



WILEY-VCH

Gerd Ganteför

Alles **NANO** oder was?

Nanotechnologie
für Neugierige

ERLEBNIS
wissenschaft



Gerd Ganteför
Alles NANO oder was?

Weitere interessante und aktuelle Titel aus dem Sachbuchprogramm und der Reihe Erlebnis Wissenschaft – von Wiley-VCH

Synwoldt, C.

Umdenken

Clevere Lösungen für die Energiezukunft

2013

ISBN: 978-3-527-33392-9

Krause, M.

Wo Menschen und Teilchen aufeinanderstoßen

Begegnungen am CERN

2013

ISBN: 978-3-527-33398-1

Heering, A.

Jule und der Schrecken der Chemie

2013

ISBN: 978-3-527-33487-2

Schwedt, G.

Plastisch, elastisch, fantastisch

Ohne Kunststoffe geht es nicht

2013

ISBN: 978-3-527-33362-2

Böddeker, K. W.

Denkbar, machbar, wünschenswert?

Wie Technik und Kultur die Welt verändern

2013

ISBN: 978-3-527-33471-1

Kricheldorf, H. R.

Menschen und ihre Materialien

Von der Steinzeit bis heute

2012

ISBN: 978-3-527-33082-9

Gross, M.

Von Geckos, Garn und Goldwasser

Die Nanowelt lässt grüßen

2012

ISBN: 978-3-527-33272-4

Heuer, A.

Der perfekte Tipp

Statistik des Fußballspiels

2012

ISBN: 978-3-527-33103-1

Lutzke, D.

Surfen in die digitale Zukunft

2012

ISBN: 978-3-527-32931-1

Ganteför, G.

Klima – Der Weltuntergang findet nicht statt

2012

ISBN: 978-3-527-32863-5

Booker, R. D., Boysen, E.

Nanotechnologie für Dummies

2006

ISBN: 978-3-527-70299-2

Gerd Ganteför

Alles NANO oder was?

Nanotechnologie für Neugierige

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor

Prof. Gerd Ganteför
Universität Konstanz
FB Physik
Universitätsstr. 10
78457 Konstanz

Bildnachweis

Das Umschlagbild wurde aus Bildern von Fotolia erstellt.

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2013 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenzeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung Simone Benjamin

Satz inmedialo

Digital- und Printmedien UG, Plankstadt

Druck und Bindung Ebner & Spiegel GmbH, Ulm

Print ISBN: 978-3-527-32961-8

ePDF ISBN: 978-3-527-65087-3

ePub ISBN: 978-3-527-65086-6

Mobi ISBN: 978-3-527-65085-9

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Der Autor



© Stephan Wagner, mit freundlicher Unterstützung des Deutschen Museums in München

Gerd Ganteför ist Physikprofessor an der Universität Konstanz. Er forscht im Bereich Clusterphysik und Nanotechnologie. Weiterhin ist er Research Professor im Department of Chemistry an der Johns Hopkins University in Baltimore, USA. In Konstanz hat er erfolgreiche Vorlesungen über Nanotechnologie sowie über Energie und Klima aufgebaut. Er ist Autor zahlreicher Fachartikel und hält öffentliche Vorträge zu vielfältigen Themen, insbesondere zur Energie- und Klimaproblematik und zu Chancen und Gefahren der Nanotechnologie. In der Reihe Erlebnis Wissenschaft erschien 2010 sein Buch »Klima – der Weltuntergang findet nicht statt«.

Inhalt

Danksagung IX

Vorwort XI

1 Einleitung 1

- 1.1 Eine Mücke ist Nanotechnologie 1
- 1.2 Was ist Nano? 3
- 1.3 Milli–Mikro–Nano 5
- 1.4 Es gibt viel Platz nach unten 6
- 1.5 Bottom-up und top-down 7
- 1.6 Die seltsamen Naturgesetze der Nanowelt 9
- 1.7 Nanotechnologie heute 11
- 1.8 Gefahren 13
- 1.9 Medizinische Anwendungen 14
- 1.10 Zukunftsvisionen 16

2 Die Geschichte 19

- 2.1 Die Idee einer kontinuierlichen Entwicklung 21
- 2.2 Die Steinzeit 23
- 2.3 Ägypter und Römer 25
- 2.4 Das Mittelalter 27
- 2.5 Die industrielle Revolution 28
- 2.6 Mikrotechnologie 30
- 2.7 Nanotechnologie 32
- 2.8 Die historische Entwicklung im Überblick 33

3 Die Natur 37

- 3.1 Kopfüber an der Decke umhergehen 37
- 3.2 Selbstreinigende Oberflächen 40
- 3.3 Alle Lebewesen bestehen aus Zellen 42
- 3.4 Ein Blick in das Innere der Zelle 44

3.5	Die Zelle als Nanofabrik	47
3.6	Der Vorsprung der Natur	48
3.7	Der Mensch baut top-down, die Natur bottom-up	49
3.8	Die Bausteine der Zelle	49
3.9	Die Zellwand	50
3.10	Das Zellgerüst	51
3.11	Proteine	52
3.12	Die Erbsubstanz	53
3.13	Die Synthese von Proteinen	54
3.14	Wie eine Zelle Nanomaschinen baut	56
3.15	Was ist Leben?	56
3.16	Gefährliche Nanomaschinen: Viren	58
4	Die Gesetze	61
4.1	Was ist ein Atom?	61
4.2	Das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis	62
4.3	Die Temperatur	65
4.4	Die Nanowelt der Quanten	69
4.5	Teilchen und Wellen	70
4.6	Was ist Licht?	71
4.7	Teilchen sind Wellen	74
4.8	Reale Science Fiction: Wahrscheinlichkeitswellen	75
4.9	Der Tunneleffekt	76
4.10	Die Unschärferelation	78
4.11	Neue Eigenschaften in der Nanowelt	80
4.12	Wellen sind Teilchen	80
5	Werkzeuge	83
5.1	Das Lichtmikroskop	86
5.2	Das Elektronenmikroskop	91
5.3	Das Rastertunnelmikroskop	97
5.4	Die Geschichte der Photolithographie	103
5.5	Fertigung von Bauelementen mit Photolithographie	108
5.6	Der Waferstepper	109
5.7	Elektronenstrahl-Lithographie	114
5.8	Materialbearbeitung mit Ionenstrahlen	115
6	Nanopartikel	119
6.1	Die Herstellung von Nanopartikeln	121
6.2	Neue Materialien	122

6.3	Feinstaub	124
6.4	Sulfat-Aerosole	129
6.5	Kolloide	131
6.6	Cluster: Neue Eigenschaften im 1-Nanometer-Bereich	135
6.7	Drei Ursachen für neue Eigenschaften	138
6.8	Neue Eigenschaften: 1. Die geometrische Struktur	138
6.9	Fullerene	144
6.10	Nanotubes	147
6.11	Neue Eigenschaften: 2. Reaktive Oberflächenatome	151
6.12	Neue Eigenschaften: 3. Quanteneffekte	154
6.13	Magische Zahlen	156
7	Anwendungen	161
7.1	Nanopartikel in Verbundmaterialien	161
7.2	Nanoton in PET-Flaschen	165
7.3	Sonnencremes mit hohen Schutzfaktoren	166
7.4	Antibakterielle Silber-Nanopartikel	167
7.5	Selbstreinigende Oberflächen	168
7.6	Superkondensatoren	169
7.7	Fasern aus Kohlenstoff-Nanotubes	172
7.8	Nanosiebe	173
7.9	Krebstherapie	176
7.10	Drug-Delivery	178
7.11	Molekulare Elektronik	178
8	Computer	181
8.1	Digitalisierung	181
8.2	Der Grundbaustein eines Computers	182
8.3	Die gute alte Zeit: Analoge Datenverarbeitung	186
8.4	Analog-Digital-Wandler	187
8.5	Digital-Analog-Wandler	188
8.6	Speichermedien: CD, Festplatte und USB-Stick	189
8.7	Die Datenauswertung	195
8.8	Wie real ist Feynmans Vision heute?	195
8.9	Vergleich Computer – Gehirn	197

8.10	Das Mooresche Gesetz	198
8.11	Was kommt als Nächstes?	200
8.12	Was können Computer?	201
9	Gefahren	203
9.1	Unrealistische Gefahren	203
9.2	Reale Gefahren	205
9.3	Konventionelle Schadstoffe	206
9.4	Risikoabschätzung	209
9.5	Eintrittspforten in den Körper	210
9.6	Die Lunge	211
9.7	Ein neues Fachgebiet: Nanotoxikologie	214
9.8	Untersuchungsmethoden	216
9.9	Die Pionierzeit der Nanotoxikologie	217
9.10	Der Stand des Wissen: Eine Übersicht	218
9.11	Siliziumdioxid	218
9.12	Titandioxid	220
9.13	Zinkoxid	222
9.14	Aluminiumoxid	223
9.15	Silber	224
9.16	Gold	225
9.17	Industrieruß (Carbon Black)	227
9.18	Fullerene	228
9.19	Kohlenstoff-Nanotubes	229
9.20	Zusammenfassung	231
10	Visionen	233
10.1	Produktivität und Ressourcen	234
10.2	Medizin	234
10.3	Computer	240
10.4	Militärische Nanovisionen	244
10.5	Die technologische Singularität	246
10.6	Nanoassembler	247
10.7	Klimakontrolle	248
11	Zusammenfassung	251
12	Referenzen	255
	Stichwortverzeichnis	263

Danksagung

Das Buch konnte ich nur schreiben, weil die sehr guten Arbeitsbedingungen an der Universität Konstanz es erlaubt haben und meine Kollegen mir die Zeit dazu eingeräumt haben. Daher möchte ich dem Fachbereich Physik und der Universität Konstanz als Ganzes dafür danken. Aber die wichtigste Person, die dieses Buch ermöglicht hat, ist meine Frau. Alle Kapitel gingen durch ihre Endkontrolle und mussten lesbar, interessant und verständlich sein. Einige Kapitel musste ich ein zweites Mal schreiben, um diese Hürde zu nehmen.

Vorwort

Das Buch richtet sich an Schüler, Studenten, Lehrer, Politiker und interessierte Bürger, die sich über das Thema »Nanotechnologie« informieren wollen. Es soll Fragen wie »Was ist Nanotechnologie?«, »Wo wird Nanotechnologie heute angewendet?«, »Was kommt in der Zukunft auf uns zu?« und »Was sind die Gefahren dieser neuen Technologie?« beantworten.

Die Nanotechnologie ist tief in den Naturwissenschaften verwurzelt. Auf Formeln habe ich zwar gänzlich verzichtet, aber einige Aspekte der Nanotechnologie sind – vorsichtig formuliert – fremdartig und unverständlich. Trotzdem habe ich versucht, dem Leser einen Eindruck von der Nanowelt zu vermitteln. Das Buch ist ein Balanceakt zwischen der Vermittlung von Wissen und dem Verstehen auf der einen Seite und einer leichten Lesbarkeit für naturwissenschaftliche Laien auf der anderen Seite. Jedes Kapitel beginnt mit verständlichen und manchmal unterhaltsamen Aspekten und führt den Leser dann immer tiefer in die jeweilige Thematik ein. Je nach Interessenslage genügt es dem Leser vielleicht, nur die erste Hälfte eines Kapitels zu lesen, um die wichtigsten Aussagen zu erfassen.

Die Kapitel bauen nicht aufeinander auf. Für Leser, die sich zum Beispiel nur über die heutigen Anwendungen oder über mögliche Gefahren informieren wollen, genügt es, die betreffenden Kapitel zu lesen.

Konstanz, Mai 2013

Gerd Ganteför

1.1 Eine Mücke ist Nanotechnologie

Sicher haben Sie schon einmal eine Mücke erschlagen, die sich Ihnen in unmissverständlicher Absicht näherte. Und Sie haben die Befriedigung erlebt, eine verwerfliche Tat, nämlich das Blutsaugen, verhindert zu haben. Aber kann man der Mücke wirklich »Bösartigkeit« unterstellen? Sie handelt nicht mit der Absicht, Sie zu quälen, sondern füllt nur ihre ökologische Nische in unserem Lebensraum aus. Was aber auf alle Fälle bleibt, ist das Gefühl, als Mensch dem einfachen Wesen »Mücke« überlegen zu sein. Bei genauerem Hinsehen stellt sich jedoch heraus, dass dieses scheinbar so unbestreitbare Gefühl der Überlegenheit auf tönernen Füßen steht. Eine Mücke (Abb. 1.1) ist vom technischen Standpunkt aus gesehen eine Maschine, deren Bau und Funktion weit jenseits dessen liegt, was Menschen erschaffen können. Auch mit fortschrittlichster Elektronik und Ultrafeinmechanik können Menschen keine künstlichen Mücken bauen. Eine Mücke wiegt ein Tausendstel eines Gramms. Gibt es so leichte, von Menschen gebaute Maschinen? Nein. Aber selbst wenn der Mensch eine solche Maschine bauen könnte, könnte sie dann auch fliegen? Hätte diese Maschine Augen? Könnte sie sich selbst ernähren? Nein. Und das, obwohl eine künstliche Mücke für das Militär unbezahlbar wäre. Denn eine solche Maschine könnte unbemerkt hinter die feindlichen Linien dringen, Gespräche abhören oder Unterlagen kopieren. Und sie bräuchte nicht zurückzukehren, denn sie kann sich selbst auftanken. Aber so etwas gibt es nicht. Noch nicht? Oder wird es niemals künstliche Mücken geben?

Das ist das Thema dieses Buches: Wie weit ist die Menschheit davon entfernt, winzige Maschinen von der Leistungsfähigkeit künstlicher Mücken zu bauen? Und wie sähe die Welt aus, wenn das irgendwann einmal möglich sein sollte?



Abbildung 1.1: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Mücke.
© Janice Carr [1]

Betrachtet man eine Mücke rein technisch, also als biologische »Maschine«, so ist sie ein Produkt hochentwickelter Nanotechnologie. Natürlich sind Pflanzen und Tiere lebendig und unterscheiden sich grundsätzlich von Maschinen. Aber wenn man diesen Unterschied einmal außer Acht lässt, ist eine Mücke ein hochkomplexer Mechanismus, der viele Funktionen einschließlich der eigenen Wartung, Reparatur und Reproduktion ausführen kann und nur ein Milligramm wiegt. Mücken bestehen wie alle Pflanzen und Tiere aus Zellen. In den Zellen, den Nanofabriken der Natur, erfüllen Proteine, also große Moleküle, vielfältige Funktionen und sie ähneln auf gewisse Weise den Maschinen aus der uns bekannten makroskopischen Welt. Im Zellkern befindet sich der Bauplan eines Lebewesens in Form der Erbsubstanz. Diese Erbsubstanz besteht aus sehr langen Molekülen, auf denen wie auf einem Magnetband der Bauplan als langer »Text« aufgeschrieben ist. Diese langen »Bücher« des Lebens nennt man Chromosomen. Sie haben einen Durchmesser von einem Nanometer und eine Länge von einigen Millimetern. Eine menschliche Zelle hat 46 solcher Fäden mit einer Gesamtlänge von knapp 2 Metern. Damit diese Moleküle in einen Zellkern passen, der nur einen Hundertstel Millimeter groß ist, muss der Faden aufgewickelt werden. Ab und zu muss die Zelle bestimmte Stellen des Fadens »lesen«, und dann beginnt ein komplizierter Prozess. Zunächst wird die gewünschte Information vom Chromosom auf ein kürzeres Molekül (die RNA) umkopiert und aus dem Zellkern heraustransportiert. Dann wird die Information von einem »Lesekopf«, dem Ribosom (Abb. 1.2), ausgelesen. Das ist ein großes Protein, das an dem Faden entlang gleitet.

Es gibt noch viele weitere Analogien zwischen Lebensfunktionen und Maschinen. Aber es gibt einen entscheidenden Unterschied: In

einem Lebewesen sind diese »Maschinen« extrem klein. Es sind Nanomaschinen. Ein Größenvergleich verdeutlicht dies: Ein heutiger Computerspeicher wiegt 10 Gramm und kann 1000 Gigabyte speichern. Das entspricht 0,01 Gramm für 1 Gigabyte. Der Zellkern wiegt nur 0,000 000 000 1 Gramm und dort ist ebenfalls rund 1 Gigabyte an Information gespeichert. Die Natur ist uns also immer noch millionenfach voraus.

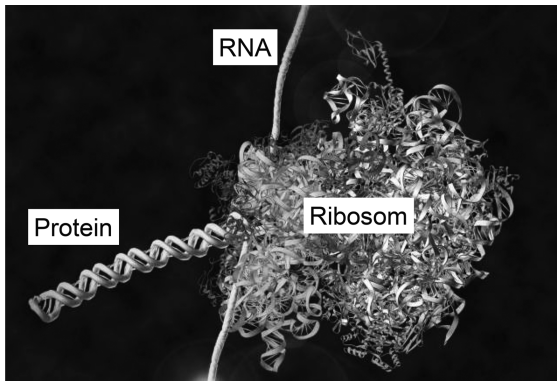


Abbildung 1.2: Wie ein Lesekopf liest ein Ribosom (bildfüllende, rundliche Struktur, Durchmesser 20 nm) die Erbinformation aus. Diese Information ist auf der RNA wie auf einem Magnetband gespeichert. Mit dieser Information baut das Ribosom ein Protein, ein neues Eiweißmolekül (nach links laufende Helix). © (2009) Nature Publishing Group [2]

Dieser große Vorsprung der Natur offenbart sich zum Beispiel darin, dass es in der Natur Mücken gibt und in der Technik nicht. Auch der Mensch lebt nur deswegen, weil ständig eine Unzahl von Prozessen in jeder seiner 100 000 Milliarden Zellen abläuft. In jeder Zelle ist die komplette Erbinformation gespeichert und es gibt Kraftwerke für die Energieerzeugung, es gibt Förderbänder für den Warentransport und viele andere kleinste »Maschinen«. Nanotechnologie ist also eigentlich etwas Natürliches.

1.2 Was ist Nano?

Der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet Zwerg. »Nano« meint zunächst einmal »sehr klein« – genauer: tausendmal kleiner als »Mikro«. »Mikro« ist die Abkürzung für ein Millionstel. Ein Mikrometer ist also ein millionstel Meter oder ein tausendstel

Millimeter. Eine Nähnadel ist etwa 1 Millimeter dick (Abb. 1.3 links). Ein Tausendstel davon, also ein Mikrometer, ist eine bereits unvorstellbar kleine Länge. Die Haut einer Seifenblase ist beispielsweise 1 Mikrometer dick. Ein menschliches Haar ist viel dicker, nämlich 50 Mikrometer (Abb. 1.3 Mitte). Die Information auf einer CD ist in einem Strich-Punkt-Muster gespeichert, das im Elektronenmikroskop sichtbar wird. Auch diese Striche haben eine Dicke von etwa 1 Mikrometer. Biologische Zellen wie die in Abb. 1.3 dargestellten Lymphozyten sind ebenfalls einige Mikrometer groß. All das ist zwar klein, aber immer noch tausendfach größer als wirkliche Nanoobjekte.

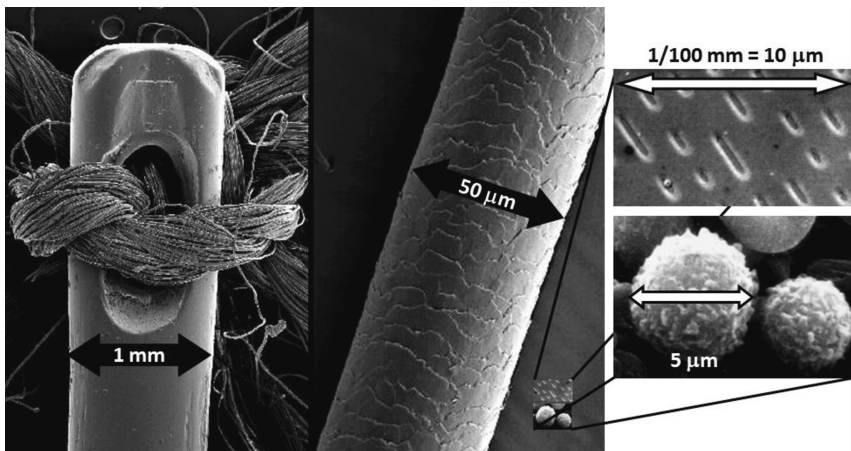


Abbildung 1.3: Ein Elektronenmikroskop offenbart viele Details aus der Welt des Kleinen, auch bei millimetergroßen Objekten wie einer Nähnadel (links). Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von 50 Mikrometer und ähnelt bei ausreichender Vergrößerung einem Baumstamm (Mitte). Das Strich-Punkt-Muster einer Musik-CD und die zwei Lymphozyten (weiße Blutkörperchen) mit einem

Durchmesser von etwa 5 Mikrometern wirken daneben winzig (Einschub Mitte unten und rechts). Nanoobjekte sind noch mal tausendmal kleiner als Zellen oder die Striche auf der CD und wären bei den hier verwendeten Vergrößerungen des Elektronenmikroskops nicht erkennbar. © Nähnadel: Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Ming H. Chen, University of Alberta [3–5]

Abgesehen von wenigen Ausnahmen hat der Mensch heute noch keinen Zugriff auf die Nanoebene und seine Fähigkeiten enden meist beim Einritzen der mikrometerdicken Striche auf einer CD. Die Natur geht viel weiter. Im Innern der Lymphozyten offenbart sich bei höchster Vergrößerung des Elektronenmikroskops ein komplexes Innenleben mit einer großen Vielfalt von Nanoobjekten, die verschie-

densten Aufgaben nachgehen und vom Zellkern gesteuert werden. Und es gibt noch viel kleinere Lebewesen. Viren haben eine Größe von 100 Nanometer und in der Wissenschaft wird diskutiert, ob Viren lebendig sind oder nicht. Sie stehen am Übergang vom Molekül zum Lebewesen.

1.3 Milli–Mikro–Nano

In der Physik spielen Größenordnungen eine wichtige Rolle. Eine Änderung um eine Größenordnung bedeutet eine Änderung um einen Faktor Zehn. So ist zum Beispiel eine Ameise (3 Millimeter Länge) rund tausendmal oder drei Größenordnungen ($10 \times 10 \times 10 = 1000$) kleiner als ein Auto (3 Meter Länge). Ein Millimeter, ein Mikrometer und ein Nanometer unterscheiden sich jeweils um den Faktor 1000, also um drei Größenordnungen. Millimetergroße Objekte wie zum Beispiel Schneeflocken sind mit bloßem Auge noch erkennbar (Abb. 1.4 links). Die nur wenige Mikrometer große Feinstruktur eines Tonminerals ist nur im Mikroskop sichtbar (Abb. 1.4 Mitte). Nanopartikel wie zum Beispiel das C_{60} (Abb. 1.4 rechts), ein kugelförmiges Molekül aus 60 Kohlenstoffatomen (»Nanofußball«), sind selbst mit höchstauflösenden Elektronenmikroskopen nur noch verschwommen zu erkennen. Unser direkter Erfahrungsbereich – also der, der Händen und Augen unmittelbar zugänglich ist – reicht aber nur hinab bis zu Strukturen, die maximal ein zehntel Millimeter (0,1 Millimeter) groß sind. In den letzten hundert Jahren ist uns durch die Entwicklung des Lichtmikroskops und durch die Verfügbarkeit immer besserer Werkzeuge der Bereich bis hinunter zu einem Zehntel eines Mikrometers (0,1 Mikrometer) zugänglich geworden. Erst der Vorstoß in den Mikrometerbereich ermöglichte die industrielle Revolution, denn bereits der Bau einfacher Dampfmaschinen erfordert mikrometergenaues Arbeiten. Ein Mikrometer ist aber aus der Sicht der Natur immer noch sehr groß und es ist theoretisch möglich, noch viel kleinere Strukturen aus Atomen zu bauen. Atome sind 0,3 Nanometer groß – kleiner geht es daher nicht, denn alle Objekte in der Welt bestehen aus Atomen. Der Mensch kann also aus dem Mikrometerbereich nochmals um drei Größenordnungen in den Nanometerbereich vorstoßen. Bisher ist dieser Bereich dem Menschen – abgesehen von wenigen Ausnahmen –

nicht zugänglich. Die Industrialisierung, die durch den Vorstoß vom Millimeterbereich in den Mikrometerbereich möglich wurde, veranschaulicht, welche enormen Möglichkeiten ein Vorstoß um weitere drei Größenordnungen in die Welt des Kleinen eröffnen könnte.

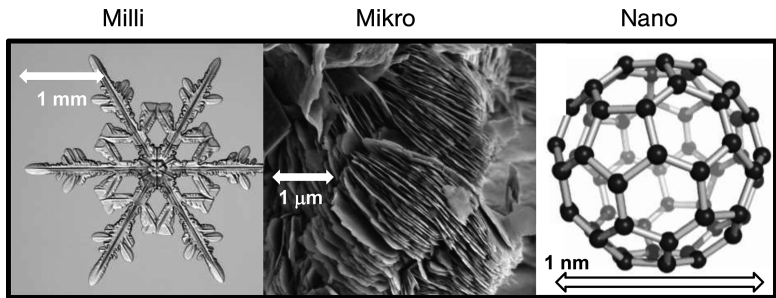


Abbildung 1.4: Schneeflocken (links) sind einige Millimeter groß und im Lichtmikroskop gut sichtbar. Ein Tonmineral besteht aus mikrometergroßen Schichten (Mitte), die nur noch mit Elektronenmikroskopen deutlich abgebildet werden können. Nanopartikel wie das Fulleren, ein »Nanofußball« aus 60 Kohlenstoff-

atomen, sind selbst mit höchstaflösenden Elektronenmikroskopen nur noch verschwommen zu erkennen und daher werden Computergrafiken zur Darstellung verwendet (rechts). Schneeflocke: © Prof. Kenneth Libbrecht; Tonmineral: © M.Sc. Wadah F. Mahmoud [6, 7, 8]

1.4 Es gibt viel Platz nach unten

Der Physiker Richard Feynman (Abb. 1.5) hat als Erster die Möglichkeiten der Nanotechnologie erkannt. In einem berühmt gewordenen Vortrag hat er 1956 den Satz geprägt: »There is plenty of room at the bottom« (»Ganz unten ist eine Menge Platz«). Feynman nahm an, dass für die Speicherung eines Bits (»0« oder »1«) mindestens ein Würfel mit einer Kantenlänge von 5 Atomen, also insgesamt 125 Atome notwendig sind. So viele Atome benötigt die Natur in der Erbsubstanz für die Speicherung eines Bits. Feynman berechnete dann, dass alles Wissen aus allen Büchern der Erde in einem Würfel der Kantenlänge von 0,1 Millimeter gespeichert werden könne. Heute hat ein Bit auf einer Festplatte eine Größe von 20–30 Nanometer und ist damit um den Faktor 10–20 größer als die Kantenlänge von Feynmans Würfel. Abgesehen von der Größe gibt es aber noch einen gravierenden Unterschied zwischen einem heutigen Datenbit und Feyn-

mans Würfel: Auf einer Festplatte wird die Information nur zweidimensional auf einer Oberfläche gespeichert, während Feynmans Speicher dreidimensional ist. Daher ist die Zahl der Atome, die heute für die Speicherung eines Bits benötigt wird, immer noch extrem hoch. Eine 10 Gramm schwere Festplatte ($\approx 10^{24}$ Atome) speichert ein Terabyte ($\approx 10^{13}$ Bit). Pro Bit entspricht dies 100 000 000 000 Atomen. Richard Feynman war der heutigen Technologie also noch um viele Größenordnungen voraus.



Abbildung 1.5: Der Nobelpreisträger Richard Feynman hat in einem Vortrag im Jahr 1956 den berühmten Satz »There is plenty of room at the bottom« geprägt. [9]

1.5 Bottom-up und top-down

Heute ist die Technik also noch weit vom atomgenauen Fertigen entfernt. Die bisher zur Verfügung stehenden Werkzeuge sind viel zu grob. Auf der atomaren Ebene erinnern die Versuche, Materie planvoll zu formen, an die Arbeit mit den Faustkeilen der Steinzeitmenschen (Abb. 1.6). Die Strukturen sind rau und unförmig. Es gibt noch einen Unterschied zwischen der Methode der Natur und der des Menschen: Der Mensch beginnt mit einem Rohling, einem ungeformten Block, und arbeitet die gewünschte Form heraus. Diese Arbeitsweise wird »top-down« (»von oben nach unten«) genannt. Dazu gehören zum Beispiel Schnitzereien oder die Arbeit eines Steinmetzes. Computerchips werden ebenfalls mit der Top-down-Methode hergestellt: In eine ungeformte Siliziumscheibe werden die Strukturen hineingearbeitet.

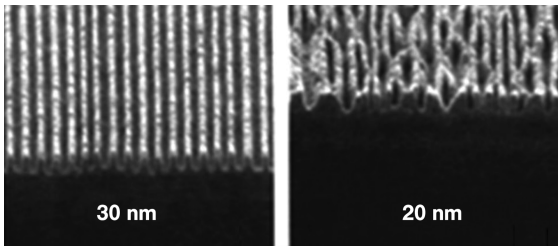


Abbildung 1.6: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines mittels Photolithographie (Stand 2006) erzeugten Stegmusters aus Silizium. Bei einem Abstand der Stege von 30 Nanometern reicht die

Fertigungsgenauigkeit noch aus, aber bei einem noch kleineren Abstand sind die Stege nicht mehr getrennt. © (2004) American Vacuum Society [10]

Das Gegenteil der Top-down-Methode ist die Bottom-up-Technik («von unten nach oben»). Dabei wird ein Werkstück aus einzelnen Bausteinen zusammengesetzt. Ein Beispiel ist der Bau eines Hauses aus Ziegelsteinen, die vom Maurer Stein für Stein platziert werden. Die Natur arbeitet nach der Bottom-up-Methode. Ein Ribosom beispielsweise setzt ein Protein aus einzelnen Aminosäuren zusammen (Abb. 1.2). Der Mensch dagegen arbeitet häufig nach der Top-down-Methode, da er keinen Zugriff auf einzelne Atome hat. Eine Ausnahme gibt es: Mit einem Rastertunnelmikroskop ist es möglich, einzelne Atome zu positionieren. Dieses Mikroskop untersucht eine Oberfläche, indem es sie mit einer scharfen Spitze abtastet. Mithilfe eines Computers erhält man dann ein Bild der Oberfläche. Die Spitze kann aber auch dazu verwendet werden, einzelne Atome zu verschieben. Allerdings funktioniert diese Manipulation einzelner Atome nur auf sehr glatten Oberflächen, denn im Vergleich zu den Atomen hat die Spitze gigantische Ausmaße. Immerhin ist es möglich, mit viel Geduld die Atome zu Schriftzeichen anzuordnen (Abb. 1.7). Kompliziertere dreidimensionale Objekte lassen sich allerdings nicht aufbauen. Das Rastertunnelmikroskop ist das einzige Werkzeug, mit dem heute einzelne Atome positioniert werden können. Damit ist es möglich geworden, Feynmans Vision wenigstens in zwei Dimensionen Realität werden zu lassen. Das Firmensymbol in Abb. 1.7 besteht aus 42 Silberatomen und enthält rund 20 Bit an Information. Die Informationsdichte ist also sogar höher als in Feynmans Vision. Allerdings ist das nur richtig, wenn die Atome der Unterlage nicht mitgerechnet werden. Es gibt noch einige weitere Probleme mit die-

ser Methode des Schreibens: Sie funktioniert nur nahe am absoluten Nullpunkt, also bei minus 273 Grad Celsius, und die Schreibgeschwindigkeit liegt bei einigen Minuten pro Buchstabe. Die Technik wird daher praktisch nur in Forschungslabors eingesetzt.



Abbildung 1.7: Mit einem Rastertunnelmikroskop können einzelne Atome auch in der Form von Buchstaben arrangiert werden. Hier dargestellt ist ein Firmensymbol bestehend aus 42 Silberatomen auf einer Silberoberfläche. © Omicron NanoTechnology GmbH, Taurusstein

Das Elektronenmikroskop (verwendet in Abb. 1.6) und das Rastertunnelmikroskop (verwendet in Abb. 1.7) sind wichtige Werkzeuge der Nanotechnologie. Einen Überblick über diese Techniken liefert Kap. 5. Dort wird auch eine Einführung in die Lithographie (verwendet in Abb. 1.6) gegeben, mit der Computerchips hergestellt werden.

1.6 Die seltsamen Naturgesetze der Nanowelt

Abb. 1.2 suggeriert dem Leser eine Nanowelt, die der unseren, abgesehen von der Größe, ähnlich ist. Aber das ist ein Irrtum. Ein Ribosom ist fünfzigmal kleiner als die Wellenlänge des Lichtes, und alleine das macht schon einen großen Unterschied. Denn mit optischen Methoden wie einem Lichtmikroskop können keine Bilder von Objekten gemacht werden, die kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sind. Ein »Foto« wie in Abb. 1.2 kann es daher nicht geben. Das Licht selbst ist zu »grobkörnig«, um so feine Strukturen sichtbar zu machen. Die »Körnigkeit« des Lichtes ist eine Folge seiner Quantennatur. Licht besteht aus Lichtteilchen, den Quanten, und ein Lichtstrahl ist ein Strom dieser Lichtquanten. Die hier etwas ungenau mit »grobkörnig«

umschriebene Eigenschaft des Lichts ist eine der großen Barrieren, die es dem Menschen erschweren, in die Nanowelt vorzudringen. Der menschliche Geist benötigt Bilder zum Verständnis, aber genau das ist sehr schwierig. Bis heute wird deshalb heftig daran gearbeitet, die Nanowelt »sichtbar« zu machen. Mit sichtbarem Licht ist dies praktisch unmöglich, aber es gibt andere Methoden, mit denen Bilder gewonnen werden können (Kap. 5).

Es gibt noch weitere Phänomene, die sich im Alltag des Menschen kaum bemerkbar machen, aber in der Nanowelt von großer Bedeutung sind. Eines davon ist die Wärme. Wärme ist die Bewegung von Atomen und Molekülen. Jeder weiß, wie sich Wärme anfühlt, aber was das eigentlich ist, wusste man lange Zeit nicht. Bei einem Gas wie etwa unserer Luft bewegen sich die Moleküle ständig mit hoher Geschwindigkeit hin und her, stoßen zusammen und gegen die Wände. Wird das Gas aufgeheizt, werden die Moleküle schneller und prallen heftiger auf die Wände. Deswegen steigt der Druck mit steigender Temperatur an, wie zum Beispiel in einem Dampfkessel. In einem Festkörper schwingen die Atome auf ihren Gitterplätzen mit wachsender Temperatur immer heftiger hin und her. Wenn sie zu stark schwingen, also die Temperatur zu hoch wird, zerfällt der Festkörper und wird flüssig oder verdampft sogar. Aber bereits bei normaler Temperatur sind alle Atome in ständiger Bewegung, und auch Nanoobjekte wie das Ribosom aus Abb. 1.2 vibrieren heftig und stoßen ständig mit Gasatomen und Molekülen zusammen. Die Nanowelt wird von dieser thermischen Bewegung beherrscht. Es gibt keine Ruhe, sondern alles ist in Bewegung und stößt ständig zusammen und ordnet sich um. In unserer Welt entspräche dies am ehesten einem andauernden schweren Erdbeben.

Eine weitere Schwierigkeit liegt im Zusammenkleben. In unserer Welt tendieren Dinge nicht dazu, zusammenzukleben. Selbst wenn zwei saubere und glatte Oberflächen ganz genau aufeinander passen – wie zum Beispiel die beiden Bruchkanten einer frisch zersprungenen Glasscheibe – verschmelzen die Bruchflächen nicht wieder miteinander, selbst wenn sie fest aufeinander gepresst werden. Das ist eigentlich unverständlich, denn die gebrochenen chemischen Bindungen sollten sich wieder zusammenfügen, wenn sie wieder in Reichweite ihrer Gegenstücke auf der anderen Seite kommen. In der Nanowelt ist das anders. Dort kleben sogar Objekte, die gar nicht zusammen passen, aneinander. Dieses »Nanokleben« ermöglicht es

zum Beispiel einer Mücke oder einem Gecko, kopfüber an der Decke zu laufen. Auf der anderen Seite hat die Schwerkraft, die in der makroskopischen Welt eine so dominierende Rolle spielt, praktisch keinen Einfluss. Das heißt, es »fällt nichts herunter«. Ein Beispiel ist Feinstaub, der tage- und wochenlang in der Luft schweben kann, ohne zu Boden zu sinken.

Ein besonders fremdartiges Phänomen ist die Unschärferelation. Es ist nicht möglich, ein Atom oder ein anderes Nanoobjekt an einem bestimmten Ort vollständig zur Ruhe zu bringen. Je kleiner ein Volumen ist, in das ein Teilchen eingesperrt wird, umso heftiger fängt das Teilchen an, sich zwischen den Wänden hin- und herzubewegen. Das Teilchen übt dabei einen Druck auf die Wände aus, und es kostet Kraft, das Volumen, in das ein Nanoteilchen eingesperrt ist, zu verkleinern. Die Unschärferelation ist eine Konsequenz des Welle-Teilchen-Dualismus, eines der großen Rätsel der Physik. Es wurde schon erwähnt, dass Licht, das in der normalen Welt alle Eigenschaften einer Welle hat, sich in der Nanowelt eher als Teilchenstrom manifestiert. Umgekehrt verhalten sich Elektronen und Atome, die unter normalen Bedingungen Teilchen sind, in der Nanowelt manchmal wie Wellen. Ein Beispiel sind die »Wellen« in Abb. 1.7. Hier wird der Wellencharakter der Leitungselektronen der Unterlage, auf der die Atome liegen, direkt sichtbar. Für den klassischen Physiker kann eine Welle nicht gleichzeitig Teilcheneigenschaften haben, Wellen- und Teilcheneigenschaften schließen sich gegenseitig aus. Aber offensichtlich liegt die wahre Natur der Nanoobjekte irgendwo dazwischen. Sie ist uns so fremdartig, dass der menschliche Geist keinen Begriff dafür hat. In Kap. 4 erhalten Sie einen Einblick in die fremden Naturgesetze der Nanowelt.

1.7 Nanotechnologie heute

Obwohl die Nanotechnologie noch lange nicht das Niveau einzelner Atome erreicht hat, gibt es auch heute schon beachtliche technische Anwendungen. Allgemein werden mit »Nanotechnologie« alle Techniken bezeichnet, bei denen Strukturen zum Einsatz kommen, die kleiner oder dünner als 100 Nanometer sind. Eine Lackschicht oder eine Seifenblase mit einer Dicke von 0,1 Mikrometern könnten also bereits als Nanotechnologie bezeichnet werden, aber beides hat

wenig mit wirklicher Nanotechnologie zu tun. Sehr feine Pulver gehören schon eher zur Nanotechnologie, insbesondere dann, wenn sie durch ihre Feinkörnigkeit neue Eigenschaften erhalten. Ein Beispiel sind Nanopartikel aus Titandioxid, die in vielen Sonnencremes enthalten sind. Sie absorbieren das schädliche UV-Licht sehr effektiv, sind aber so klein, dass sie sichtbares Licht nicht beeinflussen. Damit ist es möglich, Sonnencremes mit hohen Lichtschutzfaktoren zu produzieren, die auf der Haut praktisch unsichtbar sind. Ein anderes Beispiel sind fein aufgeraute Oberflächen, die wasser- und schmutzabweisend sind. Ähnlich wie Lotusblätter bleiben sie von selbst sauber. Im Augenblick boomt die Imprägnierung von Kleidungsstücken und vielen anderen Alltagsgegenständen mit Silbrenanopartikeln, die antibakteriell wirken. Socken, die so geschützt sind, müssen sehr viel seltener gewechselt werden – so behauptet es die Werbung. Nanopartikel sind in vielen Produkten zu finden, von denen der Kunde nicht vermuten würde, dass dort Nanotechnologie eingesetzt wird. Einen Überblick über dieses expandierende Gebiet gibt Kap. 7. Allerdings handelt es sich dabei nach Meinung des Autors nicht um »wirkliche« Nanotechnologie, denn selbstreinigende Oberflächen und geruchsarme Socken sind noch weit von der Idee einer Nanomaschine entfernt.

Nur Computer sind heute bereits tatsächlich »Nano«. Die Bauelemente in Computerprozessoren werden mit einer Fertigungsgenauigkeit von weniger als 30 Nanometern produziert. Die Auswirkungen dieses Fortschritts sind allgegenwärtig: Handys, Digitalkameras, Navigationsgeräte, transportable und fast schon intelligente Computer und das World Wide Web verändern das Leben. Diese Entwicklung beruht auf nur einer einzigen Technik, der Lithographie, die es erlaubt, so feine Strukturen preiswert und in großen Mengen zu fertigen. Die Fertigung geschieht vollautomatisch, denn ein Mensch ist nicht in der Lage, so kleine Strukturen zu sehen, geschweige denn zu bauen. Er baut also eine Maschine, die ihrerseits Computerprozessoren baut. Je kleiner die Strukturen sind, umso mehr Schalteinheiten lassen sich auf einem Chip unterbringen und umso leistungsstärker und intelligenter wird der Computer. Solche Computer eröffnen neue Möglichkeiten – sowohl zum Guten als auch zum Schlechten. Bereits heute ist es möglich, das Schreckensszenario eines totalen Überwachungsstaates mit Millionen von Überwachungskameras und der Aufzeichnung jeder Aktivität eines Bürgers Wirklichkeit werden zu

lassen. Was Computer sind und wohin sie sich in absehbarer Zeit entwickeln könnten, beschreibt Kap. 8.

1.8 Gefahren

Der »Grey Goo«, ein grauer Schleim von außer Kontrolle geratenen Nanomaschinen, der die gesamte Erdoberfläche bedeckt, ist die gängigste Weltuntergangsvision aus dem Bereich der Nanotechnologie. Daneben gibt es noch die Sorge, dass die Entwicklung superintelligenter Computer den Menschen überflüssig machen könnte. Diese Weltuntergangsvisionen und andere Szenarien einer Nanotechnologie der fernen Zukunft werden in Kap. 9 beschrieben und aus der Sicht eines Naturwissenschaftlers bewertet. Daneben gibt es aber auch reale Risiken durch Nanopartikel. Nanopartikel können durch die Lunge, die Haut oder durch den Magen-Darm-Trakt in den menschlichen Körper gelangen. Die Hauptgefahr geht von Nanopartikeln in der Luft aus, da die Lunge die schwächste Barriere im menschlichen Körper darstellt. Die Gefahren von konventionellem Feinstaub sind seit vielen Jahren bekannt. Feinstaubpartikel haben keine einheitliche Größe – ihr mittlerer Durchmesser liegt im Bereich von Mikrometern, sie sind also größer als Nanopartikel. Nanopartikel, die in der Luft schweben, werden auch als Ultrafeinstaub bezeichnet. Die normale Umgebungsluft enthält erstaunlich große Mengen an Ultrafeinstaub, dazu gehören natürliche Schwebstoffe wie Bakterien und Viren. Eine Quelle von künstlichem Ultrafeinstaub sind zum Beispiel Verbrennungsmotoren. Um diesen »konventionellen« Ultrafeinstaub von den »neuen« Nanopartikeln abzugrenzen, unterscheidet man zwischen absichtlich erzeugten Nanopartikeln und unabsichtlich erzeugtem Ultrafeinstaub.

Nanopartikel können neue chemische Eigenschaften haben und sie können so klein sein, dass sie die natürlichen Barrieren in der Lunge, in der Haut oder im Magen-Darm-Trakt überwinden und in den Blutkreislauf gelangen. Sind sie einmal dort, könnten sie in alle Organe und sogar in das Gehirn vordringen. Da Nanopartikel immer häufiger und in immer größeren Mengen zum Einsatz kommen, wird die Gefährlichkeit der Nanopartikel intensiv untersucht. Darüber ist eine neue Wissenschaft entstanden: die Nanotoxikologie. Die Nanotoxikologie beschäftigt sich mit der Frage, welche Risiken die