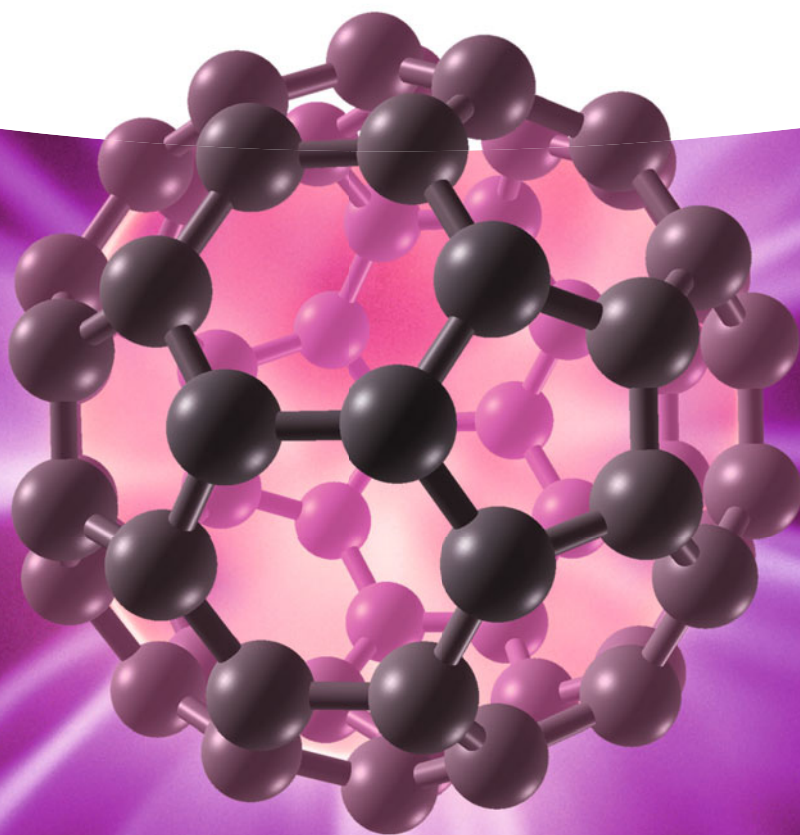


Edward L. Wolf

Nanophysik und Nanotechnologie

Eine Einführung in die Konzepte
der Nanowissenschaften



Edward L. Wolf

**Nanophysik und
Nanotechnologie**

***Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel
zu diesem Thema***

Dinh, P.M., Reinhard, P., Suraud, E.

An Introduction to Cluster Science

2014

Print ISBN: 978-3-527-41118-4; auch in anderen elektronischen Formaten verfügbar

Kulisch, W.

Nanotechnologie für Einsteiger

2014

Print ISBN: 978-3-527-33956-3; auch in anderen elektronischen Formaten verfügbar

Fujita, S., Suzuki, A.

Electrical Conduction in Graphene and Nanotubes

2013

Print ISBN: 978-3-527-41151-1; auch in anderen elektronischen Formaten verfügbar

Hofmann, P.

Einführung in die Festkörperphysik

2013

Print ISBN: 978-3-527-41226-6; auch in anderen elektronischen Formaten verfügbar

Callister, W.D., Rethwisch, D.G.

Materialwissenschaften und Werkstofftechnik

Eine Einführung

2012

Print ISBN: 978-3-527-33007-2; auch in anderen elektronischen Formaten verfügbar

Edward L. Wolf

Nanophysik und Nanotechnologie

Eine Einführung in die Konzepte der Nanowissenschaften

Übersetzt von Regine Freudenstein

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor**Edward L. Wolf**

Polytechnic Inst. of NY Univ.
Six Metrotech Center
314 Rogers Hall
New York
United States

Übersetzung ins Deutsche**Regine Freudenstein**

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

**Bibliografische Information der
Deutschen Nationalbibliothek**

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

© 2015 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

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

Umschlaggestaltung Grafik-Design Schulz,
Fußgönheim, Deutschland

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig,
Deutschland

Druck und Bindung Markono Print Media
Pte Ltd, Singapore

Print ISBN 978-3-527-41336-2

ePDF ISBN 978-3-527-41334-8

ePub ISBN 978-3-527-68738-1

Mobi ISBN 978-3-527-68739-8

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Für
Carol, Doug, Dave, Ben
und
Phill, Ned, Dan, Mehdi, Michael

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XV*

Vorwort zur ersten Auflage *XIX*

Abkürzungsverzeichnis *XXI*

1	Einleitung	<i>1</i>
1.1	Nanometer, Mikrometer, Millimeter	<i>3</i>
1.2	Das mooresche Gesetz	<i>8</i>
1.3	Esakis Quantentunneldiode	<i>10</i>
1.4	Quantenpunkte in zahlreichen Farben	<i>11</i>
1.5	GMR and TRM 10–1000 Gb Leseköpfe für Festplatten	<i>13</i>
1.6	Beschleunigungssensoren in Ihrem Auto	<i>15</i>
1.7	Nanoporöse Filter	<i>17</i>
1.8	Bauelemente im Nanometermaßstab auf der Basis herkömmlicher Technologien	<i>17</i>
	Literatur	<i>18</i>
2	Systematik zum Verkleinern von Objekten	<i>19</i>
2.1	Mechanische Frequenzen vergrößern sich in kleinen Systemen	<i>19</i>
2.2	Veranschaulichung von Skalierungsbeziehungen durch einen einfachen harmonischen Oszillator	<i>23</i>
2.3	Veranschaulichung von Skalierungsbeziehungen durch einfache Schaltelemente	<i>24</i>
2.4	Thermische Zeitkonstanten und Temperaturdifferenzen nehmen ab	<i>25</i>
2.5	Viskose Kräfte dominieren bei kleinen Partikeln in Flüssigkeiten	<i>25</i>
2.6	Reibungsbedingte Kräfte können in symmetrischen Systemen molekularer Skalierung wegfallen	<i>27</i>
	Literatur	<i>30</i>

3	Was begrenzt die Verkleinerung?	31
3.1	Die Teilchennatur (Quantennatur) der Materie: Photonen, Elektronen, Atome, Moleküle	31
3.2	Biologische Beispiele von Nanomotoren und Nanoelementen	33
3.2.1	Lineare Federmotoren	33
3.2.2	Lineare Motoren auf Schienen	35
3.2.3	Sich drehende Motoren	36
3.2.4	Ionenkanäle sind die Nanotransistoren der Biologie	41
3.3	Wie klein kann man es machen?	43
3.3.1	Mit welchen Methoden kann man Körper kleiner machen?	44
3.3.2	Wie kann man sehen, was man herstellen möchte?	45
3.3.3	Wie kann man Verbindungen mit der äußeren Welt herstellen?	47
3.3.4	Wenn man etwas weder sehen noch verbinden kann: Kann man erreichen, dass es selbstorganisierend ist und selbstständig arbeitet?	47
3.3.5	Methoden zum Zusammenfügen von kleinen dreidimensionalen Körpern	48
3.3.6	Die Selbstmontage von Strukturen mit Abmessungen im Nanometerbereich unter Verwendung von DNA-Strängen	52
	Literatur	55
4	Die Quantennatur der Nanowelt	57
4.1	Das bohrsche Atommodell	58
4.1.1	Quantisierung des Drehimpulses	59
4.1.2	Die Erweiterung des bohrschen Atommodells	60
4.2	Der Teilchen-Welle-Dualismus von Licht und Materie, die De-Broglie-Wellenlänge $\lambda = h/p$, $E = h\nu$	60
4.3	Die Wellenfunktion Ψ für Elektronen, die Wahrscheinlichkeitsdichte $\Psi^* \Psi$, laufende und stehende Wellen	61
4.4	Die maxwellischen Gleichungen, E und B als Wellenfunktionen von Photonen und optischen Fasern	67
4.5	Die heisenbergsche Unschärferelation	68
4.6	Schrödingergleichung, Quantenzustände und Energien, Tunneln durch Barrieren	69
4.6.1	Die Schrödingergleichung in einer Dimension	70
4.6.2	Das eingeschlossene Teilchen in einer Dimension	71
4.6.3	Reflexion und Tunneln an einer Potenzialstufe	73
4.6.4	Durchdringung einer Barriere, Austrittszeit aus einem Topf, resonante Tunneliode	76
4.6.5	Eingeschlossene Teilchen in zwei und drei Dimensionen: Quantenpunkte	77
4.6.6	Zweidimensionale Bänder und Quantendrähte	79
4.6.7	Der einfache harmonische Oszillator	80
4.6.8	Die Schrödingergleichung in Kugelkoordinaten	83
4.7	Das Wasserstoffatom, Einelektronenatome, Exzitonen	83

4.7.1	Magnetische Momente	87
4.7.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	88
4.7.3	Positronium und Exzitonen	89
4.8	Fermionen, Bosonen und Besetzungsregeln	90
	Literatur	91
5	Konsequenzen der Quantenphysik für die makroskopische Welt	93
5.1	Periodensystem der Elemente	93
5.2	Nanosymmetrie, zweiatomige Moleküle und Ferromagnete	94
5.2.1	Ununterscheidbare Teilchen und ihr Austausch	94
5.2.2	Das Wasserstoffmolekül: die kovalente Bindung	96
5.3	Weitere Kräfte im Nanometerbereich: Van-der-Waals-, Casimir- und Wasserstoffbindung	99
5.3.1	Die polare und die Van-der-Waals-Kraft	100
5.3.2	Die Casimir-Kraft	103
5.3.3	Die Wasserstoffbrückenbindung	107
5.4	Metalle als Töpfe mit freien Elektronen: Fermi-Niveau, DOS und Dimensionalität	108
5.4.1	Elektrische Leitfähigkeit, spezifischer Widerstand, mittlere freie Weglänge, Hall-Effekt und Magnetowiderstand	112
5.5	Periodische Strukturen (beispielsweise Si, GaAs, InSb, Cu): Kronig-Penney-Modell für Elektronenbänder und Bandlücken	113
5.6	Elektronenbänder und Leitfähigkeit in Halbleitern und Isolatoren; Lokalisierung und Delokalisierung	119
5.7	Wasserstoffähnliche Donatoren und Akzeptoren	124
5.7.1	Konzentrationen der Ladungsträger, metallische Dotierung	125
5.7.2	pn-Übergang, elektrische Dioden: $I(U)$ -Kennlinien, Laserdioden	129
5.8	Mehr über den Ferromagnetismus, die quantenmechanische Grundlage der Datenspeicherung	135
5.9	Oberflächen unterscheiden sich; die Dicke der Schottky-Barriere	138
5.10	Ferroelektrika, Piezoelektrika und Pyroelektrika: neuste Anwendungen der modernen Nanotechnologie	140
	Literatur	149
6	Selbstorganisierende Nanostrukturen in der Natur und der Industrie	151
6.1	Das Kohlenstoffatom, $^{12}_6\text{C } 1s^2 2p^4$ (0,07 nm)	152
6.2	Methan CH_4 , Ethan C_2H_6 und Oktan C_8H_{18}	153
6.3	Äthylen C_2H_4 , Benzol C_6H_6 , Acetylen C_2H_2	154
6.4	C_{60} -Fullerene ($\approx 0,5$ nm)	155
6.5	C_{∞} -Nanoröhrchen ($\approx 0,5$ nm)	156
6.5.1	Si-Nanodrähte (≈ 5 nm)	159
6.6	InAs-Quantenpunkte (≈ 5 nm)	160
6.7	AgBr-Nanokristalle (0,1–2 μm)	161

- 6.8 Fe_3O_4 -Magnetit- und Fe_3S_4 -Greigit-Nanoteilchen in magnetotaktischen Bakterien 162
- 6.9 Selbstorganisierende Einzelschichten auf Gold und anderen glatten Oberflächen 164
Literatur 166

- 7 Auf der Physik beruhende experimentelle Methoden der Nanoherstellung und der Nanotechnologie 167**
 - 7.1 Siliziumtechnologie: der INTEL-IBM-Ansatz der Nanotechnologie 168
 - 7.1.1 Strukturierung, Masken und Fotolithografie 168
 - 7.1.2 Das Ätzen von Silizium 170
 - 7.1.3 Strukturierung von gut leitenden Elektroden 170
 - 7.1.4 Methoden zur Abscheidung von Metallschichten und isolierenden Schichten 171
 - 7.2 Begrenzung der lateralen Auflösung (Linienbreite) durch die Wellenlänge, heute etwa 65 nm 173
 - 7.2.1 Optische Lithografie und Röntgenlithografie 173
 - 7.2.2 Elektronenstrahlithografie, Nano-Imprintlithografie und Mikrokontakt-Printing 174
 - 7.3 Opferschichten, frei hängende Brücken und Einzelelektronentransistoren 175
 - 7.4 Wie sieht die Zukunft der Computertechnologie auf Siliziumbasis aus? 176
 - 7.5 Wärmeabfuhr und die RSFQ-Technologie 178
 - 7.6 Methoden der Rastersondenmikroskopie: jeweils nur ein Atom 183
 - 7.7 Die Rastertunnelmikroskopie (STM) als Prototyp für einen Molekülzusammenbauer 184
 - 7.7.1 Die Herstellung von Oberflächenmolekülen mithilfe der Bewegung von Au-Atomen 184
 - 7.7.2 Zusammenbau von organischen Molekülen anhand eines STM 188
 - 7.8 Felder von Rasterkraftmikroskopen 189
 - 7.8.1 Die Herstellung von Feldern von Cantilevern mithilfe der Fotolithografie 190
 - 7.8.2 Fertigung von Strukturen im Nanometerbereich mittels eines AFM 191
 - 7.8.3 Abbildung eines einzelnen Elektronenspins mittels eines Magnetresonanz-AFM 192
 - 7.9 Grundlegende Fragen: Raten, Genauigkeit und mehr 194
 - 7.10 Nanophotonik und Nanoplasmonik 195
Literatur 199

8	Quantentechnologie auf der Grundlage von Magnetismus, Elektronen- und Kernspins sowie Supraleitung	201
8.1	Der Stern-Gerlach-Versuch: Beobachtung des Spins 1/2 des Elektrons	205
8.2	Zwei Auswirkungen des Kernspins: Kernspinresonanz und die „21,1 cm-Linie“	206
8.3	Elektronenspin 1/2 als Qubit für einen Quantencomputer: Superpositionsprinzip und Kohärenz	208
8.4	Harte und weiche Ferromagneten	212
8.5	Die Ursprünge des Riesenmagnetowiderstands (GMR-Effekt): spinabhängige Elektronenstreuung	214
8.6	Das GMR-Spinventil, ein nanophysikalischer Sensor	216
8.7	Das Tunnelventil, ein verbesserter nanophysikalischer Magnetfeldsensor	218
8.8	Magnetoresistives Random Access Memory (MRAM)	220
8.8.1	Magnetische Tunnelkontakte bei der MRAM-Speichertechnik	220
8.8.2	Nichtflüchtige Ferromagnet-Halbleiterhybridstrukturen	222
8.9	Spininjektion: Der Johnson-Silsbee-Effekt	223
8.9.1	Offensichtliche Spininjektion von einem Ferromagneten in ein Kohlenstoff-Nanoröhrchen	225
8.10	Magnetische logische Bauelemente: ein allgemeingültiges Logikgatter	225
8.11	Supraleiter und das supraleitende (magnetische) Flussquant	228
8.12	Der Josephson-Effekt und das SQUID zur Messung von Magnetfeldern	232
8.13	RSFQ-Elektronik – schnelle Einzelflussquanten-Elektronik	235
	Literatur	238
9	Nanoelektronik auf Siliziumbasis und darüber hinaus	239
9.1	Elektroneninterferenz-Bauelemente mit kohärenten Elektronen	240
9.1.1	Der Transport ballistischer Elektronen in Stich-Quantenwellenleitern: Experiment und Theorie	243
9.1.2	Wohldefinierte Quanteninterferenzeffekte in Kohlenstoff-Nanoröhrchen	244
9.2	Sensoren auf der Grundlage von Kohlenstoff-Nanoröhrchen und dichte, nichtflüchtige RAMs	246
9.2.1	Ein Sensor auf der Grundlage von Kohlenstoff-Nanoröhrchen aus polaren Molekülen, der von den ihnen eigenen großen elektrischen Feldern Gebrauch macht	247
9.2.2	Eine kreuzförmige Anordnung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen für ultradichte, ultraschnelle nichtflüchtige RAMs	249
9.3	Resonanztunneldioden und Tunneltransistoren mit heißen Elektronen	253
9.4	Ladungsqubits mit doppeltem Potenzialtopf	255
9.4.1	Qubits für Quantencomputer auf Siliziumbasis	259

9.5	Einzelektronentransistoren	260
9.5.1	Der Radiofrequenz-Einzelektronentransistor (RFSET), ein nützliches, erprobtes Forschungsinstrument	264
9.5.2	Auslesen des Ladungsqubits mit Sub-Elektronenladungsauflösung	264
9.5.3	Ein Vergleich zwischen SET und RTD (Resonanztunneldiode)	264
9.6	Experimentelle Ansätze zum Ladungsqubit mit zwei Potenzialtöpfen	267
9.6.1	Kopplung von zwei Ladungsqubits in einem Festkörper (Supraleitung)	270
9.7	Ionenfalle auf einem GaAs-Chip, Hinweis auf ein neues Qubit	271
9.8	Quantencomputer durch Quantentempemern mit künstlichen Spins	275
	Literatur	276
10	Die Nanophysik und Nanotechnologie von Graphen	279
10.1	Graphen: rekordbrechende physikalische und elektrische Eigenschaften	279
10.2	Folgen aus der Dicke von einem Atom: Weichheit und Haftfestigkeit	280
10.3	Undurchlässigkeit einzelner Graphenschichten	281
10.4	Synthese durch chemische Gasphasenabscheidung und direkte Reaktion	282
10.5	Verwendung als flexible, leitende und transparente Elektroden	284
10.6	Mögliche Anwendung bei Logikbauelementen und Erweiterung des Gesetzes von Moore	287
10.7	Anwendungen von Graphen innerhalb der Siliziumtechnologie	289
	Literatur	292
11	Ausblick in die Zukunft	295
11.1	Drexlers mechanische (molekulare) Achsen und Lager	296
11.1.1	Smalleys Widerlegung des Zusammenbaus von Maschinen	297
11.1.2	Van-der-Waals-Kräfte für reibungsfreie Lager?	299
11.2	Das Konzept des molekularen Zusammenbauers ist fehlerhaft	299
11.3	Können molekulare Maschinen die Technologie revolutionieren oder die Selbstreproduktion sogar das irdische Leben bedrohen?	301
11.4	Die Aussicht auf einen grundlegenden Reichtum durch einen Durchbruch im Nano-Ingenieurwesen	302
11.5	Was ist mit der Gentechnik und der Robotertechnologie?	303
11.6	Mögliche soziale und ethische Auswirkungen der Biotechnologie und der synthetischen Biologie	306
11.7	Gibt es eine nachmenschliche Zukunft, wie sie sich Fukuyama vorgestellt?	308
	Literatur	309

Übungen 311

Lösungen 323

Sachwortverzeichnis 353

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 jüngerem 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 Sjurssen, 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	Milliatiojoule; 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	Magnetoresistives 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“ CCP-Sensors
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}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 : $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
 Universelle Gaskonstante $R = N_A k_B$: $8,315 \text{ J/(mol K)}$
 Elementarladung e : $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
 Masse des Elektrons m_e : $9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ($= 511 \text{ keV}/c^2$)
 Masse des Protons m_p : $1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ($= 938,3 \text{ MeV}/c^2$)
 Plancksches Wirkungsquantum h : $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ($= 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$)
 $\hbar = h/2\pi$: $1,055 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ($= 6,58 \times 10^{-16} \text{ eV s}$)
 Bohrsches Magneton $\mu_B = e\hbar/2m_e$: $9,274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ ($= 5,79 \times 10^{-5} \text{ eV/T}$)
 Coulomb-Konstante $k_C = 1/4\pi\epsilon_0$: $8,988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
 Magnetische Feldkonstante (magn. Permeabilität im Vakuum) μ_0 :
 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
 Lichtgeschwindigkeit c : $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ($= 0,2998 \text{ mm/ps}$)
 Photonenenergie $hc/\lambda = hf$: 1240 (eV nm)/nm
 Bindungsenergie des Wasserstoffatoms $k_C e^2/2a_0$: $13,609 \text{ eV}$
 Bohrscher Radius a_0 : $0,0529 \text{ nm}$
 Leitwertquantum $= (R_{\text{Klitzing}})^{-1} e^2/h = 2\alpha/\mu_0 c$: $1/(25,8 \text{ k}\Omega)$
 Supraleitendes Flussquantum $hc/2e$: $2,07 \times 10^{-15} \text{ Wb} = 2,07 \times 10^{-7} \text{ Oe cm}^2$
 Elektronenvolt eV: $1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ($= 23,06 \text{ kcal/mol}$)
 Feinstrukturkonstante $\alpha = \mu_0 c e^2/2h$: $1/137,036$
 Frequenz-Spannungsverhältnis beim Josephson-Kontakt $2e/h$:
 $4,836 \times 10 \text{ Hz/V}$, $483,6 \text{ MHz}/\mu\text{V}$
 Polarisierbarkeit der Wasserstoffbahn $\alpha_H = p/E = 4,5a_0^3/k_C$:
 $7,4 \times 10^{-41} \text{ C}^2 \text{ m}^2/\text{J}$

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 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 2×10^{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 4×10^{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 m^3 ungefähr 8×10^{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}C -Atome mit einer molaren Masse von 12 g handelt, dann beträgt die Masse, die in einem Volumen von 2 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. $2,25\text{ g/cm}$ 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.