

# Inhalt

**Geleitwort — VII**

**Vorwort zur 2. Auflage — IX**

**Vorwort zur 1. Auflage — XI**

**Danksagung — XIII**

**Zum Inhalt von Band V — XV**

**Symbolverzeichnis Band V — XXIII**

|          |   |
|----------|---|
| <b>1</b> | <b>Quantenoptik — 1</b>   |
| 1.1      | Das Versagen der klassischen Physik — 2                                     |
| 1.1.1    | Der (äußere) Photoeffekt (lichtelektrischer Effekt) — 2                     |
| 1.1.2    | Der Compton-Effekt — 6  |
| 1.2      | Einsteins korpuskulare Lichttheorie — 7                                     |
| 1.2.1    | Einsteins Erklärung des Photoeffekts — 9                                    |
| 1.2.2    | Berechnung des Compton-Effekts — 13   |
| 1.3      | Das Photon als Lichtteilchen — 16   |
| 1.3.1    | Relativistische Berechnung des Compton-Effekts — 18                         |
| 1.3.2    | Der Photonenimpuls — 21   |
| 1.3.3    | Photonendrehimpuls — 26   |
| 1.3.3.1  | Der Eigendrehimpuls (Spin) des Photons — 26                                 |
| 1.3.3.2  | Der Nachweis des Eigendrehimpulses des Photons, der Versuch von Beth — 29   |
| 1.3.3.3  | Mögliche technische Anwendungen: Nanomotoren — 30                           |
| 1.3.4    | Der Bahndrehimpuls des Photons — 31   |
| 1.3.4.1  | Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlicher Quantenzustände der Photonen — 34 |
| 1.3.5    | Gedankenexperiment zur quantenhaften Aussendung von Licht — 35              |
| 1.4      | Das Materieteilchen als Welle — 36  |
| 1.5      | Wellenoptik oder Quantenoptik? — 42   |
| 1.5.1    | Das Doppelspaltexperiment (Youngscher Versuch) mit einzelnen Photonen — 42  |
| 1.5.2    | Weitere Experimente zur Selbstinterferenz von Teilchen — 47                 |
| 1.5.3    | Die Amplitude der Wahrscheinlichkeitswelle — 50                             |
| 1.5.4    | Ergebnis und Zusammenfassung — 52   |

|         |   |
|---------|---|
| 1.6     | Materiewellen — 53  |
| 1.6.1   | Die Wellenfunktion — 53   |
| 1.6.2   | Dispersionsrelation von Materiewellen — 55  |
| 1.6.3   | Das Wellenpaket — 58  |
| 1.6.4   | Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion — 62                             |
| 1.6.5   | Ort und Impuls quantenmechanischer Teilchen: Die Heisenbergschen Unschärferelationen — 68 |
| 1.7     | Absorption, spontane und induzierte (stimulierte) Emission (LASER) — 73                   |
| 1.7.1   | Atome im Strahlungsfeld — 73  |
| 1.7.2   | Die Einsteinkoeffizienten der Strahlungsübergänge — 76                                    |
| 1.7.2.1 | Absorption — 76   |
| 1.7.2.2 | Induzierte Emission — 77  |
| 1.7.2.3 | Spontane Emission — 77  |
| 1.7.3   | Herleitung des Planckschen Strahlungsgesetzes nach Einstein — 80                          |
| 1.7.4   | Der Laser — 82  |
| 1.7.4.1 | Aufbau eines Lasers — 82  |
| 1.7.4.2 | Besetzungsinversion und Laserbedingung — 87   |
| 1.7.4.3 | Absorption, minimal notwendige Lichtverstärkung und Linienprofil — 91                     |
| 1.7.4.4 | Negativer Absorptionskoeffizient und erforderliche Besetzungsinversion — 95               |
| 1.7.4.5 | Erzeugung der Besetzungsinversion durch ‚Pumpen‘ — 98                                     |
| 1.7.4.6 | Die Schwingungsmoden — 101  |
| 1.7.4.7 | Die Lasergleichung — 104  |
| 1.7.4.8 | Praktische Ausführung von Lasern — 105  |
| 1.7.4.9 | Die Laserkühlung — 108  |
|         | Zusammenfassung — 109   |

|       |   |
|-------|---|
| 2     | Atomphysik — 115  |
| 2.1   | Klassische Atomvorstellungen und offene Fragen — 115    |
| 2.1.1 | Klassische Atomvorstellungen — 115                      |
| 2.1.2 | Ionen und freie Elektronen — 118                        |
| 2.1.3 | Elektronen in Metallen — 120                            |
| 2.1.4 | Offene Fragen am Beginn des 20. Jahrhunderts — 122      |
| 2.2   | Atomspektren, Stoßanregung, Bohrsches Atommodell — 123  |
| 2.2.1 | Strahlungsspektren von Atomen — 123                     |
| 2.2.2 | Der Franck-Hertz Versuch: Stoßanregung — 126            |
| 2.2.3 | Die Bohrschen Postulate — 131                           |
| 2.2.4 | Das Bohrsche Atommodell — 133                           |
| 2.3   | Die Schrödinger-Gleichung — 141                         |
| 2.3.1 | Die Schrödinger-Gleichung für ein freies Teilchen — 141 |

|          |   |
|----------|---|
| 2.3.2    | Die stationäre Schrödinger-Gleichung — <b>144</b>   |
| 2.3.3    | Die allgemeine Schrödinger-Gleichung und relativistische Formulierungen — <b>148</b>      |
| 2.4      | Anwendungen der Schrödinger-Gleichung — <b>156</b>  |
| 2.4.1    | Das Teilchen im Kastenpotenzial — <b>156</b>  |
| 2.4.1.1  | Unendlich tiefer Potenzialtopf — <b>157</b>   |
| 2.4.1.2  | Dreidimensionaler Potenzialtopf — <b>163</b>  |
| 2.4.1.3  | Endlich tiefer Potenzialtopf — <b>165</b>   |
| 2.4.2    | Der Tunnel-Effekt — <b>168</b>  |
| 2.4.2.1  | Potenzialstufe — <b>168</b>   |
| 2.4.2.2  | Potenzialwall endlicher Breite, Tunnel-Effekt — <b>174</b>                                |
| 2.4.2.3  | Anwendung des Tunnel-Effekts: Das Raster-Tunnelmikroskop — <b>180</b>                     |
| 2.4.3    | Der quantenmechanische lineare harmonische Oszillator — <b>181</b>                        |
| 2.4.4    | „Quantum dots“ und „quantum corrals“ — <b>188</b>   |
| 2.5      | Das Elektron im Coulombpotenzial des Protons:<br>Das Wasserstoffatom — <b>189</b>         |
| 2.5.1    | Die Schrödinger-Gleichung für das Wasserstoffatom — <b>189</b>                            |
| 2.5.2    | Quantenzahlen und Energieniveaus — <b>192</b>   |
| 2.5.3    | Die stationären Energie-Niveaus des Wasserstoffatoms:<br>Die „Grobstruktur“ — <b>194</b>  |
| 2.5.4    | Die Wellenfunktion im Grundzustand und in den untersten angeregten Zuständen — <b>201</b> |
| 2.5.5    | Bahndrehimpuls und magnetisches Moment, normaler Zeeman-Effekt — <b>210</b>               |
| 2.5.6    | Der Elektronen-Spin — <b>220</b>  |
| 2.5.6.1  | Der Stern-Gerlach-Versuch — <b>221</b>  |
| 2.5.6.2  | Der Einstein-de Haas-Effekt — <b>224</b>  |
| 2.5.7    | Spin-Bahn-Kopplung, Feinstruktur, anomaler Zeeman-Effekt — <b>228</b>                     |
| 2.5.8    | Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms — <b>239</b>                               |
| 2.6      | Vielelektronensysteme und periodisches System — <b>240</b>                                |
| 2.6.1    | Vielelektronensysteme: Kopplung der Bahn- und Eigendrehimpulse — <b>240</b>               |
| 2.6.1.1  | Die Russell-Saunders-Kopplung ( <i>LS</i> Kopplung, „normale“ Kopplung) — <b>241</b>      |
| 2.6.1.2  | Die <i>JJ</i> -Kopplung — <b>244</b>  |
| 2.6.1.3  | Theoretische Modelle für Vielelektronensysteme — <b>245</b>                               |
| 2.6.1.4  | Magnetische Eigenschaften der Atome — <b>248</b>  |
| 2.6.2    | Das periodische System — <b>248</b>   |
|          | <b>Zusammenfassung — 252</b>  |
| Anhang 1 | Die Sommerfeldsche Erweiterung des Bohrschen Atommodells — <b>258</b>                     |
| Anhang 2 | Der quantenmechanische, lineare harmonische Oszillator — <b>260</b>                       |
| Anhang 3 | Lösung der Schrödinger-Gleichung für das Wasserstoffatom — <b>265</b>                     |

- Anhang 4 Der Bahndrehimpuls  $L$  eines Elektrons — 273  
 Anhang 5 Magnetisches Moment und Eigendrehimpuls (Spin) des Elektrons aus der Dirac-Gleichung — 277  
 Anhang 6 Das Periodische System der Elemente — 281

**3 Subatomare Physik — 283**

- 3.1 Kernphysik — 285  
 3.1.1 Entwicklung und Terminologie — 285  
 3.1.2 Kerneigenschaften — 293  
 3.1.2.1 Kernradius und Kernmasse — 293  
 3.1.2.2 Die Bindungsenergie des Atomkerns — 300  
 3.1.2.3 Nukleonen und Kernniveaus, Kernmagnetismus, die Kernkraft — 302  
 3.1.3 Kernmodelle — 313  
 3.1.3.1 Tröpfchenmodell und Kernbindungsenergie — 314  
 3.1.3.2 Das Fermigas-Modell — 318  
 3.1.3.3 Das Einzelteilchen-Schalenmodell — 321  
 3.1.3.4 Das kollektive Kernmodell — 325  
 3.1.4 Der radioaktive Zerfall — 326  
 3.1.4.1 Das radioaktive Zerfallsgesetz — 327  
 3.1.4.2 Der  $\alpha$ -Zerfall — 330  
 3.1.4.3 Der  $\beta$ -Zerfall — 335  
 3.1.4.4 Der  $\gamma$ -Zerfall — 344  
 3.1.4.5 Radioaktive Altersbestimmung — 345  
 3.1.5 Kernreaktionen, Kernspaltung, Kernenergie — 348  
 3.1.5.1 Direkte Kernumwandlungen, Erhaltungssätze, Wirkungsquerschnitt — 348  
 3.1.5.2 Kernspaltung (Zerfall des Kerns in zwei vergleichbar große Bruchstücke) — 352  
 3.1.5.3 Kernfusion — 366  
 3.1.5.4 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie — 375  
 3.2 Physik der kleinsten Teilchen („Elementarteilchen“) — 384  
 3.2.1 Klassifikation der Elementarteilchen — 385  
 3.2.2 Erlaubte und verbotene Teilchenprozesse: Erhaltungssätze — 388  
 3.2.2.1 Erhaltung der Leptonenzahl  $L$  — 389  
 3.2.2.2 Erhaltung der Baryonenzahl  $B$  — 391  
 3.2.2.3 Erhaltung der „Seltsamkeit“  $S$  (strangeness) — 392  
 3.2.2.4 Erhaltung des Isospins und Zusammenfassung der Quantenzahlen der Hadronen — 393  
 3.2.3 Das Quarkmodell — 394  
 3.2.3.1 Der „achtfache“ Weg — 394  
 3.2.3.2 Das Quarkmodell — 397

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.2.4    | Fundamentale Wechselwirkungen und Austauschteilchen —                               | 404        |
| 3.2.4.1  | Elektromagnetische Wechselwirkung —   | 404        |
| 3.2.4.2  | Schwache Wechselwirkung —   | 405        |
| 3.2.4.3  | Starke Wechselwirkung —   | 407        |
| 3.2.5    | Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik —                                    | 409        |
| 3.2.6    | Ein kurzer Ausflug in die Kosmologie, wo sich das Kleine mit dem Großen verbindet — | 411        |
| 3.2.6.1  | Das Hubble-Gesetz —   | 412        |
| 3.2.6.2  | Die Kosmische Hintergrundstrahlung —  | 418        |
| 3.2.6.3  | Dunkle Materie —  | 422        |
| 3.2.6.4  | Die kritische Massendichte des Universums —   | 423        |
| 3.2.6.5  | Das kosmologische Standardmodell —  | 426        |
|          | <b>Zusammenfassung —</b>  | <b>434</b> |
| Anhang 1 | Der Mößbauer-Effekt —   | 442        |
| A1.1     | Die natürliche Linienbreite —   | 442        |
| A1.2     | Lichtemission eines angeregten Atoms —  | 444        |
| A1.3     | Emission von $\gamma$ -Strahlung eines angeregten Atomkerns —                       | 446        |
| A1.4     | Der Mößbauer-Effekt —   | 448        |
| A1.5     | Anwendung des Mößbauer-Effekts: Mößbauer-Spektroskopie —                            | 452        |
|          | <b>Literatur —</b>  | <b>457</b> |
|          | <b>Register —</b>   | <b>459</b> |