

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** *XV*

**Vorwort zur ersten Auflage** *XIX*

**Abkürzungsverzeichnis** *XXI*

- 1 Einleitung** *1*
  - 1.1 Nanometer, Mikrometer, Millimeter *3*
  - 1.2 Das mooresche Gesetz *8*
  - 1.3 Esakis Quantentunnelndiode *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*
  
- 2 Systematik zum Verkleinern von Objekten** *19*
  - 2.1 Mechanische Frequenzen vergrößern sich in kleinen Systemen *19*
  - 2.2 Veranschaulichung von Skalierungsbeziehungen durch einen einfachen harmonischen Oszillator *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?</b>	<b>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</b>	<b>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 $\lambda = h/p$ , $E = h\nu$	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 Fasermoden	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 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 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  $\text{CH}_4$ , 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 ( $\approx 0,5$  nm) 155
- 6.5  $\text{C}_\infty$ -Nanoröhrchen ( $\approx 0,5$  nm) 156
- 6.5.1 Si-Nanodrähte ( $\approx 5$  nm) 159
- 6.6 InAs-Quantenpunkte ( $\approx 5$  nm) 160
- 6.7 AgBr-Nanokristalle (0,1–2  $\mu\text{m}$ ) 161

- 6.8  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Magnetit- und  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ -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 Einzelelektronentransistoren 260
- 9.5.1 Der Radiofrequenz-Einzelelektronentransistor (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 (Resonanztunnel diode) 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 Quantentempera 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

