die Fresszellen ebenfalls überfordern. Allerdings weist einiges darauf hin, dass die Belastung dieser Zellen abhängig ist von der Gesamtoberfläche der Partikel beziehungsweise der Gesamtpartikelzahl. Da Nanopartikel eine viel grössere Gesamtoberfläche (und Gesamtpartikelzahl) aufweisen, könnte ihre schädigende Wirkung stärker sein.

#### *Freie Radikale*

Die Oberflächenreaktivität der Nanopartikel kann je nach Art der Beschichtung das umliegende Gewebe chemisch schädigen. Sie basiert auf der Bildung von so genannten freien Radikalen, also Atomen, die eine «unbefriedigende» Anzahl Elektronen besitzen. Sie sind mit Elektronen über- oder unterdotiert und somit quasi in erregtem Zustand. Radikale sind also hoch reaktiv, weil sie benachbarten Atomen Elektronen entreissen oder aufdrängen können. Damit wird die eigene Struktur zwar optimiert, verwandelt aber gleichzeitig ein anderes Atom in ein Radikal und löst damit eine Kettenreaktion aus. Sind solche Radikale zudem noch frei beweglich, können sie im gesamten Körper und in allen Teilen der Zelle wirken. Gewisse Strukturen, wie zum Beispiel die Zellwände oder auch die Erbsubstanz, können durch solche freien Radikale nachweislich geschädigt werden.

In biologischen Prozessen sind freie Radikale nichts Ungewöhnliches. Sie kommen in völlig normalen, gesunden Zellen dauernd vor. Allerdings laufen diese Prozesse kontrolliert und nur in lokal begrenzten Bereichen ab. Anders verhält es sich mit den schädigenden Radikalen, die durch Umwelteinflüsse gefördert werden. Extensives Sonnenbaden verursacht zum Beispiel einen ähnlichen Effekt: Durch die Sonnenstrahlung werden Zellen im Körper «gestresst» und angeregt, was zur Abgabe von freien Radikalen führt, die das Gewebe schädigen und – schlimmstenfalls – sogar zur Bildung von Tumoren beitragen können.

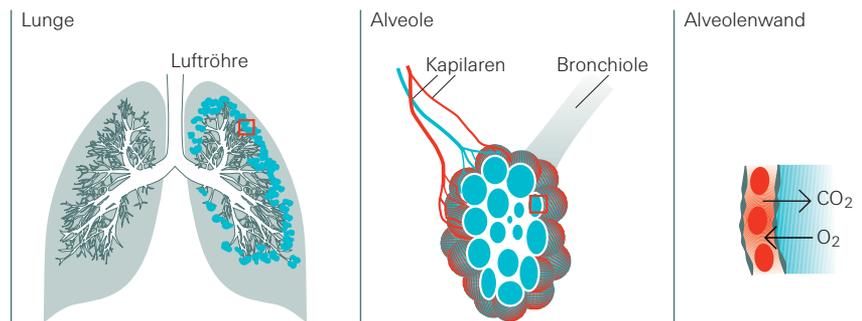
Diese schädigende Wirkung der freien Radikale hat grundsätzlich eine sinnvolle Funktion im Körper: Abwehrzellen können nämlich mit deren Hilfe unliebsame Eindringlinge wie zum Beispiel Bakterien zerstören. Die Wirkung der freien Radikale wird immer noch kontrovers diskutiert. Wie viel Bedeutung der Schädigung durch Radikale tatsächlich beigemessen werden muss, hängt vermutlich auch davon ab, wie häufig und in welchem Ausmass solche Reaktionen im Körper stattfinden. Die wichtige Frage des Grenzwertes wird die Wissenschaft vermutlich noch vor eine grössere Herausforderung stellen. Ob also tatsächlich von einer nachhaltigen Schädigung des Gewebes gesprochen werden kann, wird sich erweisen müssen.

#### *Von der Lunge in die Blutbahn*

Es ist mehrfach im Labor nachgewiesen worden, dass gewisse inhalede Nanopartikel auch in die Blutbahn gelangen können. Zwar sind die Mengenanteile nicht sehr hoch, dennoch ist es ein neues Phänomen, dass körperfremde, unlösliche Partikel aus der Lunge ins Blut aufgenommen werden (siehe Grafik Alveolen). Gegenwärtig ist noch nicht endgültig geklärt, wie die Partikel in die Blutbahn gelangen. Bekannt ist jedoch, dass ein Teil der Nanopartikel beim Einatmen ohne Umwege sogar direkt ins Gehirn transportiert wird. Der Weg führt über die Nasenschleimhaut: Setzen sich Partikel auf den Riechfasern in der Nasenschleimhaut ab, können sie möglicherweise über Nervenzellen von der Nase direkt ins Riechzentrum des Gehirns gelangen. Und tatsächlich: Ein solcher Transport ist schon aufgezeichnet worden; unbekannt bleibt bisher, ob die Partikel im Gehirn weiter wandern und wie sie sich dort verhalten.

#### **Alveolen**

Alveolen sind dünnwandige Luftsäckchen in der Lunge, die von den Bronchien aus mit sauerstoffreicher Luft versorgt werden und von aussen mit feinen Blutgefässen umgeben sind. Dieses Gefässnetz kann aus der Alveole Sauerstoff aufnehmen und von dort aus in den gesamten Körper transportieren. Die Innenseite der Alveolen sind mit Fresszellen (Makrophagen) ausgekleidet, die eingeatmete Partikel oder Bakterien aufnehmen können und zu deren Eliminierung beitragen.



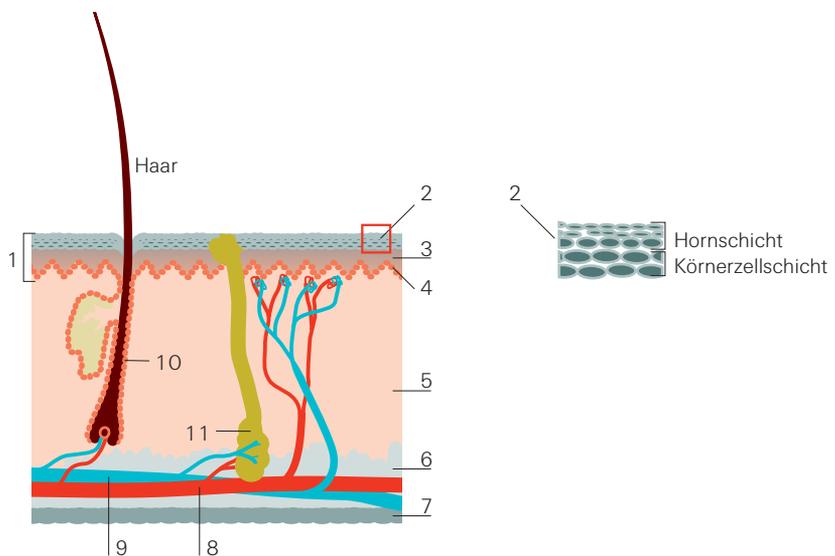
### 3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?

#### 3.2 Partikelaufnahme durch die Haut

Können Nanopartikel durch die Haut gelangen und im Blut aufgenommen werden? Diese Frage ist bislang noch nicht zweifelsfrei geklärt. Die Antwort darauf sollte aber in absehbarer Zeit gefunden werden, enthalten doch viele der bereits kommerzialisierten Kosmetika, Sonnencremes und sogar Babyprodukte einen teilweise beträchtlichen Anteil an Nanopartikeln. Eine Reihe von Produkten nutzt Nanopartikel als Trägersubstanz für Geruchs-, Feuchtigkeits- oder Farbstoffe, die zum Beispiel in Kosmetikartikeln, Haarshampoos, Deodorants oder in Weichmachern in Waschmitteln zur Anwendung kommen.

##### Aufnahme durch die Haut

Die oberste Schicht der Haut besteht aus verhornten, nicht durchbluteten Zellen, der Hornhaut. Diese Zellen stellen keine durchgehende Barriere dar: Sie sind vielmehr geschichtet und gestapelt, wodurch sich Zwischenräume bilden, die etwa 50 nm groß sind. Eingebettet in tiefere, gut durchblutete Hautschichten sind die Haarwurzeln. Die feinen Haare gelangen in einem Kanal an die Oberfläche der Haut und verbinden damit die verhornte Oberfläche mit den tiefen Hautschichten. Denkbare Routen für die Aufnahme von Nanopartikeln über die Haut sind demnach einerseits die Passage durch die Hornhaut in tiefere Hautschichten, andererseits aber auch der Weg direkt über die Haarwurzel in die Blutbahn.



- |                        |                       |                 |
|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1 Epidermis            | 5 Dermis              | 9 Venole        |
| 2 Plattenepithelzellen | 6 Unterhautfettgewebe | 10 Haarfollikel |
| 3 Stachelzellschicht   | 7 Faserbindegewebe    | 11 Schweißdrüse |
| 4 Basalzellschicht     | 8 Arteriole           |                 |

Bisher durchgeführte Studien beantworten nicht eindeutig, ob Nanopartikel tatsächlich über die Haut aufgenommen werden können. Einerseits gibt es klare Hinweise, dass zuvor markierte Nanopartikel im Blut nachgewiesen werden. Andererseits gehen manche Wissenschaftler davon aus, dass die kleinsten Partikel nicht einmal bis zur unteren Ebene der obersten Hornschicht gelangen können. Warum unterscheiden sich die bisherigen Forschungsergebnisse so sehr? Der Grund für die divergierenden Aussagen liegt vermutlich in verschiedenen Untersuchungsmethoden. Einige Studien untersuchen zum Beispiel nicht die Haut an lebenden Organismen, sondern verwenden abgetrennte Hautstücke, die dann nicht mehr durchblutet werden und demnach auch nur begrenzt aussagefähig sind. Gewisse Präparationstechniken sind ebenfalls kritisch, weil sie unter Umständen kleinste Partikel auswaschen, bevor diese registriert werden können.

### **Hypoallergen**

Unfähig, Allergien hervorzurufen.

Fest steht, dass zurzeit niemand weiss, wie oder wie viele Partikel potenziell aufgenommen werden können. Wenn man bedenkt, dass verschiedenste Produkte bereits auf dem Markt sind, drängt die Zeit nach einer Klärung der Situation. Sonnen- und Pflegecremes für Babys und Kleinkinder, die nanotechnologisch hergestelltes Titandioxid enthalten, sind nur ein Beispiel. Titandioxid absorbiert UV-Strahlung und schützt damit vor der Sonneneinstrahlung. Als Nanopartikel ist es ausserdem *hypoallergen* und eignet sich damit besonders für empfindliche Haut. Titandioxyd wurde schon früher Sonnencremes beigefügt, allerdings in grösserer Partikelform, weshalb es eher auf der Hautoberfläche blieb. In der neuen Form könnte möglicherweise ein Teil des Titandioxids in den Körper gelangen.

Sollte sich erweisen, dass Nanopartikel die Haut durchdringen können, ist bei der Anwendung entsprechender Produkte bei Kleinkindern besondere Vorsicht geboten, da diese im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht eine besonders grosse Hautoberfläche haben.

Dass Sonnencremes zunehmend Titandioxyd in Form von Nanopartikeln zugefügt wird, ist aus kosmetischer Sicht ein Vorteil für den Kunden: Partikel in dieser Grösse sind nämlich transparent – die Sonnencreme muss somit nicht mehr als weisse Masse auf die Haut aufgetragen werden. Ausserdem wird davon ausgegangen, dass, bedingt durch die grosse Anzahl der kleinen Partikel, ein besserer Sonnenschutz erreicht wird.

### **3.3 Partikelaufnahme über den Magen-Darm-Trakt**

Die meisten Stoffe, die aufgenommen und geschluckt werden, gelangen früher oder später in den Darm. Was passiert mit Nanopartikeln, die wir über die Nahrung aufnehmen? Verbleiben sie im Darm oder gelangen sie auch ins Blutssystem?

Der Darm erfüllt grundsätzlich zwei Aufgaben: Er nimmt Nährstoffe auf und schützt den Körper vor unerwünschten Stoffen. Die «erwünschten» Stoffe gelangen auf spezifischen Transportwegen in die Darmzellen, während Fremdstoffe in der Regel im Darm verbleiben und dann ausgeschieden werden. Medikamente und Vitamine werden ebenfalls über diese Transportmechanismen aufgenommen.

### 3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?

Für Nanopartikel gilt das jedoch nicht unbedingt. Sie werden auch über einen anderen Weg – die so genannten «Peyerschen Platten» – aufgenommen. Diese Platten sind kleinere Flecken im Darmgewebe, die eigentlich zum Immunsystem und damit zur Abwehr gehören. Sie sind in der Lage, grössere Moleküle in «Bläschen» aufzunehmen und quer durch die Zelle zu transportieren. Tritt der Inhalt auf der anderen Seite wieder aus, gelangt er ins Lymphsystem. Von hier aus können Nanopartikel auch ins Blutsystem übertreten und sich im Körper verteilen. Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Partikel, desto mehr werden aufgenommen und desto weiter kommen sie. Partikel unter etwa 300 nm können bis in die Blutbahn gelangen; Partikel, die kleiner als 100 nm sind, werden darüber hinaus von verschiedenen Geweben und Organen aufgenommen.

Mögliche Quellen für Nanopartikel im Verdauungstrakt sind nicht nur das Trinkwasser und Nahrungsmittelzusätze, sondern auch Stäube, die sich aus der Atmosphäre auf Lebensmitteln absetzen, oder Zahnpastaspuren, die beim Zähneputzen geschluckt werden. Im Bereich der Zahnmedizin setzen sich immer mehr nanotechnologisch hergestellte Füllungen und Implantate durch, mit denen bessere Materialeigenschaften erreicht werden sollen. Durch Abrieb oder andere Prozesse könnte jedoch ein Teil der verarbeiteten Materialien in den Magen-Darm-Trakt gelangen.

Gelangen Nanopartikel nun über die beschriebenen Wege in den Verdauungsapparat und von dort in die Blutbahn, können sie sich wiederum im gesamten Körper bewegen und Aktivitäten entwickeln, die sich für den Organismus möglicherweise als problematisch erweisen.

«Der grundlegende Wandel in der Arzneimittelherstellung und -verabreichung wird in den nächsten zehn Jahren etwa die Hälfte des weltweiten Arzneimittelproduktionsvolumens von 380 Milliarden US-Dollar betreffen.»  
*La Van und Langer, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*<sup>7</sup>

#### 3.4 Nanopartikel im Körper

Nanopartikel können – wie gezeigt – indirekt über die Lunge oder den Verdauungstrakt in die Blutbahn gelangen oder in Form von Medikamenten direkt dorthin injiziert werden. Da durch die Nanotechnologie unerwartete Möglichkeiten entstehen, sind neuere Entwicklungen in der pharmazeutischen Industrie sehr viel versprechend: So werden nicht nur die Löslichkeit und Aufnahme eines Medikaments verbessert, sondern es können auch neue «Multifunktionswirkstoffe» kreiert werden. Heute ist man beispielsweise in der Lage, mehrere Wirksubstanzen am Träger anzubringen und zusätzlich noch einen Antikörper als «Schlepper» anzuhängen, der hilft, genau das gewünschte Gebiet im Körper zu finden, wo sich die Wirkung des Medikaments entfalten soll. Oder man koppelt noch ein Partikel an, das für bildgebende Verfahren genutzt werden kann. Eine entsprechende Beschichtung des Nanopartikels verlängert dessen Verweildauer in der Blutbahn, so dass die Substanz länger einwirken kann.

<sup>7</sup> LaVan, D.A., Langer, R.: «Implications of Nanotechnology in the Pharmaceuticals and Medical fields» in: Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (Hg.): *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Arlington, USA: National Science Foundation. 2001. S. 77–83.

«(...) Waren und Dienstleistungen auf der Basis der Nanotechnologie dürften zuerst in solchen Märkten eingeführt werden, in denen Leistungsmerkmale besonders wichtig sind und der Preis eine untergeordnete Rolle spielt.»  
*Roco und Bainbridge, US National Science Foundation (NSF)<sup>8</sup>*

### Stärken einzelner Länder

Anzahl der Befragten, die das jeweilige Land als den Standort mit den anspruchsvollsten nanotechnologischen Entwicklungen in einer bestimmten Branche nannten.  
 (Basierend auf einer Umfrage von 3i mit weltweit führenden Wissenschaftlern, Investoren und Führungskräften aus Wirtschaft und Industrie.)

Experten nehmen an, dass nanotechnologisch hergestellte Medizinprodukte und Pharmazeutika zu den ersten «Nanoprodukten» gehören werden, die sich im Markt durchsetzen. Der medizinische Markt bietet ein riesiges Wachstumspotenzial, handelt es sich dabei doch um eine Branche, bei der Qualität und Wirksamkeit eines Produkts an erster Stelle stehen. Höhere Preise werden in Kauf genommen, solange ein Heilmittel dem Patienten einen Vorteil verspricht. Als führend in der Entwicklung von pharmakologischen Substanzen und innovativen Heilmitteln im nanotechnologischen Sektor gelten die USA und an zweiter Stelle Europa. Die frühen Nanotechnologieprodukte werden sich also besonders im pharmakologischen Sektor Nordamerikas bemerkbar machen – sicher eine Herausforderung für die Assekuranz, treffen doch hier potenziell exponierte Produkte mit einem äusserst sensiblen Rechtssystem zusammen.

	Medizin/ Pharma	Materialien	Chemikalien	Elektronik	Manufaktur
Rang 1	US, Westen (28)	US, Westen (28)	Deutschland (25)	Japan (34)	US, Westen (26)
Rang 2	US, Osten (26)	US, Osten (27)	US, Westen (19)	US, Westen (33)	US, Osten (26)
Rang 3	UK (23)	Japan (25)	US, Osten (16)	US, Osten (20)	Japan (21)
Rang 4	Deutschland (19)	Deutschland (21)	UK (11)	Korea (17)	Deutschland (15)
Rang 5	Schweiz (9)	UK (15)	Japan (10)	Taiwan/ Deutschland (9)	Korea/ Taiwan (7)

Quelle: 3i (Hg.): *Nanotechnology – size matters. Building a successful nanotechnology company. White Paper, 10. Juli 2002.*

### Bildgebende Verfahren

Der Begriff «Bildgebung» oder «bildgebende Verfahren» ist im Zusammenhang mit der medizinischen Diagnostik geprägt worden. Zusammengefasst versteht man darunter Verfahren, die es erlauben, anatomische Strukturen des menschlichen (auch tierischen) Körpers möglichst präzise zu visualisieren (Röntgen, Computertomografie, Angiogramm, Kernspintomografie, Magnetic resonance imaging (MRI) etc.)

Die meisten pharmazeutischen Nanoprodukte befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Einige durchlaufen bereits letzte Tests und sind nicht mehr weit von der Markteinführung entfernt. Das Innovationspotenzial ist enorm. Nanotechnologie birgt Chancen für Therapien bislang noch unheilbarer Erkrankungen. Besondere Hoffnungen setzt man auf neue Diagnostikmöglichkeiten, innovative Krebstherapien und die Behandlung von Infektions- und Gehirnerkrankungen. Neue Verabreichungsformen von Medikamenten, die im Körper besser wirken und weniger Nebenwirkungen auslösen, werden ebenfalls untersucht und haben in einzelnen Studien bereits erfolgreiche Resultate erzielt. Verschiedene Produkte, die für *bildgebende Verfahren* verwendet werden, sind bereits erhältlich. Auch im Bereich der Zahn- und Knochenimplantate sowie der desinfizierenden Wundpflaster und -verbände konnten sich nanotechnologisch veränderte Produkte bereits durchsetzen.

### Aufnahme im Körper

Was passiert nun mit Nanopartikeln, die entweder unbewusst aus der Umwelt oder bewusst als Heilmittel in den Körper gelangen? Normalerweise werden körperfremde Partikel oder Fremdstoffe, die in die Blutbahn gelangt sind, von spezialisierten Fresszellen aufgenommen, die für die Entfernung solcher «Fremdkörper» zuständig sind. Erstaunlicherweise gilt das aber nicht unbedingt für Nanopartikel. Alles, was kleiner ist als etwa 200 nm, wird nicht mehr nur spezifisch von diesen Fresszellen aufgenommen, sondern scheinbar grundlos auch von ganz anderen Zellen, die dafür eigentlich gar nicht «konstruiert» sind. So kommt es, dass man Nanopartikel plötzlich auch in Blutzellen wieder findet. Nicht nur für Blutzellen konnte dies gezeigt werden, sondern auch für eine Reihe von anderen Zelltypen. Einmal von der Zelle aufgenommen, können sich Nanopartikel auf diese Art und Weise im Blut praktisch grenzenlos durch den gesamten Körper bewegen.

<sup>8</sup> Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (Hg.): *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Arlington, USA. National Science Foundation. 2001.

### 3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?

#### *Körperverteilung und Ausscheidung*

Über die Blutbahn können sich Nanopartikel weit verbreiten und so auch in die verschiedenen Organe wie Herz, Knochenmark, Eierstöcke oder Muskeln gelangen. Wiederholt konnten Nanopartikel sogar im Gehirn, dem am besten geschützten Organ, nachgewiesen werden. In Anbetracht der Tatsache, dass Nanopartikel demnach kaum durch Gewebeschranken aufgehalten werden, dürfte auch der Zugang zu einem ungeborenen Lebewesen über die Plazentaschranke möglich sein.

Die Frage ist nun: Verbleiben die Nanopartikel auf Dauer im Körper? Wenn nicht, können sie trotzdem Schaden anrichten? Üblicherweise werden die Partikel mit der Zeit aus den meisten Organen ausgeschieden. Genau wie jeder andere Fremdstoff auch, werden Nanopartikel nämlich mit einer Proteinschicht bedeckt und somit als Fremdstoff markiert. Auf diese Weise werden sie von den spezialisierten Fresszellen erkannt, aufgenommen und aus dem Körper entfernt.

Nicht immer jedoch gelingt es, ein Partikel so zu markieren, dass es als Fremdstoff deklariert wird. Je nach Typ der Partikelbeschichtung werden gewisse Nanopartikel anscheinend nicht erkannt und darum nicht markiert; die Partikel verbleiben dann länger im Umlauf und können sich noch besser im Körper verteilen. Nach einigen Tagen bis Wochen befindet sich der grösste Anteil dieser Partikel in den Organen, in denen besonders viele Fresszellen angesiedelt sind, nämlich in Leber, Milz, Knochenmark und in den Lymphknoten. Die genaue Verteilung der Nanopartikel auf diese Organe hängt unter anderem von ihrer individuellen Beschichtung und damit von ihrer «Oberflächenchemie» ab. Was mit den Nanopartikeln geschieht, kommt auf die Materialbeschaffenheit des jeweiligen Partikels an. Biologisch abbaubare Stoffe werden zersetzt, die Zersetzungsprodukte dann über Darm und Niere ausgeschieden. Als Trägerstoffe für Medikamente sind beinahe ausschliesslich biologisch abbaubare Materialien untersucht worden.

Das Verhalten von nichtbiologisch abbaubaren Nanopartikeln ist weit weniger gut untersucht; es scheint aber möglich, dass sie sich in gewissen Organen, besonders in der Leber, dem Entgiftungsorgan des Körpers, ablagern und dort akkumulieren. Wie lange solch eingelagerte Nanopartikel dort bleiben, ob sie Schaden anrichten können und, wenn ja, welche Dosis schädigend wirkt, ist noch nicht eingehend untersucht worden. Von anderen Erkrankungen der Leber gibt es jedoch Hinweise, dass auch völlig harmlose Stoffe durch Akkumulation die Funktion der Leber beeinträchtigen und schädigen können.

#### *Nanopartikel im Gehirn*

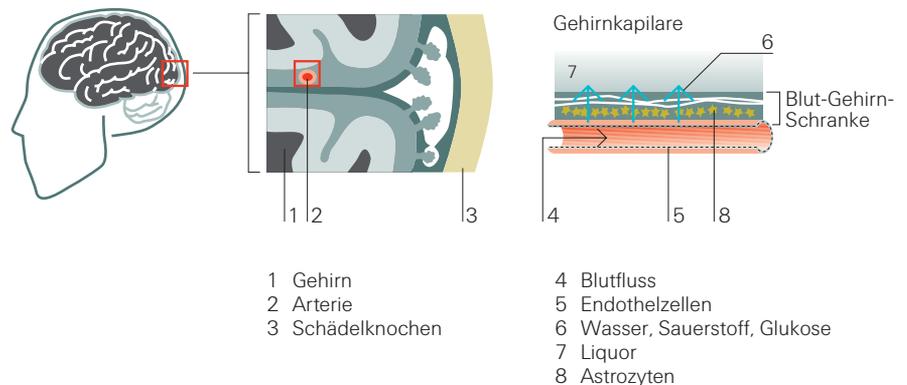
Das Gehirn ist das am besten abgeschirmte Organ im menschlichen Körper – und das aus gutem Grund. Die äusserst empfindlichen Nervenzellen sind auf ein genau abgestimmtes Milieu angewiesen, um ihre Funktionsfähigkeit zu erhalten. Daher gibt es eine besonders strenge «Eingangskontrolle», die fremde Stoffe so gut wie nicht in das Gehirn passieren lässt. Selbst die Blutgefässe, die sonst den ganzen Körper versorgen, haben keinen direkten Zugang zum Hirngewebe: Sie berühren nur die Aussenseite. Man spricht von der so genannten «Blut-Hirn-Schranke» (siehe Grafik auf Seite 23). Während in den meisten Gewebearten die transportierten Stoffe aus den Blutgefässen austreten können, sind die Gefässe im Gehirn gut versiegelt. Der einzige Weg, hier einzutreten, ist durch eine so genannte aktive Aufnahme. Die Blutgefässe sind mit speziellen Zellen ausgekleidet, die Nährstoffe und andere Substanzen erkennen, aktiv in sich aufnehmen und auf der anderen Seite in das Hirngewebe wieder abgeben können.

**«Ein Freund von mir (Albert R. Hibbs) schlägt eine sehr interessante Möglichkeit für relativ kleine Maschinen vor. Obwohl es nach einer ziemlich verrückten Idee klingt, wäre es seiner Meinung nach für die Chirurgie interessant, wenn man den Chirurgen sozusagen schlucken könnte. Man setzt den mechanischen Chirurgen in ein Blutgefäss, über das er in das Herz gelangt und sich dort umsieht. (Natürlich müssen die Informationen nach aussen übermittelt werden.) Er stellt fest, welche Herzklappe defekt ist, nimmt ein kleines Messer und schneidet sie heraus. Andere kleine Maschinen könnten dauerhaft in den Körper eingebracht werden, um ein schlecht funktionierendes Organ zu unterstützen.»**  
*Richard P. Feynman,*  
*Nobelpreisträger für Physik 1965<sup>9</sup>*

<sup>9</sup> Feynman, Richard P. (1959): *There's plenty of room at the bottom. An invitation to enter a new field of physics.*

### Blut-Hirn-Schranke

Die Funktion der Gehirnzellen hängt von einem konstanten Milieu im Gehirn ab. Damit nicht beliebige Stoffe in das Gehirn gelangen können, sind die das Gehirn versorgenden Gefäße mit einer dichten Zellschicht aus Endothelzellen ausgekleidet. Von aussen ist dieses Gefäßnetz zusätzlich mit einer Lage von Astrozyten umgeben, die nur eine kontrollierte Passage von Stoffen aus dem Blut in das Gehirn erlauben.



Dieser Transportweg ist äusserst selektiv. Das ist auch der Grund, weshalb so viele Medikamente, die im Gehirn wirken sollten, gar nicht erst dort ankommen. Mehr als 98% der möglichen Heilmittel scheitern an dieser Barriere. Um auch nur die kleinste Wirkung zu erzielen, muss die Dosis unter Umständen so hoch gewählt werden, dass beträchtliche Nebenwirkungen auftreten können. Ausnahmen gibt es wenige: Lediglich einige fettlösliche Substanzen, wie beispielsweise Alkohol oder Koffein, werden einfach durchgelassen. Um schwer gehirngängige Substanzen zum Zielort zu bringen, benutzt man bei der Entwicklung von Medikamenten einen Trick: Man koppelt den Wirkstoff an einen Träger, der einen natürlichen Zugang zum Gehirn hat, und schleust ihn so an der Schranke vorbei.

Aus diesem Grunde setzt die pharmazeutische Industrie grösste Hoffnungen in die Nanotechnologie. Versuche haben nämlich gezeigt: Benutzt man einen Nanopartikel als Träger und heftet ein Medikament an, so nimmt dessen Konzentration im Gehirn deutlich zu. Offensichtlich erreichen Nanopartikel, was die einzelnen Medikamente nicht können: sich Zutritt zum Gehirn zu verschaffen. Forscher haben herausgefunden, dass abhängig von der Beschichtung des Nanopartikels die Medikamentenaufnahme noch weiter erhöht werden kann.

Wie genau die Nanopartikel in das Gehirn gelangen, ist noch umstritten. Machen sie die Barriere durchlässig und schleusen sich zwischen den Zellen ein, oder «erschleichen» sie sich die Aufnahme zu den Zellen?

Mit der Nanotechnologie ergeben sich also völlig neue Wege für die Herstellung und Anwendung von Medikamenten. Damit liesse sich zum Beispiel die Medikamentendosis reduzieren, um den Körper bei der Behandlung von Krankheiten weniger zu belasten. Vielleicht wird man in Zukunft auf diesem Weg sogar normalerweise nicht gehirngängige Stoffe an ihren Zielort bringen und somit möglicherweise Krankheiten therapieren, die bislang als unheilbar galten – Hoffnungsschimmer für viele terminal erkrankte Patienten einerseits und ökonomische Wachstumsmöglichkeiten für die pharmazeutische Industrie andererseits.

### 3 Die Reise durch den menschlichen Körper: Führen alle Wege ins Blut?

Leider ist zu vermuten, dass sich durch solche Produkte auch neue Risiken ergeben, die bisher noch nicht als solche erkannt wurden. Was passiert, wenn gewisse Partikel in das Gehirn gelangen, die gar nicht dorthin geschickt wurden? Wenn Nanopartikel, die zum Beispiel zur Behandlung eines Tumors in die Blutbahn injiziert wurden, ebenfalls in das Gehirn eintreten? Je nach Beschaffenheit des Partikels könnte dieser kürzer oder länger im Blut kreisen und sich schliesslich auch im Gehirn ablagern. Da aber noch nicht genau bekannt ist, wann und wie viele dieser Partikel wieder abgebaut und ausgeschieden werden, besteht potenziell die Möglichkeit, dass sie sich im Gehirn anreichern. Damit würde sich das streng behütete Milieu im Gehirn jedoch nachhaltig verändern. Neurodegenerative Erkrankungen wie die Alzheimer Krankheit oder Parkinson sollen einer Hypothese nach ursächlich durch eine Störung in der Eisenkonzentration im Gehirnmilieu entstehen. Eisenoxid-Nanopartikel werden aber heute schon für eine Reihe von Applikationen eingesetzt. So zum Beispiel als neuartiges Kontrastmittel in der Magnetresonanz. Das Problem ist, dass viele solcher unerwarteter Nebenwirkungen erst mit grosser Verzögerung bekannt werden. Mehrere Jahre können vergehen, bevor völlig unerwartete Risiken auftreten und erst im Nachhinein verständlich werden.

#### 3.5 Interaktion mit biologischen Prozessen

##### Enzyme

Biokatalysatoren; Makromoleküle, meist Proteine, die chemischen Reaktionen in biologischen Systemen katalysieren. Ein Enzym ist ein biochemischer Katalysator, der hilft, ein Substrat zu spalten oder anderweitig zu verändern. Das Enzym erleichtert die dafür nötige Reaktion, indem es die Aktivierungsenergie herabsetzt, die stets überwunden werden muss, damit es überhaupt zu einer Stoffumsetzung kommt. Das Enzym nimmt an der biochemischen Reaktion teil, geht mit den umzusetzenden Stoffen sogar eine vorübergehende Verbindung (den Enzym-Substrat-Komplex) ein, wird aber durch die Reaktion nicht verändert.

Enzyme sind ihrer chemischen Natur nach Eiweisse = Proteine. Für die katalytische Wirksamkeit ist das so genannte aktive Zentrum verantwortlich, das aus besonders gefalteten Teilen der Polypeptidkette oder reaktiven Nicht-Eiweiss-Anteilen des Enzymmoleküls besteht. Eine spezielle Hohlstruktur im Enzym bewirkt, dass das aktive Zentrum mit einem passenden Substrat in Kontakt treten kann.<sup>10</sup>

Im Körper laufen permanent unzählige Regel- und Steuerungsprozesse ab, welche äusserst sensibel aufeinander abgestimmt sind. Mit Hilfe von kleinen aktiven Eiweissen, den so genannten *Enzymen*, sorgen sie unter anderem für unsere konstante Körpertemperatur, regeln das Hunger- und Schlafgefühl, versorgen den Körper mit allen lebenswichtigen Stoffen und helfen bei der Infektionsabwehr. Eine Beeinträchtigung dieser Vorgänge kann eine ganze Kaskade von Reaktionen auslösen, die die normalen Körperfunktionen unterbricht und schlimmstenfalls irreversibel stört.

Da sich Nanopartikel vielfältigen Zutritt zum Körper verschaffen können, stellt sich die Frage, ob sie vielleicht auch auf die körpereigenen Regelmechanismen einwirken. Die Botenstoffe und Enzyme, die diese Prozesse steuern, sind etwa 20 nm gross und funktionieren nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip. Nur Stoffe, die exakt in die dafür vorgesehene Stelle passen und andocken können, aktivieren den Boten, der dann eine bestimmte Aufgabe ausführt. Botenstoffe kommen und gehen für gewöhnlich und blockieren natürliche Prozesse nicht irreversibel.

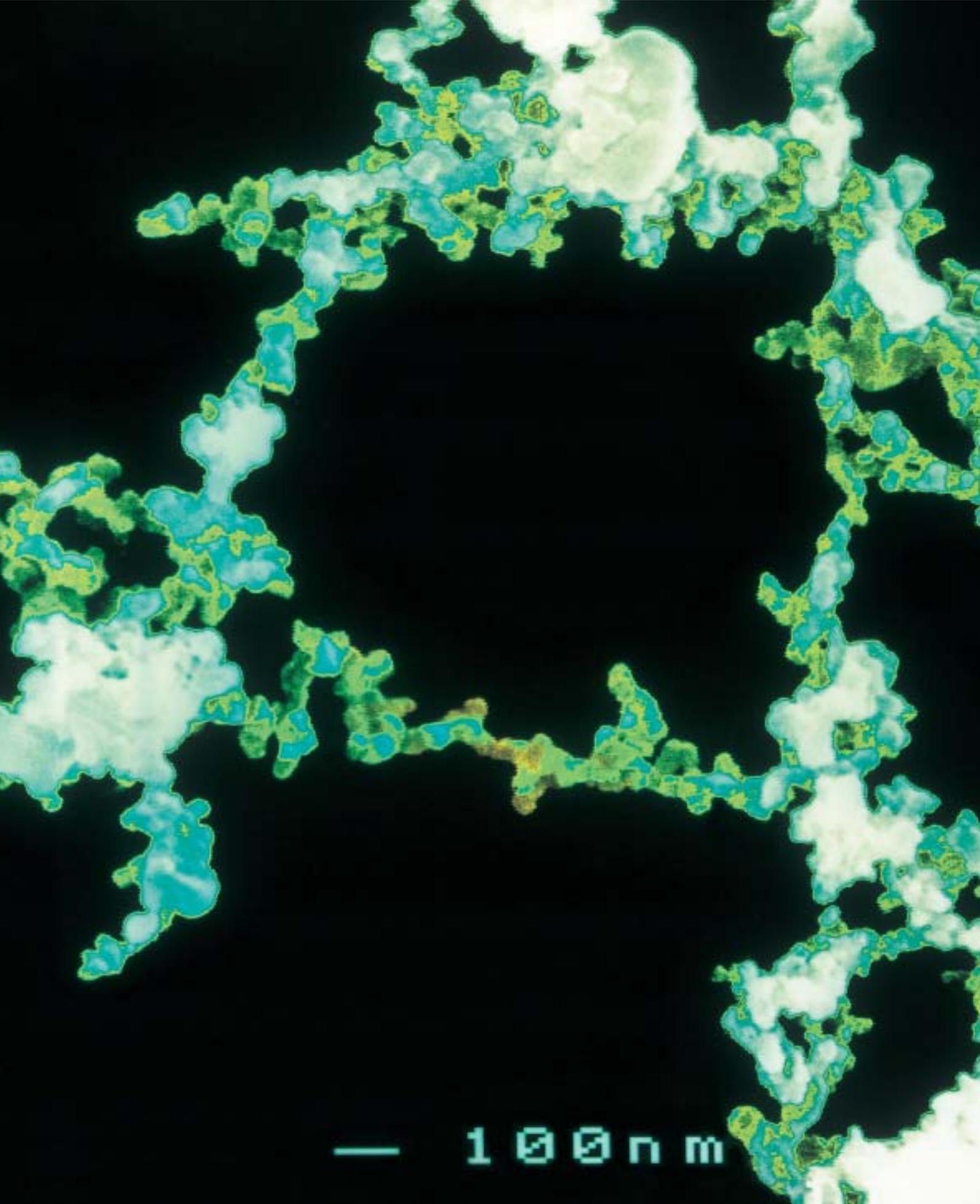
Einige Fälle sind bereits beschrieben worden, in denen Nanopartikel biologische Prozesse stören konnten. Beispielsweise gibt es Hinweise auf Bauprozesse oder Stoffverwertungsprozesse, die durch Nanopartikel beeinträchtigt werden. Auch die Kommunikation zwischen benachbarten Zellen scheint beeinflusst zu werden. Hier werden Botenstoffe ausgetauscht, die von Nanopartikeln aufgefangen oder gestört werden können. Unter Umständen könnten die neuartigen Partikel auch für das Immunsystem problematisch sein. Entweder, weil sie einzeln so klein sind, dass sie gar nicht erkannt werden und erst beim Anlagern an biologische Strukturen dem Immunsystem «auffallen» und unerwünschte Reaktionen auslösen, oder weil sie erkannt werden und systemische Störungen wie beispielsweise Allergien auslösen.

<sup>10</sup> www.net-lexikon.de

Die Forschung steht in diesen Bereichen noch ganz am Anfang. Ob und inwiefern die neue Technologie wirklich auf den Körper einwirken kann, ist zurzeit reine Spekulation. Auch hat der Körper viele Reparatur- und Ausgleichsmechanismen, die ebenfalls in Betracht gezogen werden müssen. Allerdings wird deutlich, dass ein erheblicher Informationsbedarf besteht, um die elementare Frage klären zu können, wie die Möglichkeit der Interaktionen von Nanopartikeln mit dem Körper aussehen.

Die Störung von gewissen biologischen Prozessen kann auch ganz bewusst vorgenommen werden, um einen entscheidenden Vorteil zu erreichen. Ein gut untersuchtes Beispiel eines solchen Störprozesses ist die partielle Hemmung des AIDS-Erregers mit Hilfe eines Buckyballs. Solche Buckyballs können ein Enzym blockieren, das zur Vermehrung des Virus notwendig ist. Die Blockierung entsteht einfach dadurch, dass sich der Buckyball in der Andockstelle des Enzyms festsetzt und dort bleibt. Damit soll eine dauerhafte und irreversible Hemmung des Botenstoffs erreicht werden.

Dieseruss-Nanopartikel in einer 45 000 fachen Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop.



## 4 Nanopartikel in der Umwelt

**«(Die Nanotechnologie) hält Lösungen – soweit es überhaupt Lösungen gibt – für die meisten unserer dringenden Materialbedürfnisse in den Bereichen Energie, Gesundheit, Kommunikation, Transport, Nahrung, Wasser usw. bereit.»**  
*Richard Smalley, Professor an der Rice University und Nobelpreisträger für Chemie 1996<sup>11</sup>*

Je nach Herstellungsverfahren und Freisetzungsintensität können Nanopartikel in das Wasser oder in die Luft und schliesslich auch ins Erdreich und ins Grundwasser gelangen. Zudem finden sie zunehmend Verbreitung in verschiedensten Wegwerfartikeln, die früher oder später als Müll entsorgt oder recycelt werden müssen.

Viele der künstlich hergestellten Nanopartikel werden in ihrer Art und Menge für die Umwelt neu sein. Sie könnten eine völlig neue Klasse nichtbiologisch abbaubarer Schadstoffe darstellen, von denen Wissenschaftler noch sehr wenig wissen. Das langfristige Verhalten solcher Stoffe und deren Auswirkungen auf die Elemente sind damit äusserst schwer vorhersehbar. Demgegenüber gibt es aber auch vielfältige Bemühungen, die Nanotechnologie zum Schutz der Umwelt einzusetzen.

Staatlich unterstützte Forschungsarbeiten, besonders in Nordamerika, evaluieren bereits, ob Nanopartikel bei der Sanierung von Altlasten bei grossflächigen Umweltverschmutzungen eingesetzt werden können. Anstatt verschmutztes Grundwasser aufwändig hochzupumpen und zu behandeln, könnten reaktive Nanopartikel in den Boden gepumpt werden, wo sie Schadstoffe – zum Beispiel organische Lösungsmittel und Schwermetalle – durch eine chemische Reaktion in harmlose Substanzen umwandeln. Mit den heutigen Verfahren muss der Boden bei grossen industriellen Verschmutzungen Kubikmeter für Kubikmeter abgetragen, aufwändig aufbereitet und wieder zurückgebracht werden – ein teures und langwieriges Vorgehen.

Neue, nanotechnologische Verfahren beruhen auf der Anwendung von künstlich hergestellten, hochreaktiven Nanopartikeln, die aufgrund ihrer kleinen Partikelgrösse eine Gesamtoberfläche von bis zu 1000 Quadratmetern pro Gramm haben können. Diese aktive Oberfläche kann chemisch mit gewissen toxischen Kontaminanten im Erdreich, Grundwasser oder in der Luft reagieren und sie «neutralisieren». Zur Trinkwasseraufbereitung werden zurzeit Nanopartikel getestet, die Silber enthalten und antibakteriell wirken.

Zur Rückgewinnung der eingesetzten Partikel sind magnetische Verfahren genauso im Gespräch wie spezielle Filtermethoden. Idealerweise verbleiben die Partikel aber nach getaner Arbeit am Wirkungsort, da sie entweder biologisch abbaubar sind oder zusammenklumpen. Dadurch können sie eher mit grösseren Stoffen verglichen werden, die teilweise auch natürlich in der Umwelt vorkommen.

Ähnliche Reinigungsmethoden werden auch im Zusammenhang mit der Verschmutzung durch industrielle Herstellungs- und Prozessverfahren diskutiert. Man geht davon aus, dass diese Art der Nanotechnologie umweltgerechte, industrielle Herstellungsprozesse begünstigt, indem toxische Abgase und andere prozessbedingte Nebenprodukte durch Nanopartikel entgiftet würden. Während in einzelnen Studien viel versprechende Resultate bei der Umweltdekontamination erzielt wurden, gibt es für die erfolgreiche Anwendung von Nanopartikeln in industriellen Prozessen noch kaum Erfahrungswerte. Langfristige Auswirkungen solcher Verfahren sind deshalb bislang ungewiss. Andere Forschungsprojekte fokussieren auf nanotechnischen Möglichkeiten zur Energieeinsparung – wie in der Elektronikbranche durch effizientere und energiesparsamere Geräte.

<sup>11</sup> Etc Group (Hg.): *The big down*. Januar 2003. Seite 46.

## 4 Nanopartikel in der Umwelt

«Dieses Gebiet steckt noch in den Kinderschuhen. (...) Die ersten Ergebnisse müssen vorsichtig bewertet werden. Das Gebiet wächst so schnell mit seinen Entdeckungen, dass Fragen über die Folgen für die Umwelt gerade erst aufgeworfen werden.»

Joseph B. Hughes, Professor am Georgia Institute for Technology<sup>12</sup>

### Ultrafeine Partikel (UFP)

Ultrafeine Partikel sind kleiner als 100 nm. Der Begriff des ultrafeinen Partikel ist identisch mit dem des «Nanopartikels» und wird in dieser Publikation für die schon seit längerem bekannten Partikel in der Luft verwendet.

Neue Lösungsansätze im Umgang mit der zunehmenden Umweltverschmutzung und Ressourcenverknappung sind gesucht. Dass angesichts einer rapide wachsenden Weltbevölkerung und einer zunehmenden Erschöpfung der essenziellen Ressourcen wie Wasser oder fossile Brennstoffe Lösungen zur Bewältigung der Probleme gefunden werden müssen, ist klar. Bezüglich der Nanotechnologie stellt sich jedoch die Frage: Wie können wir diese nutzbringend einsetzen und sicherstellen, dass auch langfristig keine unerwarteten Folgen zutage treten?

Bereits im Jahr 2000 vermuteten Wissenschaftler in den USA und in Grossbritannien, dass Nanopartikel auch unerwünschte Auswirkungen auf die Umwelt haben könnten. Doch Untersuchungen zu Umweltfragen befinden sich noch in einem sehr frühen Stadium – mit konkreten Ergebnissen aus entsprechenden Studien ist erst in den nächsten Jahren zu rechnen.

Obwohl wenig schlüssiges Wissen über das Verhalten von nanotechnologisch hergestellten Produkten in der Umwelt vorhanden ist, werden diese heute schon angewendet und in naher Zukunft noch viel zahlreicher auf den Markt kommen. Der Umgang mit Chancen und Risiken muss also heute evaluiert werden, und zwar je schneller und umfassender, desto besser.

Fehlt das Wissen, müssen Szenarien entworfen und mögliche Erkenntnisse aus artverwandten Themengebieten herangezogen werden. Aus Kenntnissen über die weltweite Luftverschmutzung lässt sich zum Beispiel einiges über das Verhalten von *ultrafeinen Partikeln* (UFP) in der Luft und deren Auswirkung auf die Gesundheit ableiten. Gemeinsamkeiten mit oder Unterschiede zu den neu synthetisierten Nanopartikeln erleichtern letztlich das Verständnis für ihre möglichen Verhaltensmechanismen.

### *Nanopartikel in der Luft*

Seit Jahrzehnten wird die Staubbelastung der Atmosphäre und ihr Einfluss auf die menschliche Gesundheit erforscht. Wissenschaftler haben im Zusammenhang mit der Luftverschmutzung potenzielle Gefahren für die Gesundheit der so genannten ultrafeinen Partikel wiederholt und im Detail untersucht.

Dieselmotoren zum Beispiel stossen ultrafeine Partikel aus amorphem Kohlenstoff aus und tragen damit speziell in Städten zur Luftverschmutzung bei. In einigen Studien konnte nachgewiesen werden, dass die Anzahl ultrafeiner Partikel in der Luft mit der Sterberate in der Bevölkerung korreliert. Das gilt besonders für anfälligeren Bevölkerungsgruppen wie Kinder oder ältere Menschen. Bei den untersuchten Partikeln handelte es sich jedoch um Stäube aus Dieselabgasen, die normalerweise innerhalb weniger Tage zusammenklumpen (aggregieren) und sich selbstständig absetzen. Während diese Stäube also nach einiger Zeit aus der Luft eliminiert werden, sind künstliche Nanopartikel häufig so behandelt, dass sie gerade nicht zusammenklumpen und dadurch viel länger in der Luft verbleiben. Sie setzen sich praktisch nicht auf Oberflächen ab und könnten beim Einatmen zu den zuvor beschriebenen Reaktionen in der Lunge führen.

<sup>12</sup> Feder, Barnaby J.: «As uses grow, tiny materials' safety is hard to pin down». in: New York Times, 3. November, 2003.

### **Kolloide**

Partikel, die in Flüssigkeiten mobil bleiben, weil sie sich nicht zusammenlagern und absetzen. Die Partikel können natürlicher oder künstlicher Natur sein.

### *Schadstoffe im Boden*

*Kolloide* nehmen bei der Verteilung von Schadstoffen im Boden eine wichtige Rolle ein. Wasserabweisende Schadstoffe und Schwermetalle binden sich an sie und können auf diese Art grossflächig im Boden verteilt werden. Die bisher untersuchten Stoffe sind um ein Vielfaches grösser als die zur Diskussion stehenden Nanopartikel. Es ist zu befürchten, dass die kleineren Nanopartikel wegen ihrer grösseren Oberfläche möglicherweise mehr Schadstoffe binden und durch das Erdreich transportieren. Sollten sie zudem auch viel mobiler sein, würden Schadstoffe in grösseren Mengen und mit höherer Geschwindigkeit in verschiedene Erdschichten gelangen. Problematisch könnte es mit Düngern und Pestiziden im Boden werden. Diese sind eigentlich nur begrenzt mobil, könnten aber durch die beweglichen Nanopartikel im Erdreich «huckepack» über weite Strecken transportiert werden. Da solche Partikel zum Teil sehr reaktiv sind, kann man sich auch diverse Reaktionen mit in der Umwelt vorhandenen Stoffen vorstellen, die zu neuen und unter Umständen toxischen Verbindungen führen.

Ein weiterer Faktor für die Beweglichkeit der Partikel im Boden ist der Zustand der Flüssigkeiten im Erdreich. Abhängig von der Sättigung des Bodens mit Wasser, der Wasserströmung und der chemischen Zusammensetzung der Flüssigkeiten werden Partikel mehr oder weniger weit transportiert. Ob und in welchem Masse Nanopartikel einen Einfluss auf das Verhalten von Wasser haben, ist bisher noch ungeklärt. Bereits kleine Veränderungen reichen aus, um ökologische Gesetzmässigkeiten zu beeinflussen. Damit würde sich nicht nur die Verteilung von Schadstoffen im Boden ändern, sondern auch die Qualität des Grundwassers. Zwar ist man inzwischen auf das Problem aufmerksam geworden, doch entsprechende Forschungsaktivitäten stecken noch in den Anfängen.

### *Transportweg über den Wasserkreislauf*

Wasser verdunstet durch Wärmeeinwirkung und schlägt sich irgendwo als Regen wieder nieder. Mit dem Wasserkreislauf könnten sich Nanopartikel in kürzester Zeit ubiquitär über den Globus verteilen und den Schadstofftransport dabei möglicherweise begünstigen.

Wird man in Zukunft vielleicht metallische Nanopartikel im Polareis nachweisen können? Phantasie ist erlaubt, weil sie Szenarien ermöglicht, die in Abwesenheit von Wissen potenzielle Risiken erahnen lassen.

Auch eine Auswirkung auf das Klima wäre denkbar, wenn auch nicht sehr wahrscheinlich. Nanopartikel könnten zu einer Erwärmung oder aber auch zu einer Abkühlung der Atmosphäre führen. Die Klimawirksamkeit von Nanopartikeln ist bisher jedoch schwierig abzuschätzen. Für die nächsten paar Jahrzehnte ist aber anzunehmen, dass Nanopartikel im Vergleich zu den Treibhausgasen eine eher untergeordnete Rolle spielen.

### *Absorption von Nanopartikeln durch Pflanzen*

Würden Pflanzen Nanopartikel über die Wurzeln absorbieren, könnten diese durch den Konsum von Nutzpflanzen in die Nahrungskette von Mensch und Tier gelangen. Abgesehen davon könnten die Nanopartikel zusätzlich noch Schadstoffe mitschleppen. Ob Pflanzen auch über die Luft Nanopartikel aufnehmen können, ist noch unbekannt.

**«Es ist schwer, Wissenschaftler oder Finanzmanager davon zu überzeugen, dass sie Umweltverträglichkeitsstudien fördern sollen. Der unmittelbare Ertrag einer Forschungsarbeit, die zum Beispiel Wege aufzeigt, um Nanomaterialien zur Heilung von Krankheiten einzusetzen, ist grösser als der Lohn für die Entdeckung, dass Nanomaterialien Krankheiten verursachen können.»**  
*Vicki Colvin, Executive Director des Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN) der Rice University<sup>13</sup>*

<sup>13</sup> Colvin, Vicki L.: «Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News.» in: *EurekaAlert! Nanotechnology in context*. November 2002. [www.eurekaalert.org](http://www.eurekaalert.org)

## 4 Nanopartikel in der Umwelt

Vor dem Hintergrund, dass Nanopartikel als Träger für Arzneimittel im menschlichen Körper dienen und teilweise bis in die am besten geschützten Bereiche des Körpers vordringen können, kann man über die Aufnahmefähigkeit von Pflanzen höchstens spekulieren.

### «Worst-case»-Szenarien

Angesichts der herrschenden Unsicherheit kommt man nicht umhin, auch an «worst-case»-Szenarien zu denken. Was wäre, wenn gewisse Nanopartikel tatsächlich einen schädlichen Einfluss auf die Umwelt ausübten? Könnte man sie aus den entsprechenden Systemen Wasser, Boden und Luft wieder entfernen?

Fest steht, dass die Eliminierung von Nanopartikeln aus der Umwelt äusserst schwierig wäre. Dies stellt die produzierende Industrie vor eine grosse Herausforderung. Denn bei der Herstellung von Nanomaterialien besteht die Gefahr, dass Produktionsabfälle genau wie andere Abfälle auch mit der Abluft oder mit dem Abwasser in die Umwelt gelangen. Sollte sich im Nachhinein herausstellen, dass dieses Vorgehen weitreichende Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung oder die Luftzusammensetzung hat, würden Wirtschaft und Gesellschaft vor einem grossen Problem stehen.

Die Entfernung von Nanopartikeln aus Flüssigkeiten wie Trinkwasser ist zurzeit nur durch *Zentrifugations-* oder durch *Ultrafiltrationsverfahren* denkbar. Beide Methoden eignen sich nicht dazu, grosse Volumina zu verarbeiten oder wären sehr kostspielig.

### Zentrifugation

Partikel werden durch schnelle Rotation und Nutzung der Fliehkraft voneinander getrennt.

### Ultrafiltration

Spezielle Methode, bei der Flüssigkeiten durch besonders dichte Filter unter Anwendung von Druck (0,7–4,8 bar) filtriert werden.

Um Nanopartikel aus der Luft filtern zu können, bedarf es neuartiger Filtrationsverfahren, weil die heute üblichen Luftreinigungsfilter in Gebäuden und Fabrikationsanlagen in der Regel zu grossporig sind. Man wird jedoch die Porengrösse der Filter nicht einfach soweit reduzieren können, dass Nanopartikel darin hängen bleiben. Probleme wie starke Druckdifferenzen und die Verstopfung von Poren müssen erst noch gelöst werden. Angesichts dieser Herausforderungen wird deutlich, dass auch effektive Atemmasken zum jetzigen Zeitpunkt eher unrealistisch sind. Denn mit der dafür erforderlichen Faserkonstruktion wäre eine normale Atmung nicht möglich.

Einen anderen Ansatz verfolgen derzeit einige «start-up»-Firmen. Sie wollen die Nanotechnologie gerade für die Herstellung von Atemschutzmasken nutzen und mit Hilfe von «Nanofiltern» besonders leistungsfähige Schutzfilter herstellen. Ähnlich wie bei der Entgiftung von verschmutzter Erde oder Wasser werden hochreaktive Nanopartikel an die Fasern im Atemschutzfilter gebunden. Die herauszufilternden Partikel kollidieren mit den beschichteten Fasern und werden durch eine chemische Reaktion mit den Nanopartikeln neutralisiert und unschädlich gemacht. Versuche mit der Neutralisierung von Bakterien oder gewissen chemischen Stoffen haben bereits stattgefunden und anscheinend positive Resultate erzielt. Der Erfolg dieser Entwicklungen bleibt abzuwarten.

### *Entsorgung oder Wiederverwertung?*

Es gibt Bereiche, die zum heutigen Zeitpunkt der Entwicklung noch kaum bedacht werden, nämlich die Entsorgung, Rezyklierung und Wiederverwertung von Nanomaterialien. Wie diese sich in den gängigen Verfahren verhalten werden, ist offen.

#### **Neue Energieformen für den Umweltschutz**

Einen Beitrag zur Umweltschonung leistet die Nanotechnologie möglicherweise auch durch ihr enormes Energiesparpotenzial. Dabei geht es nicht nur um neue Brennstoffzellen in Form von Nanotubes, die als hervorragender Wasserstoffspeicher fungieren, sondern auch um innovative Beleuchtungsmittel oder neuartige Solarzellen, die sich nach der Vorstellung der Forscher künftig auf Gebäude sprühen oder in Kleidung einbauen lassen sollen.

Organische Solarzellen absorbieren Sonnenlicht mit Hilfe einer aufgetragenen Farbstoffschicht von einigen Nanometern, die – analog zur Photosynthese bei der Pflanze – Licht in Energie umwandelt. Innovative Leuchtkörper, so genannte organische Leucht-

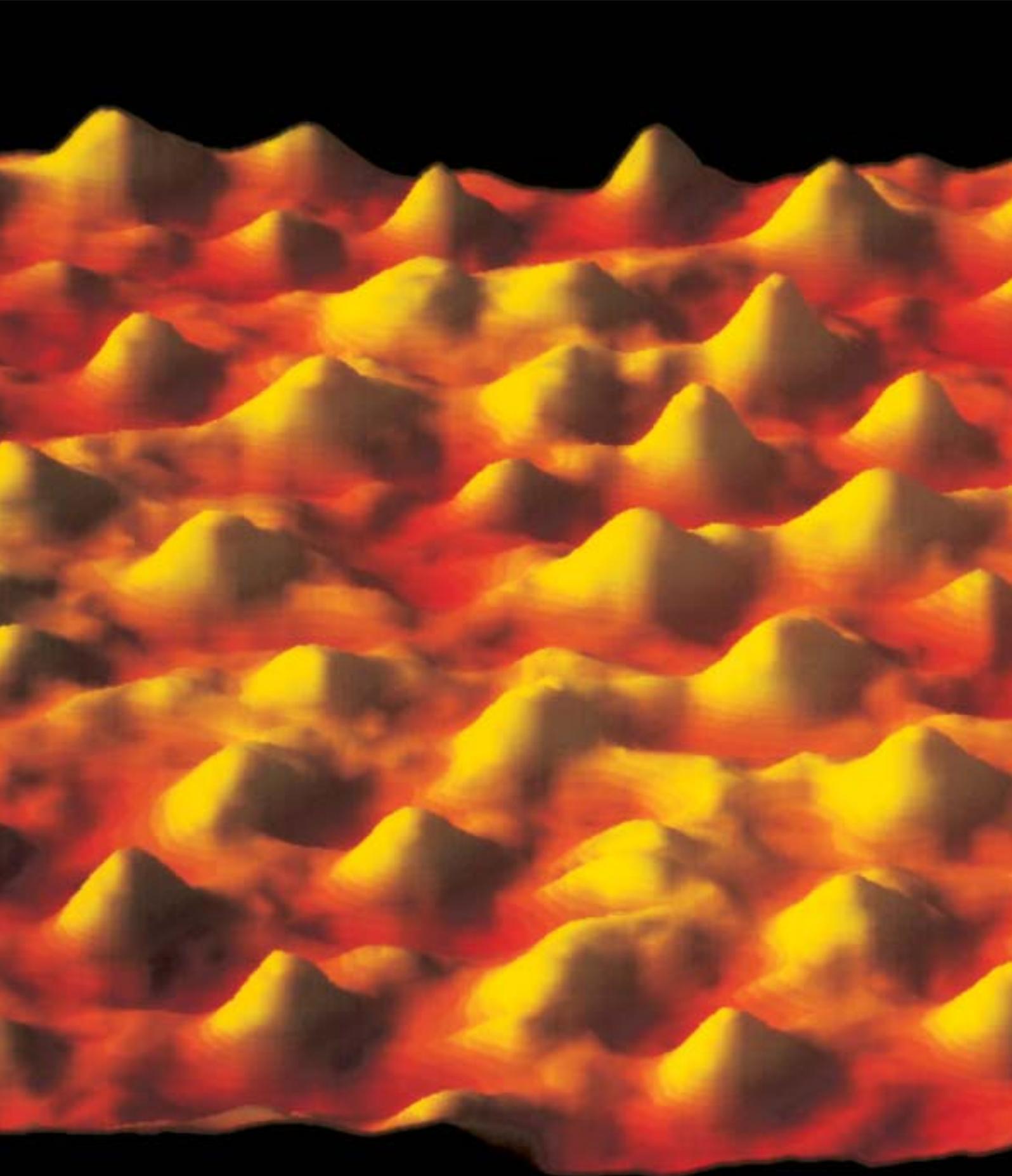
dioden (*Organic Light Emitting Diode, OLED*), bestehen ebenfalls aus einem nanometerdünn aufgetragenen Substrat, das leuchtet, wenn es unter Strom gesetzt wird. Diese Leuchtkörper sollen die Effizienz der herkömmlichen Glühbirnen übertreffen und obendrein in der Herstellung noch preiswerter sein.

Obwohl derartige Anwendungen noch keine Marktreife erlangt haben, ist ihr Potenzial schon absehbar. Organische Licht- und Solarstromerzeuger sparen Energie, sind durch ihr organisches Ausgangsmaterial preisgünstig und wegen der dünnen Schicht mechanisch flexibel. So könnte man mit Hilfe von organischen Leuchtdioden biege- oder faltbare Computerdisplays oder dreidimensionale Leuchtobjekte kreieren. Was die möglichen Anwendungen betrifft, sind der Phantasie keine

Grenzen gesetzt: Zum Beispiel beleuchtete Strassenschilder und neuartige Fahrzeug- und Raumbeleuchtungen, bei denen ganze Bauteile – wie Zimmerdecken – der Lichtemission dienen.

Die Chancen der Nanotechnologie liegen einerseits darin, Energie zu sparen, innovative Energiequellen zu entwickeln und Ressourcen besser zu nutzen, andererseits aber auch in neuen Herstellungsverfahren, für die weniger Rohstoffe und Basismaterialien gebraucht werden und die weniger toxisches Abfallmaterial produzieren. Durch Gewichtsreduktion und alternative Treibstoffnutzung im Transportbereich oder innerhalb der herstellenden Industrie liesse sich auch der Ausstoss von Treibhausgasen reduzieren.

Kohlenstoffmoleküle, die mit einem Scanner-Tunnel-Mikroskop (STM) zur Lichtemission angeregt wurden. Die Auflösung beträgt 5 nm.



## 5 Berufskrankheiten («occupational hazards»)

«Diese «Latenzlücke», die allen Gefährdungen mit langer Latenzzeit gemeinsam ist, verdeutlicht den weit verbreiteten Irrtum der Annahme, dass das «Fehlen von Belegen für einen Schaden» gleichbedeutend sei mit dem «Beleg für das Fehlen eines Schadens». Das ist es aber nicht.»  
*David Gee und Morris Greenberg, wissenschaftliche Autoren*<sup>14</sup>

«In einem Forschungsgebiet mit mehr als 12 000 Literaturnachweisen pro Jahr stellten wir mit Erstaunen fest, dass bisher keine Modelle zur Risikoabschätzung von Nanomaterialien entwickelt und keine toxikologischen Studien über synthetische Nanomaterialien durchgeführt worden sind.»  
*Vicki Colvin*<sup>15</sup>

Die meisten so genannten Nanoprodukte bestehen nicht vollständig aus Nanopartikeln, sondern enthalten nur einen beigemischten Anteil davon. Nanopartikel, die als Rohmaterialien dienen, werden in grösseren Mengen in spezialisierten Fabriken hergestellt. Eine Exposition findet also hauptsächlich an den Orten am Arbeitsplatz statt, wo solche Grundstoffe hergestellt und verpackt werden. Auch während des Transports und besonders beim Aus- und Umladen in der Produktionsstätte für Zwischen- oder Endprodukte können Arbeitskräfte mit den nanotechnologisch hergestellten Materialien und deren Risiken in Kontakt kommen.

Im Hinblick auf die gesundheitlichen Auswirkungen, die Nanopartikel auf Personen haben können, die beruflich mit Nanopartikeln umgehen, muss zwischen Pulvern und in Flüssigkeiten enthaltenen Partikeln unterschieden werden. Letztere sind einfacher zurückzuhalten und breiten sich nicht so leicht aus. Pulver verteilen sich hingegen schon bei der geringsten Erschütterung in der Luft. Ein höheres Verbreitungspotenzial haben Nanopartikelpulver, die zur Verhinderung von Verklumpung behandelt wurden und somit länger in der Luft verweilen. Es versteht sich von selbst, dass besonders die hoch reaktiven Partikel für die exponierten Arbeiter kritisch sind.

Bei der Herstellung von Nanopartikeln finden viele Produktionsschritte in einer geschlossenen Umgebung statt, zum Teil in Unterdruckräumen. Aber beim Transport dieser Nanopartikel von der Produktionsstätte zum Anwendungsort ist ein gewisses Mass an Handhabung nicht zu vermeiden. Ergo könnte durch deren Verteilung in der Arbeitsumgebung eine Gefährdung entstehen. Gesichtsmasken bieten hier nur einen geringen Schutz. Lediglich eine umfassende Luftfilterung in der Anlage könnte die Partikel entfernen. Letzteres ist jedoch äusserst aufwändig und zumindest nach dem heutigen Stand der Technik für die Luftreinhaltung von grösseren Gebäudeteilen kaum möglich.

Bislang ist das Risiko der berufsbedingten Exposition gegenüber nanopartikelären Stoffen nach dem Risiko bemessen worden, das von den artverwandten, grösseren Partikelformen bereits bekannt ist. Titandioxid, ein in relativ grossen Mengen hergestelltes Produkt, ist dafür ein typisches Beispiel. Für den beruflichen Umgang mit Materialien müssen nach dem Gesetz für bestimmte Stoffe Sicherheitsdatenblätter (*Material Safety Data Sheet*, MSDS) zur Verfügung gestellt werden. Darin sind potenzielle Risiken, adäquate Schutzmassnahmen und der Umgang mit der Substanz beschrieben. So enthalten die Sicherheitsdatenblätter für Titandioxid-Nanopulver die Arbeits- und Gesundheitsschutzempfehlungen für die Substanz Titandioxid. Diese wurden offenbar von jenen Empfehlungen übernommen, die für die Markt gängigen grösseren Partikelformen entworfen wurden. So wird im Sicherheitsdatenblatt für Nano-Titandioxidpulver nach wie vor empfohlen, während der Handhabung eine Staubmaske zu tragen, obwohl diese bekanntlich nur eingeschränkt Schutz bietet.

14 Gee, David, Greenberg, Morris: «Asbestos: from «magic» to malevolent mineral». In: *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000*. EEA Environmental Issue Report Nr. 22, 2001. S. 52–63.

15 Colvin, Vicki L.: «Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News.» in: *EurekaAlert! Nanotechnology in context*. November 2002. [www.eurekaalert.org](http://www.eurekaalert.org)

## 5 Berufskrankheiten («occupational hazards»)

Ausserdem richten sich auch die Expositionsgrenzwerte eher nach weitaus grösseren Partikeln und sind für Nanopartikel eigentlich zu hoch. Vorschriften für den Transport solcher Pulver werden nicht speziell erwähnt, und im Fall von Titandioxid wird kein Unterschied zwischen der reaktiveren Kristallform – dem «Rutil» – und der weniger reaktiven Form «Anatas» gemacht. Ein Arbeiter, der mit katalytischem Titandioxid-Nanopulver umgeht, trägt somit eine relativ nutzlose Gesichtsmaske und arbeitet in einem Lüftungssystem, das die Partikel nur ungenügend aus der Luft entfernt.

Mit Nanopartikeln muss vermutlich ähnlich umgegangen werden wie heute schon mit gewissen Bio-Organismen oder radioaktiv-strahlenden Substanzen. Adäquate Schutzmassnahmen wie eine nanotaugliche «glovebox» müssen der möglichen Gefährdung entsprechend voraussichtlich noch entwickelt werden.

### Grosses Innovationspotenzial

Die Nanotechnologie wird die Welt, wie wir sie kennen, verändern – dies scheint nur eine Frage der Zeit zu sein. Gewisse Innovationen haben sich bereits durchgesetzt, so zum Beispiel spezielle Oberflächenbehandlungen, die Wasser abweisende und selbst reinigende Effekte auf Glas, Kunststoff, Metall oder poröse Materialien haben. Wer sich wundert, warum die auf einem Dach montierten Solarzellen auch nach längerer Zeit trotz Hitze, Staub- und Kälteeinwirkung immer noch wie neu aussehen, dem hilft die folgende Erklärung:

Das Phänomen der sich selbst reinigenden Oberflächen basiert auf einer Technik, die von der Natur abgeschaut wurde. Es handelt sich dabei um den so genannten Lotuseffekt, welcher der Lotuspflanze aus Asien nachempfunden wurde. Die Lotuspflanze ist bekannt dafür, dass sie selbst bei heftigen Regenschauern so gut wie nicht nass wird und immer makellos saubere Blätter behält. Forscher haben herausgefunden, dass dieser Umstand der speziellen Oberflächenbeschaffenheit der Blätter zu verdanken ist. Diese

sind einerseits aus extrem Wasser abweisenden Wackskristallen aufgebaut und bilden andererseits im Nanometerbereich eine raue Oberfläche. Dadurch haben Regentropfen nur eine äusserst geringe Kontaktfläche mit dem Blatt und perlen so schnell davon ab, dass sie gleichzeitig Staub oder Fremdpartikel mitreissen. Dank der Nanotechnologie kann man nun nicht nur selbst reinigende Fensterscheiben oder Verkehrsschilder herstellen, sondern auch poröse Materialien wie Holz oder Ton imprägnieren und Häuserfassaden vor unliebsamer Spraydekoration schützen.

Zu den neueren Errungenschaften, die durch die Partikeltechnologie möglich geworden sind, zählt auch die Kratzfestigkeit von Lacken, die in der Autoindustrie grossen Anklang findet. Auch neue Formen von Korrosionsschutz gehören dazu: Sie ermöglichen wesentlich dünnere und leichtere Beschichtungen, die nicht nur für den Flugzeugbau von Interesse sind. Neue Korrosionsschutzmöglichkeiten für Metalle könnten schon bald die bisher verwendeten – äusserst toxisch und schwer zu entsorgenden – Chromverbindungen im Kampf gegen den Rost ersetzen. Nanotechnologisch hergestellte Oberflächen könnten somit zum Umweltschutz beitragen.

Abbildung 1

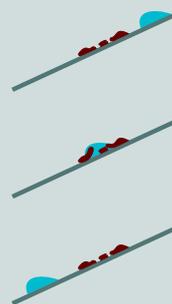
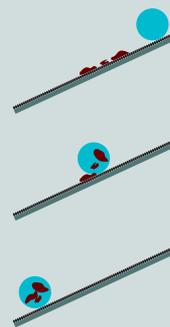


Abbildung 2



### Lotuseffekt

**Abbildung 1:** Fläche mit hoher Grenzflächen-spannung. Wassertropfen dehnen sich aus und bedecken eine grosse Fläche. Schmutzpartikel werden nicht entfernt.

**Abbildung 2:** Mit einer Nanostruktur beschichtete Fläche, die die Grenzflächen-spannung senkt – Wassertropfen perlen ab. Das Resultat ist eine «selbstreinigende» Oberfläche, wie man sie bei der Lotuspflanze kennt.

Siliziumoxid (SiO<sub>2</sub>)-Nanopulver, vermischt mit nanodisperser Flüssigkeit (kolloidale Lösung), das zum Ausfiltern von Partikeln im Nanobereich verwendet wird, zum Beispiel für die Wasserreinigung. Aufnahme mit dem Transmissionmikroskop (Massstab 50 nm).



## 6 Regulatives Umfeld

Nanotechnologisch hergestellte Produkte wurden bis zu Beginn 2004 nicht speziell in der Gesetzgebung berücksichtigt, weder in besonderen Vorschriften oder Empfehlungen, wie mit solchen Produkten oder deren Basismaterialien umgegangen werden soll, noch wie solche Produkte zu kennzeichnen sind.

In Anbetracht der Vielfältigkeit der betroffenen Produkte ist dies nicht weiter verwunderlich. Die Produktpalette reicht von Medikamenten über Textilfasern bis hin zu Gläsern oder Flugzeugteilen. Allerdings werden Nanopartikel selbst innerhalb von bestimmten Produktsegmenten nicht als eigenständige Klasse erkannt und entsprechend bezeichnet. So klassifiziert die Amerikanische Zulassungsbehörde *Food and Drug Administration* (FDA) Nanopartikel in UV-abweisenden Substanzen nicht als neuen Inhaltsstoff, sondern als «variation of the bulk material», also lediglich als eine Variation des zugrunde liegenden Stoffes.

Das bereits angesprochene Titandioxyd-Nanopulver wird folglich genauso behandelt wie die gängigen grösseren Partikel desselben Stoffes. Da es sich dadurch nicht um einen neuen Stoff handelt, muss er auch nicht extra zugelassen werden. Aufwändige und langwierige Testverfahren sind damit überflüssig. Das *Scientific Committee on Cosmetic Products and Non-Food Products intended for Consumers* der Europäischen Kommission vertritt eine ähnliche Auffassung: Titandioxyd wird als «sicher» eingestuft, unabhängig von der Grösse der verarbeiteten Partikel. Der Tatsache, dass allein durch die Verkleinerung von an sich harmlosem Material möglicherweise Risiken für die Gesundheit entstehen können, wird damit keine Beachtung geschenkt.

Diese Einstellung erstaunt: Schliesslich unterscheiden sich – wie bereits erwähnt – die Nanopartikel von den Mikropartikeln durch mehrere Eigenschaften. Wäre dies nicht der Fall, wäre es auch nicht sinnvoll, in einer Reihe von Produkten grössere Mikropartikel durch teurere Nanopartikel zu ersetzen.

**«Man kann spekulieren, dass anorganische Stoffe allgemein biologisch inert sind. Doch ohne harte Daten speziell über synthetische Nanomaterialien lässt sich unmöglich vorhersagen, welche physiologischen Wirkungen auftreten können und vor allem, welche Expositionswerte zu empfehlen sind.»**  
*Vicki Colvin*<sup>16</sup>

Die Schwierigkeit mit der Klassifizierung und Zulassung von Nanomaterialien zeigt sich im Wortlaut, wie er zum Beispiel von der FDA angewendet wird: «Substantially equivalent to conventional products». Dabei gäbe es stichhaltige Gründe dafür, Nanopartikel in einer eigenen Klasse zusammenzufassen: Nanopartikel können auf andere Art und Weise als Mikropartikel in den Körper gelangen; sie können in Bereiche des Körpers eindringen, die vor grösseren Partikeln geschützt sind und in den Körperkreislauf gelangen. Ausserdem wird vermutet, dass sie reaktiver sind, sodass sich gesundheitsschädliche Wechselwirkungen unter Umständen aufschaukeln könnten.

Die regulatorischen Bestimmungen für die Exposition mit Nanopartikeln am Arbeitsplatz sind ebenfalls wenig verbindlich. «Hazard guidelines» für Schwebstoffe in der Luft («airborne particles») basieren bislang massgeblich auf zwei verschiedenen Systemen:

Einerseits wird die erlaubte Menge von bekannten, toxischen Stoffen in der Luft eingeschränkt. Das gilt zum Beispiel für Asbest, Silikate, Barium, Chrom und viele andere Stoffe, für die die Weltgesundheitsorganisation (WHO) international gültige Standards definiert hat. Grundlage für die Beurteilung von potenziellen Gesundheitsgefahren sind auch hier jeweils die Eigenschaften oder die Toxizität des Ausgangsmaterials («bulk material»).

<sup>16</sup> Colvin, Vicki L.: «Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News.» in: *EurekaAlert! Nanotechnology in context*. November 2002. [www.eurekaalert.org](http://www.eurekaalert.org)

**«Wohl kaum je zuvor waren Risiken & Chancen einer neuen Technologie so eng miteinander verknüpft, wie das bei der Nanotechnologie der Fall ist. Es sind genau jene Eigenschaften, die die Nanopartikel so eindeutig wertvoll machen, die andererseits die Vermutungen bezüglich Gefährdung von Mensch und Umwelt aufkommen lassen.»**

**Marcel Bürge, Risk Engineering,  
Swiss Re**

Andererseits gibt es Vorschriften, die generell die Staubbelastung in der Luft regulieren. Hier werden zum Beispiel die nicht toxischen Stäube in der Luft limitiert («Total dust, containing no asbestos and less than 1 % crystalline silica»)<sup>17</sup>. Als eines der ersten Länder weltweit unternimmt Deutschland Anstrengungen, um ultrafeine Partikel – also Nanopartikel in der Luft – gesondert zu regulieren.

Nanopartikel oder andere nanotechnologisch hergestellte Stoffe wie Buckyballs oder Nanotubes werden noch nicht in einer eigenen Stoffklasse zusammengefasst. Unklar bleibt, ob dies überhaupt sinnvoll wäre, kann man doch nicht einmal die verschiedenen Nanopartikel miteinander vergleichen. Je nach individueller Grösse, Beschichtung, Ausgangsmaterial oder Komposition können bereits zwei Nanopartikel völlig andere Eigenschaften aufweisen. Ein Eisenpartikel mit Beschichtung verhält sich nicht nur anders als eines ohne – es kommt auch darauf an, *womit* es beschichtet wurde.

#### *Herausforderung für die Forschung*

Dieser Umstand stellt die Forschung vor eine grosse Herausforderung: Toxikologische Studien können nicht einfach mit bestimmten Partikeln durchgeführt und dann verbindlich auf alle anderen Nanopartikel übertragen werden. Solche Studien zu verallgemeinern wäre unzulässig. Müsste im Prinzip für jeden Stoff ein eigenes Sicherheitsdatenblatt hergestellt werden, das über die toxischen Eigenschaften Auskunft gibt? Dies wäre ein ungeheurer Aufwand, da die gängigen Testmethoden für verbindliche Aussagen nicht ausreichen. Es müssen also Wege gefunden werden, die eine Risikoabschätzung zulassen und den sicheren Umgang mit diesen neuen Materialien erlauben.

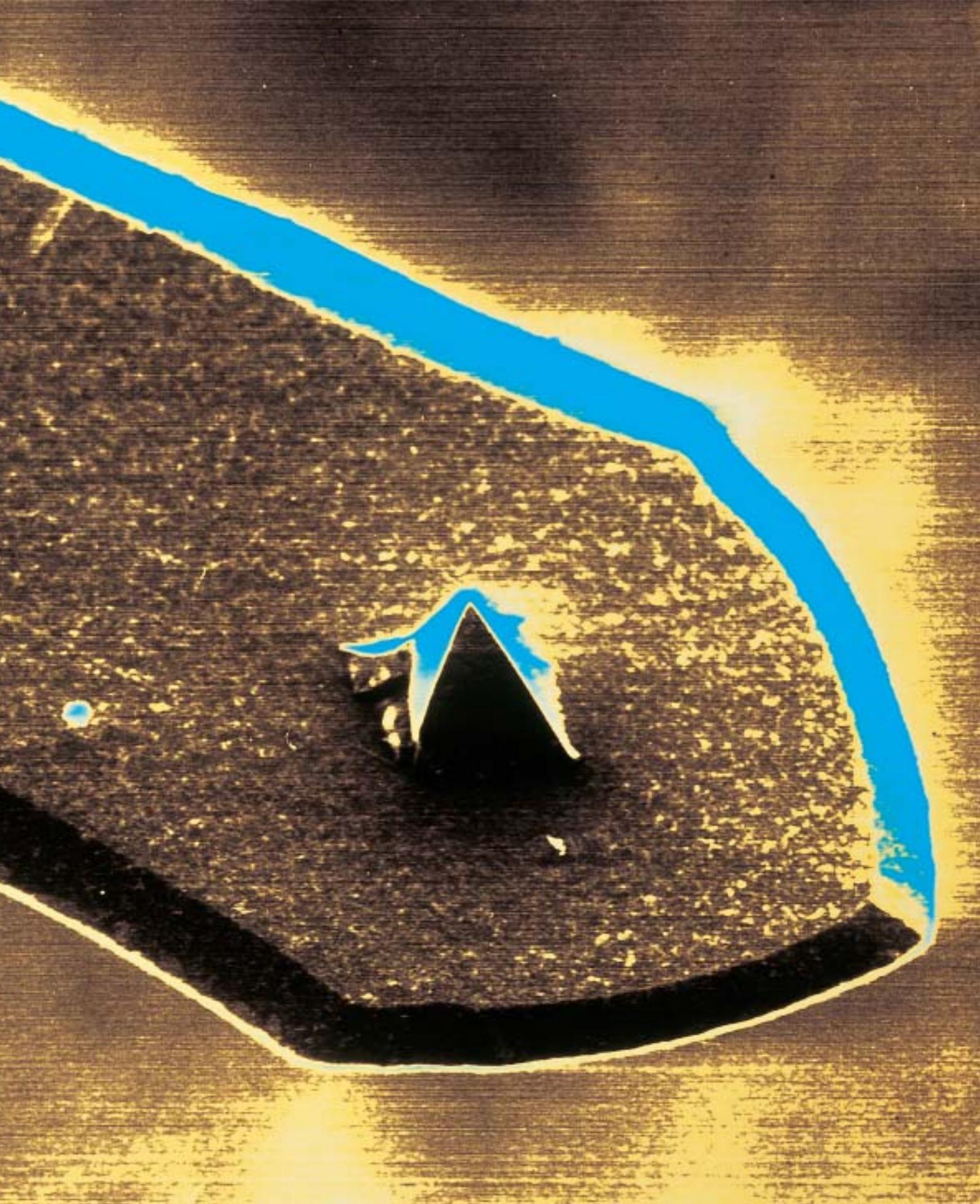
#### *Standardisierung notwendig*

Grundlage hierfür müsste demnach eine international gültige Standardisierung der nanotechnologischen Substanzen und Stoffe sowie eine einheitliche Nomenklatur sein. Nur wenn die entsprechenden Substanzklassen genau definiert sind und alle «vom Gleichen reden», lassen sich die Resultate der Risikoabschätzungen verschiedener Institute oder Länder miteinander vergleichen und somit Fortschritte in der Abklärung von potenziellen Risiken erzielen. Ohne eine einheitliche «Sprache» sind weder regulative Massnahmen noch versicherungstechnische Formulierungen («wordings») möglich. Selbst die Kennzeichnung von Produkten wäre ohne Standardisierung ein äusserst schwieriges Unterfangen.

Bei einer Standardisierung wäre auch eine Deklarationspflicht für Unternehmen, die mit nanotechnologisch behandelten Produkten arbeiten, in Betracht zu ziehen. Eine solche Massnahme würde es der Assekuranz ermöglichen, Produkte dieser Art in ihren Versicherungsbeständen zu identifizieren.

<sup>17</sup> [www.osha.eu.int](http://www.osha.eu.int)

Vollständig aus einer 1  $\mu\text{m}$  dünnen CVD-Diamantschicht hergestellte Cantilever-Spitze für Atomic Force Mikroskop (AFM) zur Abtastung von Proben im atomaren Bereich. Aufnahme mit einem Scanner Elektronen Mikroskop (SEM).



## 7 Auswirkungen auf die Versicherung

Die Einführung der Nanotechnologie bedeutet einen Paradigmenwechsel – sowohl in den industriellen Anwendungen als auch in Bezug auf die Expositionsmechanismen. Im Laufe der gesamten Evolution war die Menschheit noch nie einer solchen Art und Menge von Substanzen ausgesetzt, die – offenbar ungehindert – in den menschlichen Körper eindringen können.

Wie wahrscheinlich ist es, eine Beziehung zwischen Ursache und Wirkung für potenzielle Schäden durch Nanopartikel zu finden? Angesichts der Ergebnisse, die zum Beispiel aus Untersuchungen mit Dieselabgasen bekannt sind, scheint ein Kausalzusammenhang durchaus möglich. Vermutlich würde man damit nicht einfach eine weitere Substanz im grossen Cocktail von krebsauslösenden Stoffen identifizieren, mit denen der Mensch ohnehin täglich konfrontiert wird. Wahrscheinlicher ist es, dass bei gewissen Produkten genau nachgewiesen werden kann, wo sie herkommen, wer sie hergestellt hat, und was sie beim Geschädigten bewirkt haben.

«(Die Nanotechnologie) wird Moores Law ganz schön alt aussehen lassen.»  
*Jillian Buriak, kanadische Nanotech-Wissenschaftlerin sowie Professorin und Senior Research Officer, National Institute for Nanotechnology (NINT)*<sup>18</sup>

### *Revolutionäre Risikoentwicklung*

Die Assekuranz ist besorgt. Nicht, weil sich im Zuge neuer technologischer Entwicklungen erfahrungsgemäss neue Schadenszenarien auftun, sondern weil das Ausmass dieser potenziellen Schäden falsch oder gar nicht eingeschätzt werden kann. Die im Zusammenhang mit der Nanotechnologie häufig diskutierten Beispiele von Unfällen und Einzelschäden sind vermutlich nur die Spitze des Eisbergs beziehungsweise das kleinere Übel. Die gut vorstellbaren Entwicklungs-, Konstruktions-, Fabrikations- und Informationsfehler dürften so ziemlich für alle neuen Technologien gelten. Risikotechnisch und versicherungstechnisch (unspektakuläre) Technologieschübe gab es auch früher schon: dem Nieten folgte das Schweiessen; Kunstfasern ersetzen Naturfasern; Plastik löste Metall ab; Transistoren folgten den Verstärkerröhren; die Turbine den Kolben; das Auto der Kutsche, und optische Kabel ersetzen den elektrischen Leiter.

### **Des Rätsels Lösung für die Informationstechnologie?**

Nach dem Moore'schen Gesetz verdoppelt sich die Rechenleistung, beziehungsweise die Anzahl von Transistoren pro Chip alle 18 Monate. Mit leichten Abweichungen hat sich diese Tendenz in der Vergangenheit als richtig erwiesen. Intels erster Chip von 1971 hatte 2000 Transistoren, die heutigen arbeiten mit 100 Millionen Transistoren.<sup>19</sup> Damit sich dieser Trend zur Steigerung der Speicherkapazität fortsetzen kann, müssen aber neue Speichertechnologien gefunden werden, weil die derzeitigen Techniken schon bald an ihre Miniaturisierungs-

grenze stossen. Es muss ein Technologiewechsel stattfinden, ähnlich dem Schritt vom Schaltrelais zum Transistor, der die Entwicklung des Computers überhaupt erst möglich machte.

Um der technologischen Sackgasse zu entkommen, wird derzeit fieberhaft an Ansätzen für eine Nanoelektronik gearbeitet; eine Technik, die ohne die Begrenzungen der heute verwendeten Lithographie auskommt. Die Forschung befasst sich mit Nanoröhren-Transistoren, mit Quantenrechnern und mit DNA- und Enzym-Computern. Auch an den dazugehörigen schnellen Speichermedien wird geforscht.

Obwohl diese neuen Verfahren – zumindest im Industriemassstab – noch nicht überall gängig sind, wird die Nanotechnologie bereits heute als die Lösung für viele Probleme im Elektronikbereich angesehen. Eines der wenigen Produkte, das schon bald Marktreife erreichen könnte, ist das im Nanoscale operierende Speichermedium «Millipede» von IBM. Auf der Fläche einer Briefmarke sollen damit 25 DVDs gespeichert werden können, also über 100 Gigabyte.

<sup>18</sup> Patriquin, Martin: «Small matter provokes a major debate» in: Toronto Globe and Mail, 19. November 2003.

<sup>19</sup> Wolfe J. (Hg.): «Will Nanotech preserve Moore's Law?» in: *Nanotech Report*. Forbes Wolfe, September 2003, Ausgabe 2, Nr. 9. [www.forbesnanotech.com](http://www.forbesnanotech.com)

## 7 Auswirkungen auf die Versicherung

All diese technologischen Veränderungen und Sprünge wurden von den Versicherern ohne Probleme mitgemacht, da wenig Unvorhersehbares zu befürchten war. Das heisst, es handelte sich dabei risikotechnisch um eher *evolutionäre* Entwicklungen, mit denen Versicherungen in der Regel gut – wenn auch reaktiv – umgehen können. Dabei kam es jedoch nie zu einer wirklichen, das heisst sprunghaften Veränderung der Risikolandschaft, zu keinen unabschätzbaren Unsicherheiten, keiner eigentlichen Bedrohung für den Risikoträger.

Anders sieht es mit risikotechnisch *revolutionären* Entwicklungen aus, deren Schadenpotenziale nicht abgeschätzt werden können. Bei diesen Entwicklungen gibt es zwei unterschiedliche Formen: erstens potenzielle Risiken, die eine Zuordnung der Schadenursache (Kausalität) zulassen, und zweitens jene, deren Schadenursache lediglich nicht ausgeschlossen werden kann, also die so genannten *Phantomrisiken*.

### Phantomrisiko

Ein Phantomrisiko beschreibt einen Zustand, der von der Bevölkerung als Bedrohung wahrgenommen wird, ohne dass ein wissenschaftlich nachweisbarer Kausalzusammenhang hergestellt werden kann.

Es ist zu befürchten, dass die Nanotechnologie zur Kategorie der revolutionären Risiken mit ursächlich nachweisbarer Schadenfolge gehören wird. Dabei sind die potenziellen Schäden in Bezug auf ihre Grösse und Raum/Zeit vermutlich nicht oder nur äusserst schwer abschätzbar. Risiko- und versicherungstechnisch wirklich neu ist die Nanotechnologie also wegen der Unvorhersehbarkeit der Risiken sowie wegen der Latenz von möglichen Serien- und Kumul-Schäden, die ursächlich durch die neuen Eigenschaften und damit durch das unterschiedliche Verhalten von nanotechnologisch hergestellten Produkten entstehen.

### Keine Langzeiterfahrung

Bei der Bewertung der Nanotechnologie konnten die Wissenschaftler bislang weder auf toxikologische Studien noch auf Langzeiterfahrungen zurückgreifen. Studien, die zur Risikoabschätzung notwendig wären, sind aus Mangel an Forschungsgeldern häufig nicht zustande gekommen. Finanzielle Mittel für toxikologische Studien sind nur schwer zu erhalten: Sponsoren interessieren sich in erster Linie für wissenschaftlichen Fortschritt oder wertvolle Patente. Hier braucht es gewisse Rahmenbedingungen, damit staatlich finanzierte Projekte einerseits und eigene Risikoanalysen in der Industrie andererseits durchgeführt werden können.

### «Die Bedeutung des unendlich Kleinen ist unendlich gross.»

Louis Pasteur

Die nanotechnologische Forschung ist noch in einem frühen Stadium, und die Versicherungswirtschaft hofft, dass das Resultat überwältigend positiv ausfallen wird. Trotzdem müssen wir wachsam bleiben und die Erfahrungen aus der Vergangenheit im Auge behalten. Asbest kann in diesem Zusammenhang als ein Produkt genannt werden, das sich nachteilig entwickelt hat. Wie können wir sicherstellen, dass sich die Nanotechnologie zu unserem Vorteil entwickelt?

Als Asbest vor vielen Jahren breite Anwendung fand und weltweit vermarktet wurde, war es einer der besten Brand hemmenden und beständigsten Stoffe, die erhältlich waren. Ähnlich wie heute gewisse nanotechnologisch hergestellte Produkte wurden asbesthaltige Produkte damals innovativ eingesetzt. Zudem waren Asbestfasern nicht im eigentlichen Sinne toxisch oder chemisch bedenklich. Das Problem bestand darin, dass die Fasern lediglich aufgrund ihrer Form und Grösse zu schweren Schäden im Lungengewebe führen konnten: Eine Eigenschaft, deren Folgen erst mit erheblicher Verspätung erkannt wurde.

«Der Entdecker einer Kunst ist nicht der beste Richter über Nutzen und Nachteil, der denen erwächst, die sich ihrer bedienen.»  
Platon

Diese späte Erkenntnis führte dazu, dass Vorschriften und Schutzmassnahmen erst verbindlich eingeführt werden konnten, nachdem bereits weltweit viele Patienten unheilbar erkrankt waren. Vereinzelt Studien hatten auch damals schon im Vorfeld auf potenzielle Risiken hingewiesen. Ohne Langzeiterfahrung konnte das wahre Ausmass des Schadens jedoch nicht annähernd vorausgesehen werden.

Nun stehen Gesellschaft und Versicherungswirtschaft vor der Frage: Wie werden sich die Nanotechnologie und ihre Produkte auf Mensch und Umwelt auswirken? Die meisten Nanopartikel sind vermutlich nicht toxisch im eigentlichen Sinne. Aufgrund ihrer Winzigkeit haben sie aber besondere Eigenschaften mit daraus resultierenden Risiken, die noch weitgehend unbekannt sind. Und auf die Erkenntnisse aus der Langzeiterfahrung möchte man wohl kaum warten.

Angesichts der Tatsache, dass trotz frühester Warnhinweise über die gesundheitlichen Auswirkungen von Asbest bis zur Einführung von international gültigen Massnahmen beinahe 100 Jahre vergangen sind, wäre es wünschenswert, dieses Mal schneller einen Konsens zu finden. Dies erscheint durchaus realistisch, zumal sich die Risikolandschaft seit damals markant verändert hat.

#### Asbest: Frühe Warnhinweise und Massnahmen

1898	Britische Gewerbeaufseherin Lucy Deane warnt vor schädlichen und «schlimmen» Wirkungen von Asbeststaub.
1906	Bericht aus einer französischen Fabrik über 50 Todesfälle bei Asbesttextilarbeiterinnen und Empfehlung von Kontrollen.
1911	Versuche mit Ratten liefern «hinreichende Gründe» für den Verdacht, dass Asbest schädlich ist.
1911 und 1917	Britische Gewerbeaufsicht findet nicht genügend Belege, die weitere Massnahmen rechtfertigen würden.
1918	US-Versicherer verweigern Asbestarbeitern Versicherungsschutz aufgrund von Vermutungen über krankheitsauslösende Arbeitsbedingungen in der Industrie.
1930	Merewether Report in Grossbritannien stellt bei 66 % der Langzeitarbeiter in der Fabrik in Rochdale eine Asbestose fest.
1931	Britische Asbestvorschriften sehen Staubkontrolle nur bei der Herstellung und Entschädigung bei Asbestose vor, doch die Vorschriften werden unzulänglich umgesetzt.
1935–49	Berichte über Lungenkrebsfälle bei Arbeitern in der Asbestproduktion.
1955	Doll stellt hohes Lungenkrebsrisiko bei Asbestarbeitern in Rochdale fest.
1959–60	Mesotheliom-Krebsfälle bei Arbeitern und in der allgemeinen Bevölkerung in Südafrika festgestellt.
1962/64	Mesotheliom-Krebsfälle bei Asbestarbeitern, Menschen in der Umgebung von Fabriken und bei Verwandten von Fabrikarbeitern unter anderem in Grossbritannien und den Vereinigten Staaten festgestellt.
1969	Britische Asbestvorschriften verbessern die Kontrollen, lassen aber Anwender und Krebsfälle ausser Acht.
1982–89	Der Druck von Medien, Gewerkschaften und anderen Interessengruppen in Grossbritannien führt zur Verschärfung der Asbestkontrollen bei Anwendern und Herstellern und zur verstärkten Suche nach Ersatzstoffen für Asbest.
1998–99	EU und Frankreich verbieten alle Formen von Asbest.
2000–01	WTO stützt das Asbestverbot durch EU/Frankreich gegen Einspruch Kanadas.

Quelle: Gee David und Greenberg, Morris: "Asbestos: from 'magic' to malevolent mineral" in: Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000. EEA Environmental Issue Report Nr. 22. 2001. S. 61.

### 7.1 Asbest – ein zulässiger Vergleich?

Der Vergleich von Nanoröhren (Nanotubes) mit Asbestfasern erregt schon seit einiger Zeit die Gemüter. In Fachpublikationen wird gezielt darauf hingewiesen, dass Nanoröhren teilweise eine ähnliche Form und Grösse wie Asbestfasern besitzen. Die Vermutung, dass das Schadenspotenzial ähnlich sein könnte, liegt nahe und wird in Fachkreisen diskutiert.

Nanoröhren machen jedoch nur einen kleinen Teil der momentan produzierten Nanomaterialien aus. Auch wenn dieser Anteil mit der Zeit immer grösser wird, sollte eher der viel grössere Anteil der nicht-röhrenförmigen Nanopartikel genauestens unter die Lupe genommen werden. Die Versicherungswirtschaft ist gut beraten, wenn sie die Entwicklungen genau verfolgt und die Anwendungen von Nanopartikeln kennt.

Wie erwähnt, sind Nanopartikel bereits weltweit in zahlreichen Produkten enthalten und kommen in verschiedenen Anwendungen vor. Schon jetzt deutet einiges darauf hin, dass gewisse Nanomaterialien das Potenzial haben, gesundheitliche Schäden hervorzurufen. Diese sind höchstwahrscheinlich nicht von akuter, sondern von chronischer Natur, und es könnte längere Zeit dauern, bis sie sich manifestieren. Darin liegt das eigentliche Risiko für die Versicherer. In diesem Sinne ist auch der Vergleich mit Asbest zu verstehen.

#### Asbest-Analogie

Aspekt	Nanotechnologie	Asbest
Hersteller bekannt	✓	✓
Definierte Substanz	Nein	✓
Weltweite Verbreitung	✓	✓
Vielseitige Verwendung	✓	✓
Akut toxisch	Nein	Nein
Persistent	Teilweise	✓
Langzeitwirkung	Denkbar	✓
Risiken	Unbekannt	Krebs
Serienschadenspotenzial	✓	✓
Kumulschadenspotenzial	✓	✓
Agens analytisch nachweisbar	✓	✓

#### Risikobeurteilung

Risiken, die durch die Einführung neuer Produkte oder innovativer Technologien entstehen, müssen sich nicht unbedingt von Anfang an zeigen; sie können mit jahrelanger Verzögerung auftreten. Das macht die Risikobeurteilung und die Preisfindung für den Versicherer zwar nicht einfach, aber dennoch machbar, sofern Schadenszenarien vorstellbar und die daraus resultierenden Schäden in Zahl und Ausmass abschätzbar sind. Solange es sich also um potenzielle Einzelschäden – auch neuartige – handeln wird. Die Nanotechnologie wird sich aber weltweit in den verschiedensten Industriezweigen und in einer Vielzahl von Anwendungen mit so grosser Geschwindigkeit verbreiten, dass sich die aus Erfahrung denkbaren Einzelschäden durch Entwicklungs-, Design-, Produkte- und Anwendungsfehler kaum mit grosser Verzögerung einstellen werden. Kritisch wird es, wenn sich systemische Fehler erst mit der Zeit bemerkbar machen, oder wenn ein systematisch verändertes Verhalten lange Zeit unentdeckt bleibt. Dann könnte sich ein unvorhersehbar grosses Schadenspotenzial aufbauen, zum Beispiel im Bereich der gesundheitlichen Beeinträchtigung.

Eine Risikobeurteilung respektive eine Schadensabschätzung wäre erst dann möglich, nachdem sich die ersten Gesundheitsschäden nachweislich manifestiert hätten. Da es Anzeichen dafür gibt, dass gewisse Nanopartikel erst nach geraumer Zeit als schädlich erkennbar sein könnten, muss der Versicherer für seine Risikobeurteilung die Einsatzgebiete und die Verbreitung von potenziell verdächtigen Nanoprodukten sowie die begleitenden Schutzvorkehrungen und Schadensverhütungsmassnahmen kennen.

Im Bereich der Berufskrankheiten und der Produkthaftung nimmt das Risiko (Exponierung) für den Körper bekanntlich zu, je kleiner die Distanz zu Fremdstoffen und schädlichen Einflüssen ist. Es ist am grössten, wenn Schadstoffe direkt in den Körper gelangen können.

Wenn dies unbewusst und unkontrolliert geschieht, ist im Fall einer gesundheitlichen Beeinträchtigung die Schadenklage sicher. Je länger es dauert, bis die schädliche Wirkung erkannt wird, desto grösser wird die kumulierte Schadensersatzforderung sein. Will man also das Risikopotenzial in Bezug auf seine Grösse abschätzen, muss man die Verbreitungspfade der potenziell schädigenden Stoffe kennen. Würde sich die Ausbreitung auf die Anwendungsgebiete mit direktem Körperzugang beschränken – also Nahrung, Körperpflege und Heilmittel –, wäre eine grobe Risikoabschätzung noch möglich; nicht aber, wenn die Ausbreitung über die Umwelt, die Luft und das Trinkwasser geschieht.

Zumindest theoretisch stehen Nanopartikeln diese Wege offen. Ferner wären viele der künstlich hergestellten Nanopartikel bis zum Hersteller zurückverfolgbar und somit die Haftbarmachung wahrscheinlicher als dies bei ubiquitär vorhandenen Schadstoffen wie zum Beispiel den ultrafeinen Partikeln aus Dieselabgasen der Fall ist.

Wenn also die Risiken der nanotechnischen Produkte beurteilbar und handhabbar sein sollen, müssen sie besonders auf ihre Langzeittoxizität untersucht werden. Vermutlich sind dazu sogar neuartige Testmethoden und Versuchsanordnungen notwendig.

Es wird für die Versicherer nicht einfach sein, die potenziellen Risiken zu erkennen, weil sich sowohl die Herstellung als auch – und dies vor allem – die Anwendung von Nanomaterialien sehr vielfältig durchsetzen wird. Zu den frühen Anwendungsgebieten zählen Pigmentierungen, Oberflächenvergütungen und Beschichtungen verschiedenster Art. Auch die Kosmetik- und Haushaltsproduktehersteller nutzen die speziellen Eigenschaften von nanotechnologischen Stoffen bereits, sowie die Elektronik-, Automobil- und Flugzeugindustrie. Experten sind sich aber einig, dass das grösste Nutzungspotenzial zur Zeit im Bereich der Medizin und Pharmazie liegt. Bei Heilmitteln möchte man durch die Hilfe von Nanopartikeln die Wirkstoffe ja gezielt in die Organe hineintransportieren. Erkenntnisse über potenzielle Nebenwirkungen wird man in einzelnen Fällen erst mit der Zeit erlangen. Für die Abschätzung des Produkthaftpflichtrisikos solcher neuer Medikamente gilt wie bis anhin: Das Schadenpotenzial unerwarteter Nebenwirkungen nimmt mit der Dauer bis zur Schadenmanifestierung und mit der Marktdurchdringung zu; Dabei sind lifestyle-Präparate bezüglich ihrer Klagewahrscheinlichkeit aufgrund von Nebenwirkungen exponierter als lebenserhaltende Heilmittel.

**«Die häufig geäusserte Forderung nach absoluter Sicherheit, Kontrollierbarkeit und Reversibilität ist nicht erfüllbar und bedeutet eine Verkenning der Tatsache, dass jede Technologie nicht nur Probleme löst, sondern auch welche schafft. Je weniger neu geschaffene Risiken allgemein akzeptiert werden, und je weniger auf Mittel zu deren Bewältigung vertraut wird, desto eher werden die möglichen Negativfolgen jeder neuen Technologie auch für die Assekuranz zum Problem.»**  
*Swiss Re: Gentechnik und Haftpflichtversicherung. 1998.*

### 7.2 Das Risk Management der Versicherer

Die Versicherer werden bezüglich nanotechnologischer Risiken für geraume Zeit mit Unsicherheiten leben müssen, das heisst, sie werden weder die Schadenseintrittswahrscheinlichkeit noch das mögliche Schadenausmass kennen. Dies ist so lange tragbar, bis sich die Einzelschäden – der technischen Entwicklung folgend – quasi evolutionär entwickeln, und der Versicherer seine Risiko-Management-Massnahmen laufend anpassen kann. Was aber vermieden werden muss, ist der unvorhersehbare, ruinöse Kumulschaden, wie er durch eine Spätschaden-Klageflut ausgelöst werden kann. Wie immer, wenn das Haftpflichtrisiko unberechenbar ist, muss der Versicherer sein Engagement so limitieren, dass er wenigstens sein eigenes «worst-case»-Schadenszenario abschätzen kann. Zu den wichtigsten schadenlimitierenden Massnahmen gehören unter anderem jene, die einen Serienschaden versicherungstechnisch begrenzen. Einmal durch die Zuordnung zu einer Serie – allenfalls sogar zu einem Event. Im Falle der Zuordnung zu einem Event müsste dieser betraglich limitiert sein und wäre auf diese Weise für die Assekuranz tragbar.

Durch «claims made»-Deckungen, beziehungsweise Schadensdefinitionen und exakte Beschreibungen des Schadeneintrittverständnisses kann das Problem des «stacking of limits» vermieden werden. Schäden, die über die Zeit anfallen, sollten mittels Schadenserienklausel zeitlich klar zugeordnet werden können, idealerweise auf jenes Jahr, in dem der erste Schaden der Serie bekannt wurde. Der hohe Deckungsbedarf für eine potenzielle Serienschadens-Exponierung soll ausschliesslich über die entsprechende Festlegung der Deckungsstrecken und gegebenenfalls hohe Limiten erreicht werden.

Deckungen, die «fear of claims»-Schäden zulassen, sollten nicht gewährt werden. Ferner sollten die Bedingungen für das Schadenreporting dem Umstand Rechnung tragen, dass ein Serienschaden entstehen könnte.

### 7.3 Herausforderung für die Risikokommunikation

Was die Nanotechnologie eigentlich darstellt, welche besonderen Qualitäten Nanoprodukte haben können und welches die möglichen Risiken sind, ist dem Laien zurzeit oftmals noch unklar.

Es handelt sich nicht nur um eine äusserst vielseitige Technologie, sondern die Herstellungsprozesse und die Wirkungsmechanismen von nanotechnischen Produkten bleiben dem Betrachter, Anwender und Konsumenten auch weitgehend verschlossen. Möglicherweise wird dies in der Gesellschaft zu Unsicherheit und Skepsis führen, besonders dann, wenn eine öffentliche Diskussion über die verschiedenen Risikoaspekte in Gang kommt.

Im Gegensatz zur Debatte über die Kernenergie oder die Gentechnik sieht die Öffentlichkeit in der Nanotechnologie zurzeit noch keine eminente Gefahr. Vielen ist die Einführung dieser neuen Technologie noch gar nicht bewusst. Das zunehmende Medieninteresse seit Anfang 2003 könnte diese Situation jedoch ändern und zu einer Diskussion über Nutzen und Risiken führen. Ob die Öffentlichkeit die neue Technologie akzeptiert und Vorteile für sich darin sieht, oder ob sie diese ablehnt, wird stark davon abhängen, wie gut sie informiert und in der Lage sein wird, objektiv zu urteilen.

#### «Public Issues»

Public Issues sind Anliegen von Anspruchsgruppen, die sich auf ihrem Weg über die veröffentlichte und die öffentliche Meinung zum Politikum mausern. Einmal auf die politische Agenda gekommen, ist die Anpassung von Gesetzen und der Rechtsprechung nur noch eine Frage der Zeit.

**«Da es keine überzeugenden Belege dafür gibt, dass die heutigen Belastungen mit Karzinogenen unbedenklich sind, ist es klüger, das Vorsorgeprinzip anzuwenden und davon auszugehen, dass sie bedenklich sind. Besonders wenn für die Erkrankungen (bzw. die ökologischen Auswirkungen) durch höhere Belastungen kein Schwellenwert der Exposition bekannt ist, unterhalb dessen keine Wirkungen zu erwarten sind.»**  
*David Gee und Morris Greenberg<sup>20</sup>*

Sicher ist, dass die Nanotechnologie über kurz oder lang zum «Public Issue» wird. Spätestens seit die Gentechnologie ins gesellschaftliche Bewusstsein kam, weiss man, dass der Protest aus der Gesellschaft dazu führen kann, die Weiterentwicklung einer neuen Technologie zu bremsen. Demnach muss es im Interesse der Industrie und Wirtschaft sein, sich mit den Bedenken und Bedürfnissen der Gesellschaft zu befassen und diese in die weitere Entwicklung mit einzubeziehen.

Der Konsument erhält viele und teilweise recht widersprüchliche Informationen, die auf ihn einwirken. So erreichen ihn nicht nur die gute Botschaft der Produktinnovation, sondern auch Warnungen und Bedenken. Offene und verantwortungsvolle Risikokommunikation ist Aufgabe aller Wissensträger und vornehmlich auch der produzierenden Industrie. Es braucht den Dialog zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Behörden sowie der Öffentlichkeit. Als Risikoträger sollte es die Assekuranz als ihre Pflicht erachten, auch mit dem Gesetzgeber den Risikodialog zu führen.

#### 7.4 «Lesson learnt»

Die Zeit drängt: Hat sich eine bestimmte Meinung erst einmal in der Gesellschaft durchgesetzt, ist es äusserst schwierig, langwierig und aufwändig, diese vom Gegenteil zu überzeugen. Die Öffentlichkeit muss sich vielmehr von Anfang an bewusst sein, dass eine neue Technologie nicht nur Probleme löst, sondern auch Probleme schafft, was wiederum zur Entstehung neuer Risiken führen kann.

Es hängt von einer Reihe subjektiver Wahrnehmungen ab, wie Menschen Risiken einschätzen. Die so genannten «Angstfaktoren» (siehe Kasten Seite 46) geben Auskunft darüber, ob ein Thema potenziell Furcht auslösen kann und damit als Bedrohung wahrgenommen wird. Zu diesen Faktoren zählt unter anderem der Ursprung eines Risikos. Ist es eine neue und von Menschenhand geschaffene Technik und damit «hausgemachter Ärger», oder handelt es sich um ein natürlich vorkommendes Phänomen, mit dem Menschen schon über Generationen hinweg konfrontiert wurden? Wird der zu erwartende Schaden irreversibel sein, löst dieser Umstand weit mehr Angst aus als wenn man glaubt, dagegen etwas machen zu können.

Angst machen auch jene Risiken, die einem aufgezwungen werden, und gegen die man sich nicht eigenständig entscheiden kann: Die Produktedeklaration ist aus diesem Grund sehr wichtig. Erst sie versetzt den Konsumenten in die Lage, ein Risiko freiwillig zu akzeptieren oder es abzulehnen. Das Risiko selbst ist wissenschaftlich schwer zu beurteilen und in Forschungskreisen teilweise stark umstritten. Vor allem widersprüchliche Aussagen von Wissenschaft und Behörden führen deshalb in der Öffentlichkeit zu Misstrauen. Auch kontroverse Aussagen von Fachleuten zu Risiken verstärken die Angst.

Uneinigkeit herrschte bislang unter Wissenschaftlern bezüglich der Frage, was der wichtigste Faktor für die potenzielle Toxizität von Nanopartikeln sein könnte. Die Antworten sind eher widersprüchlich, was der Vertrauensbildung bekanntlich abträglich ist, wie die kontrovers geführte Diskussion über die BSE-Risiken Anfang der Neunzigerjahre eindrucksvoll zeigte.

<sup>20</sup> Gee, David, Greenberg, Morris: «Asbestos: from «magic» to malevolent mineral». In: *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000*. EEA Environmental Issue Report Nr. 22, 2001. S. 52–63.

## 7 Auswirkungen auf die Versicherung

### Angstfaktoren

Warum lösen manche Risiken so viel mehr Beunruhigung, Angst oder Aufregung als andere aus, offenbar ungeachtet der wissenschaftlichen Einschätzung ihrer eigentlichen Bedenklichkeit? Die Forschung in der so genannten «psychometrischen» Tradition (Fischhoff et al. 1978, 1991; Slovic 1986; Gardner und Gould 1989) hat über viele Jahre versucht, Antworten auf diese Schlüsselfrage zu finden. Daraus sind einige mehr oder weniger allgemein anerkannte Faustregeln hervorgegangen.

Ein Risiko ist im Allgemeinen besorgniserregender (und wird weniger akzeptiert), wenn es wahrgenommen wird als:

1. *Unfreiwilliges Risiko* (z. B. Belastung durch Umweltverschmutzung) und nicht als aus freiem Willen oder auf eigene Gefahr in Kauf genommen (z.B. gefährliche Sportarten oder das Rauchen).
2. *Ungerecht verteiltes Risiko* (einige Menschen profitieren davon, während andere unter den Folgen zu leiden haben).
3. Risiko, das auch durch persönliche Vorsichtsmassnahmen *nicht vermeidbar* ist.
4. Risiko mit *unbekannter* oder *neuartiger* Ursache.
5. *Von Menschenhand geschaffenes, nicht naturgegebenes* Risiko.
6. Ein Risiko, das *unsichtbare* und *irreversible* Schädigungen verursacht, z. B. indem sich Erkrankungen erst viele Jahre nach einer Exposition manifestieren.
7. Ein Risiko, das besonders *kleine Kinder* oder *Schwangere* oder ganz allgemein die *nachfolgenden Generationen* gefährdet.
8. Eine Bedrohung, durch eine *besonders gefürchtete* Art zu sterben (durch eine schwere Erkrankung oder Verletzung).
9. Risiko, dessen *Opfer nicht anonym, sondern Menschen sind, die man kennt*.
10. Ein Risiko, über das *die Wissenschaft nur wenige Erkenntnisse hat*.
11. Ein Risiko, über das *widersprüchliche* Aussagen von verantwortlichen Stellen (oder, was noch schlimmer ist, von ein und derselben Stelle) vorliegen.

Mit freundlicher Genehmigung der Oxford University Press.<sup>21</sup>

### *Gesellschaft als Meinungsträger*

Wie wird sich die Gesellschaft also im Hinblick auf die Verbreitung der Nanotechnologie entscheiden? Wird sie die Technologie unterstützen, weil man erkennt, dass diese Technologie zweifellos eine Reihe von verschiedenen Vorteilen bringt? Oder wird sie der weiteren Entwicklung skeptisch gegenüberstehen, weil die Frage nach den möglichen Risiken nicht zufrieden stellend beantwortet wurde?

Tatsache ist, dass bis heute wenige Stimmen in der Öffentlichkeit laut geworden sind. Noch hat sie sich keine Meinung bilden können; zu wenige Menschen sind sich der Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie überhaupt bewusst. Selbst der Begriff «Nanotechnologie» ist Vielen bislang unbekannt. Sie verbinden mit dem Ausdruck «Nano» daher auch weder ein «positives» noch «negatives» Image – ein Zustand, der sich allerdings sehr schnell ändern kann. Ein negativ wahrgenommenes Ereignis mit einem nanotechnologisch hergestellten Produkt oder ein Medienereignis zum Thema Nanotechnologie kann das wertende Bewusstsein der Bevölkerung spontan wachrütteln.

Der Bestseller «Prey» des «Jurassic Park»-Autoren Michael Crichton beschreibt ein Horror-Szenario, bei dem die Welt beinahe an den Folgen der unsachgemässen Anwendung der Nanotechnologie zu Grunde geht. Dabei spielen intelligente Nanopartikel, die sich unkontrolliert vermehren können, die Hauptrolle.

Fakten und Fiktion werden in der Geschichte miteinander so verbunden, dass der Leser ohne thematische Vorkenntnisse nicht einfach das eine vom anderen zu unterscheiden weiss. Dass der gesamte Bereich der künstlichen Intelligenz und des «self-assembly» noch weit von jeglicher Umsetzung entfernt ist – falls überhaupt jemals möglich –, erfährt der Leser und demnächst im Kino der Zuschauer nicht. Folglich könnte er die Nanotechnologie hauptsächlich mit künstlicher Intelligenz und bedrohlichen Szenarien in Verbindung bringen.

<sup>21</sup> Bennett, Peter und Calman, Kenneth (1999): *Risk Communication and Public Health*. Oxford University Press. Box 1.1, S. 6.

## 7.5 Das Vorsorgeprinzip («precautionary principle»)

Die zuständigen Behörden haben die schwierige Aufgabe, für die sichere Handhabung der nanotechnologischen Produkte und Applikatoren im Hinblick auf deren rasche Verbreitung in der Gesellschaft zu sorgen. Ohne wissenschaftlich fundierte Kenntnisse der damit verbundenen Risiken ist dies nach den geltenden Gesetzen aber nur schwer möglich.

Es muss also ein sinnvoller Weg gefunden werden, der einerseits die Forschung und Entwicklung im technologischen Sinne zulässt, andererseits aber auch den bestmöglichen Schutz vor möglichen Gefahren für Mensch und Umwelt bietet. Dieses Dilemma verhindert die Einführung des so genannten Vorsorgeprinzips für neue Technologien bereits seit mehr als 20 Jahren. Das Vorsorgeprinzip fordert nämlich auch die proaktive Einführung von Schutzmassnahmen angesichts möglicher Risiken, die von der Wissenschaft heute – aufgrund mangelnden Wissens – weder bestätigt noch dementiert werden können.

Nach dem Prinzip «better safe than sorry» sollten frühzeitig notwendige Massnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt eingeführt werden, auch wenn die wissenschaftlichen Unsicherheiten bezüglich der Risiken noch nicht endgültig geklärt worden sind. «Die Abwesenheit von eindeutigen Hinweisen auf potenzielle Gefahren soll kein Grund sein, um mögliche, ökonomisch vertretbare Schutzmassnahmen nicht einzuführen», wird in der Rio Convention von 1992 festgehalten (*«...where there are threats of serious or irreversible damage, lack of scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation»*).<sup>22</sup>

Ob und in welchem Entwicklungsstadium solche Massnahmen etabliert werden sollen, ist schwierig zu entscheiden. Einerseits möchte man nicht unnütz teure Schutzmassnahmen ergreifen, die sich möglicherweise negativ auf die weitere wirtschaftliche Entwicklung auswirken könnten. Andererseits dürfen weder Mensch noch Umwelt mit Gefahren belastet werden, die hätten vermieden werden können.

Das Dilemma um das Vorsorgeprinzip ist zurzeit in einer Reihe von öffentlichen Diskussionen ein Thema, wie zum Beispiel bei der mobilen Kommunikation oder bei gentechnisch veränderten Lebensmitteln. Bisher konnte trotz aller Anstrengungen auf internationaler Ebene kein, alle Akteure befriedigendes allgemeingültiges Vorsorgeprinzip vereinbart werden, weil sich die Details in den jeweils zur Entscheidung stehenden Situation individuell unterscheiden.

In Anbetracht der möglichen Gefahren, die sich durch eine Etablierung der Nanotechnologie für die Gesellschaft ergeben könnten, und der derzeit herrschenden Unsicherheit in wissenschaftlichen Kreisen, müsste das Vorsorgeprinzip trotz aller Schwierigkeiten zur Anwendung kommen. Das heisst, der Umgang mit nanotechnologisch hergestellten Stoffen sollte sorgfältig abgeschätzt werden und mit adäquaten Schutzmassnahmen einhergehen. Dies ist zurzeit besonders wichtig für Personen, die beruflich regelmässig mit Nanopartikeln exponiert sind. Ausserdem sollte jeder vertretbare Aufwand betrieben werden, um die derzeitigen Unsicherheiten zu klären, die von nanotechnologischen Risiken ausgehen.

<sup>22</sup> Rio Convention (1992): «United Nations Conference on Environment and Development: Rio Declaration on Environment and Development, 14. Juli 1992» in: *International Legal Materials* 31, S. 874–879.

## 7 Auswirkungen auf die Versicherung

Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Risikoabschätzung einer so vielschichtigen Technologie wie der Nanotechnologie ist es, zwischen den betroffenen Wirtschaftsvertretern, Gesetzgebern und Forschungsinstituten einen Konsens zu finden. Ein Konsens, der sich auch über die Ländergrenzen hinweg erstreckt. Nur, wenn die vielen offenen Fragestellungen strukturiert und organisiert angegangen werden, kann der Versuch Erfolg haben, die Risiken zu analysieren.

Die Last der Forschungsarbeit muss auf viele Schultern verteilt werden. Weder einzelne Industrieunternehmen noch öffentliche Institute sind in der Lage, allein genügend Kapazitäten für deren Klärung zu beschaffen. Obwohl es Institute und Firmen gibt, die mittlerweile eigene Risikoanalysen durchführen und diese parallel zur Produktentwicklung finanzieren, kann es nicht die Aufgabe einzelner Unternehmen sein, die Bürde des Unbedenklichkeitsnachweises alleine zu tragen. Um ein umfassendes Bild der Risikolandschaft zu zeichnen, würde die Bemühung Einzelner ausserdem wohl kaum ausreichen. Zur besseren Koordination dieser Anstrengungen bräuchte es eine gewisse Standardisierung mit entsprechenden Rahmenbedingungen, angefangen bei der Nomenklatur.

Gewisse Unbedenklichkeitsnachweise und Langzeitstudien sollten gesetzlich verankert und mit entsprechenden Forschungsgeldern auf verschiedene Forschungsinstitute verteilt werden. Auch die Industrie müsste ihren Beitrag dazu leisten, indem sie sich aktiv an der Risikoforschung und in der Risikokommunikation in der Gesellschaft beteiligt.

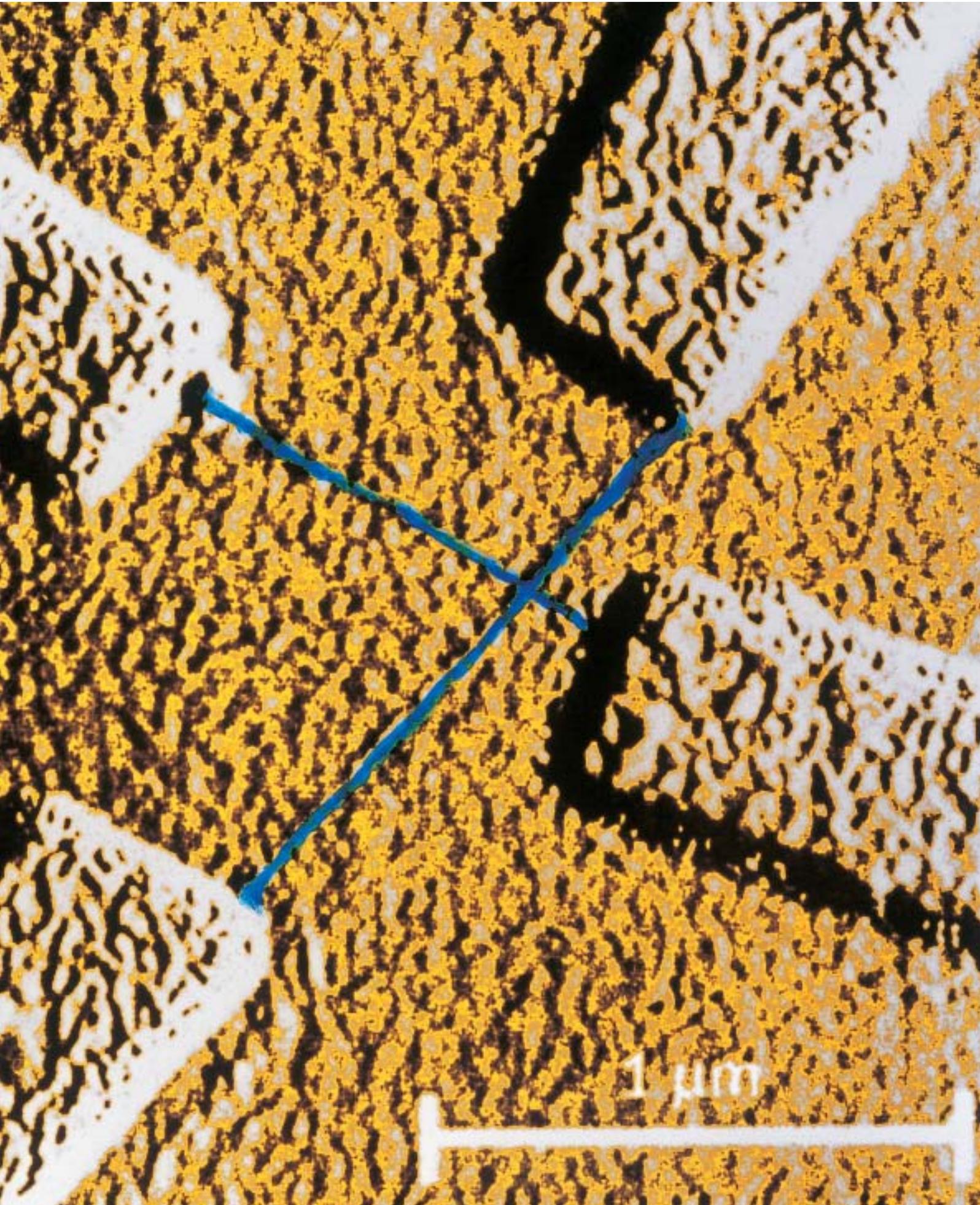
### 7.6 Die Assekuranz als Partner

Die Assekuranz hat die Aufgabe, Unsicherheiten und Risiken von ihren Geschäftspartnern zu übernehmen – im Fall von neuen Technologien sind es vor allem Unsicherheiten. Das heisst: Weder Wahrscheinlichkeit noch Ausmass der möglicherweise eintretenden Schäden sind berechenbar – dies im Gegensatz zur grossen Anzahl bekannter Risiken eines Versicherungsportfeuillees, die dank der Schadenerfahrung beziffert werden können.

Besonders mit der Übernahme von Unsicherheiten leistet die Assekuranz einen wichtigen Beitrag, der den technischen Fortschritt und das Eingehen von Wagnissen erleichtert oder ermöglicht. Sie wäre aber kein guter Partner der Wirtschaft, wenn sie ihr Geschäft unwissend betreiben und blindlings Verpflichtungen übernehmen würde. Die Versicherungsindustrie ist deshalb bestrebt, Risiken zu erkennen, zu analysieren und zu bemessen, damit die Übernahme nicht zum Abenteuer wird. Risiken zu beurteilen und kalkulierbar zu machen, ist ihre Stärke zum Nutzen aller. Dabei ist sie aber angewiesen auf den Wissensaustausch und Risikodialog mit allen Vertretern einer Risikogemeinschaft.

Nur wer ein klares Bild von der Risikolandschaft hat, kann im Risikogeschäft ein zuverlässiger Partner sein.

Darstellung zweier sich kreuzender Transistoren im Atomic Force Mikroskop (AFM) bei einem Masstab von 1  $\mu\text{m}$ .



# Anhang

## Anhang 1: Zusammenfassung von Applikationen im Informatiksektor

Material/technique	Applications	Time-scale (to market launch)
<b>Pre 2015</b>		
Quantum well structures (pers. comm., Gareth Barry, Imperial College London, 22 Nov 2002)	Telecommunications/optics industry. Potentially very important applications in laser development for the data communications sector.	Quantum well lasers already utilised in CD players. Not yet optimised for the communications market (ie fibre optics): 4–5 years.
Quantum dot structures (source as above)	The aim is to use fibre optic communication in building and computers. The problems are cost and high temperature operating conditions. Quantum well/dot structures can potentially solve this problem.	Quantum dots still in research stage: 7–8 years.
Photonic crystal technologies (Miles and Jarvis, 2001)	Optical communication sector, ie fibre optics. Photonic integrated circuits can be nearly a million times denser than electronic ones. Their tighter confinement and novel dispersion properties also open up opportunities for very low power devices.	Still in basic R&D, but very strong commercial interest emerging.
Carbon nanotubes in nanoelectronics. These hold promise as basic components for nanoelectronics – they can act as conductors, semiconductors and insulators (Holister, 2002)	Memory and storage; commercial prototype nanotube-based (non-volatile); RAM; display technologies; E-paper.	Commercial prototype nanotube-based RAM predicted in 1–2 years.  Consumer flat screen by the end of 2003.  Limited commercialisation of E-paper in 1–2 years.
Spintronics – the utilisation of electron spin for significantly enhanced or fundamentally new device functionality (Science Blog, 2002)	Ultra-high capacity disk drives and computer memories.	A read head has been demonstrated that can deal with storage densities of a terabit per square inch. In 2001, Fuji announced a new magnetic coating promising a 3-gigabyte floppy disk.
Polymers (Compano, 2001)	Display technologies – this sector is driven by the electronics consumer market.	Some commercialisation, eg Cambridge Display Technologies has been formed specifically to exploit this technology.
<b>Post 2015</b>		
Molecular nanoelectronics (including DNA computing) (Compano, 2001)	Circuits based on single molecule and single electron transistors will appear, initially in special applications.	Single atom transistor demonstrated recently. Still immature, but huge potential (Miles and Jarvis, 2001).
Quantum information processing (QIP) (Compano, 2001)	Several researchers have devised algorithms for problems that are very computationally intensive (and thus time-consuming) for existing digital computers, which could be made much faster using the physics of quantum computers. eg factoring large numbers (essential for cryptographic applications), searching large databases, pattern matching, simulation of molecular and quantum phenomena (Anton et al., 2001).	Still in pure research phase, although some US defence money has been made available (Holister, 2002).

*Als Quelle diente der nur in englischer Originalsprache erschienene Bericht von Greenpeace Environmental Trust (Hg.): Future Technologies, Today's Choices. Juli 2003. Seite 26.*

## Anhang 2: Zusammenfassung von Applikationen im Nanometerbereich für Pharmazie und Medizin

Material/technique	Property	Applications	Time-scale (to market launch)
<b>Diagnostics</b>			
Nanosized markers ie the attachment of nanoparticles to molecules of interest (Holister, 2002)	Minute quantities of a substance can be detected, down to individual molecules.	eg detection of cancer cells allow early treatment.	?
«Lab-on-a-chip» technologies (Saxl, 2000)	Miniaturisation and speeding up of the analytical process.	The creation of miniature, portable diagnostic laboratories for uses in the food, pharmaceutical and chemical industries; in disease prevention and control; and in environmental monitoring	Although chips currently cost over GBP 1250 (USD 2085) each to make, within three years the costs should fall dramatically, making these tools widely available.
Quantum dots (pers. comm., Gareth Barry, Imperial College London, 22 Nov 2002)	Quantum dots can be tracked very precisely when molecules are «bar coded» by their unique light spectrum.	Diagnosis	In early stage of development, but there is enough interest here for some commercialisation (eg Q-dot-Inc.).
<b>Drug delivery</b>			
Nanoparticles in the range of 50–100 nm (Miles and Jarvis, 2001)	Larger particles cannot enter tumour pores while nanoparticles can easily move into a tumor.	Cancer treatment	?
Nanosizing in the range of 100–200 nm (Miles and Jarvis, 2001)	Low solubility	More effective treatment with existing drugs.	?
Polymers (Holister, 2002)	These molecules can be engineered to a high degree of accuracy.	Nanobiological drug carrying devices.	?
Ligands on a nanoparticle surface (Holister, 2002)	These molecules can be engineered to a high degree of accuracy.	The ligand target receptors can recognise damaged tissue, attach to it and release a therapeutic drug.	?
Nanocapsules (Holister, 2002)	Evading body's immune system whilst directing a therapeutic agent to the desired site.	A Buckyball-based AIDS treatment is just about to enter clinical trials (Ho, 2002a).	Early clinical.
Increased particle adhesion (Holister, 2002)	Degree of localised drug retention increased.	Slow drug release	?
Nanoporous materials (Holister, 2002)	Evading body's immune system whilst directing a therapeutic agent to the desired site.	When coupled to sensors, drug-delivering implants could be developed.	Pre-clinical: an insulin-delivery system is being tested in mice.
«Pharmacy-on-a-chip» (Saxl, 2000)	Monitor conditions and act as an artificial means of regulating and maintaining the body's own hormonal balance.	eg Diabetes treatment	More distant than «lab-on-a chip» technologies.
Sorting biomolecules (Holister, 2002)	Nanopores and membranes are capable of sorting, for example, left and right-handed versions of molecules.	Gene analysis and sequencing.	Current–?
<b>Tissue regeneration, growth and repair</b>			
Nanoengineered prosthetics (Miles and Jarvis, 2001)	Increased miniaturisation; increased prosthetic strength and weight reduction; improved biocompatibility.	Retinal, auditory, spinal and cranial implants.	Most immediate will be external tissue grafts; dental and bone replacements; internal tissue implants (Miles and Jarvis, 2001).
Cellular manipulation (Miles and Jarvis, 2001)	Manipulation and coercion of cellular systems.	Persuasion of lost nerve tissue to grow; growth of body parts.	More distant: 5–7 years

*Als Quelle diente der nur in englischer Originalsprache erschienene Bericht von Greenpeace Environmental Trust (Hg.): Future Technologies, Today's Choices. Juli 2003. Seite 28.*

**Anhang 3: Zusammenfassung von Applikationen im Energiesektor**

<b>Material/techniques</b>	<b>Applications</b>	<b>Time-scale (to market launch)</b>
<b>Power generation (PV technology)</b>		
Polymer materials (organic)	Solar cells (pers. comm., Jenny Nelson, Imperial College London, 2 Dec 2002). Current developments aim to balance moderate efficiency with low cost. Another big advantage is that these layers can easily be incorporated into appliances. Current problems stem from the material's instability.	The research stage has advanced much more quickly than expected. As a result, polymer-based PV cells should enter the market in 5 years.
Combinations of organic and inorganic molecules	Dye-sensitised solar cells made from a thin hybrid layer (pers. comm., Jenny Nelson, Imperial College London, 2 Dec 2002). These cells are potentially very cheap because fabrication is from cheap, low purity materials by simple and low cost procedures (Saxl, 2000). Photocatalytic water treatment.	Low power applications will enter market first. Limited commercialisation already occurring (eg by Sustainable Technologies International).
Quantum wells (inorganic)	Quantum-well solar cells (pers. comm., Jenny Nelson, Imperial College London, 2 Dec 2002). Current research is taking place in high-efficiency applications because the infrared part of the solar spectrum may be absorbed.	Pure research
Nanorods	These structures can be tuned to respond to different wavelengths of light forming cheap and efficient solar cells (Holister, 2002).	Long-term
<b>Fuel conversion /storage</b>		
Improved fuel catalysts through nanostructuring	Fuel conversion (Saxl, 2000).	Current – 3 years
Nanotubes	Fuel storage. eg a methane-based fuel cell for powering mobile phones and laptops is currently being developed (Holister, 2002).	2 years
Nanoparticles	Vastly increased (eg x 10) charge and discharge battery rate (Holister, 2002).	Distant

*Als Quelle diente der nur in englischer Originalsprache erschienene Bericht von Greenpeace Environmental Trust (Hg.): Future Technologies, Today's Choices. Juli 2003. Seite 29.*

# Quellen

- 3i (Hg.): *Nanotechnology – size matters. Building a successful nanotechnology company*. White Paper, 10. Juli 2002.
- Bennett, Peter und Calman, Kenneth (1999): *Risk Communication and Public Health*. Oxford University Press.
- Colvin, Vicki L.: «Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News.» in: *EurekaAlert! Nanotechnology in context*. November 2002. [www.eurekaalert.org](http://www.eurekaalert.org)
- Colvin, Vicki L.: «The potential environmental impact of engineered nanomaterials» in: *Nature Biotechnology* (2003), Volume 21, Nr. 10, S. 1166–1170.
- Crichton, Michael (2002): *Prey*. Harper Collins.
- Etc Group (Hg.): *The big down*. Januar 2003.
- Feder, Barnaby J.: «As uses grow, tiny materials' safety is hard to pin down». in: *New York Times*, 3. November, 2003.
- Feynman, Richard P. (1959): *There's plenty of room at the bottom. An invitation to enter a new field of physics*.
- Forbes Nanotechreport, September 2003, Vol. 2, Nummer 9.
- Gee, David, Greenberg, Morris: «Asbestos: from «magic» to malevolent mineral». In: *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000*. EEA Environmental Issue Report Nr. 22. 2001. S. 52–63.
- Greenpeace (Hg.): *Future Technologies, Today's Choices*. Greenpeace report Juli 2003.
- Jopp, Klaus (2003): *Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge*. Gabler.
- LaVan, D.A., Langer, R.: «Implications of Nanotechnology in the Pharmaceuticals and Medical fields» in: Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (Hg.): *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Arlington, USA: National Science Foundation. 2001. S. 77–83.
- «Nanotechnology: Shaping the World Atom by Atom». [www.nano.gov](http://www.nano.gov)
- Patriquin, Martin: «Small matter provokes a major debate» in: *Toronto Globe and Mail*. 19. November 2003.
- Regis, Ed. (1995): *Nano: The emerging science of Nanotechnology: remaking the world – molecule by molecule*. Little, Brown and Company.
- Rio Convention (1992): «United Nations Conference on Environment and Development: Rio Declaration on Environment and Development, 14. Juli 1992» in: *International Legal Materials* 31, S. 874–879.
- Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (Hg.): *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Arlington, USA. National Science Foundation. 2001.
- Thayer, Ann (2002): «Nanotech meets market realities» in: *Chemical & Engineering News*.
- Wolfe, J. (Hg.): «Will Nanotech preserve Moore's Law?» in: *Nanotech Report*. Forbes Wolfe. September 2003, Ausgabe 2, Nr. 9. [www.forbesnanotech.com](http://www.forbesnanotech.com)
- *Venture Capital Magazine*, November 2002.
- [www.nanoword.net](http://www.nanoword.net)
- [www.net-lexikon.de](http://www.net-lexikon.de)
- [www.osha.eu.int](http://www.osha.eu.int)

Diese Publikation basiert auf einer Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen sowie wertvollen Beiträgen einzelner Institute und Universitäten. Eine umfassende Literaturliste kann bestellt werden bei:  
Swiss Reinsurance Company  
Kennwort: «Nano-Literaturliste»  
Postfach  
8022 Zürich  
Schweiz

# Weitere Publikationen in der Reihe «Risk Perception»

## **Die Versicherbarkeit von Terrorismusrisiken in der Sachversicherung nach dem 11. September 2001**

Die Publikation «Die Versicherbarkeit von Terrorismusrisiken in der Sachversicherung nach dem 11. September 2001» beschäftigt sich mit der Identifizierung, Abschätzung und Versicherbarkeit von Terrorismusrisiken sowie damit, wie sich diese Risiken verändert haben und die Risikogemeinschaft mit ihnen umgeht. Zudem vergleicht sie die Versicherbarkeit von Terrorismusrisiken vor und nach dem 11. September 2001 und gibt einen Überblick über die Lösungen und Lösungsansätze in verschiedenen Ländern.  
*Bestell-Nr.: 149873\_03\_en/de/fr*

## **Elektromog – ein Phantomrisiko**

Elektromagnetische Felder sind ein Beispiel für so genannte Phantomrisiken, für denkbare Gefahren also, deren Grösse nicht zu bemessen ist, die vielleicht nicht einmal existieren, die aber dennoch wirklich sind. Und sei es nur, indem sie Ängste hervorrufen und Klagen provozieren. Für die Assekuranz sind diese Risiken gefährlich, weniger wegen des unkalkulierbar kleinen Gesundheitsrisikos als vielmehr wegen des unkalkulierbar grossen gesellschaftspolitischen Änderungsrisikos.  
*Bestell-Nr.: 203-9677\_en/de/fr/it/pt/es*

## **Präventive Schadenbewältigung: Mehr gewinnen als verlieren**

Trotz aller Schutzmassnahmen können Unternehmen plötzlich in existenzbedrohende Situationen geraten. Vom Management wird erwartet, dass es Schäden und deren Folgen bewältigen kann. Zu den klassischen Aufgaben des Risk Managements kommt deshalb die präventive Schadenbewältigung hinzu: die systematische Vorbereitung auf die Bewältigung von Schadenereignissen durch den Aufbau eines Notfall- und Krisenmanagements.  
*Bestell-Nr.: 203\_01295\_en/de*

## **Naturkatastrophen und Rückversicherung**

Trotz enormer Fortschritte in Wissenschaft und Technik bleiben Naturkatastrophen unvorhersehbar. Immerhin konnte in den letzten Jahrzehnten das Verständnis von Ursachen und Wirkungen solcher Extremereignisse stark verbessert werden. Die in dieser Publikation vorgestellten Konzepten verstehen sich also nicht als der Weisheit letzter Schluss, sondern vielmehr als Momentaufnahme von sich weiterentwickelnden Methoden – und damit auch als Einladung zur Diskussion.  
*Bestell-Nr.: 1493661\_03\_en/de/fr/es/ch*

## **Space weather – Gefahren aus dem Weltraum?**

Weltraumwetter gefährdet nicht bloss die Funktionsfähigkeit technischer Systeme, sondern beeinträchtigt auch die Gesundheit von Menschen. Erhöhte Sonnenaktivität kann daher viele Bereiche unserer zunehmend technisierten Welt treffen.  
*Bestell-Nr.: 203\_00223\_en/de*

## **Chancen und Risiken der Klimaänderung**

Die globale Erwärmung ist heute ein Faktum. Das Klima hat sich verändert: sichtbar, fühlbar, messbar. Und eine zusätzliche Erwärmung der durchschnittlichen globalen Temperatur ist sehr wahrscheinlich. Dabei spielt der menschliche Eingriff in das natürliche Klimasystem eine wichtige, wenn nicht entscheidende Rolle. Die Publikation zeigt auf, wie Resultate aus der Klimaforschung in praktische Massnahmen umgesetzt werden können, und macht die konkreten Folgen des Klimawandels sichtbar.  
*Bestell-Nr.: 1491585\_02\_en/de*

## **Sturm über Europa Ein unterschätztes Risiko**

Wie entstehen Winterstürme über Europa? Was ist ihr Schadenpotenzial? Wie geht die Versicherungswirtschaft mit diesem Risiko um? Spezialisten für Naturkatastrophen beschäftigen sich bei Swiss Re seit Jahren mit solchen Fragen – aus gutem Grund, wie «Lothar» und «Martin» im Dezember 1999 zeigten. In der Publikation wird nicht nur das Phänomen der europäischen Stürme thematisiert, sondern auch aufgezeigt, wie das Sturmrisiko modelliert und adäquate Prämien berechnet werden können.  
*Bestell-Nr.: 201\_00239\_en/de/fr*

## **Tropische Zyklone**

Jedes Jahr bilden sich über den tropischen Meeren etwa 80 Zyklone. Es ist unmöglich vorauszusagen, wann ein solcher Zyklon entsteht und welche Bahn er einschlagen wird. In der Publikation wird ein Konzept von Swiss Re zur Einschätzung des Risikos «Tropische Zyklone» vorgestellt. Dieses basiert auf Modellen zur Bewältigung von Naturgefahren, die von staatlichen Forschungsanstalten, kommerziellen Beratern, Brokern sowie Versicherungs- und Rückversicherungsgesellschaften entwickelt wurden.  
*Bestell-Nr.: 201\_9678\_en/de/fr/es*

Die Broschüre **Swiss Re Publications** enthält eine vollständige Übersicht über alle verfügbaren Publikationen von Swiss Re.  
*Bestell-Nr.: 1492220\_03\_en*

## **Wie bestellen?**

Um eine Publikation zu bestellen, schicken Sie eine Mail an [publications@swissre.com](mailto:publications@swissre.com) oder via unser Portal bei [www.swissre.com](http://www.swissre.com). Geben Sie den Titel der Publikation sowie die Bestellnummer an und welche der verfügbaren Sprachen Sie wünschen:

*Englisch: \_en*  
*Deutsch: \_de*  
*Französisch: \_fr*  
*Italienisch: \_it*  
*Portugiesisch: \_pt*  
*Spanisch: \_es*

**P&C-Publikationen von Swiss Re –  
realisiert von Technical Communications,  
Chief Underwriting Office.**



**Annabelle Hett**  
**Risk Engineering Services**  
**Chief Underwriting Office**

Annabelle Hett schloss ihr Studium in Veterinärmedizin mit einer Doktorarbeit in Radiologie und Nuklearmedizin ab und arbeitete zunächst als Tierärztin in einer Pferdeklinik. Dann übernahm sie eine Position im Bereich Epidemiologie beim Bundesamt für Veterinärwesen, wo sie sich vor allem mit BSE befasste und Forschungsprojekte in Zusammenarbeit mit dem NeuroCenter durchführte (dem Schweizer Referenzlabor für transmissible spongiforme Enzephalopathien bei Tieren). Daneben absolvierte Annabelle Hett eine Weiterbildung in Risikokommunikation. Bei Swiss Re arbeitet sie seit 2002 in der Abteilung Risk Engineering Services, wo sie momentan die Leitung von «SONAR» innehat, einem Netzwerk zur Früherkennung von Risikoindikatoren. Ausserdem befasst Annabelle Hett sich im Rahmen von mehreren Projekten mit Fragen der Identifikation, Analyse und Kommunikation von Risiken.

© 2004

Swiss Reinsurance Company

Titel:

Nanotechnologie

Kleine Teile – grosse Zukunft

Autorin: Annabelle Hett unter Mitarbeit verschiedener Co-Autoren

Redaktion/Produktion:

Technical Communications

Chief Underwriting Office

Grafische Gestaltung:

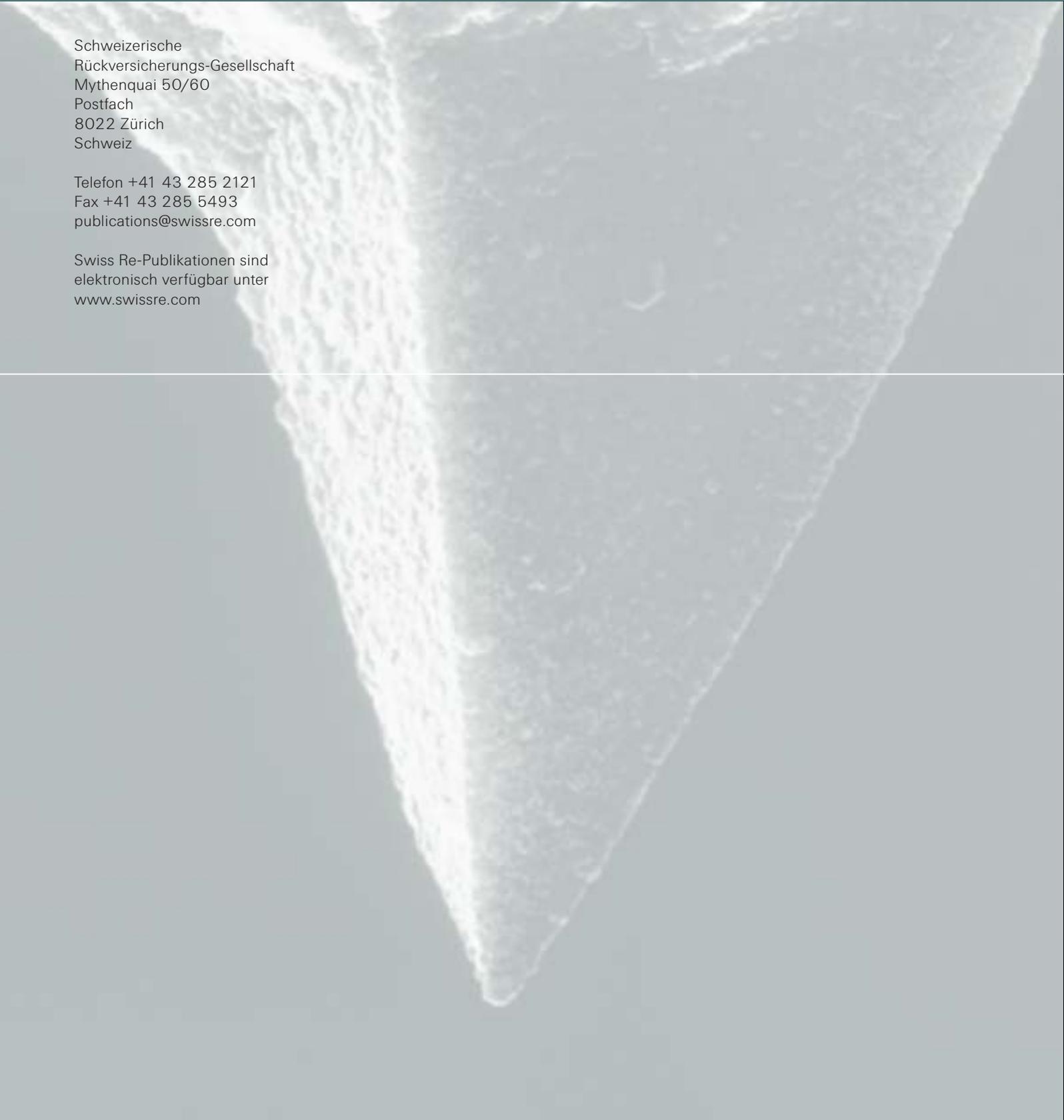
d signsolution, Zürich

Bildnachweis: H.R. Bramaz, Zürich

Umschlagbild: Diamantbeschichtete Siliziumspitze eines Atomic Force Mikroskop (AFM), das mit einem Rasterelektronenmikroskop aufgenommen wurde.

The material and conclusions contained in this publication are for information purposes only, and the author(s) offers no guarantee for the accuracy and completeness of its contents. All liability for the integrity, confidentiality or timeliness of this publication, or for any damages resulting from the use of information herein is expressly excluded. Under no circumstances shall Swiss Re Group or its entities be liable for any financial or consequential loss relating to this product.

Bestell-Nummer: 1501255\_04\_de  
Property & Casualty, 04/04, 3000 de



Schweizerische  
Rückversicherungs-Gesellschaft  
Mythenquai 50/60  
Postfach  
8022 Zürich  
Schweiz

Telefon +41 43 285 2121  
Fax +41 43 285 5493  
[publications@swissre.com](mailto:publications@swissre.com)

Swiss Re-Publikationen sind  
elektronisch verfügbar unter  
[www.swissre.com](http://www.swissre.com)