

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** *XV*

**Vorwort zur ersten Auflage** *XIX*

**Abkürzungsverzeichnis** *XXI*

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>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</b>	<b>19</b>
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 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
<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, $^{12}\text{C } 1s^2 2p^4$ (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 Elektronenstrahlolithografie, 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

<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	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 (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
<b>10</b>	<b>Die Nanophysik und Nanotechnologie von Graphen</b>	<b>279</b>
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
<b>11</b>	<b>Ausblick in die Zukunft</b>	<b>295</b>
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**