

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort XV**

**Vorwort zur ersten Auflage XIX**

**Abkürzungsverzeichnis XXI**

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

|          |  |
|----------|--|
| <b>3</b> | <b>Was begrenzt die Verkleinerung? 31</b>  |
| 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   |
| <b>4</b> | <b>Die Quantennatur der Nanowelt 57</b>  |
| 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 $\lambda = h/p$ , $E = \hbar v$ 60                  |
| 4.3      | Die Wellenfunktion $\Psi$ für Elektronen, die Wahrscheinlichkeitsdichte $\Psi^* \Psi$ , laufende und stehende Wellen 61            |
| 4.4      | Die maxwellschen Gleichungen, $E$ und $B$ als Wellenfunktionen von Photonen und optischen Fasernmoden 67                           |
| 4.5      | Die heisenbergsche Unschärferelation 68  |
| 4.6      | Schrödinger-Gleichung, Quantenzustände und Energien, Tunneln durch Barrieren 69  |
| 4.6.1    | Die Schrödinger-Gleichung 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 Tunneldiode 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 Schrödinger-Gleichung 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         |
| <b>5</b> | <b>Konsequenzen der Quantenphysik für die makroskopische Welt</b>  | <b>93</b>  |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Selbstorganisierende Nanostrukturen in der Natur und der Industrie</b>  | <b>151</b> |
| 6.1      | Das Kohlenstoffatom, $^{12}_6\text{C}$ $1s^2 2p^4$ ( $0,07\text{ nm}$ )  | 152        |
| 6.2      | Methan $\text{CH}_4$ , Ethan $\text{C}_2\text{H}_6$ und Oktan $\text{C}_8\text{H}_{18}$                              | 153        |
| 6.3      | Äthylen $\text{C}_2\text{H}_4$ , Benzol $\text{C}_6\text{H}_6$ , Acetylen $\text{C}_2\text{H}_2$                     | 154        |
| 6.4      | $\text{C}_{60}$ -Fullerene ( $\approx 0,5\text{ nm}$ )   | 155        |
| 6.5      | $\text{C}_\infty$ -Nanoröhrchen ( $\approx 0,5\text{ nm}$ )  | 156        |
| 6.5.1    | Si-Nanodrähte ( $\approx 5\text{ nm}$ )  | 159        |
| 6.6      | InAs-Quantenpunkte ( $\approx 5\text{ nm}$ )   | 160        |
| 6.7      | AgBr-Nanokristalle ( $0,1\text{--}2\mu\text{m}$ )  | 161        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.8   | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Magnetit- und Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub> -Greigit-Nanoteilchen in magnetotaktischen Bakterien | 162 |
| 6.9   | Selbstorganisierende Einzelschichten auf Gold und anderen glatten Oberflächen   | 164 |
|       | Literatur   | 166 |
| 7     | <b>Auf der Physik beruhende experimentelle Methoden der Nanoherstellung und der Nanotechnologie</b>                               | 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 | Elektronenstrahlolithografie, Nano-Imprintlithografie und Mikrokontakt-Printing   | 174 |
| 7.3   | Opferschichten, frei hängende Brücken und Einzelektronentransistoren  | 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 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>8</b> | <b>Quantentechnologie auf der Grundlage von Magnetismus, Elektronen- und Kernspins sowie Supraleitung</b>   | <b>201</b> |
| 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        |
| <b>9</b> | <b>Nanoelektronik auf Siliziumbasis und darüber hinaus</b>  | <b>239</b> |
| 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      | Ladungsquibits mit doppeltem Potenzialtopf  | 255        |
| 9.4.1    | Qubits für Quantencomputer auf Siliziumbasis  | 259        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 9.5    | Einzelelektronentransistoren   | 260 |
| 9.5.1  | Der Radiofrequenz-Einzelelektronentransistor (RFSET), ein nützliches, erprobtes Forschungsinstrument                       | 264 |
| 9.5.2  | Auslesen des Ladungsquibits mit Sub-Elektronenladungsauflösung   | 264 |
| 9.5.3  | Ein Vergleich zwischen SET und RTD (Resonanztunneldiode)   | 264 |
| 9.6    | Experimentelle Ansätze zum Ladungsquibit mit zwei Potenzialöpfen   | 267 |
| 9.6.1  | Kopplung von zwei Ladungsquibits in einem Festkörper (Supraleitung)  | 270 |
| 9.7    | Ionenfalle auf einem GaAs-Chip, Hinweis auf ein neues Qubit  | 271 |
| 9.8    | Quantencomputer durch Quantentempern mit künstlichen Spins   | 275 |
|        | Literatur  | 276 |
| <br>   |  |     |
| 10     | <b>Die Nanophysik und Nanotechnologie von Graphen</b>  | 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 |
| <br>   |  |     |
| 11     | <b>Ausblick in die Zukunft</b>   | 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