

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Frühe Atomphysik	1
1.1 Einführung	1
1.2 Das Spektrum des Wasserstoffatoms	1
1.3 Die bohrsche Theorie	3
1.4 Relativistische Effekte	6
1.5 Moseleysches Gesetz und Ordnungszahl	8
1.6 Strahlungsübergänge	11
1.7 Die Einstein-Koeffizienten	13
1.8 Der Zeeman-Effekt	16
1.8.1 Experimentelle Beobachtung des Zeeman-Effekts	20
1.9 Zusammenstellung der atomaren Einheiten	22
Aufgaben	23
2 Das Wasserstoffatom	27
2.1 Die Schrödinger-Gleichung	27
2.1.1 Lösung der angularen Gleichung	28
2.1.2 Lösung der radialen Gleichung	32
2.2 Übergänge	35
2.2.1 Auswahlregeln	37
2.2.2 Integration bezüglich θ	39
2.2.3 Parität	40
2.3 Feinstruktur	43
2.3.1 Der Spin des Elektrons	43
2.3.2 Die Spin-Bahn-Wechselwirkung	44
2.3.3 Die Feinstruktur von Wasserstoff	48
2.3.4 Die Lamb-Verschiebung	50
2.3.5 Übergänge zwischen Feinstruktur-Niveaus	52
Weiterführende Literatur	52
Aufgaben	53

3	Helium	57
3.1	Der Grundzustand von Helium	57
3.2	Die angeregten Zustände von Helium	59
3.2.1	Spin-Eigenzustände	64
3.2.2	Übergänge in Helium	66
3.3	Auswertung der Integrale für Helium	66
3.3.1	Grundzustand	66
3.3.2	Angeregte Zustände: Das direkte Integral	68
3.3.3	Angeregte Zustände: Das Austauschintegral	70
	Weiterführende Literatur	71
	Aufgaben	72
4	Alkalimetalle	77
4.1	Schalenstruktur und das Periodensystem der Elemente	77
4.2	Der Quantendefekt	79
4.3	Die Zentralfeldnäherung	82
4.4	Numerische Lösung der Schrödinger-Gleichung	86
4.4.1	Selbstkonsistente Lösungen	88
4.5	Die Spin-Bahn-Wechselwirkung: Ein quantenmechanischer Ansatz	90
4.6	Die Feinstruktur der Alkaliatome	93
4.6.1	Relative Intensitäten der Feinstrukturübergänge	94
	Weiterführende Literatur	96
	Aufgaben	96
5	Das LS-Kopplungsschema	103
5.1	Feinstruktur im LS -Kopplungsschema	107
5.2	Das jj -Kopplungsschema	109
5.3	Mittlere Kopplung: Übergänge zwischen den Kopplungsschemen	111
5.4	Auswahlregeln im LS -Kopplungsschema	115
5.5	Der Zeeman-Effekt	116
5.6	Zusammenfassung	117
	Weiterführende Literatur	119
	Aufgaben	120

6	Hyperfeinstruktur und Isotopenverschiebung	125
6.1	Hyperfeinstruktur	125
6.1.1	Hyperfeinstruktur für s-Elektronen	126
6.1.2	Wasserstoffmaser	129
6.1.3	Hyperfeinstruktur für $l \neq 0$	130
6.1.4	Vergleich von Feinstruktur und Hyperfeinstruktur	132
6.2	Isotopenverschiebung	135
6.2.1	Masseneffekte	136
6.2.2	Volumenverschiebung	138
6.2.3	Information aus Atomkernen	139
6.3	Zeeman-Effekt und Hyperfeinstruktur	140
6.3.1	Zeeman-Effekt bei schwachem Feld, $\mu_B B < A$	140
6.3.2	Zeeman-Effekt bei starkem Feld	142
6.3.3	Mittlere Feldstärken	143
6.4	Messung der Hyperfeinstruktur	145
6.4.1	Das Atomstrahlverfahren	147
6.4.2	Atomuhren	151
	Weiterführende Literatur	153
	Aufgaben	153
7	Wechselwirkung von Atomen mit Strahlung	159
7.1	Aufstellen der Gleichungen	159
7.1.1	Störung durch ein oszillierendes elektrisches Feld	160
7.1.2	Näherung rotierender Wellen	161
7.2	Die Einstein-B-Koeffizienten	162
7.3	Wechselwirkung mit monochromatischer Strahlung	164
7.3.1	Die Konzepte der π -Pulse und der $\pi/2$ -Pulse	165
7.3.2	Der Bloch-Vektor und die Bloch-Kugel	165
7.4	Ramsey-Streifen	170
7.5	Strahlungsdämpfung	173
7.5.1	Dämpfung eines klassischen Dipols	173
7.5.2	Die optischen Bloch-Gleichungen	176
7.6	Der Wirkungsquerschnitt der optischen Absorption	178
7.6.1	Wirkungsquerschnitt für reine Strahlungsverbreiterung	183
7.6.2	Die Sättigungsintensität	183
7.6.3	Leistungsverbreiterung	184
7.7	AC-Stark-Effekt oder Lichtverschiebung	185
7.8	Anmerkung zur semiklassischen Theorie	187
7.9	Schlussbemerkungen	188

Weiterführende Literatur	190
Aufgaben	190
8 Dopplerfreie Laserspektroskopie	197
8.1 Doppler-Verbreiterung von Spektrallinien	197
8.2 Die Kreuzstrahlmethode	200
8.3 Sättigungsspektroskopie	202
8.3.1 Prinzipien der Sättigungsspektroskopie.....	203
8.3.2 Cross-over-Resonanzen bei der Sättigungsspektroskopie	205
8.4 Zwei-Photonen-Spektroskopie	211
8.5 Kalibrierung bei der Laserspektroskopie	217
8.5.1 Kalibrierung der relativen Frequenz	217
8.5.2 Absolute Kalibrierung	218
8.5.3 Optische Frequenzkämme	220
Weiterführende Literatur	225
Aufgaben	225
9 Laserkühlung und Laserfallen	231
9.1 Die Streukraft	232
9.2 Abbremsen eines Atomstrahls.....	236
9.2.1 Chirp-Kühlung	239
9.3 Optische Melasse	240
9.3.1 Die Doppler-Grenze	244
9.4 Die magneto-optische Falle	247
9.5 Einführung zur Dipolkraft	252
9.6 Die Theorie der Dipolkraft.....	255
9.6.1 Optische Gitter.....	261
9.7 Die Sisyphus-Kühlung	263
9.7.1 Allgemeine Anmerkungen	263
9.7.2 Detaillierte Beschreibung der Sisyphus-Kühlung	264
9.7.3 Grenze für den Mechanismus der Sisyphus-Kühlung	268
9.8 Raman-Übergänge.....	270
9.8.1 Geschwindigkeitsauswahl durch Raman-Übergänge.....	270
9.8.2 Raman-Kühlung.....	272
9.9 Atomfontänen	274
9.10 Schlussbemerkungen.....	276
Aufgaben	277

10	Magnetfallen, Verdampfungskühlung und BEC	285
10.1	Das Prinzip der Magnetfalle	285
10.2	Magnetfallen	287
10.2.1	Beschränkung in radialer Richtung.....	287
10.2.2	Beschränkung in axialer Richtung.....	289
10.3	Verdampfungskühlung	291
10.4	Bose-Einstein-Kondensation	295
10.5	Bose-Einstein-Kondensation in eingefangenen atomaren Dämpfen.....	297
10.5.1	Die Streulänge	298
10.6	Ein Bose-Einstein-Kondensat	305
10.7	Eigenschaften von Bose-Kondensaten	311
10.7.1	Schallgeschwindigkeit	311
10.7.2	Abklinglänge	311
10.7.3	Kohärenz im Bose-Einstein-Kondensat	312
10.7.4	Der Atomlaser.....	313
10.8	Schlussbemerkungen.....	314
Aufgaben		315
11	Atominterferometrie	321
11.1	Der youngsche Doppelspaltversuch.....	322
11.2	Ein Beugungsgitter für Atome	325
11.3	Das Drei-Gitter-Interferometer.....	325
11.4	Messung der Rotation	328
11.5	Die Beugung von Atomen durch Licht	330
11.5.1	Interferometrie mit Raman-Übergängen	331
11.6	Schlussbemerkungen.....	334
Weiterführende Literatur		335
Aufgaben		335
12	Ionenfallen	337
12.1	Die Kraft auf Ionen im elektrischen Feld	337
12.2	Das Earnshaw-Theorem	338
12.3	Die Paul-Falle	340
12.3.1	Gleichgewichtszustand einer Kugel auf einem rotierenden Sattel	340
12.3.2	Das effektive Potential in einem Wechselfeld	341
12.3.3	Die lineare Paul-Falle.....	341

12.4	Puffergaskühlung	346
12.5	Laserkühlung eingefangener Ionen	347
12.6	Quantensprünge	349
12.7	Penning-Falle und Paul-Falle	351
12.7.1	Die Penning-Falle	353
12.7.2	Massenspektroskopie von Ionen	355
12.7.3	Das anomale magnetische Moment des Elektrons	355
12.8	Elektronenstrahl-Ionenfallen	357
12.9	Aufgelöste Seitenbandkühlung	359
12.10	Zusammenfassung zu Ionenfallen	361
	Weiterführende Literatur	362
	Aufgaben	362
13	Quanteninformatik	365
13.1	Qubits und ihre Eigenschaften	366
13.1.1	Verschränkung	368
13.2	Ein Quanten-Logikgatter	370
13.2.1	Bilden eines CNOT-Gatters	371
13.3	Parallelität in der Quanteninformatik	373
13.4	Zusammenfassung Quanteninformatik	375
13.5	Dekohärenz und Quantenfehlerkorrektur	376
13.6	Schlussbemerkungen	377
	Weiterführende Literatur	378
	Aufgaben	379
	Anhang	385
A	Störungstheorie	385
A.1	Mathematik der Störungstheorie	385
A.2	Gekoppelte klassische Oszillatoren mit ähnlichen Frequenzen	386
B	Berechnung der elektrostatischen Energien	389
C	Magnetische Dipolübergänge	393
D	Linienform bei der Sättigungsspektroskopie	395

E	Raman-Übergänge und Zwei-Photonen-Übergänge	399
E.1	Raman-Übergänge	399
E.2	Zwei-Photonen-Übergänge	402
F	Die statistische Mechanik der Bose-Einstein-Kondensation	405
F.1	Die statistische Mechanik von Photonen	405
F.2	Bose-Einstein-Kondensation	406
F.2.1	Bose-Einstein-Kondensation in einer harmonischen Falle.....	408
	Literaturverzeichnis	411
	Index	419