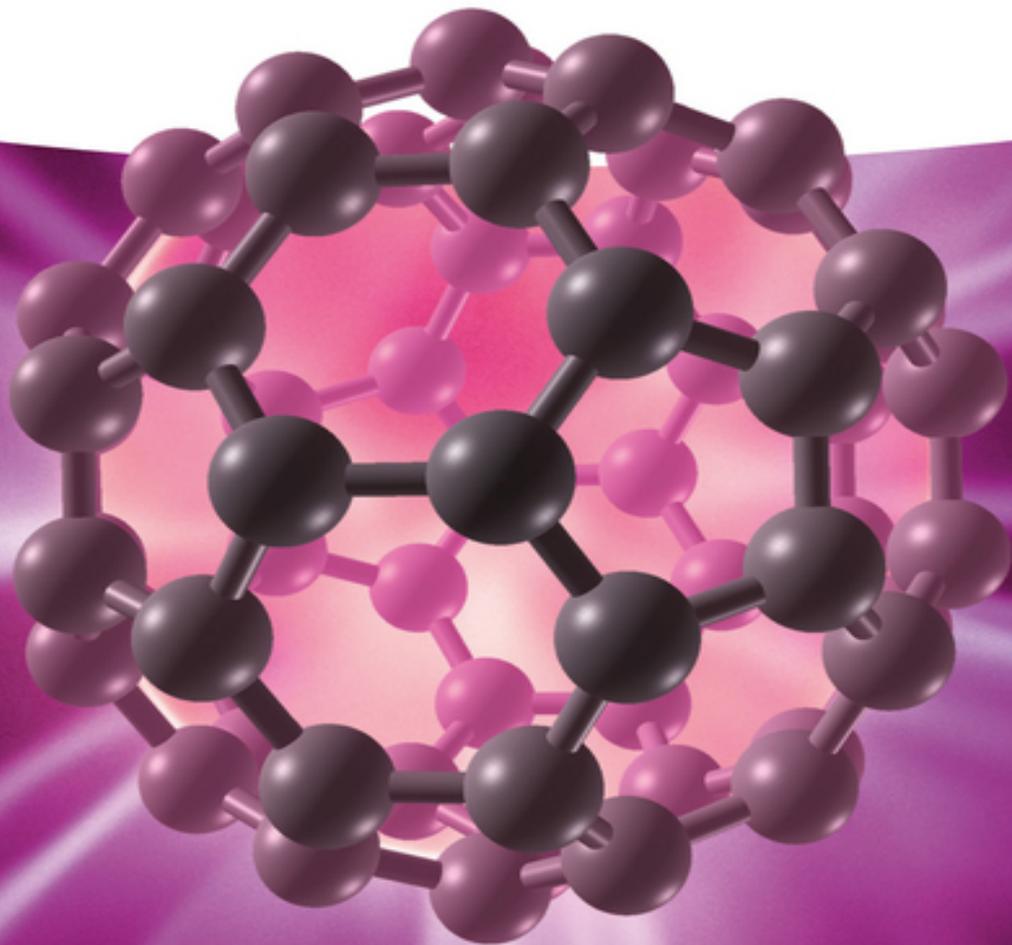


Edward L. Wolf

# Nanophysik und Nanotechnologie

Eine Einführung in die Konzepte  
der Nanowissenschaften



# Vorwort

Dieses Buch über die Nanophysik richtet sich an Nichtspezialisten. Die Nanophysik beschäftigt sich mit physikalischen Effekten im Nanometer- und Subnanometerbereich; insbesondere werden wichtige Fragen im Zusammenhang mit einer *kleinstmöglichen Technologie* behandelt.

Die „Nanophysik“ beinhaltet daher die physikalischen Gesetze, die im Bereich von 100 nm bis hinunter zum subatomaren Bereich gelten (kleiner als 0,1 nm). Dazu gehören die „Quantenmechanik“, die etwa 1925 von dem theoretischen Physiker Erwin Schrödinger entwickelt wurde, die „mesoskalige Physik“, deren Ursprung weiter gefächert und jüngeren Datums ist, und die Physik des Atomkerns, die sich im Bereich von  $10^{-15}$  m (fm) abspielt. Aus pädagogischer Sicht erfordert der 1 nm-Bereich die Konzepte der „Quantenmechanik“ (die in diesem Buch manchmal auch als „Nanophysik“ bezeichnet wird), die, nachdem sie einmal eingeführt sind, den Schlüssel zum Verständnis bis hinunter zum Femtometerbereich des Atomkerns darstellen.

Die dritte Auflage enthält neue Abschnitte über Nanofotonik und Nanoplasmonik sowie über die Nano-Imprintlithografie ([Kapitel 7](#)), einen neuen Abschnitt über Quantum-Annealing-Computer in [Kapitel 9](#) sowie ein völlig neues [Kapitel 10](#) über Graphen. Außerdem wurde das Buch in Bezug auf die „Nanoelektronik“ auf den neuesten Stand gebracht. Zu diesem Thema gab es schon in der zweiten Auflage wichtige Ergänzungen, sowohl aus magnetischer als auch aus quantenmechanischer Sicht und auch in Bezug auf die Möglichkeiten von Quantencomputern, einer Ergänzung der gegenwärtig erfolgreichen

Siliziumtechnologie. Das neue [Kapitel 8](#) trägt der Titel „Quantentechnologie auf der Grundlage von Magnetismus, Elektronen- und Kernspins sowie Supraleitung“, das folgende [Kapitel 9](#) heißt „Nanoelektronik auf Siliziumbasis und darüber hinaus“. Darin sind auch neue elektronische Anwendungen von Kohlenstoff-Nanoröhrchen enthalten. Weitere neue Abschnitte beschäftigen sich mit der Supraleitung: Sie liefern ein konkretes Beispiel zur Quanten-Kohärenz sowie Bauelemente auf der Basis der „schnellen Einzelflussquanten-Computertechnologie (RSFQ), die bereits in [Kapitel 7](#) eingeführt wird und sich durch einen geringen Leistungsverbrauch und schnelle Operationen auszeichnet. Das alte [Kapitel 8](#) („Ausblick in die Zukunft“) ist nun [Kapitel 11](#).

Zusätzlich wurden neue Abschnitte vor allem in den [Kapiteln 4](#) und [5](#) eingeführt, die die Konzepte für die wichtigsten neuen Themen vorstellen, darunter die jüngsten Fortschritte der Nanotechnologie. Die jetzt eingefügten Grundlagen ferromagnetischer Wechselwirkungen und von Quantencomputern sind für jede Technologie auf Quanten- oder magnetischer Basis von zentraler Bedeutung. Die neue Auflage ist in sich geschlossen und enthält auch eine kurze Liste nützlicher Konstanten sowie ein Glossar.

Bei der Auswahl der neuen Themen (seit der ersten Auflage dieses Buchs im Jahr 2004 hat es viele erstaunliche Entwicklungen gegeben) spielte die Einschätzung des Autors eine große Rolle, welche Entwicklungen in der Nanotechnologie wichtig sind. Aus diesem Grund wird etwa die Kernphysik im Zusammenhang mit Vorschlägen, den „Kernspin  $1/2$ “ als Qubit-Informationsträger in Quantencomputern zu verwenden, kurz angesprochen. Zudem wird ein neues Experiment in kleinem Maßstab vorgestellt, das die Erzeugung von Neutronen (mithilfe

einer Standard-Kernfusionsreaktion) demonstriert und die Nanotechnologie zu diesem Zweck ausnutzt.

Ein weiterer wesentlicher und wichtiger Aspekt der Grundlagenphysik, die „Austauschenergie identischer Teilchen“, war bereits berücksichtigt worden, da sie für das grundlegende Verständnis kovalenter Bindungen, des Ferromagnetismus (der für nanotechnologische Computer-Festplatten wesentlich ist) und in jüngster Zeit auch für Vorschläge eines „Ladungs-Qubits“ für Quantencomputer ausschlaggebend ist. Dieses Thema (die Austauschwechselwirkung) ist auch über die kovalente Bindung in der organischen Chemie hinaus von großer Wichtigkeit.

Von Beginn an war dieses Buch als eine Einführung in die Phänomene und Naturgesetze, die im Bereich extrem kleiner Abmessungen gelten (wobei auch der nukleare Femtometerbereich eingeschlossen ist), für Leser gedacht, die bereits Mathematik- und Physikvorlesungen gehört, aber nicht unbedingt Atom- oder Kernphysik studiert haben. Der Leser sollte allerdings mit Zahlen umgehen können und Interesse an neuen Ideen haben.

Die Übungen wurden eher als Lernhilfen für den interessierten Leser konzipiert als als formale Aufgaben. Einiges neues Material, etwa zur Feldionisation durch Spitzen oder zum Zusammenbruch von durch Ultraschall erzeugte Blasen, wurde in die Übungen eingearbeitet, um den Haupttext für den Leser nicht zu überladen.

Ich hoffe, dass der interessierte Leser anregende und auch nützliche neue Ideen in diesem (immer noch schmalen) Buch finden wird. Für Einzelheiten sei der Leser auf die zahlreichen, sich auf dem neuesten Stand befindenden Literaturhinweise verwiesen.

Der Autor ist seinen Kollegen Ulrike Werner und Vera Palmer beim Wiley-VCH-Verlag für ihre Hilfe bei der Erstellung der dritten Auflage zu Dank verpflichtet. Er dankt auch seinen Kollegen bei der New York University Polytechnic School of Engineering, insbesondere Lorcan Folan und Ms DeShane Lyew für ihre Hilfe. Mr. Malhar Desai war bei der Erstellung des endgültigen Manuskripts eine große Hilfe. Der Autor dankt seiner Frau Carol, die auf vielfältige Weise dieses Buchprojekt ständig unterstützt hat.

New York, Mai 2014  
*Edward L. Wolf*

# **Vorwort zur ersten Auflage**

Dieses Buch beruht auf einer Folge von zwei Wahlfachkursen im Grundstudium, die ich an der Polytechnischen Universität initiiert habe: „Konzepte der Nanotechnologie“ und „Methoden und Anwendungen der Nanotechnologie“. Die Qualität, die unterschiedlichen Hauptfächer, das Interesse und der Enthusiasmus der Studenten, die diese „Nano-Folge“ von Kursen besucht haben, haben mich sehr gefreut. Elektrotechnik, Computertechnik, Computerwissenschaften, Maschinenbau und chemische Verfahrenstechnik waren typische Hauptfächer dieser Studenten. Dadurch war eine Aufteilung in interdisziplinäre Arbeitsgruppen leicht, die dann Texte und Präsentationen erarbeiteten, in denen Gebiete ihrer Wahl aus der Vielzahl der Themen im Bereich der Nanotechnologie gründlich untersucht wurden. Voraussetzungen waren eine Vorlesung in Physik (auf der Basis der Differenzialrechnung), eine Einführung in die Chemie sowie Grundlagen in der Mathematik und der Computerwissenschaft.

Ich danke meinen Kollegen der interdisziplinären Physikgruppe für ihre Hilfe bei der Ausarbeitung der Kurse und insbesondere Lorcan Folan und Harold Sjursen, dass sie in den Lehrplan für das Grundstudium aufgenommen wurden. Als ich Iwao Teraoka erzählte, dass ich Schwierigkeiten hatte, ein geeignetes Lehrbuch zu finden, schlug er vor, ich solle ein solches Buch selbst schreiben und brachte mich mit Ted Immergut zusammen, einem klugen und erfahrenen Herausgeber, der mir dann half, aus den Themen der Kurse einen Vorschlag für ein Buch zu erstellen. Ich danke Rajinder Khosla für nützliche Ratschläge in Bezug auf die Struktur des Buchs. Beim

Wiley-VCH-Verlag erhielt ich Ratschläge und technische Unterstützung von Vera Palmer, Ron Schultz, Ulrike Werner und Anja Tschortner. In der Polytechnik half mir DeShane Lyew, zudem danke ich Stephen Arnold und Jovan Mijovic für Diskussionen und ihre Hilfe. Meine Frau Carol unterstützte mich während des gesamten Projekts.

Ich hoffe, dass dieses einfache Buch nicht nur als Lehrbuch für Studenten, sondern auch für Berufstätige von Interesse ist, die über Grundkenntnisse in Physik und benachbarten Themen verfügen und sich über die sich entwickelnden Gebiete der Nanowissenschaften und Nanotechnologie informieren möchten. Ich hoffe, dass das Buch einigen Lesern bei ihrer Karriere hilft. Ich habe zu jedem Kapitel einige Übungen eingefügt, darüber hinaus gibt es in den grau unterlegten Textstellen zusätzliche Informationen, die man nicht unbedingt lesen muss.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts mit seiner ganzen Vielfalt von Wissen in den Natur- und Ingenieurwissenschaften und rasch fortschreitenden Entwicklungen, insbesondere in den Gebieten der Nanotechnologie, Robotik und Biotechnologie ist es möglicherweise auch notwendig, sich mit dem Potenzial, den Möglichkeiten und auch mit den Gefahren zu beschäftigen, die sich dadurch eröffnen. Wenn es eine „nachmenschliche Zeit“ geben wird, wird zweifelsohne ein breites Bewusstsein für die Aufgaben dabei mithelfen, das Beste daraus zu machen.

New York, Juli 2004  
*Edward L. Wolf*

# Abkürzungsverzeichnis

A	Adenin, eine der vier Nukleinbasen in der DNA und der RNA (bindet mit Thymin)
ABM	Anti-Ballistic Missile; Raketenabwehrsystem (Vertrag), mögliches Beispiel für die Grenzen eines Roboters
ADC	Analog-Digital-Wandler
AFM	Atomic Force Microscope; Rasterkraftmikroskop
Amu	Atomic mass unit; Atomare Masseneinheit (veraltet, s. u.)
ATP	Adenosintriphosphat, energiereicher Baustein der RNA, führt zu ADP
Bar	Einheit des Drucks, 1013,25 mbar entsprechen dem Normaldruck
BCS	BCS-Theorie (Bardeen, Cooper, Schrieffer), Theorie der Supraleitfähigkeit
BOX	Buried Oxide; vergrabene Oxidschicht; wird in Si verwendet, um die Kapazität in FETs zu verringern (siehe SOI)
C	Cytosin, eine der vier Nukleinbasen in der DNA und der RNA (bindet mit Guanin)
CIP	Current-in-plane, Strom in der Ebene, Geometrie bei einem Spin-Ventil-GMR-Sensor
CMOL	CMOS/Nanodraht/Molekularhybrid; vorgeschlagene Computerlogik
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor; ein Herstellungsprozess für Halbleiterbauelemente bzw. eine Computerlogik
CPP	Current-perpendicular-to-plane; Strom senkrecht

	zur Ebene; Geometrie in einem TMR- (Tunnelventil-) Sensor
CPU	Central Processing Unit; (Haupt-) Prozessor eines Computers
CVD	Chemical Vapor Deposition; chemische Gasphasenabscheidung; Verfahren zur Abscheidung von Schichten
D	Debye, CGS-Einheit des elektrischen Dipolmoments $1 \text{ D} = 3,3 \times 10^{-30} \text{ Cm}$
daDNA	Doppelstrang-DNA
DMF	Dimethylformamid, ein polares Molekül
DNA	Desoxyribonukleinsäure, Polymer, das die Einzel- und Doppelhelix bildet; Letztere enthält die Basen C, G, A und T, die über Wasserstoffbrückenbindungen binden; Träger der Erbinformation
DNT	Dinitrotoluol, giftige, explosive Substanz; polare Moleküle; möglicherweise nachweisbar
DOS	Density of States; Zustandsdichte; wird gewöhnlich für Elektronen pro Einheitsenergie pro Einheitsvolumen angegeben
DRAM	Dynamic Random Access Memory, dynamisches RAM
$E_F$	Fermi-Energie
$E_g$	Bandlückenenergie, wird gewöhnlich in eV angegeben
ESR	Elektronenspinresonanz
eV	Elektronenvolt; $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
FET	Feldeffekttransistor
fm	Femtometer
FQHE	Gebrochenzahliger Quanten-Hall-Effekt

G	Guanin, eine der vier Nukleinbasen in der DNA und der RNA (bindet mit Cytosin)
GMR	Giant magneto resistance; Riesenmagnetowiderstand
hdp	Hexagonal dichteste Kugelpackung
HEMT	High-Electron-Mobility Transistor; Transistor mit hoher Elektronenbeweglichkeit
HTS	Hochtemperatursupraleiter
JJ	Josephson-Tunnelkontakt
kfz	Kubisch flächenzentriertes Gitter
Laser	Light Amplification by stimulated Emission of Radiation; Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung
maJ	Milliattojoule; mögliche Energieeinheit für sehr kleine Systeme
MBE	Molecular Beam Epitaxy; Molekularstrahlepitaxie, eine Methode zur Abscheidung atomar perfekter Kristallschichten
MEMS	Mikroelektromechanisches System
meV	Millielektronenvolt, ein Tausendstel Elektronenvolt
MeV	Megaelektronenvolt, eine Million Elektronenvolt
MFM	Magnetkraftmikroskopie
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MRAM	Magneto-resistives Random Access Memory
MRFM	Rasterkraftmagnetmikroskopie
MRI	Magnetic Resonance Imaging, ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung von Gewebestrukturen im Körperinneren
MWNT	Multi-Wall-Nanoröhrchen (aus Kohlenstoff)

NEMS	Nanoelektromechanisches System
NMR	Kernspinresonanz
NW	Nanowire, Nanodraht
PMMA	Polymethylmethacrylat, umgangssprachlich Acrylglas oder Plexiglas; wird in der Siliziumtechnologie als Fotolack verwendet
pn	Übergang zwischen positiv dotierten und negativ dotierten Halbleitern; Gleichrichter, Bestandteil eines Transistors und regelbarer Kondensator
Py	Permalloy, Nickel-Eisen-Legierung, Ferromagnet mit hoher magnetischer Permeabilität
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat, wird als Piezokeramik in Ultraschallmessgeräten, bei SPM- und SBSL-Wandlern verwendet
QCA	Quantum Cellular Automata; Quantenzellularautomaten
QD	Quantum Dot; Quantenpunkt, eine dreidimensionale kleine Struktur, die sich ähnlich wie ein Atom verhält
QED	Quantenelektrodynamik, beschreibt die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie; sie führt zu einer geringfügigen Änderung des $g$ -Faktors des Elektronenspins von 2,0 zu 2,0023
QHE	Quanten-Hall-Effekt
QPC	Quantenpunktkontakt
Radar	Radio Detection and Ranging, (frei übersetzt: Funkortung und -abstandsmessung)
RAM	Random Access Memory
recA	Protein, das in dem Bakterium <i>E. coli</i> vorkommt; es spielt bei der Reparatur und Erhaltung der DNA eine Rolle

RFSET	Radiofrequenz-Einzelelektronentransistor
RNA	Ribonukleinsäure; ein Polymer, das im Aufbau der DNA ähnelt, aber die Base U anstelle von T verwendet. Evolutionsmäßig gesehen ist sie ein Vorläufer der DNA; spielt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung von genetischen Informationen in Proteine
RNAP	RNA-Polymerase, ein Enzym, das die Synthese der RNA bei der Transkription der DNA katalysiert
RSFQ	Rapid Single Flux Quantum; schnelle Einzelflussquanten-Elektronik; eine Form von supraleitender Computerlogik
RTD	Resonanztunneldiode; es gibt weitere Formen (z. B. TBRTD) dieser Transistoren und dieser Logik
SBSL	Single-Bubble-Sonolumineszenz; Einzelblasen-Sonolumineszenz
SEM	Scanning Electron Microscope; Rasterelektronenmikroskop
SET	Einzelelektronentransistor
SFQ	Einzelflussquant
SHO	Simple Harmonic Oscillator; einfacher harmonischer Oszillator
SOI	Silizium auf einem Isolator; Herstellungsprozess für Schaltkreise auf einem Isolator; in einen Silizium-Einkristall wird eine vergrabene Oxidschicht eingebaut, anschließend wird getempert, um eine isolierende Quarzschicht zu erzeugen (siehe BOX)
Sonar	Sound Navigation and Ranging; Verfahren zur Ortung von Gegenständen mittels ausgesandter Schallimpulse; in modernen Geräten werden zur

	Schallerzeugung unter Wasser piezoelektrische Elemente verwendet
SPM	Scanning Probe Microscope; Rastersondenmikroskop
SQUID	Supraleitende Quanteninterferenzeinheit
ssDNA	Einzelstrang-DNA
STM	Scanning Tunneling Microscope; Rastertunnelmikroskop
SWNT	Single-Wall-Nanoröhrchen
T	Thymin, eine der vier Nukleinbasen in der DNA (bindet mit Adenin); in der RNA nicht vorhanden
TBRTD	Resonanztunneldiode mit drei Barrieren (siehe RTD)
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TMR	Magnetischer Tunnelwiderstand; Grundlage des „Tunnelventil“ CCPSensors
TPa	Terapascal; $1 \text{ TPa} = 10^{12} \text{ N/m}^2$ ; möglicher Wert des Elastizitätsmoduls
u	Einheitenzeichen der atomaren Masseneinheit, definiert als 1/12 der Masse des Kohlenstoffisotops $^{12}\text{C}$
U	Uracil, eine der vier Nukleinbasen in der RNA(ersetzt Thymin); in der DNA nicht vorhanden
2DEG	Zweidimensionales Elektronengas

### Einige nützliche Konstanten

Avogadro-Konstante  $N_A$ :  $6,022 \times 10^{23}$  Teilchen/mol

Boltzmann-Konstante  $k_B$ :  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K

Universelle Gaskonstante  $R = N_A k_B$ :  $8,315$  J/(mol K)

Elementarladung  $e$ :  $1,602 \times 10^{-19}$  C

Masse des Elektrons  $m_e$ :  $9,109 \times 10^{-31}$  kg (= 511 keV/c<sup>2</sup>)

Masse des Protons  $m_p$ :  $1,672 \times 10^{-27}$  kg (= 938,3 MeV/c<sup>2</sup>)

Plancksches Wirkungsquantum  $h$ :  $6,63 \times 10^{-34}$  J s (= 4,136  $\times 10^{-15}$  eV s)

$\hbar = h/2\pi$ :  $1,055 \times 10^{-34}$  J s (=  $6,58 \times 10^{-16}$  eV s)

Bohrsches Magneton  $\mu_B = e\hbar/2m_e$ :  $9,274 \times 10^{-24}$  J/T (=  $5,79 \times 10^{-5}$  eV/T)

Coulomb-Konstante  $k_C = 1/4\pi\epsilon_0$   $8,988 \times 10^9$  Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>

Magnetische Feldkonstante (magn. Permeabilität im Vakuum)  $\mu_0$ :  $4\pi \times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>

Lichtgeschwindigkeit  $c$ :  $2,998 \times 10^8$  m/s (= 0,2998 mm/ps)

Photonenenergie  $hc/\lambda = hf$ : 1240 (eV nm)/nm

Bindungsenergie des Wasserstoffatoms  $k_C e^2/2a_0$ : 13,609 eV

Bohrscher Radius  $a_0$ : 0,0529 nm

Leitwertquantum =  $(R_{\text{Klitzing}})^{-1} e^2/h = 2\alpha/\mu_0 c$ :  $1/(25,8 \text{ k}\Omega)$

Supraleitendes Flussquantum  $hc/2e$ :  $2,07 \times 10^{-15}$  Wb =  $2,07 \times 10^{-7}$  Oe cm<sup>2</sup>

Elektronenvolt eV:  $1,602 \times 10^{-19}$  J (= 23,06 kcal/mol)

Feinstrukturkonstante  $\alpha = \mu_0 c e^2/2h$ : 1/137,036

Frequenz-Spannungsverhältnis beim Josephson-Kontakt  $2e/h$ :  $4,836 \times 10$  Hz/V, 483,6 MHz/ $\mu$ V

Polarisierbarkeit der Wasserstoffbahn  $\alpha_H = p/E = 4,5a_0^3/k_C$ :  $7,4 \times 10^{-41}$  C<sup>2</sup> m<sup>2</sup>/J

# 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 wohl erprobte 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 vermeiden, 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 nochherausgearbeitet 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  $L$   $2 \times 10^{10}$ . 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. Erinnerung 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 Grafit (die jeweils eine Dichte von 3,51 bzw. 2,25  $\text{g/cm}^3$  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  $T = 300$  K übersteigt, also bei Raumtemperatur.) Dabei ist  $T$  die absolute Temperatur in Kelvin und  $k_B$  die Boltzmann-Konstante, die  $1,38 \times 10^{-23}$  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**

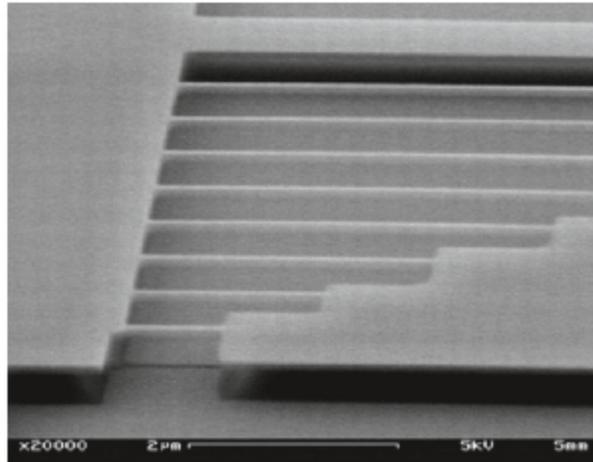
Halten Sie sich vor Augen: Eine Verkleinerung des Maßstabs von arbeitenden Bauelementen und Maschinen von 1 mm auf 1 nm erstreckt sich über sechs Größenordnungen! Über den größten Bereich, vielleicht die ersten fünf Größenordnungen, bis hinunter zu 10 nm (100 Å) mag die klassische newtonsche Physik ausreichen, 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 genau 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 werden, sind allerdings sehr ähnlich. Oszillatoren, deren Frequenzen den GHz-Bereich erreichen, haben vollständig andere Anwendungen als die im musikalischen Hörbereich!



**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.

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 Festkörper 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 ungefährender 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 Halbleitertechnologie 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 magnetischer 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.

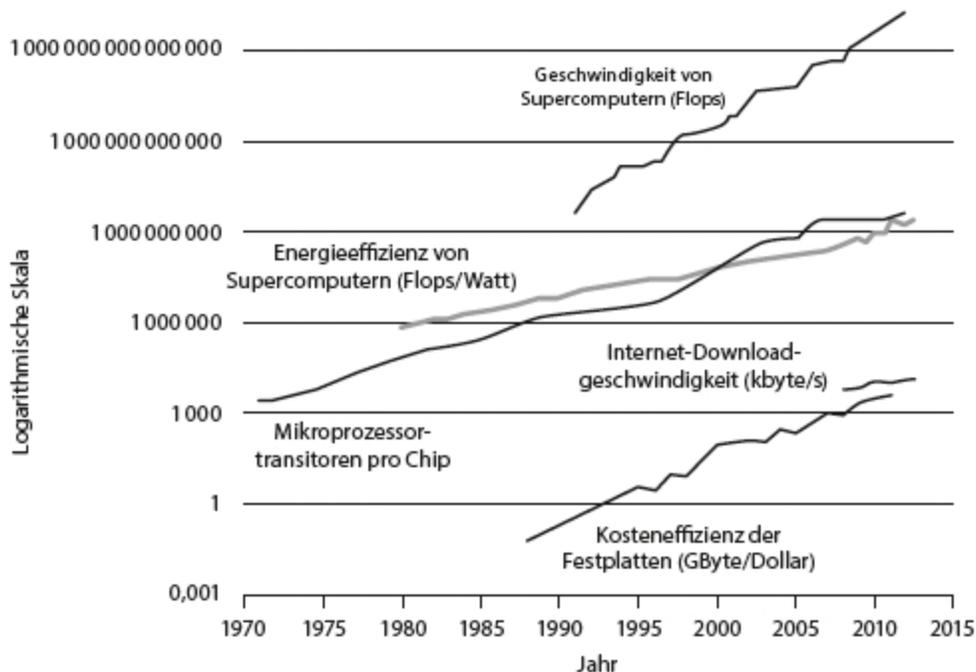
## **1.2 Das mooresche Gesetz**

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 Silizium-Mikroelektroniktechnologie entspricht eine einfach herstellbare Speicherplatzgröße von  $1 \mu\text{m} \cdot 10^{12} \text{ bits/cm}^2$  (1 Tb/cm<sup>2</sup>). Genauso wichtig ist kontinuierliche Verkleinerung des magnetischen Festplattenelements (und des dazugehörigen Lese-/Schreibkopfes), die die ~ 1000 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.



**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 Taktgeschwindigkeiten sind gleichermaßen angestiegen, sie betragen zurzeit etwa 2 GHz. Eine Zusammenfassung finden Sie in [7]. Abgedruckt mit Erlaubnis von [6].

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