

Inhaltsverzeichnis

Vorwort XIX

1 Einleitung 1

- 1.1 Klassische Mechanik und Quantenmechanik 1
- 1.2 Aufbau des Bands „Quantenmechanik 1“ 4
- 1.3 Grenzen der Quantenmechanik 7

2 Historisch-heuristische Einführung in die Quantenmechanik 9

- 2.1 Quanteneigenschaften des Strahlungsfelds 9
 - 2.1.1 Strahlung eines schwarzen Körpers 9
 - 2.1.1.1 Experimenteller Befund 9
 - 2.1.1.2 Herleitung der Strahlungsformel für den schwarzen Körper 11
 - 2.1.2 Der äußere lichtelektrische Effekt 18
 - 2.1.3 Compton-Effekt 20
- 2.2 Quanteneigenschaften der Materie 24
 - 2.2.1 Die spezifische Wärme fester Körper 25
 - 2.2.2 Diskrete Atomzustände 27
 - 2.2.2.1 Das Kombinationsprinzip der Frequenzen 27
 - 2.2.2.2 Franck-Hertz'scher Stoßversuch 28
 - 2.2.3 Bohr'sches Atommodell 30
 - 2.2.3.1 Qualitative Formulierung der Bohr'schen Postulate 31
 - 2.2.3.2 Quantitative Formulierung der Bohr'schen Postulate 31
 - 2.2.3.3 Bohr'sches Wasserstoffatommodell 33
 - 2.2.3.4 Strahlungsspektrum des Wasserstoffatoms 35
 - 2.2.3.5 Kritik am Bohr'schen Atommodell 35
 - 2.2.4 Das Korrespondenzprinzip 36
- 2.3 Welleneigenschaften der Materie 37
 - 2.3.1 De Broglie's Materiewellen 37

* Mit einem Stern sind Themen und Kapitel gekennzeichnet, die eher zusätzlich für die Masterausbildung vorgesehen sind

2.3.2	Wellenpakete, Wahrscheinlichkeiten, Erwartungswerte	39
2.3.2.1	Wellen und Wellenpakete	39
2.3.2.2	Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation	44
2.3.3	Erwartungswerte	45
2.3.3.1	Ortsdarstellung	45
2.3.3.2	Impulsdarstellung	50
2.3.4	Unschärferelation, Operatoren und Vertauschungsrelationen	51
2.3.4.1	Unschärferelation	51
2.3.4.2	Vertauschungsrelationen	53
2.3.4.3	Operatoren	54
2.3.5	Verallgemeinerung auf drei Dimensionen	55
2.3.6	Vielteilchensysteme	57
2.4	Grundzüge der Wellenmechanik	58
	Aufgaben	62
3	Die Schrödinger-Gleichung	65
3.1	Heuristische Formulierung der Schrödinger-Gleichung	65
3.2	Stationäre Lösung der Schrödinger-Gleichung	68
3.3	Die Kontinuitätsgleichung für die Wahrscheinlichkeit	69
3.4	Impulsdarstellung der Schrödinger-Gleichung	71
3.5	Lösung der Schrödinger-Gleichung für einfache Potentiale	73
3.5.1	Schrödinger-Gleichung im eindimensionalen Raum	73
3.5.2	Übersicht über das Energie-Eigenwertproblem	74
3.5.2.1	Gebundene Partikel	74
3.5.2.2	Einseitig und zweiseitig ungebundene Partikel	76
3.5.3	Stetigkeitseigenschaften der Wellenfunktion	78
3.5.3.1	Anschlussbedingungen bei endlichem Potentialsprung	78
3.5.3.2	Anschlussbedingungen bei δ -förmigem Potential	79
3.5.4	Die Potentialstufe	80
3.5.4.1	Problemstellung	80
3.5.4.2	Lösungen für $x < 0$	81
3.5.4.3	Lösungen für $x > 0$	82
3.5.4.4	Stetigkeitsbedingungen	82
3.5.4.5	Diskussion	84
3.5.5	Der Potentialwall	87
3.5.6	Der Potentialgraben	90
3.5.6.1	Das kontinuierliche Spektrum	90
3.5.6.2	Das diskrete Energiespektrum	95
3.5.6.3	Unendlich tiefer Potentialtopf	100
	Aufgaben	102

4	Grundlagen der Quantenmechanik	105
4.1	Der quantenmechanische Zustand	105
4.2	Zustandsvektoren im Hilbert-Raum	107
4.2.1	Elemente des Hilbert-Raums	107
4.2.2	Linearität des Hilbert-Raums	107
4.2.3	Skalarprodukt von Zustandsvektoren	109
4.2.3.1	Definition und Eigenschaften	109
4.2.3.2	Norm eines Vektors	110
4.2.3.3	Orthogonalität von Vektoren	110
4.2.3.4	Die Schwarz'sche Ungleichung	110
4.2.4	Separabilität und Vollständigkeit des Hilbert-Raums	112
4.2.4.1	Separabilität	112
4.2.4.2	Basis im Hilbert-Raum	112
4.2.4.3	Vollständigkeit und Darstellung eines Zustandsvektors	114
4.2.4.4	Skalarprodukt in Komponentendarstellung	115
4.2.4.5	Schmidt'sches Orthogonalisierungsverfahren	115
4.3	Operatoren im Hilbert-Raum	117
4.3.1	Definition eines Operators	117
4.3.2	Eigenschaften von Operatoren	118
4.3.2.1	Lineare Operatoren	118
4.3.2.2	Beschränkte Operatoren	118
4.3.2.3	Operatorsummen	118
4.3.2.4	Produkte von Operatoren	119
4.3.2.5	Adjungierte Operatoren	119
4.3.2.6	Hermiteische und antihermitesche Operatoren	120
4.3.2.7	Einheitsoperator und Projektionsoperatoren	120
4.3.2.8	Unitäre Operatoren	121
4.3.3	Darstellung eines Operators in einem vollständigen Orthonormalsystem	121
4.3.4	Eigenwerte und Eigenvektoren hermitescher Operatoren	123
4.3.4.1	Eigenwertgleichung, Eigenwerte und Eigenvektoren	123
4.3.4.2	Eigenwerte hermitescher Operatoren	124
4.3.4.3	Diskretes Eigenwertspektrum, Entartung	124
4.3.4.4	Orthogonalität und Vollständigkeit von Eigenvektoren	125
4.3.4.5	Kontinuierliche Eigenwerte	127
4.3.4.6	Gemischtes Spektrum	129
4.4	Dirac-Schreibweise	130
4.4.1	Duale Vektoren	130
4.4.2	Produkte von Dirac-Vektoren	130
4.4.2.1	Skalares Produkt	130
4.4.2.2	Dyadisches Produkt	131
4.4.3	Projektionsoperatoren und Vollständigkeitsrelation	131

4.4.3.1	Projektionsoperatoren	131
4.4.3.2	Vollständigkeitsrelation	132
4.4.4	Darstellung von Operatoren	133
4.5	Anschluss an die physikalische Realität	136
4.5.1	Observable	136
4.5.1.1	Observable und Operatoren	136
4.5.1.2	Basisobservable und zusammengesetzte Observable	137
4.5.2	Vertauschungsrelationen	138
4.5.2.1	Vertauschungsrelationen für Basisobservable	138
4.5.2.2	Vertauschungsrelationen für zusammengesetzte Operatoren	139
4.5.3	Eigenwertproblem der Basisobservablen	141
4.5.4	Orts- und Impulsdarstellung eines Zustands	144
4.5.5	Orts- und Impulsdarstellung der Basisoperatoren \hat{x} und \hat{p}	146
4.5.6	Orts- und Impulsdarstellung zusammengesetzter Operatoren	148
4.5.7	Quantenmechanik in einer beliebigen Basis	149
4.5.7.1	Bestimmung neuer Basen	149
4.5.7.2	Transformation der Zustände, Erhaltung der Information	150
4.5.7.3	Transformation der Operatoren in die neue Darstellung	152
4.6	Erwartungswert, Streuung, Messwert	152
4.7	Zeitentwicklung quantenmechanischer Systeme	155
4.7.1	Zeitentwicklungsoperatoren	155
4.7.2	Schrödinger-Bild	157
4.7.3	Heisenberg-Bild	158
4.7.4	Wechselwirkungsbild	159
4.7.5	Ehrenfest'sche Theoreme	161
4.7.6	Erhaltungsgrößen	162
4.8	Vertauschbare Operatoren	163
4.8.1	Eigenvektoren bei vertauschbaren Operatoren	163
4.8.2	Vollständiger Satz vertauschbarer Operatoren	165
4.9	Verallgemeinerte Unschärferelation	166
4.9.1	Die Unschärferelation	166
4.9.2	Beispiele für die Unschärferelation	168
4.9.2.1	Heisenberg'sche Unschärferelation	168
4.9.2.2	Kinetische und potentielle Energie	168
4.9.2.3	Komponenten des Drehimpulses	169
4.9.2.4	Energie-Zeitunschärfe	170
4.9.3	*Zustände minimaler Unschärfe	171
4.9.4	Diskussion der Unschärferelation	174
4.9.4.1	Elektronenbeugung am Spalt	175
4.9.4.2	Beobachtung eines Elektrons in einem Mikroskop	176
4.10	Wahrscheinlichkeiten in der Quantenmechanik	177
4.10.1	Dichteoperator	179

- 4.10.2 *Wahrscheinlichkeitsoperator für Observable 180
- 4.10.2.1 *Klassische charakteristische Funktion und Wahrscheinlichkeitsdichte 180
- 4.10.2.2 *Quantenmechanische charakteristische Funktion und Operator für die Wahrscheinlichkeitsdichte 181
- 4.10.2.3 *Entwicklung nach Eigenfunktionen 182
- 4.10.2.4 *Beispiel: Kontinuierliches Spektrum 184
- 4.10.2.5 *Beispiel: Messung am δ -Potential 185
- 4.10.3 *Verteilungsfunktion für mehrere Operatoren 189
- 4.10.3.1 *Vertauschbare Operatoren 189
- 4.10.3.2 *Nicht vertauschbare Operatoren 189
- 4.11 Axiome der Quantenmechanik 191
 - Aufgaben 193

- 5 Der lineare harmonische Oszillator 197**
- 5.1 Schrödinger-Gleichung 197
 - 5.1.1 Zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung 197
 - 5.1.2 Dimensionslose Variable 198
- 5.2 Beschränktheit der Energieeigenwerte und Grundzustand 199
 - 5.2.1 Beschränktheit der Energieeigenwerte 199
 - 5.2.2 Grundzustand 200
- 5.3 Eigenwertspektrum 201
- 5.4 Normierung der Eigenfunktionen 204
- 5.5 Ortsdarstellung der ersten Eigenfunktionen 205
- 5.6 *Vollständigkeitsrelation 207
- 5.7 Beispiele für das Rechnen mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren 211
 - 5.7.1 Matrixelemente des Ortsoperators 211
 - 5.7.2 Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung im Grundzustand 212
- 5.8 Klassische und quantenmechanische Aufenthaltswahrscheinlichkeit 214
- 5.9 Das zeitliche Verhalten 216
 - Aufgaben 218

- 6 Quantenmechanische Bewegung im Zentralfeld 221**
- 6.1 Klassische und quantenmechanische Bewegung im Zentralfeld 221
 - 6.1.1 Das Zentralfeld 221
 - 6.1.2 Klassische Bewegung im zentralsymmetrischen Potential 223
 - 6.1.3 Quantenmechanische Bewegung im Zentralfeld 224
- 6.2 Vertauschbarkeit von \hat{L} und \hat{H} im zentralsymmetrischen Feld 227
 - 6.2.1 Definition des Drehimpulsoperators 227
 - 6.2.2 Vertauschbarkeit von \hat{L} und \hat{H} 227

6.3	Quantenmechanische Zerlegung des Operators \hat{p}^2	229
6.4	Schrödinger-Gleichung für den Radialanteil	232
6.5	Drehimpulsalgebra	233
6.5.1	Vertauschungsrelationen	233
6.5.1.1	Kommutator für die Komponenten des Drehimpulses	233
6.5.1.2	Vertauschungsrelation mit dem Quadrat des Drehimpulsoperators	235
6.5.2	Algebraische Bestimmung der Eigenwerte und Eigenzustände von L^2 und L_z	235
6.5.3	Das Vektormodell	240
6.5.4	Ortsdarstellung	242
6.5.4.1	Operatoren	242
6.5.4.2	Eigenfunktionen für $m = l$	243
6.5.4.3	Normierung	244
6.5.4.4	Eigenfunktionen für $m \leq l$	244
6.5.5	Diskussion der Drehimpuls-Eigenzustände	246
6.6	Lösung der Schrödinger-Gleichung für den Radialanteil: das Wasserstoffproblem	254
6.6.1	Spezialisierung auf das Coulomb-Potential	254
6.6.2	Verhalten der Lösung für $\rho \ll 1$	254
6.6.3	Verhalten der Lösung für $\rho \rightarrow \infty$	255
6.6.4	Vollständiger Lösungsansatz	256
6.6.5	Normierbarkeit der Lösung	257
6.6.6	Energieeigenwerte	258
6.6.7	Eigenfunktionen	259
6.7	Diskussion der Zustandsfunktionen	260
6.8	Entartung beim Wasserstoffproblem	264
	Aufgaben	266
7	Näherungsmethoden zur Lösung quantenmechanischer Probleme	269
7.1	Einleitung	269
7.2	Zeitunabhängige (Schrödinger'sche) Störungstheorie	271
7.2.1	Störungstheorie für diskrete Energieniveaus ohne Entartung	271
7.2.1.1	Störungstheorie erster Ordnung	273
7.2.1.2	Störungstheorie zweiter Ordnung	274
7.2.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	277
7.2.1.4	Gültigkeit der Störungsrechnung	278
7.2.2	Störungstheorie mit Entartung	279
7.2.2.1	Problemstellung	279
7.2.2.2	Bestimmung der symmetriangepassten Eigenvektoren	280
7.2.3	Anwendung der zeitunabhängigen Störungstheorie: Stark-Effekt	282

- 7.2.3.1 Lösung des ungestörten Problems 283
- 7.2.3.2 Störungstheorie ohne Entartung für den Grundzustand 284
- 7.2.3.3 Störungstheorie mit Entartung für den ersten angeregten Zustand 285
- 7.2.3.4 Diskussion 286
- 7.3 *Die Methode der kanonischen Transformation 289
- 7.4 Zeitabhängige (Dirac'sche) Störungstheorie 293
- 7.4.1 Schrödinger-Gleichung für zeitabhängige Hamilton-Operatoren 293
- 7.4.2 Kurzzeitig wirksame Störungen 295
- 7.4.3 Zeitlich anhaltende Störung. Plötzliches Einschalten 297
- 7.4.3.1 Monochromatische Störung 297
- 7.4.3.2 Überlagerung von Wellen verschiedener Frequenz (inkohärente Störung) 301
- 7.4.3.3 Auswahlregeln 303
- 7.4.4 Zeitlich anhaltende Störung mit adiabatischem Einschalten 304
- 7.4.4.1 Störungstheoretischer Ausdruck für die Wellenfunktion 304
- 7.4.4.2 Klassische Dispersionstheorie 306
- 7.4.4.3 Quantenmechanische Dispersionstheorie 307
- 7.4.4.4 Beweis des f -Summen-Satzes 310
- 7.4.4.5 Diskussion 311
- 7.5 Das Wasserstoffmolekülion, Tunneleffekt 312
- 7.5.1 Energie und Wellenfunktion 312
- 7.5.2 Bestimmung der Energiewerte 314
- 7.5.3 Tunneleffekt 317
- 7.6 Das Ritz'sche Variationsprinzip 318
- 7.6.1 Das Variationsprinzip 318
- 7.6.2 Beispiel: Abschätzung für den Grundzustand des harmonischen Oszillators 321
- 7.7 *Die WKB-Methode 322
- 7.7.1 *Quasiklassische Wellenfunktion 322
- 7.7.2 *Quasiklassische Näherung im eindimensionalen Fall 324
- 7.7.2.1 *Die Wellenfunktion 324
- 7.7.2.2 *Verhalten in der Umgebung eines Umkehrpunkts 326
- 7.7.2.3 *Eigenschaften der Airy-Funktion 328
- 7.7.2.4 *Anschlussbedingungen 329
- 7.7.3 *Bohr'sche Quantisierungsbedingung 330
- Aufgaben 332
- 8 Bewegung von Teilchen im elektromagnetischen Feld 335**
- 8.1 Die Schrödinger-Gleichung von Teilchen im elektromagnetischen Feld 335

8.1.1	Die Schrödinger-Gleichung in der Ortsdarstellung	335
8.1.2	Kontinuitätsgleichung und Wahrscheinlichkeitsstromdichte	336
8.1.3	Eichtransformation	337
8.1.4	*Aharonov-Bohm-Effekt	341
8.2	Freie Elektronen im homogenen Magnetfeld und Landau-Niveaus	346
8.3	*Magnetfeld und elektronische Zustandsdichte im Festkörper	349
8.3.1	*Bewegung von Elektronen ohne Magnetfeld	349
8.3.2	*Bewegung von Elektronen im Magnetfeld	351
8.3.2.1	*Bestimmung des Entartungsgrads	352
8.3.2.2	*Abschätzung realistischer Entartungsgrade	353
8.3.2.3	*Zustandsdichte	353
8.3.2.4	*Diskussion der Ergebnisse	355
8.3.2.5	*Effekt der Bewegung in z-Richtung und Einfluss der Temperatur	357
8.3.3	*Experimentelle Bestätigung der Landau-Niveaus	357
8.3.3.1	*Zyklotronresonanz	357
8.3.3.2	*Optischer Nachweis von Landau-Niveaus	358
8.3.3.3	*Der de Haas-van Alphen-Effekt	358
8.3.3.4	*Der Shubnikov-de Haas-Effekt	359
8.4	Gebundene Elektronen im statischen Magnetfeld. Normaler Zeeman-Effekt	359
	Aufgaben	364
9	Spin und magnetisches Moment des Elektrons	367
9.1	Experimentelle Grundlage	367
9.1.1	Stern-Gerlach-Versuch	367
9.1.2	Feinstruktur der Spektrallinien	368
9.1.3	Spinhypothese von Uhlenbeck und Goudsmit	369
9.1.4	Einstein-de Haas-Versuch	372
9.2	Mathematische Beschreibung des Spins	372
9.2.1	Zustandsvektoren für Spin 1/2-Teilchen	372
9.2.2	Darstellung der Spinoperatoren	375
9.2.3	*Transformation von Spinoren	379
9.2.3.1	*Koordinatentransformation	379
9.2.3.2	*Spinortransformation	380
9.2.3.3	*Drehung um die z-Achse	382
9.3	Zusammensetzung von Drehimpulsen	383
9.3.1	Bahndrehimpuls	383
9.3.2	Spindrehimpuls	383
9.3.3	Gesamtdrehimpuls	383
9.3.4	Eigenzustände zu L^2 , L_z , S^2 , S_z	384

- 9.3.5 Eigenzustände zu $\hat{J}^2, \hat{L}^2, \hat{S}^2$ und \hat{J}_z 385
- 9.3.6 Eigenfunktionen zu J^2, L_1^2, L_2^2, J_z 387
- 9.4 Pauli-Gleichung 388
 - 9.4.1 Heuristische Ableitung 388
 - 9.4.2 *Konzept der ordnungslinearisierten Evolutionsgleichungen 389
 - 9.4.2.1 *Minimale Kopplung 389
 - 9.4.2.2 *Ordnungslinearisierte Schrödinger-Gleichung 392
 - 9.4.2.3 *Elektron im elektromagnetischen Feld 397
 - 9.4.3 Spin-Bahn-Kopplung 398
 - 9.4.4 Wasserstoffatom im homogenen magnetischen Feld 399
- 9.5 *Feinstrukturaufspaltung ohne Magnetfeld 400
- 9.6 *Elektronen im schwachen Magnetfeld (anomaler Zeeman-Effekt) 405
- 9.7 *Wasserstoffatom im starken Magnetfeld (Paschen-Back-Effekt) 409
 - Aufgaben 412
- 10 Vielteilchensysteme 415**
 - 10.1 Erhaltungssätze 415
 - 10.1.1 Schrödinger-Gleichung 415
 - 10.1.2 Gesamtimpuls und Impulserhaltung 416
 - 10.1.3 Gesamtdrehimpuls 417
 - 10.2 Wechselwirkungsfreiheit und Unabhängigkeit 418
 - 10.2.1 Teilchensysteme ohne Wechselwirkung 418
 - 10.2.2 Austauschentartung 420
 - 10.3 Identische quantenmechanische Teilchen 421
 - 10.3.1 Wellenfunktionen identischer Teilchen 421
 - 10.3.2 Wellenfunktionen für wechselwirkungsfreie Bosonen und Fermionen 423
 - 10.3.3 Pauli-Prinzip 424
 - 10.4 *Die Struktur des Hilbert-Raums für ein System aus N Teilchen 424
 - 10.4.1 *Einleitung 424
 - 10.4.2 *Hilbert-Raum für ein N -Teilchensystem 425
 - 10.4.3 *Operatoren in Produkt-Räumen 426
 - 10.4.4 *Identische Teilchen 427
 - 10.5 *Näherungsverfahren für Teilchensysteme mit Wechselwirkung 427
 - 10.5.1 *Störungstheorie: Helium-Atom 427
 - 10.5.2 *Hartree-Verfahren 431
 - 10.5.3 *Hartree-Fock-Verfahren 434
 - 10.6 Bändermodell des Festkörpers 434

- 10.6.1 Reduktion des Vielteilchenproblems auf ein Einteilchenproblem 434
- 10.6.2 Bloch'sches Theorem 436
- 10.6.3 Eigenfunktionen in einem gitterperiodischen Potential 437
Aufgaben 443

- 11 *Konzeptionelle Probleme der Quantenmechanik 447**
- 11.1 *Determinismus und Wahrscheinlichkeit 447
- 11.1.1 *Unschärfe und Messergebnis 447
- 11.1.2 *Das Doppelspaltexperiment 449
- 11.1.3 *Stern-Gerlach-Versuche 451
- 11.1.4 *Renninger's Argument 453
- 11.2 *Der Kollaps der Wellenfunktion 454
- 11.2.1 *de Broglie's Paradoxon 454
- 11.2.2 *Schrödinger's Katze 457
- 11.2.3 *Wigner's Freund 457
- 11.2.4 *Subjektive Theorien 458
- 11.2.5 *Feynman's Summation der Möglichkeiten 458
- 11.2.6 *Konzept der klassischen Messung von Landau und Lifschitz 459
- 11.2.7 *Kopenhagener Interpretation 459
- 11.2.8 *Ensembletheorien 460
- 11.2.9 *Many-World-Theorien 460
- 11.3 *Die Elemente der physikalischen Realität 461
- 11.3.1 *Das Problem der vollständigen Theorie 461
- 11.3.2 *Das EPR-Modell 462
- 11.3.3 *Das Modell von Bohm und Aharanov 464
- 11.3.4 *Das EPR-Paradoxon in der Kopenhagener Deutung 465
- 11.4 *Verborgene Variablen 466
- 11.4.1 *Dispersion 466
- 11.4.2 *Die Bell'schen Ungleichungen 468
- 11.4.2.1 *Quantenmechanische Situation 468
- 11.4.2.2 *Verborgene Variablen 469
- 11.4.2.3 *Die Bell'sche Ungleichung 470
- 11.4.2.4 *Verletzung der Bell'schen Ungleichung 471
- 11.4.3 *Das GHZ-Experiment 472
- 11.5 *Der Messprozess 477
- 11.5.1 *Reiner und gemischter Zustand 477
- 11.5.2 *Zeitevolution des Dichteoperators 480
- 11.5.3 *Der Messprozess 481
- 11.5.3.1 *Gemeinsamer Zustand von Messobjekt und Messsystem 482
- 11.5.3.2 *Der von Neumann'sche Übergangsoperator 483
- 11.5.3.3 *Wigner'scher Messoperator 484

- 11.5.4 *Übergang zum gemischten Zustand 485
- 11.5.5 *AND und OR 488
- 11.6 *Anwendungen der Theorie des Messprozesses 489
 - 11.6.1 *Der Quanten-Zenon-Effekt 489
 - 11.6.2 *Delayed-Choice-Experimente 492
 - 11.6.3 *Wechselwirkungsfreie Messung 493
 - 11.6.3.1 *Das Mach-Zehnder-Interferometer 493
 - 11.6.3.2 *Prinzip der wechselwirkungsfreien Messung 494
 - 11.6.3.3 *Zerstörungsfreie Materialprüfung nach Elitzur-Vaidman 495
 - 11.6.4 *Quantencomputer 497
 - 11.6.5 *Quanten-Teleportation 498
 - 11.6.6 *Quantenkryptographie 501

Literaturverzeichnis 507

Sachverzeichnis 509