



# Auf einen Blick

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Einführung</b> .....                                                           | <b>21</b>  |
| <b>Teil I: Der Eintritt in die Welt der Quanten</b> .....                         | <b>27</b>  |
| <b>Kapitel 1:</b> Der Weg zur Quantenmechanik.....                                | 29         |
| <b>Teil II: Ohne geht es nicht: Die Grundlagen</b> .....                          | <b>49</b>  |
| <b>Kapitel 2:</b> Die Grundlage: Die Schrödingergleichung.....                    | 51         |
| <b>Kapitel 3:</b> Teilchen in Potentialen.....                                    | 69         |
| <b>Kapitel 4:</b> In den Hilbertraum eindringen.....                              | 91         |
| <b>Kapitel 5:</b> Der Blick hinter die Kulissen der Quantenmechanik.....          | 113        |
| <b>Kapitel 6:</b> Zwei Eckpfeiler: Der Drehimpuls und das<br>Wasserstoffatom..... | 129        |
| <b>Teil III: Den Weg weitergehen: Grundlagen, die zweite</b> .....                | <b>157</b> |
| <b>Kapitel 7:</b> Der Spin und das Pauli-Prinzip.....                             | 159        |
| <b>Kapitel 8:</b> Riesige Verbände von Bausteinen: Festkörper.....                | 179        |
| <b>Kapitel 9:</b> Eine spukhafte Fernwirkung? Die Verschränkung.....              | 195        |
| <b>Teil IV: Von der Ursuppe zum Universum</b> .....                               | <b>205</b> |
| <b>Kapitel 10:</b> Nicht nur Quark(s): Die fundamentalen Teilchen.....            | 207        |
| <b>Kapitel 11:</b> Quantengravitation: Der Weg zurück zum Ursprung.....           | 235        |
| <b>Teil V: Von Festkörpern zu Nanopartikeln</b> .....                             | <b>259</b> |
| <b>Kapitel 12:</b> Seltsame Ströme und andere Phänomene: Mikrostrukturen.....     | 261        |
| <b>Kapitel 13:</b> In die Welt der Nanostrukturen abtauchen.....                  | 289        |
| <b>Teil VI: Von Mikrostrukturen zu Quantentechnologien</b> .....                  | <b>319</b> |
| <b>Kapitel 14:</b> Der Einstieg in die Quantenrevolution 2.0.....                 | 321        |
| <b>Teil VII: Der Top-Ten-Teil</b> .....                                           | <b>347</b> |
| <b>Kapitel 15:</b> Der Weg in die Quantenmechanik: Zehn plus vier Biografien..... | 349        |
| <b>Kapitel 16:</b> Zehn Postulate der Quantenmechanik.....                        | 363        |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....                                                | <b>367</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis</b> .....                                                 | <b>371</b> |







# Inhaltsverzeichnis

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Einführung</b>                                                    | <b>21</b> |
| Über dieses Buch                                                     | 21        |
| Konventionen in diesem Buch                                          | 21        |
| Törichte Annahmen über die Leser                                     | 22        |
| Wie dieses Buch aufgebaut ist                                        | 22        |
| Teil I: Der Eintritt in die Welt der Quanten                         | 22        |
| Teil II: Ohne geht es nicht: Die Grundlagen                          | 23        |
| Teil III: Den Weg weitergehen: Grundlagen, die zweite                | 23        |
| Teil IV: Von der Ursuppe zum Universum                               | 24        |
| Teil V: Von Festkörpern zu Nanopartikeln                             | 24        |
| Teil VI: Von Mikrostrukturen zu Quantentechnologien                  | 24        |
| Teil VII: Der Top-Ten-Teil                                           | 24        |
| Symbole, die in diesem Buch verwendet werden                         | 25        |
| Wie es weitergeht                                                    | 25        |
| <br><b>TEIL I</b>                                                    |           |
| <b>DER EINTRITT IN DIE WELT DER QUANTEN</b>                          | <b>27</b> |
| <br><b>Kapitel 1</b>                                                 |           |
| <b>Der Weg zur Quantenmechanik</b>                                   | <b>29</b> |
| Die Strahlung schwarzer Körper                                       | 30        |
| Eine Idealisierung: Der schwarze Strahler                            | 30        |
| Das Planck'sche Strahlungsgesetz                                     | 31        |
| Mit Licht Elektronen auslösen: Der Photoeffekt                       | 34        |
| Sie bilden die Elemente: Die Atome                                   | 36        |
| Experimentelle Ergebnisse                                            | 37        |
| Frühe Atommodelle                                                    | 38        |
| Das Bohr'sche Atommodell                                             | 38        |
| Licht: Welle oder Teilchen?                                          | 40        |
| Der Doppelspaltversuch: Licht ist eine Welle                         | 41        |
| Photon schubst Elektron: Der Comptoneffekt                           | 42        |
| Die Welleneigenschaften der Materie                                  | 44        |
| Welle oder Teilchen? Beides!                                         | 46        |
| Ein neuer Weg                                                        | 47        |
| <br><b>TEIL II</b>                                                   |           |
| <b>OHNE GEHT ES NICHT: DIE GRUNDLAGEN</b>                            | <b>49</b> |
| <br><b>Kapitel 2</b>                                                 |           |
| <b>Die Grundlage: Die Schrödingergleichung</b>                       | <b>51</b> |
| Ohne sie geht nichts: Die Schrödingergleichung und ihre Bestandteile | 52        |
| Sie beschreibt das System: Die Wellenfunktion                        | 53        |
| Ab jetzt zählen nur noch Wahrscheinlichkeiten                        | 55        |
| Erwartungswert und Normierung                                        | 56        |



## 16 Inhaltsverzeichnis

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Im Prinzip nur Rechenvorschriften: Operatoren.....            | 56 |
| Erste quantenmechanische Operatoren.....                      | 57 |
| Der Formalismus ebnet den Weg: Kommutatoren.....              | 58 |
| Zurück zur Schrödingergleichung.....                          | 60 |
| Das Superpositionsprinzip.....                                | 60 |
| Der Orts- und der Impulsraum.....                             | 61 |
| Stationäre Zustände.....                                      | 62 |
| Sie kommen im (Wellen-)Paket: Quantenteilchen.....            | 64 |
| Die Zusammenfassung der Grundlagen oder erste Postulate ..... | 66 |

### Kapitel 3

#### Teilchen in Potentialen..... 69

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Ein (Potential-)Topf mit Inhalt.....                       | 69 |
| Entkommen unmöglich: Der unendliche Potentialtopf.....     | 69 |
| Die Symmetrie macht's: Der symmetrische Potentialtopf..... | 76 |
| Entkommen ist möglich: Der endliche Potentialtopf.....     | 78 |
| Dreifach gefangen: Der dreidimensionale Topf.....          | 79 |
| Separationsansatz.....                                     | 80 |
| Potentialstufen und Potentialbarrieren überwinden .....    | 82 |
| Ein plötzlicher Sprung: Die Potentialstufe.....            | 82 |
| Nicht undurchdringlich: Die Potentialbarriere .....        | 87 |

### Kapitel 4

#### In den Hilbertraum eindringen..... 91

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Die mathematische Struktur.....                                       | 92  |
| Der Hilbertraum und die Dirac-Notation.....                           | 92  |
| Hermitesche Operatoren.....                                           | 96  |
| Eigenwerte und Eigenvektoren.....                                     | 98  |
| Der harmonische Oszillator.....                                       | 100 |
| Der klassische harmonische Oszillator.....                            | 100 |
| Der quantenmechanische harmonische Oszillator.....                    | 101 |
| Der klassische und der quantenmechanische harmonische Oszillator..... | 109 |
| Der dreidimensionale harmonische Oszillator .....                     | 111 |

### Kapitel 5

#### Der Blick hinter die Kulissen der Quantenmechanik..... 113

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| Die Kopenhagener Interpretation.....                   | 114 |
| Der Messprozess.....                                   | 115 |
| Die Heisenberg'sche Unschärferelation.....             | 119 |
| Herleitung der Unschärferelation.....                  | 121 |
| Diskussion der Heisenberg'schen Unschärferelation..... | 122 |
| Die Energie-Zeit-Unschärfe.....                        | 124 |
| Die Probleme bei der Interpretation.....               | 125 |

## Inhaltsverzeichnis 17

**Kapitel 6****Zwei Eckpfeiler: Der Drehimpuls und das****Wasserstoffatom ..... 129**

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| Mit dem Drehimpuls auf Quantenniveau arbeiten .....          | 130 |
| Der klassische Drehimpuls.....                               | 130 |
| Der quantenmechanische Drehimpuls.....                       | 130 |
| Die algebraischen Eigenschaften des Drehimpulsoperators..... | 131 |
| Die Eigenwertgleichungen .....                               | 134 |
| Der Bahndrehimpuls in Kugelkoordinaten .....                 | 136 |
| Zusammenfassung der Ergebnisse .....                         | 140 |
| Einfach – und auch wieder nicht: Das Wasserstoffatom .....   | 141 |
| Die Schrödingergleichung.....                                | 142 |
| Die Radialgleichung .....                                    | 145 |
| Die Quantenzahlen und die Entartung.....                     | 148 |
| Die Energieniveaus und ihre Darstellung.....                 | 150 |
| Die Wellenfunktionen.....                                    | 152 |
| Hier tummeln sich die Elektronen: Die Orbitale.....          | 153 |

**TEIL III****DEN WEG WEITERGEHEN: GRUNDLAGEN, DIE ZWEITE ..... 157****Kapitel 7****Der Spin und das Pauli-Prinzip..... 159**

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Quantenphysik pur: Der Spin.....                                    | 160 |
| Der Stern-Gerlach-Versuch .....                                     | 161 |
| Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ .....                               | 161 |
| Die Pauli-Matrizen .....                                            | 163 |
| Der Spin ist entscheidend: Fermionen und Bosonen .....              | 166 |
| Die Addition von Drehimpulsen .....                                 | 167 |
| Die Addition von zwei Spins mit $s = \frac{1}{2}$ .....             | 167 |
| Identische Teilchen.....                                            | 169 |
| Das Pauli-Prinzip.....                                              | 171 |
| Ein Elektron nach dem anderen: Das Periodensystem der Elemente..... | 174 |
| Die Orbitalbesetzung und die Hund'sche(n) Regel(n).....             | 175 |

**Kapitel 8****Riesige Verbände von Bausteinen: Festkörper ..... 179**

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| Eine regelmäßige Anordnung: Der Kristall .....              | 180 |
| In einen anderen Raum wechseln: Das reziproke Gitter.....   | 181 |
| Die chemische Bindung: Arten von Festkörpern.....           | 182 |
| Energiebänder in Kristallen .....                           | 184 |
| Bänder und Bandlücken .....                                 | 186 |
| Quantisierte Schwingungen und andere seltsame Teilchen..... | 187 |
| Phononen: Quantisierte Gitterschwingungen .....             | 188 |
| Die Eigenschaften von Phononen .....                        | 188 |
| Quasiteilchen.....                                          | 191 |



## 18 Inhaltsverzeichnis

### Kapitel 9

#### **Eine spukhafte Fernwirkung? Die Verschränkung..... 195**

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| Die Verschränkung.....                      | 196 |
| Die Dekohärenz-Theorie.....                 | 199 |
| Einstein und die spukhafte Fernwirkung..... | 202 |
| Das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon.....  | 202 |
| Die Rolle der Bell'schen Ungleichungen..... | 203 |

### TEIL IV

#### **VON DER URSUPPE ZUM UNIVERSUM ..... 205**

### Kapitel 10

#### **Nicht nur Quark(s): Die fundamentalen Teilchen..... 207**

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Der Zoo der Elementarteilchen.....                                 | 208 |
| Die Erzeugung von Teilchen.....                                    | 209 |
| Die Ordnung im Teilchenzoo.....                                    | 212 |
| Nicht immer leicht: Leptonen.....                                  | 214 |
| Beeindruckende Teilchen: Hadronen.....                             | 218 |
| Das Quark-Modell.....                                              | 219 |
| Drei Quarks: Baryonen.....                                         | 220 |
| Ein Quark und ein Antiquark: Mesonen.....                          | 221 |
| Die fundamentalen Wechselwirkungen und ihre Austauschteilchen..... | 224 |
| Die elektromagnetische Kraft.....                                  | 224 |
| Die schwache Kraft.....                                            | 225 |
| Die starke Kraft.....                                              | 226 |
| Die Gravitation.....                                               | 228 |
| Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik.....                | 229 |
| Quantenfeldtheorien.....                                           | 232 |
| Einsteins Traum.....                                               | 233 |

### Kapitel 11

#### **Quantengravitation: Der Weg zurück zum Ursprung..... 235**

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| Die Gravitation.....                                       | 236 |
| Die Krümmung der Raumzeit.....                             | 238 |
| Zurück zum Anfang oder die Entwicklung des Universums..... | 240 |
| Der Urknall und die Expansion.....                         | 241 |
| Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung.....         | 244 |
| Der Lebenslauf des Universums.....                         | 244 |
| Strahlung – was sonst: Die Strahlungs-Ära.....             | 246 |
| Endlich Materie: Die Materie-Ära.....                      | 249 |
| Die Ursuppe? Das Quark-Gluon-Plasma.....                   | 251 |
| Die dunkle Seite des Universums.....                       | 253 |
| Die Dunkle Materie.....                                    | 253 |
| Die Dunkle Energie.....                                    | 254 |
| Das Lambda-CDM-Modell.....                                 | 255 |
| Die Quantengravitation.....                                | 256 |

## Inhaltsverzeichnis 19

## TEIL V VON FESTKÖRPERN ZU NANOPARTIKELN ..... 259

### Kapitel 12 Seltsame Ströme und andere Phänomene: Mikrostrukturen ..... 261

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| Weder Leiter noch Isolatoren: Halbleiter .....      | 262 |
| Die Eigenleitung: Elektronen und Löcher .....       | 262 |
| Die Dotierung: Elektronen oder Löcher .....         | 264 |
| Noch ein Paar: Exzitonen .....                      | 268 |
| Materialien in der Halbleitertechnologie .....      | 269 |
| Mikroelektronik .....                               | 272 |
| Die Herstellung von Mikrostrukturen .....           | 274 |
| Das Moore'sche Gesetz .....                         | 276 |
| Der Strom fließt und fließt: Die Supraleitung ..... | 278 |
| Durch die Wand: Der Tunneleffekt .....              | 282 |
| Die Rastertunnelmikroskopie .....                   | 283 |
| Und noch einmal: Tunneln .....                      | 285 |

### Kapitel 13 In die Welt der Nanostrukturen abtauchen ..... 289

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Die Nanowelt .....                                                     | 290 |
| Die Veränderung physikalischer Eigenschaften im Nanometerbereich ..... | 291 |
| Arten von Nanostrukturen .....                                         | 294 |
| Ein ganz besonderer Stoff: Kohlenstoff .....                           | 297 |
| Die Chemie des Kohlenstoffs .....                                      | 298 |
| Die Festkörpermodifikationen: Diamant und Graphit .....                | 300 |
| Ein Blick in die Nachbarschaft: Bornitrid .....                        | 302 |
| Nanotechnologie in Reinkultur: Dünne Schichten .....                   | 304 |
| Die Anwendung dünner Schichten .....                                   | 304 |
| Mechanische Eigenschaften .....                                        | 305 |
| Schichtsysteme und Stoffverbunde .....                                 | 309 |
| Quantenmechanik pur: Quantenpunkte .....                               | 311 |
| Kohlenstoffnanostrukturen .....                                        | 313 |
| Selbstassemblierung .....                                              | 317 |

## TEIL VI VON MIKROSTRUKTUREN ZU QUANTENTECHNOLOGIEN ..... 319

### Kapitel 14 Der Einstieg in die Quantenrevolution 2.0 ..... 321

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| Quantencomputing .....                          | 323 |
| Die Voraussetzungen .....                       | 323 |
| Mögliche Technologien für Quantencomputer ..... | 326 |
| Die Quantenteleportation .....                  | 333 |

## 20 Inhaltsverzeichnis

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Kryptografie, Quantenkryptografie und Postquantenkryptografie ..... | 338 |
| Die Kryptografie .....                                              | 340 |
| Die Quantenkryptografie .....                                       | 341 |
| Die Postquantenkryptografie .....                                   | 345 |

### TEIL VII

## DER TOP-TEN-TEIL ..... 347

### Kapitel 15

#### Der Weg in die Quantenmechanik: Zehn plus vier

#### Biografien ..... 349

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| Max Planck .....                    | 349 |
| Albert Einstein .....               | 350 |
| Niels Bohr .....                    | 351 |
| Werner Heisenberg .....             | 352 |
| Max Born .....                      | 354 |
| Erwin Schrödinger .....             | 356 |
| Louis de Broglie .....              | 357 |
| Paul Dirac .....                    | 357 |
| Wolfgang Pauli .....                | 358 |
| David Hilbert .....                 | 359 |
| Frauen in der Quantenmechanik ..... | 360 |
| Maria Goeppert-Mayer .....          | 360 |
| Lucy Mensing .....                  | 361 |
| Hertha Sponer .....                 | 361 |
| Emmy Noether .....                  | 361 |

### Kapitel 16

#### Zehn Postulate der Quantenmechanik ..... 363

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| Erstes Postulat .....             | 363 |
| Zweites Postulat .....            | 363 |
| Drittes Postulat .....            | 364 |
| Viertes Postulat .....            | 364 |
| Fünftes Postulat .....            | 364 |
| Sechstes Postulat .....           | 365 |
| Siebtes Postulat .....            | 365 |
| Achstes Postulat .....            | 365 |
| Neuntes Postulat .....            | 365 |
| Zehntes Postulat .....            | 365 |
| Das Spin-Statistik-Postulat ..... | 366 |

#### Abbildungsverzeichnis ..... 367

#### Stichwortverzeichnis ..... 371