

## 1

## Einleitung

In der Technologie geht es um die Anwendung von wissenschaftlichen Erkenntnissen zur ökonomischen (rentablen) Produktion von Waren und Dienstleistungen. Dieses Buch beschäftigt sich mit der Größe oder der Größenordnung von Maschinen und Geräten in unterschiedlichen Bereichen der Technologie. Es befasst sich insbesondere mit den kleinsten Bauteilen, die realisiert werden können, und gleichermaßen mit den dazugehörigen Gesetzen der Physik im Nanometerbereich: der „Nanophysik“, die in der Lage ist, das Verhalten von Materie in diesem unsichtbaren Bereich genau vorherzusagen. Das physikalische Verhalten im Nanometerbereich wird durch die Quantenmechanik genau beschrieben und mithilfe der Schrödingergleichung dargestellt. Die Schrödingergleichung erlaubt ein quantitatives Verständnis der Struktur und der Eigenschaften von Atomen. Chemische Stoffe, Moleküle, selbst die Zellen der Biologie, die aus Atomen bestehen, lassen sich daher im Prinzip durch diese wohlerprobte Darstellung der Nanophysik beschreiben (wenn ausreichend Rechenleistung vorhanden ist).

Es ist oft von Vorteil, Geräte zu verkleinern, wie etwa in der modernen Halbleitertechnologie. Wo liegen die Grenzen der Verkleinerung? Wie sehr kann ein Bauelement verkleinert werden? Jedes Bauelement muss sich aus Atomen zusammensetzen, deren Größe im Bereich von 0,1 nm liegt. Hier wird das Wort „Nanotechnologie“ mit von Menschenhand entworfenen Bauelementen in Verbindung gebracht, in denen ein wesentliches Element oder Elemente, die kontrolliert hergestellt werden, Größen im Bereich von 0,1–1000 nm besitzen, d. h. von 1 Å bis zu 1 µm. An dieser Stelle ergibt sich eine Überschneidung mit der „Mikrotechnologie“ im Mikrometerbereich. Die Mikroelektronik ist die derzeit am weitesten entwickelte Technologie, abgesehen von der Biologie, deren komplex arbeitende Einheiten auf einer Skala zu finden sind, die im Bereich von Mikrometern liegt.

Obwohl die Literatur über die Nanotechnologie manchmal auf Maschinen im Nanometermaßstab verweist, sogar auf „selbstreproduzierende Maschinen im atomaren Maßstab“ [1], wird zugleich zugegeben, dass „ein Fertigungsdurchbruch“ [2] zu ihrer Realisierung erforderlich ist und zurzeit noch keine Maschine im Nanometermaßstab existiert. Vielmehr gibt es selbst im Mikrometermaßstab kaum eine Maschine, und es scheint, dass die kleinsten mechanischen Maschinen, die in großer Formenvielfalt leicht erhältlich sind, im Millimeterbereich liegen, wie etwa in herkömmlichen Armbanduhren. (Um Verwechslungen zu vermei-

den, beachten Sie, dass die Vorsilbe „Mikro“ manchmal auch für Techniken im Zusammenhang mit der optischen Mikroskopie verwendet wird, die auf einer größeren Skala arbeiten, wie etwa „Mikrochirurgie“, doch nicht in diesem Buch.)

Der Leser mag korrekt schlussfolgern, dass die Nanotechnologie zurzeit eher ein Konzept als eine Tatsache ist, obwohl sie sicherlich medial und finanziell Realität ist. Dass das Konzept ein großes Potenzial für die Technologie hat, ist die Botschaft, die man der finanziellen und medialen Aufmerksamkeit zu diesem Thema entnehmen kann.

Die Idee einer begrenzenden Größenskala einer stark miniaturisierten Technologie ist aus mehreren Gründen grundsätzlich interessant. Wenn die Abmessungen die atomare Skala erreichen, dann ändern sich die physikalischen Gesetze, d. h. man geht von der klassischen Physik zur quantenmechanischen Beschreibung der Nanophysik über. Die Änderungen im Verhalten beim Übergang vom klassischen zum „mesoskopischen“ Bereich, also zur atomaren Skala, sind in der gegenwärtigen Physik weitgehend verstanden, aber in bestimmten Fällen sind die Einzelheiten kompliziert und müssen erst noch herausgearbeitet werden. Obwohl der Übergang von der klassischen Physik zur Nanophysik zur Folge haben kann, dass bereits existierende Anwendungen versagen, eröffnet dieser Übergang auch Möglichkeiten für neue Anwendungen.

Ein vorrangiges Interesse am Konzept der Nanotechnologie beruht auf ihren Verbindungen zur Biologie. Die kleinsten Formen des Lebens, Bakterien, Zellen und die aktiven Bestandteile lebender biologischer Zellen, haben eine Größe, die im Nanometerbereich liegt. Es kann sich tatsächlich herausstellen, dass die einzige Möglichkeit für eine vielschichtige realisierbare Nanotechnologie durch die Biologie vorgegeben ist. Sicherlich wurde von den Vorreitern und Anhängern der Nanotechnologie das gegenwärtige Verständnis der Molekularbiologie als ein Existenzbeweis für die Nanotechnologie betrachtet. In der Molekularbiologie werden die „selbstreplizierenden Maschinen auf atomarer Ebene“ von der DNA gelenkt und durch die RNA kopiert, bestimmte Moleküle werden von Enzymen „zusammengesetzt“; alle Zellen sind reichlich mit Motoren im molekularen Maßstab ausgestattet, wofür Kinesin ein Beispiel ist. Ionenkanäle, die bestimmten Ionen (z. B. Kalium oder Calcium) erlauben durch die Lipidschicht in eine Zelle einzutreten (oder sie blockieren), scheinen vorzüglich konstruierte Geräte im molekularen Maßstab zu sein, bei denen bestimmte Konformationen aus Proteinmolekülen einen offenen bzw. geschlossenen Kanal definieren.

Biologische Sensoren wie die Stäbchen und Zapfen der Netzhaut und die in magnetotaktischen Bakterien gefundenen Magnete im Nanomaßstab arbeiten an der Quantengrenze der Sensibilität. Das zweifelsfreie Verständnis der Arbeitsweise dieser Sensoren erfordert die Anwendung der Nanophysik. Man könnte sagen, dass die von Darwin beschriebene Evolution, deren Grundlage die Überlebenschancen sind, die Gesetze der Quanten-Nanophysik beherrscht hat, die bekanntlich auf der Vorhersage von Wahrscheinlichkeiten beruht. Versteht man die Rolle der Quanten-Nanophysik, die in den molekularen Bausteinen der Natur enthalten ist, so kann dies die Auslegung von menschengemachten Sensoren, Motoren und vielleicht sehr viel mehr beeinflussen, mit möglichen Anwendungen in

den experimentellen und ingenieurwissenschaftlichen Verfahren der Nanotechnologie.

Für den unwahrscheinlichen Fall, dass die technische Realisierung – im traditionellen Sinn – von Maschinen im molekularen Maßstab möglich wird, prophezeien die optimistischsten Beobachter die Entwicklung derartiger unsichtbarer Maschinen in der Größenordnung von biologischen Molekülen. Medizinische Minimaschinen könnten dann konstruiert werden, deren Aufgabe es ist, Defekte in Zellen zu korrigieren, gefährliche Zellen wie Krebszellen zu töten oder sogar, wenn man der Fantasie freien Raum gibt, Zellfehler zu reparieren, die nach dem Auftauen von biologischem Gewebe auftreten, das zur Erhaltung gefroren wurde [3].

Dieses Buch soll Ihnen als Führer durch die Ideen und physikalischen Konzepte dienen, die ein Verständnis der Änderungen erlauben, die auftreten, wenn sich die Größenordnungen auf den atomaren Maßstab verringern. Es beruht auf der Annahme, dass eine allgemeine Einführung in die Konzepte der Nanophysik die Fähigkeiten von Studenten und Fachleute, deren studentische Ausbildung in den Ingenieurwissenschaften oder den angewandten Naturwissenschaften angesiedelt ist, außerordentlich erweitern wird, um in den verschiedenen Bereichen der Nanotechnologie Beiträge zu liefern. Die in weiten Bereichen anwendbaren Konzepte der Nanophysik sind es wert, genauer betrachtet zu werden, da sie nicht durch die unvermeidbaren Änderungen an der Spitze der Technologie überholt werden.

## 1.1

### Nanometer, Mikrometer, Millimeter

Ein Nanometer, also  $10^{-9}$  m, ist ungefähr zehnmal so groß wie die kleinsten Atome, beispielsweise Wasserstoff und Kohlenstoff, und daher unsichtbar für das menschliche Auge, während ein Mikrometer etwas größer als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts ist. Ein Millimeter, die Größe eines Stecknadelkopfes, ist ungefähr die kleinste Größe, die in heutigen Maschinen verwendet wird. Das Verhältnis zwischen Millimeter und Nanometer beträgt 1 Mio.; dies ist ungefähr auch der von der heutigen mechanischen Technologie aufgespannte Bereich vom höchsten Wolkenkratzer bis zu den kleinsten Teilen konventioneller mechanischer Maschinen. Die enormen Möglichkeiten zur Herstellung neuer Maschinen, die sich von 1 mm bis zu 1 nm über sechs Größenordnungen erstrecken, kann man mit der berühmten Äußerung von Richard Feynman ausdrücken: „Unten ist eine Menge Platz“. Wenn  $L$  als typische Länge betrachtet wird, 0,1 nm für ein Atom und vielleicht 2 m für einen Menschen, dann beträgt der Größenbereich  $L \times 10^{10}$ . Wenn man denselben Größenbereich auf eine Fläche anwendet, etwa  $0,1 \text{ nm} \times 0,1 \text{ nm}$  vs.  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , beträgt der Bereich für  $L^2$   $4 \times 10^{20}$ . Da ein Volumen  $L^3$  von drei Seiten  $L$  eingeschlossen wird, ergibt sich, dass die Anzahl der Atome mit einer Größe von 0,1 nm in einem Volumen von  $2 \text{ m}^3$  ungefähr  $8 \times 10^{30}$  beträgt. Erinnert man sich, dass die Avogadro-Zahl  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  die Anzahl der Atome in einem

Mol angibt, und nimmt an, dass es sich um  $^{12}\text{C}$ -Atome mit einer molaren Masse von 12 g handelt, dann beträgt die Masse, die in einem Volumen von  $2\text{ m}^3$  eingeschlossen ist,  $15,9 \times 10^4\text{ kg}$ , was einer Dichte von  $1,99 \times 10^4\text{ kg/m}^3$  entspricht ( $19,9\text{ g/cm}^3$ ). (Das ist ungefähr  $20\times$  die Dichte von Wasser und somit größer als die Dichten von elementarem Kohlenstoff in seinen Modifikationen Diamant und Graphit (die jeweils eine Dichte von 3,51 bzw. 2,25 g/cm aufweisen), da die Größe  $L$  des Kohlenstoffatoms in diesen Formen 0,1 nm geringfügig übersteigt.)

Ein wesentliches Arbeitsinstrument des Nanotechnologen ist die Fähigkeit, die Größe der verschiedenen Parameter von Interesse zu bestimmen, wenn sich die Länge  $L$  von 1 mm etwa auf 1 nm verringert.

Natürlich verhält sich die Anzahl der Atome in einem Bauteil wie  $L^3$ . Wenn ein Transistor auf einer Mikrometerskala  $10^{12}$  Atome enthält, dann enthält er auf einer Nanometerskala ( $L'/L = 10^{-3}$ ) 1000 Atome, wahrscheinlich zu wenig, um seine Aufgabe weiter zu erfüllen.

Normalerweise denken wir beim Skalieren an eine isotropische Skalenreduzierung in drei Dimensionen. Eine Verkleinerung kann jedoch auch als nützlich angesehen werden, wenn sie nur in einer oder zwei Dimensionen erfolgt. Man kann beispielsweise einen Würfel auf ein zweidimensionales (2D) Blatt der Dicke  $a$  verkleinern oder auf eine eindimensionale (1D) Röhre oder einen „Nanodraht“ mit der Querschnittsfläche  $a^2$ . Der Ausdruck „nulldimensional“ wird benutzt, um einen Körper zu beschreiben, der in allen drei Dimensionen sehr klein ist und das Volumen  $a^3$  besitzt. In der Elektronik wird ein nulldimensionaler Körper (ein Würfel im Nanometermaßstab, der die Größe  $a^3$  aufweist und aus einem Halbleitermaterial besteht) „Quantenpunkt“ oder „Quantendot“ (QD) oder auch „künstliches Atom“ genannt, da er nur wenige Elektronenzustände besitzt, deren Energien scharf getrennt sind und folglich den Elektronenzuständen eines Atoms gleichen.

Wie wir sehen werden, hat ein Quantenpunkt typischerweise einen so kleinen Radius  $a$  mit einer entsprechend geringen elektrischen Kapazität  $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 a$  (wobei  $\epsilon\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante des Mediums ist, in das der Quantenpunkt eingebettet ist), dass die elektrische Ladeenergie  $U = Q^2/2C$  „groß“ ist. (In vielen Situationen ist eine Energie „groß“, wenn sie die thermische Anregungsenergie  $k_B T$  bei  $T = 300\text{ K}$  übersteigt, also bei Raumtemperatur.) Dabei ist  $T$  die absolute Temperatur in Kelvin und  $k_B$  die Boltzmann-Konstante, die  $1,38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$  beträgt. In dieser Situation kann eine Änderung der Ladung  $Q$  des Quantenpunktes um nur eine Elektronenladung  $e$  aufgrund der „großen“ Änderung von  $U$  ausreichen, um den Quantenpunkt als einen Teil des Flussweges eines äußeren Stroms ausschalten.

Das ist die grundlegende Idee des „Einzel-Elektronen-Transistors“. Die Rolle des Quantenpunktes in dieser Anwendung gleicht der Rolle des Gitters in der Vakuum-Triode, doch schon eine zusätzliche Elektronenladung auf dem „Gitter“ schaltet das Bauelement aus. Um Bauelemente dieser Art herzustellen, die bei Raumtemperatur arbeiten, ist es erforderlich, dass der Quantenpunkt winzig klein ist, also nur einige wenige Nanometer groß.

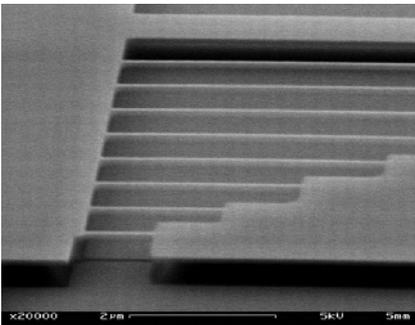
## Unten ist eine Menge Platz

Halten Sie sich vor Augen: Eine Verkleinerung des Maßstabs von arbeitenden Bauelementen und Maschinen von 1 mm auf 1 nm erstreckt sich über sechs Größenordnungen! Über den größten Bereich, vielleicht die ersten fünf Größenordnungen, bis hinunter zu 10 nm (100 Å) mag die klassische newtonsche Physik ausreichen, um Änderungen im Verhalten zu beschreiben. Dieser klassische Bereich der Skala und die Änderungen der Größen wichtiger physikalischer Eigenschaften wie etwa der Resonanzfrequenz sind so groß, dass vollständig unterschiedliche Anwendungen möglich sind.

## Verkleinerung des Xylofons

Das bekannte Xylofon erzeugt musikalische Klänge, wenn seine Stäbe (das Xylofon ist eine lineare Anordnung rechteckiger Stäbe der Dimension  $a \times b \times c$ , wobei mit zunehmender Stablänge  $c$  die Klangfrequenzen niedriger werden) mit einem Schlägel angeschlagen werden und transversale Schwingungen senkrecht zur kleinsten Dimension  $a$  ausführen. Das traditionelle „mittlere C“ in der Musik entspricht 256 Hz. Wenn die Größenskala der Xylofonstäbe auf den Mikrometerbereich verkleinert wird, wie es kürzlich mithilfe der Halbleitertechnologie erreicht wurde, und der Schlägel durch eine elektromagnetische Anregung ersetzt wird, tritt dieselbe transversale mechanische Oszillation auf, deren Messung ergeben hat, dass sie sich dem Gigahertzbereich ( $10^9$  Hz) nähert [5]!

Die gemessenen Frequenzen der Xylofontasten im Mikrometermaßstab werden noch durch die Gesetze der klassischen Physik genau beschrieben. Die Oszillatoren, die erfolgreich verkleinert wurden (Abb. 1.1), unterscheiden sich genommen ein wenig von Xylofonstäben, da sie an beiden Enden fixiert sind und nicht einfach nur lose aufliegen. Die Gleichungen, die in diesem Fall angewendet



**Abb. 1.1** Siliziumnanodrähte in einer harfenähnlichen Anordnung. Weil die Einkristall-Siliziumstäbe an beiden Enden eingespannt sind und aufgrund des Fehlens einer mechanischen Spannung ähnelt die Situation eher

einer Anordnung von Xylofonstäben. Die Resonanzfrequenz des Drahtes von 2  $\mu\text{m}$  Länge liegt bei ungefähr 400 MHz. Abgedruckt mit Erlaubnis von [5] Copyright 1999. American Institute of Physics.

werden, sind allerdings sehr ähnlich. Oszillatoren, deren Frequenzen den GHz-Bereich erreichen, haben vollständig andere Anwendungen als die im musikalischen Hörbereich!

Können solche Elemente in neuen Anwendungen verwendet werden, um Klystrone und Gunn-Oszillatoren zu ersetzen, konventionelle Quellen der GHz-Strahlung? Wenn Techniken gefunden werden können, um vom Mikrometerbereich zum Nanometerbereich verkleinerte „Xylofonstäbe“ herzustellen, würde die klassische Physik wahrscheinlich beinahe bis hinunter zur atomaren Skala wirken. Die begrenzenden Schwingungsfrequenzen sind die zweiatomiger Moleküle, die im Bereich von  $10^{13}$ – $10^{14}$  Hz liegen. Zum Vergleich: Die Frequenz des Lichts, das in der Glasfaserkommunikation verwendet wird, beträgt ungefähr  $2 \times 10^{14}$  Hz.

### **Verlässlichkeit von Konzepten und angenäherten Parameterwerten bis hinunter zu ungefähr $L = 10$ nm (100 Atome)**

Die große Ausdehnung des „klassischen“ Bereichs der Größenskala von 1 mm bis hinunter zu 10 nm bedingt die Stabilität (Beständigkeit) der grundlegenden mikroskopischen Eigenschaften kondensierter Materie (herkömmliche Bau- und Werkstoffmaterialien) nahezu bis zu einer Größe von  $L = 10$  nm oder 100 Atomen in einer Reihe bzw. 1 Mio. Atome pro Würfel.

Typische mikroskopische Eigenschaften kondensierter Materie sind der inneratomare Abstand, die Massendichte, die Schallgeschwindigkeit  $v_s$ , der Elastizitätsmodul  $E$ , der Kompressionsmodul  $K$ , die Kohäsivenergie  $U_0$ , der spezifische Widerstand  $\rho$ , die thermische Leitfähigkeit  $k$ , die relativen magnetischen und dielektrischen Suszeptibilitäten  $\kappa$  und  $\epsilon$ , die Fermi-Energie  $E_F$ , die Austrittsarbeit  $W$  eines Metalls und die Bandlücke  $E_g$  eines Halbleiters oder Isolators. Ein aktuelles Beispiel, bei dem Bulk-Eigenschaften bis zu einer Probengröße von 1 nm beibehalten werden, sind die auf CdSe-„Quantenpunkten“ beruhenden Fluoreszenzmarker, die weiter unten beschrieben werden.

### **Auch die Eigenschaften von Bulk-Materialien werden von der Nanophysik bestimmt**

Auch wenn wir die Skala im Bereich von 1–10 nm als eine „klassische Skala“ beschreiben können, muss ein Nanotechnologe die Tatsache berücksichtigen, dass für das vollständige Verständnis vieler Eigenschaften der kondensierten Materie bereits Konzepte der Nanophysik erforderlich sind. Dies ist eigentlich selbstverständlich, da die Atome selbst in ihrer Struktur und in ihrem Verhalten nanophysikalisch sind.

Darüber hinaus beruht das heutige grundlegende Verständnis von Halbleitern einschließlich der Energiebänder, der verbotenen Bänder und der effektiven Masse  $m^*$  von freien Elektronen und freien Löchern auf der Nanophysik in Form der Schrödingergleichung, die auf eine periodische Struktur angewendet wird.

Periodizität, eine sich wiederholende Einheitszelle der Dimension  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (in drei Dimensionen) verändert stark den Weg, auf dem sich ein Elektron (oder ein „Loch“, ein grundsätzlich positiv geladener freier Platz für ein Elektron) im Fest-

körper bewegt. Wie weiter unten ausführlich diskutiert wird, existieren Bereiche (Bänder) der Energie der freien Ladungsträger, in denen die Ladungsträger durch den periodischen Festkörper wandern, ohne irgendwo zu streuen; dies erfolgt auf dieselbe Art und Weise, wie sich eine elektromagnetische Welle ohne Abschwächung im Bandpass einer Übertragungsleitung ausbreiten wird. Zwischen den erlaubten Energiebändern gibt es Lücken, in denen sich keine freien Ladungsträger aufhalten können, wiederum in Analogie zu einer Bandsperre in einer Übertragungsleitung.

Daher sind im „klassischen“ Bereich der Größenskala, wie er oben beschrieben wurde, die Folgen der Periodizität für die Bewegung der Elektronen und Löcher unverändert (die allerdings bezogen auf die newtonschen Gesetze „nicht klassisch“ sind). In der Praxis können die Eigenschaften eines rechteckigen Feldes von 100 Atomen pro Seite, ein Nanokristall mit nur 1 Mio. Atomen, mit den Methoden der Festkörperphysik genau beschrieben werden. Wenn das Material kristallin ist, sind die Eigenschaften einer Probe mit  $10^6$  Atomen wahrscheinlich ein ungefährer Wegweiser zu den Eigenschaften eines makroskopischen Körpers. Dessen Bulk-Eigenschaften sollten sich aus einer 100-Atome-pro-Seite-Simulation relativ leicht herleiten lassen.

Ein grundlegendes Verständnis der Ideen und somit auch der Herstellungsverfahren der Halbleiterphysik ist voraussichtlich ein nützliches Hilfsmittel für einen Wissenschaftler oder Ingenieur, der auf dem Gebiet der Nanotechnologie arbeiten wird. Die meisten Bauteile in der Gruppe der Mikroelektromechanischen Systeme (MEMS) einschließlich Beschleunigungssensoren, den damit verbundenen Winkelgeschwindigkeitssensoren etc. werden heutzutage unter Verwendung der Halbleitermikrotechnologie hergestellt.

Die zweite und anspruchsvollere Frage für den Nanotechnologen ist, die Änderungen im physikalischen Verhalten, die am Ende des klassischen Bereichs auftreten, zu verstehen und hoffentlich auszunutzen. Das „Ende der Größenskala“ ist die Größe der Atome und Moleküle, bei der die Nanophysik der bewährte konzeptionelle Ersatz für die klassische Physik ist. Moderne Physik, die die Quantenmechanik als Darstellung der Materie im Nanometerbereich einschließt, ist eine vollständig entwickelte und bewiesene Theorie, deren Anwendung auf reale Situationen nur durch die Fähigkeiten zur Modulierung und die Berechnung begrenzt sind.

Im modernen Zeitalter erleichtern Simulationen und angenäherte Lösungen zunehmend die Anwendung der Nanophysik auf nahezu jede Fragestellung von Interesse. Die wesentlichen Probleme sind bereits (angemessen oder mehr als angemessen) in der umfangreichen Literatur der theoretischen Chemie, Biophysik, Physik der kondensierten Materie und Halbleiterphysik gelöst. Das praktische Problem besteht darin, das passende Werk zu finden, und häufig auch darin, die Bezeichnungen und das Einheitensystem so umzuwandeln, dass man die Ergebnisse auf die eigene Fragestellung anwenden kann.

Es sollte betont werden, dass Information auch eine inhärente Größe hat. Die Dichte der Information, die gespeichert werden kann, wird nur durch das kodierende Element bestimmt, sei es eine Perle auf einem Rechenbrett, ein magneti-

scher Bereich auf einer Festplatte, eine Ladung auf einem CMOS-Kondensator, eine Vertiefung im Nanometermaßstab in einer plastischen aufzeichnenden Oberfläche, die An- oder Abwesenheit eines bestimmten Atoms an einem bestimmten Ort oder die Anwesenheit eines „up“ oder „down“ Spins (elektronisches oder nukleares magnetisches Moment bei einer Atomdichte von  $0,1 \text{ nm}^{-3} = 10^{30}/\text{m}^3 = 10^{24}/\text{cm}^3$ ) in kondensierter Materie. Wenn diese kodierenden Elemente sich auf einer Oberfläche befinden, beträgt die begrenzende Dichte  $0,1 \text{ nm}^{-2} = 10^{20}/\text{m}^2$ .

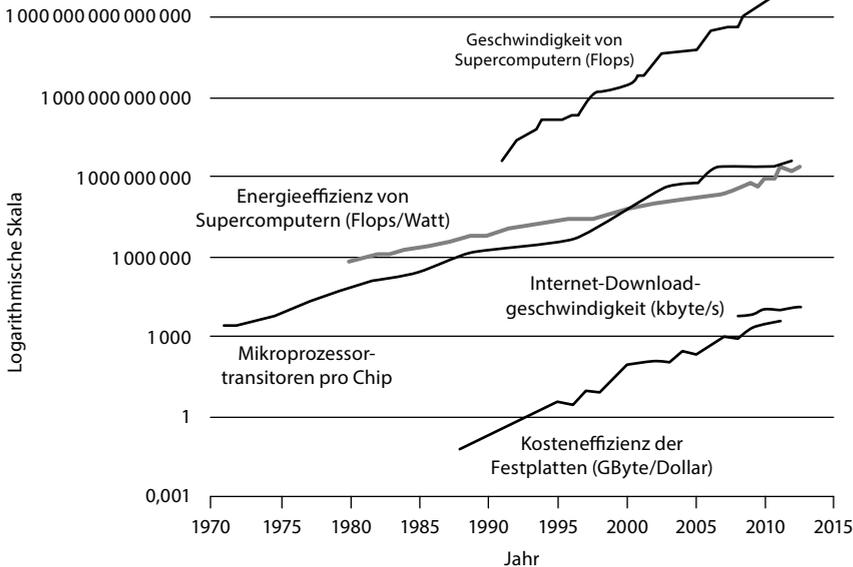
Die wesentliche Begrenzung mag die reale Größe des Leselements sein, das geschichtlich gesehen im Fall des magnetischen Bits eine Drahtspule (Magnetspule) ist. Die maximale Informationsdichte in der heute beständig weiterentwickelten Technologie der magnetischen Computerfestplattenlaufwerke liegt ungefähr bei  $100 \text{ Gb/in}^2$  oder  $10^{11}/\text{in}^2$ . Möglicherweise können nichtmagnetische Technologien, vielleicht auf Grundlage von Feldern von AFM-Spitzen, die auf einen Plastikfilm wie Polymethylmethacrylate (PMMA) schreiben, die magnetische Technologie überholen.

## 1.2

### Das mooresche Gesetz

Der Computerchip ist sicherlich eine der herausragenden Errungenschaften der Technologie des 20. Jahrhunderts, die die nutzbare Rechengeschwindigkeit bei geringerer Größe und reduzierten Kosten erheblich erweitert. In der modernen Gesellschaft sind Computer und die Kommunikation per E-Mail nahezu überall nutzbar. Möglicherweise ist das bahnbrechendste Ergebnis der Computertechnologie die allgemeine Verfügbarkeit des E-Mail-Zugangs zu den informierten, zumindest geringfügig subventionierten, großartigen Suchmaschinen wie etwa Google. Gibt es keine unerwartete Rückkehr zur Vergangenheit, die diesen großartigen menschlichen Fortschritt umkehrt, scheint es vernünftig zu sagen, dass Computer in eine neue Ära der Information, der Verbundenheit und der Aufklärung in der menschlichen Existenz geführt haben.

Moore's empirisches Gesetz, das in Abb. 1.2 in verschiedenen Formen dargestellt ist, beruht auf der Beobachtung von Moore, dass sich nach jeweils 1,5 Jahren die Anzahl der Mikroprozessorentransistoren pro Chip verdoppelt und so ein exponentielles Wachstum zeigt. Wie in der Abbildung ebenfalls dargestellt ist, wachsen verschiedene damit in Zusammenhang stehende Leistungsgrößen wie (von oben nach unten) die Geschwindigkeit und Energieeffizienz von Supercomputern, die Internet-Downloadgeschwindigkeit und die Kosteneffizienz der Festplatten auch exponentiell. Im Allgemeinen fasst dieses empirische Gesetz die „Ökonomie der Skalierung“ wie folgt zusammen: Dieselbe Aufgabe wird bei ständiger Verringerung der Größe erfüllt. (Wie wir sehen werden, bedeutet kleiner auch schneller, wodurch der Vorteil der Verkleinerung erhöht wird.) Beim alten Rechenbrett stellen die Positionen der Perlen binäre Zahlen mit einer Informationsdichte dar von vielleicht 1 bit [(0/1) oder (ja/nein)] pro  $\text{cm}^2$ . In der



**Abb. 1.2** Das Gesetz von Moore [6]. Die Anzahl der Transistoren in aufeinanderfolgenden Generationen von Computerchips ist exponentiell angestiegen, sie verdoppelt sich etwa alle 1,5 Jahre. George Moore, Mitbegründer von Intel, Inc. sagte dieses Wachstumsmuster 1965 voraus, als ein Siliziumchip nur 30 Transistoren enthielt! Die Anzahl von Dynamic Random Access Memory (DRAM) Speicherzellen folgt einem vergleichbaren Muster.

Das Wachstum beruht hauptsächlich auf der kontinuierlichen Verringerung der Größe der Schlüsselemente in den Bauteilen auf weniger als 45 nm aufgrund von Verbesserungen bei der optischen Fotolithografie. Die Taktfrequenzen sind gleichermaßen angestiegen, sie betragen zurzeit etwa 2 GHz. Eine Zusammenfassung finden Sie in [7]. Abgedruckt mit Erlaubnis von [6].

Silizium-Mikroelektroniktechnologie entspricht eine einfach herstellbare Speicherplatzgröße von  $1 \mu\text{m} \cdot 10^{12} \text{ bits/cm}^2$  ( $1 \text{ Tb/cm}^2$ ). Genauso wichtig ist kontinuierliche Verkleinerung des magnetischen Festplattenelements (und des dazugehörigen Lese-/Schreibkopfes), die die  $\sim 1000 \text{ Gb}$  Plattenspeicher der gegenwärtigen Laptops möglich macht. Die kontinuierliche Verbesserung der Leistung (Verringerung der Größe der Bauelemente), die durch das Gesetz von Moore empirisch beschrieben wird (eine Verdopplung der Leistung etwa alle 1,5 Jahre), entsteht durch die entsprechende Verringerung der Größenordnung der Computerchips, unterstützt von der Gesamtnachfrage des Marktes, die wiederum stark von der Werbung beeinflusst wird.

Die enormen Verbesserungen vom Rechenbrett zum Pentiumchip und zum Core i7-Chip veranschaulichen das Versprechen der Nanotechnologie. Bitte beachten Sie, dass das alles dennoch im Bereich der „klassischen Größenskala“ liegt! Die Computerexperten sind sich absolut sicher, dass nanophysikalische Effekte soweit vernachlässigbar sind.

Die Halbleiterindustrie, die über Jahrzehnte eine herausragende Leistung vollbrachte und dabei eine fortschrittliche Gesellschaft geformt, aber auch ihre Unternehmer und Aktionäre angemessen reich gemacht hat, sorgt sich um ihren nächsten Schritt!

Der nächste Schritt der Halbleiterindustrie, wenn er denn wirklich stattfindet, muss sich auf die nanophysikalischen Regeln einlassen. Jede neue Technologie, wenn sie machbar ist, wird mit allgemein zugänglichen Rechnerkapazitäten bei unvorstellbar geringen Kosten konkurrieren müssen. Wenn Tetraherz-Computer mit 8 Gb RAM-Speicher und 1000 Gb Festplatten tatsächlich Standardartikel werden, was kann dann mit ihnen konkurrieren? Die Siliziumtechnologie wird schwer zu schlagen sein.

Die Nanotechnologie stellt auch im wörtlichen Sinn die physikalisch mögliche Grenze für solche Verbesserungen dar. Die Grenze der Technologie ist offensichtlich, da die kleinste mögliche Verbindungsleitung auf einem Chip zumindest einen Durchmesser von 100 Atomen haben muss. Das Gesetz von Moore beschreibt den Erfolg der Halbleiterindustrie empirisch: das Zurverfügungstellen immer schnellerer Computer mit wachsender Ausgereiftheit bei kontinuierlich fallendem Preis. Der Erfolg wurde mit einer immer größeren Anzahl von Transistoren pro Chip erreicht, was durch eine immer feinere Skalierung der leitenden und aktiven Komponenten auf den Siliziumchips möglich wurde. Es gibt ein großes, auf wirtschaftlichen Gründen basierendes Problem, diesen Trend (das Gesetz von Moore) kontinuierlich fortzusetzen: die steil ansteigenden Produktionskosten (um geringere Linienbreiten und kleinere Transistoren zu verwirklichen).

Das eigentliche Problem bei der Fortsetzung dieses Trends sind aber die Änderungen der physikalischen Gesetze, die auftreten, wenn die Größe von Atomen erreicht wird: Dies ist ein wichtiges Thema in diesem Buch.

### 1.3

#### Esakis Quantentunneldiode

Der Tunneleffekt ist in der Quantenmechanik grundlegend, eine wesentliche Konsequenz von Wahrscheinlichkeitswellenfunktionen als Maß für den Ort eines Teilchens. Anders als ein Tennisball kann ein winziges Elektron eine Barriere durchdringen. Dieses Phänomen wurde zuerst in der Halbleitertechnologie von Leo Esaki ausgenutzt, der entdeckte, dass die Strom-Spannungs-Kurven ( $I/U$ ) einer Halbleiter-pn-Gleichrichterdiode anormal wird, wenn die Barriere sehr dünn ist, was durch Erhöhung der Konzentration des Dotierelements erreicht wird. Der Durchlassstrom  $I$  ergibt bei Auftragung gegen die Spannung  $U$  normalerweise eine ansteigende Exponentialfunktion, die sich wie  $\exp(eU/kT)$  verhält; hier geht ihr ein eindeutiger „Strom-Höcker“ voraus, der bei einer Biasspannung von null beginnt und sich bis zu etwa  $U = 50$  mV erstreckt. In dem Bereich zwischen dem „Höcker“ und dem Beginn des herkömmlichen exponentiellen Stromanstiegs gibt es einen Bereich mit negativer Steigung  $dI/dU < 0$ !

Der planare Kontakt zwischen einem n-leitenden und einem p-leitenden Bereich in einem Halbleiter wie Silizium enthält eine „Verarmungszone“, die die leitenden Bereiche mit freien Elektronen auf der n-Seite und freien Löchern auf der p-Seite trennt. Es ist eine nützliche, aber nicht triviale Übung in der Halbleiterphysik, zu zeigen, dass für die Breite  $W$  der Verarmungszone gilt:

$$W = \left[ \frac{2\epsilon\epsilon_0 V_B (N_D + N_A)}{e(N_D N_A)} \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

Dabei ist  $\epsilon\epsilon_0$  die dielektrische Konstante,  $e$  die Elektronenladung und  $V_B$  die Bandverbiegung über dem Kontakt;  $N_D$  und  $N_A$  sind jeweils die Konzentrationen der Donator- und Akzeptorstörstellen.

Die Änderung im elektrischen Verhalten (der negative Widerstandsbereich), die auf dem Tunneln der Elektronen (in der schmalen Verarmungszone) beruht, ermöglicht einen vollkommen neuen Effekt, eine Schwingung bei einer außerordentlich hohen Frequenz! (Wie es oft beim anhaltenden Fortschritt der Technologie der Fall ist, wurde diese bahnbrechende Anwendung als Oszillator lange von der Gunn-Diode verdrängt, die einfacher herzustellen ist.)

Die Esaki-Tunneldiode ist vielleicht das erste Beispiel, bei dem das Auftreten der Quantenmechanik an der Grenze einer kleinen Größe zu einer neuen Anwendung geführt hat. In unserer Ausdrucksweise ist die Sperrschicht-Tunnelbarriere zweidimensional, mit nur einer kleinen Dimension, der Verarmungsschichtdicke  $W$ . Die Esaki-Diode gehört in unserer Einordnung zu den Bauteilen der Nanotechnologie, da die kontrollierte dünne Barriere  $W$  nur einige Nanometer dick ist.

## 1.4

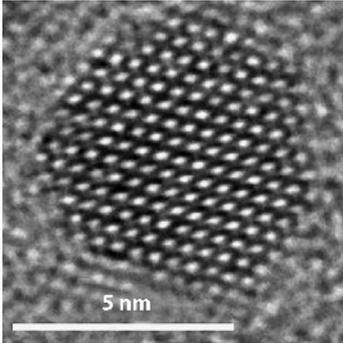
### Quantenpunkte in zahlreichen Farben

Quantenpunkte (QDs) aus CdSe und vergleichbaren Halbleitern werden durch sorgfältig kontrolliertes Ausfällen aus Lösungen mit definierten Größen im Bereich von  $L = 4$  oder  $5$  nm gewachsen. Man hat herausgefunden, dass die Wellenlänge (Farbe) des intensiven Fluoreszenzlichts, das von diesen Quantenpunkten bei Beleuchtung mit ultravioletten Licht (UV) emittiert wird, empfindlich von der Größe  $L$  abhängt.

Es sind genug Atome in diesem Teilchen, um die Konzepte der Festkörperphysik erfolgreich anzuwenden, die Elektronenbänder, verbotene Bandlücken, effektive Massen von Elektronen und Löchern und vieles mehr enthalten.

Trotzdem ist das Teilchen klein genug, um „künstliches Atom“ genannt zu werden, das durch diskrete scharfe Elektronenenergiezustände und diskrete scharfe Absorptions- und Emissionswellenlängen der Photonen charakterisiert wird.

Transmissions-Elektronenmikroskopaufnahmen (TEM) solcher Nanokristalle, die vielleicht nur aus 50 000 Atomen bestehen, zeigen perfekt angeordnete Kristalle, die die Kristallstruktur und annähernd die Gitterkonstante des Festkörpers besitzen (Abb. 1.3). Quantitative Untersuchungen des Lichtemissionsprozesses



**Abb. 1.3** Transmissions-Elektronenmikroskopaufnahme (TEM) eines 5 nm CdSe Quantenpunktteilchens, die freundlicherweise von Andreas Kornowski, Universität Hamburg, Deutschland zur Verfügung gestellt wurde.

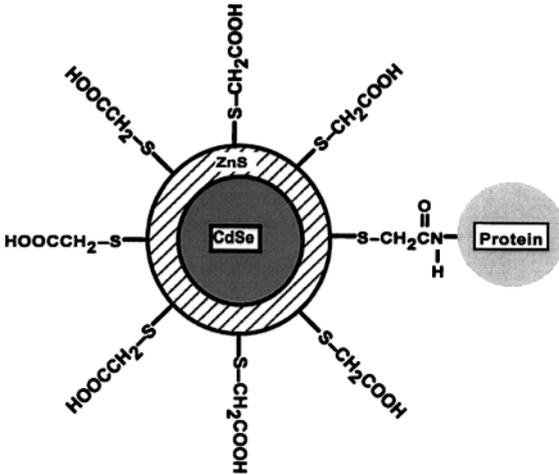
in Quantenpunkten weisen darauf hin, dass die Bandlücke, die effektiven Massen von Elektronen und Löchern sowie andere mikroskopische Materialeigenschaften sehr nah bei den Werten von großen Kristallen aus demselben Material liegen. Die Lichtemission stammt in allen Fällen von der strahlenden Rekombination eines Elektrons und eines Loches, die zuvor durch die Bestrahlung mit kürzeren Wellenlängen erzeugt werden.

Die Energie  $E_R$ , die bei der Rekombination entsprechend der Beziehung  $E = h\nu = hc/\lambda$  freigesetzt wird, wird vollständig an ein Photon (die Quanteneinheit des Lichts) abgegeben. Dabei sind  $\nu$  und  $\lambda$  jeweils die Frequenz bzw. die Wellenlänge des emittierten Lichts,  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit  $= 3 \times 10^8$  m/s und  $h$  das plancksche Wirkungsquantum  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J s  $= 4,136 \times 10^{-15}$  eV s. Die Farbe des emittierten Lichts wird durch die Wahl der Länge  $L$  kontrolliert, da  $E_R = E_G + E_e + E_p$  mit fallendem  $L$  größer wird. Dabei ist  $E_G$  die Bandlücke des Halbleiters,  $E_e$  und  $E_p$  sind die Confinement-Energien der Elektronen bzw. Löcher.

Es ist eine elementare Übung in der Nanophysik, die in Kapitel 4 erläutert wird, zu zeigen, dass diese Confinement-Energien (Blauverschiebung) proportional zu  $1/L^2$  sind. Da diese Ausdrücke die Energie des emittierten Photons vergrößern, verkürzen sie die Wellenlänge des Lichts relativ zu dem vom Bulk des Halbleiters emittierten; dieser Effekt wird als „Blauverschiebung“ des Lichts von Quantenpunkten bezeichnet.

Diese Nanokristalle werden in der biologischen Forschung als Marker für bestimmte Arten von Zellen verwendet, während sie im optischen Mikroskop unter Bestrahlung mit ultraviolettem Licht (UV) beobachtet werden.

Bei diesen Anwendungen ist der eigentliche Halbleiter-QD-Kristall üblicherweise mit einem dünnen Film beschichtet, um ihn unempfindlich gegen eine wässrige biologische Umgebung und darin lösbar zu machen. Eine weitere Schicht kann dann aufgebracht werden, die dem QD erlaubt, sich vorzugsweise an eine bestimmte biologische Zelle oder einen Zellbestandteil von Interesse zu binden. Ein derart beschichteter Quantenpunkt ist in Abb. 1.4 dargestellt. Die Autoren



**Abb. 1.4** Schematische Darstellung eines Quantenpunktes zur Verwendung in biologischem Gewebe mit Schichten, die zur Sicherstellung der Wasserlöslichkeit dienen. Dieser ZnS-ummantelte CdSe-Quantenpunkt

ist mithilfe von Mercaptoacettsäure kovalent an ein Protein gebunden. Die typische Größe des Kerns des Quantenpunktes beträgt 4,2 nm (Abgedruckt mit Erlaubnis von [8], Copyright 1998 AAAS).

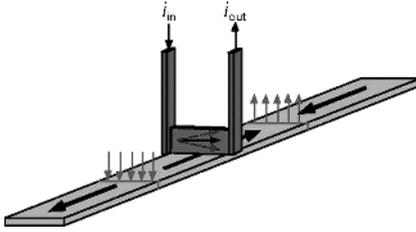
berichten, dass die Quantenpunkte, die sie als leuchtende Marker verwenden, 20-mal heller und 100-mal stabiler gegen Fotobleichung sind und Emissionsspektren besitzen, die dreimal schärfer als die von herkömmlichen organischen Farbstoffen wie Rhodamin sind.

Der biologische Forscher kann beispielsweise die äußere Zellenoberfläche grün erleuchtet sehen, während die Oberfläche des inneren Zellkerns rot beleuchtet sein kann. Dazu ist nur eine Bestrahlung des ganzen Bereichs mit Licht einer einzigen kürzeren Wellenlänge erforderlich.

## 1.5

### GMR and TRM 10–1000 Gb Leseköpfe für Festplatten

In modernen Computern verschlüsselt die Festplatte Informationen in Form einer dichten Folge von winzigen, linearen, reversiblen ferromagnetischen Bereichen oder Bits. Ihre Leistungsfähigkeit wurde seit 1995 erheblich durch die aufeinanderfolgende Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands (GMR) und des Magnetischen Tunnelwiderstands (TMR) verbessert; beide erlauben stufenweise kleinere Anordnungen (Leseköpfe) zum Einlesen der magnetischen Daten. Bei den GMR-Bauelementen liegen die ferromagnetischen Bits, wie in Abb. 1.5 gezeigt, parallel zur Plattenoberfläche. Die Arbeitsweise der GMR-Leseköpfe ist ein wunderbares Beispiel für die Nanophysik und führte im Jahr 2007 zur Verleihung des Nobelpreises für Physik an Peter Grünberg und Albert Fert. Wir diskutieren hier den GMR-Effekt aufgrund seiner Wichtigkeit sowie in Verbindung mit



**Abb. 1.5** Schematische Darstellung eines GMR-Lesekopfes. Zwei Leiter sind durch das Abtastelement verbunden, das wiederum eine leitende Kupferschicht enthält, die zwischen einem harten und einem weichen magneti-

schen Material eingebettet ist (Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von G.A. Prinz, US Naval Research Laboratory, Washington, DC).

dem Nobelpreis. Eine ausführlichere Darstellung einschließlich des TMR-Lesekopfs mit Tunnelkontakt, der auf ferromagnetische Bits eingestellt ist, die senkrecht zur Plattenoberfläche angeordnet sind und Laufwerke mit 1000 Gb ermöglichen, erfolgt in den Abschn. 8.1–8.4. Die TMR-Technologie wird heute in den „Cloud-Computern“ verwendet, die große Mengen an Informationen verarbeiten, die auf YouTube und Facebook erzeugt werden, während sogar kleinere, aber teurere „Flash-Speicherzellen“ (die in den bekannten „USB-Speichersticks“ verwendet werden) die Festplatte bei bestimmten hochwertigen Anwendungen ersetzen. Die ferromagnetischen Bits werden in die Oberfläche der Festplatte geschrieben (und von dort ausgelesen), die gleichmäßig mit einem ferromagnetischen Film beschichtet ist, der ein kleines Koerzitivfeld hat. Dies ist ein „sanfter“ Ferromagnet, sodass ein kleines angelegtes Magnetfeld  $\mathbf{B}$  einfach eine ferromagnetische Magnetisierung  $\mathbf{M}$  in Richtung des anliegenden Feldes  $\mathbf{B}$  erzeugen kann. Sowohl das Schreiben als auch das Lesen wird vom „Lesekopf“ übernommen.

Die Dichte der Informationen, die auf einer magnetischen Festplatte gespeichert werden können, wird grundsätzlich durch die kleinstmögliche Größe einer ferromagnetischen „Domäne“ begrenzt. Ferromagnetismus ist ein kooperativer nanophysikalischer Effekt, der eine Mindestzahl an Atomen erfordert: Unterhalb dieser Zahl bleiben die einzelnen magnetischen Momente der Atome unabhängig voneinander. Man schätzt, dass diese „superparamagnetische Grenze“ in der Größenordnung von 100 Gb/in<sup>2</sup> liegt.

Die praktische Grenze war aber geschichtlich gesehen die Größe des „Lesekopfes“, der in Abb. 1.5 dargestellt ist. Er erzeugt auf der einen Seite ein lokales magnetisches Feld  $\mathbf{B}$  im Oberflächenbereich, um eine magnetische Domäne zu erzeugen, und tastet dann das magnetische Feld der so erzeugten magnetischen Domäne ab. In der heutigen Technologie besitzen die linearen Bits eine Länge von ungefähr 100 nm ( $\mathbf{M}$  zeigt entlang der Spur) und eine Breite im Bereich von 0,3–1,0  $\mu\text{m}$ . Die ferromagnetische Magnetisierung der Domäne  $\mathbf{M}$  ist parallel oder antiparallel zur linearen Spur.

Die lokal begrenzten, senkrechten Magnetfelder  $\mathbf{B}$ , die an den Verbindungen zwischen parallelen und antiparallelen Bits auftreten, werden vom Lesekopf abgetastet. Die Breite des Übergangsbereichs zwischen benachbarten Bits, in denen

dieses lokal begrenzte Magnetfeld existiert, liegt zwischen 10 und 100 nm. Die lokal begrenzten Magnetfelder  $\mathbf{B}$  erstrecken sich linear über die Spur und zeigen von der Oberfläche der Festplatte aufwärts (oder abwärts), wie in Abb. 1.5 dargestellt ist.

Der dem neusten Stand der Technik entsprechende Magnetfeldsensor ist ein ausnehmend dünnes, sandwichartiges Gebilde aus magnetischen und nichtmagnetischen Metallen, die senkrecht orientiert sind, um das Magnetstreufeld  $\mathbf{B}$  zwischen den benachbarten Bits aufzunehmen. Die Gesamtdicke des Sensors entlang der Richtung der Spur beträgt zurzeit etwa 80 nm, doch diese Dicke kann demnächst auf 20 nm absinken. Der GMR-Sensor besteht aus einer abtastenden weichen, ferromagnetischen Schicht aus einer NiFe-Legierung, einem Cu-Abstandshalter und einer „magnetisch harten“ ferromagnetischen Co-Schicht. Ein abtastender Strom fließt entlang des sandwichartigen Gebildes quer zur Spur; gemessen wird die Spannung über der sandwichartigen Anordnung, die auf das Magnetfeld in der Ebene des Sandwichs reagiert. Die Cu-Schicht in diesem Lesekopf-Sandwich hat eine Dicke von 15 Atomen! Die Empfindlichkeit dieses GMR-magneto-resistiven Sensors liegt momentan in der Nähe von 1 % pro Oersted ( $1 \text{ Oe} \approx 10^{-4} \text{ A/m}$ ).

Das Schreiben der magnetischen Bits wird von einer Komponente des „Lesekopfes“ ausgeführt, die in Abb. 1.5 nicht dargestellt ist. Sie erzeugt auf der Oberfläche ein lokalisiertes Magnetfeld  $\mathbf{B}$  parallel oder antiparallel zur Spur. Das örtliche Magnetfeld an der Oberfläche wird induktiv von einer geschlossenen ebenen, aus einer magnetischen Schicht bestehenden Leiterschleife erzeugt, die Ähnlichkeit mit einer Kiste mit offenen Seiten hat; sie wird von einer linearen Spalte quer zur Spur unterbrochen, die der Festplatte zugewandt ist.

Diese „Lesekopf-Einheiten“ werden in Massen produziert, wobei Methoden aus der lithografischen Siliziummikrotechnologie verwendet werden. Man erwartet, dass noch kleinere Sensoren mit höheren Speicherdichten möglich sein werden, wenn es weitere Fortschritte in der Siliziumtechnologie gibt.

Diese Einheiten, die eine große wirtschaftliche Auswirkung haben, sind eine Demonstration der Nanotechnologie, bei der die genau kontrollierten Abmessungen im Nanometerbereich liegen. Der Mechanismus der deutlich verbesserten Magnetfeldempfindlichkeit des Riesenmagnetowiderstands (GMR) ist ebenfalls vollständig nanophysikalischer Natur; er ist ein Beispiel von (wahrscheinlich unerwartet) besseren Ergebnissen an der Grenze zum Quantenbereich aus der Messskala.

## 1.6

### Beschleunigungssensoren in Ihrem Auto

Moderne Autos besitzen Airbags, die sich bei Unfällen aufblasen, um Fahrer und Mitfahrer vor abrupten Beschleunigungen zu schützen. Mikroelektromechanische Beschleunigungssensoren (Beschleunigungsmesser), die aus Halbleitermaterialien bestehen, befinden sich in einem Gehäuse, das die Airbags schnell auf-

bläst. Der eigentliche Beschleunigungssensor ist eine Masse  $m$ , die durch eine Feder mit der Federkonstanten  $k$  am Gehäuse des Sensors befestigt ist, der wiederum am Fahrgestell angebracht ist. Wenn das Auto (und somit das Gehäuse des Sensorelements) eine starke Beschleunigung erfährt, wird die Feder, die mit der Masse verbunden ist, sich ausdehnen oder zusammenziehen; dies führt zu einer Bewegung der Masse  $m$  relativ zum Sensorelement. Diese Auslenkung wird gemessen, zum Beispiel durch die Änderung einer Kapazität, und löst dann gegebenenfalls das Aufblasen des Airbags aus. Dieses mikroelektromechanische (MEM) Bauteil wird in einem Gehäuse zusammen mit der zugehörigen Elektronik maschenweise mit den Methoden der auf der Basis von Silizium beruhenden Mikroelektronik hergestellt.

### Die newtonschen Gesetze

Die newtonschen Gesetze beschreiben den Ort  $x$ , die Geschwindigkeit  $v = dx/dt$  und die Beschleunigung  $a = d^2x/dt^2$  einer Masse  $m$ , auf die eine Kraft  $F$  wirkt; es gilt:

$$\frac{m d^2x}{dt^2} = F \quad (1.2)$$

Die Kinematik beschreibt die Beziehungen zwischen  $x$ ,  $v$ ,  $a$  und  $t$ . Der zeitabhängige Ort  $x$  wird bei einer gleichförmigen Beschleunigung  $a$  beispielsweise durch folgende Gleichung beschrieben:

$$x = x_0 + v_0 t + at^2 \quad (1.3)$$

Dabei sind  $x_0$  und  $v_0$  jeweils der Ort und die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Hängt die Beschleunigung  $a(t)$  von der Zeit ab und sind  $x_0 = 0$  und  $v_0 = 0$ , so gilt:

$$x(t) = \iint a(t) dt^2 \quad (1.4)$$

Das erste newtonsche Gesetz besagt, dass bei Abwesenheit einer Kraft die Masse  $m$  in Ruhe verharrt, wenn sie anfänglich in diesem Zustand ist; wenn sie zu Beginn in Bewegung war, setzt sie diese Bewegung unverändert fort. (Diese Gesetze gelten nur, wenn das Koordinatensystem, in dem die Beobachtungen gemacht werden, sich gleichmäßig bewegt; sie gelten sicher nicht in einem beschleunigten Bezugssystem wie einem Karussell. Für die meisten Zwecke kann die Oberfläche der Erde als ein „Inertialsystem“ angesehen werden, obwohl sie aufgrund der Rotation beschleunigt ist; das heißt, die newtonschen Gesetze können hier verwendet werden.)

Das zweite Gesetz besagt  $F = ma$  (1.2).

Das dritte Gesetz sagt aus, dass für zwei Massen in Kontakt die Kraft, die von der ersten auf die zweite ausgeübt wird, entgegengesetzt und genauso groß ist wie die Kraft, die von der zweiten auf die erste ausgeübt wird.

Eine ausgeklügelte Version eines solchen Beschleunigungssensors, der so ausgelegt ist, dass er Beschleunigungen in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung aufnehmen kann, und mit einer integrierten Elektronik ausgestattet ist, kann verwendet werden, um dreidimensionale Verschiebungen als Funktion der Zeit zu messen.

Diese Geräte werden heutzutage natürlich nicht im Nanometerbereich gebaut, aber sie sind ein Beispiel für eine umfangreiche Klasse von mikroelektronischen Sensoren, die bei Fortschritten in der Halbleitertechnologie kleiner hergestellt werden könnten, wenn kleinere Bauteile sinnvoll sind.

## 1.7

### Nanoporöse Filter

Die ursprünglichen nanoporösen Filter<sup>1)</sup> (Nuclepore) [9] sind Ebenen aus Polycarbonat mit einer Dicke von 6–11  $\mu\text{m}$ , die dicht aneinanderliegende Felder von parallelen Löchern aufweisen, die durch die Ebene verlaufen. Die Filter sind mit Porengrößen von 0,015–12,0  $\mu\text{m}$  (15–12 000 nm) erhältlich. Die Löcher werden erzeugt, indem man die Polycarbonatebenen einem senkrechten Strahl von ionisierenden  $\alpha$ -Teilchen aussetzt, der lineare Spuren mit Schäden im atomaren Maßstab im Polycarbonat bewirkt. Kontrolliertes chemisches Ätzen wird dann verwendet, um die parallelen Löcher herzustellen und auf den gewünschten Durchmesser zu vergrößern. Dieses Projekt ist ein Beispiel für Nanotechnologie.

Die Filter sind robust und können eine beträchtliche Durchlassleistung haben; bis zu 12 % der Fläche können geöffnet sein. Die feinsten Filter blockieren den Durchlass von Bakterien und vielleicht sogar von einigen Viren; sie werden bei zahlreichen Anwendungen benutzt, u. a. bei Wasserfiltern für Wanderer.

Eine zweite Art von Filtern (Anapore) hat sich später durchgesetzt. Sie bestehen aus Aluminiumoxid, das durch anodische Oxidation von Aluminium erzeugt wird. Diese Filter sind poröser (bis zu einem Wert von 40 %), fester und temperaturbeständiger als Polycarbonatfilter. Die Anapore-Filter werden beispielsweise benutzt, um dichte Anordnungen von Nanodrähten herzustellen. Diese erhält man, indem man ein duktiles Metall bei hohem Druck und hoher Temperatur in die Poren des Nanopore-Aluminiumoxidfilters presst.

## 1.8

### Bauelemente im Nanometermaßstab auf der Basis herkömmlicher Technologien

Mithilfe der heutigen Kenntnisse von Materialien hat man verstanden, dass die wunderschönen Farben von gefärbten Glasfenstern Metallpartikeln im Nanometermaßstab entstammen, die im Glas verteilt sind. Diese Metallteilchen weisen bei der Streuung von Licht Resonanzen mit bestimmten Wellenlängen auf, die von

1) Diese Filter werden von der Nuclepore Corporation, 7035 Commerce Circle, Pleasanton, CA 94566 hergestellt.

der Größe  $L$  der Partikel abhängig sind. Die Verteilung der Partikelgröße hängt wiederum von der Wahl der Metallverunreinigungen, ihrer Konzentration und der Hitzebehandlung des Glases ab. Wenn die Metallteilchen im Glas beleuchtet werden, dann streuen sie vorzugsweise Licht bestimmter Farben. Neutrale Dichtefilter, die für fotografische Anwendungen verkauft werden, weisen ebenso eine Verteilung von kleinen Partikeln auf, die im Glas eingeschlossen sind.

Carbon Black, gewöhnlich als Ruß bekannt, der Kohlenstoffteilchen in Nanometergröße enthält, wurde anfänglich als ein Zusatz im Gummi von Autoreifen verwendet. (Wie wir heutzutage wissen, enthält Carbon Black einen geringen Anteil an  $C_{60}$  (Buckminsterfullerene), andere Fullerene und grafitähnliche Nanotubes verschiedener Typen.)

Die AgBr- und AgI-Kristalle aus der herkömmlichen Fotografie sind Einkristalle im Nanometermaßstab, die in eine dünne Gelatinematrix eingeschlossen sind. Es scheint so, als ob die wesentliche Lichtabsorption in diesen Kristallen dicht an der Quantenempfindlichkeitsgrenze liegt. Es scheint weiterhin so, als ob die nanoskopischen Änderungen in diesen winzigen Kristallen, die bei der Absorption eines oder mehrerer Photonen auftreten, ihnen ermöglichen, sich bei dem herkömmlichen fotografischen Entwicklungsprozess in größere metallische Silberpartikel zu verwandeln. Das herkömmliche fotografische Negativbild ist eine Anordnung aus festen Silberkörnern, die in eine Gelatinematrix eingebettet sind. Daher erlaubt es eine außergewöhnlich dauerhafte Aufzeichnung, die über Jahrzehnte oder mehr stabil ist.

Die Drogen und Medikamente, die im Alltagsleben so wichtig sind (und somit auch von gewaltiger wirtschaftlicher Bedeutung), einschließlich Koffein, Aspirin und zahlreichen anderen, bestehen aus bestimmten Molekülen in der Größe von Nanometern, die typischerweise weniger als 100 Atome enthalten.

Die kontrollierte Ausfällungsschemie befasst sich beispielsweise mit der Herstellung gleichmäßiger Kugeln aus Polystyrol in Nanometergröße, die seit Langem als Kalibrationsmarker für die Transmissions-Elektronenmikroskopie vertrieben werden.

## Literatur

- 1 Kurzweil, R. (1999) *The Age of Spiritual Machines*, Penguin Books, New York, S. 140.
- 2 Drexler, K.E. (1986) *Engines of Creation*, AnchorBooks, New York, S. 49.
- 3 Drexler, K.E. op. cit., S. 268. Siehe auch Drexler, K.E. (2013) *Radical Abundance: How a Revolution in Nanotechnology will Change Civilization*, PublicAffaires/Perseus, New York.
- 4 Feynman, R. (1961) There's plenty of room at the bottom, in *Miniaturization*, (Hrsg. H.D. Gilbert), Reinhold, New York.
- 5 Carr, D.W. et al. (1999) *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 920.
- 6 Brynjolfsson, E. und McAfee, A. (2014) *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Technology*, Norton Publishers.
- 7 Lundstrom, M. (2003) *Science*, **299**, 210.
- 8 Warren, C.W. und Shumig, N. (1998) *Science*, **281**, 2016–2018.
- 9 Crawford, G.P., Steele, L.M., Ondris-Crawford, R., Iannocchione, G.S., Yeager, C.J., Doane, J.W. und Finotello, D. (1992) *J. Chem. Phys.*, **96**, 7788.