

Horst Hansel/Werner Neumann

# Physik

Atome • Atomkerne  
Elementarteilchen

Mit Übungsaufgaben  
von Erich Hudl und Rudolf Renner

Mit 185 Abbildungen und 30 Tabellen

# Inhalt

	<b>Das diskrete Energiespektrum des harmonischen Oszillators</b> . . . . .	15
1.1	Kirchhoffsches Gesetz für die Strahlung des schwarzen Körpers. . . . .	15
1.2	Klassische Ansätze zur Herleitung eines Strahlungsgesetzes für den schwarzen Körper. . . . .	19
1.3	Plancksches Strahlungsgesetz. . . . .	24
1.4	Aufgaben. . . . .	29
<b>2</b>	<b>Grenzen des klassischen Wellenmodells und des klassischen Teilchenmodells</b> . . . . .	<b>30</b>
2.1	Dualismus des Lichtes. . . . .	31
2.1.1	Licht als elektromagnetische Welle. . . . .	31
2.1.2	Quantencharakter des Lichtes. . . . .	34
2.1.2.1	Experimentelle Belege für den Quantencharakter des Lichtes. . . . .	34
2.1.2.1.1	Äußerer lichtelektrischer Effekt. . . . .	35
2.1.2.1.2	Stokesche Regel der Fluoreszenz. . . . .	36
2.1.2.1.3	Kurzwellige Grenze der Röntgen-Bremsstrahlung. . . . .	36
2.1.2.2	Das Photon. . . . .	37
2.1.2.3	Compton-Effekt. . . . .	40
2.1.2.4	Komplementarität von Wellen-und Teilcheneigenschaften. . . . .	43
2.2	Dualismus der stofflichen Materie. . . . .	45
2.2.1	Atomistik der stofflichen Materie. . . . .	45
2.2.1.1	Zum Nachweis der Existenz der Atome. . . . .	45
2.2.1.2	Masse und Größe von Atomen. . . . .	47
2.2. .3	Periodensystem der Elemente. . . . .	50
2.2. .4	Isotopie. . . . .	54
2.2. .4.1	Einige Verfahren zum Nachweis und zur Trennung von Isotopen. . . . .	57
2.2.1.4.1.1	Massenspektrograf, Massentrenner. . . . .	58
2.2.1.4.1.2	Ultrazentrifuge. . . . .	63
2.2.1.4.1.3	Diffusionsverfahren. . . . .	63
2.2.1.4.1.4	Elektrolyse, chemische Austauschreaktionen. . . . .	64
2.2.1.5	Atomistik der Elektrizität. . . . .	65
2.2.2	De Brogliesche Beziehung. . . . .	66
2.2.3	Grenzen des klassischen Begriffsystems. . . . .	70
2.3	Aufgaben. . . . .	76

	<b>Aufbau der Atome aus Atomkern und Atomhülle</b>	<b>.77</b>
3.1	Ionisation und Dissoziation	.77
3.2	Streuversuche	.79
3.2.1	Streuversuche von LENARD	.79
3.2.2	Streuversuche von RUTHERFORD	.79
3.3	Aufgaben	.86
<b>4</b>	<b>Energiezustände der Atome</b>	<b>.88</b>
4.1	Zur Klassifikation der Spektren	.88
4.1.1	Emissions- und Absorptionsspektren	.88
4.1.2	Kontinuierliche Spektren, diskrete Spektren	.89
4.2	Anregung von Atomen	.90
4.2.1	Optische Anregung	.90
4.2.2	Mechanische Anregung, Elektronenstoßversuch von FRANCK und HERTZ	.91
4.2.3	Thermische Anregung	.93
4.2.4	Spontane Emission, mittlere Lebensdauer von Atomen in angeregten Zuständen	.94
4.2.5	Ionisationsenergie	.97
4.3	Spektrum des Wasserstoffs und Spektren der wasserstoffähnlichen Ionen	.98
4.3.1	Spektrum des Wasserstoffs	.98
4.3.1.1	Resonanzfluoreszenz, Resonanzlinien	.103
4.3.2	Spektren der wasserstoffähnlichen Ionen	.105
4.4	Aufgaben	.107
<b>5</b>	<b>Modellvorstellungen der Atomphysik</b>	<b>.108</b>
5.1	Rutherfordsches Atommodell	.108
5.2	Bohrsches Atommodell	.109
5.2.1	Bohrsche Postulate	.109
5.2.2	Interpretation des Wasserstoffspektrums	.110
5.2.3	Grenzen der Bohrschen Theorie	.115
5.3	Grundlagen der Quantenmechanik	.117
5.3.1	Materiewellen	.117
5.3.1.1	Schrödinger-Gleichung	.117
5.3.1.2	Zur Interpretation der Zustandsfunktion	.121
5.3.1.3	Energieeigenwertgleichung, Energieeigenwerte, Eigenfunktionen	.125
5.3.2	Energie-, Impuls- und Hamilton-Operator	.128
5.3.3	Erwartungswerte	.131
5.3.4	Quantenmechanische Bewegungsgleichung	.136
5.3.5	Vertauschungsrelationen, Heisenbergsche Unschärferelation	.138
5.3.6	Zum Axiomensystem der Quantenmechanik	.143
5.3.7	Anwendungen	.147
5.3.7.1	Eigenwertspektrum des Orts- und des Impulsoperators	.148
5.3.7.2	Wechselwirkungsfreies mikrophysikalisches Objekt	.151
5.3.7.3	Linearer harmonischer Oszillator	.152
5.3.7.4	Elektron im Coulomb-Feld eines Atomkernes	.157

5.3.7.5	Rotator und Rotationsspektrum . . . . .	165
5.3.7.6	Tunneleffekt . . . . .	169
5.4	Aufgaben . . . . .	179
<b>6</b>	<b>Drehimpuls und magnetisches Moment . . . . .</b>	<b>180</b>
6.1	Drehimpuls von Mikroobjekten . . . . .	180
6.1.1	Drehimpuls des Rotators . . . . .	182
6.1.2	Bahndrehimpuls des Elektrons im Coulomb-Feld des Atomkernes . . . . .	184
6.2	Magnetisches Bahnmoment . . . . .	185
6.3	Elektronenspin . . . . .	188
6.3.1	Versuch von STERN und GERLACH . . . . .	188
6.3.2	Spinoperator, Spinoren, Paulische Spinmatrizen . . . . .	190
6.3.3	Gesamtdrehimpuls für ein Valenzelektron . . . . .	196
6.4	Gesamtdrehimpuls mehrerer Valenzelektronen . . . . .	199
6.5	Aufgaben . . . . .	203
<b>7</b>	<b>Spektren der Einelektronen- und der Mehrelektronen- systeme . . . . .</b>	<b>205</b>
7.1	Spektren der Einelektronensysteme . . . . .	205
7.1.1	Grundstruktur der Spektren der Alkalimetallatome . . . . .	205
7.1.2	Dublettcharakter der Einelektronenspektren . . . . .	211
7.1.3	Übergangsregeln . . . . .	214
7.2	Spektren der Mehrelektronensysteme . . . . .	219
7.2.1	Übersicht über die Art der Spektren . . . . .	219
7.2.2	Multipllettstruktur der Mehrelektronenspektren . . . . .	221
7.3	Aufgaben . . . . .	224
<b>8</b>	<b>Atome in Wechselwirkung mit magnetischen, elektrischen und elektromagnetischen Feldern . . . . .</b>	<b>226</b>
8.1	Wechselwirkung mit magnetischen Feldern . . . . .	226
8.1.1	Normaler Zeeman-Effekt . . . . .	227
8.1.2	Anomaler Zeeman-Effekt, Paschen-Back-Effekt . . . . .	229
<b>8.1.3</b>	Paramagnetische Elektronenresonanz . . . . .	235
8.2	Wechselwirkung mit elektrischen Feldern . . . . .	239
8.3	Wechselwirkung mit Strahlung . . . . .	242
8.3.1	Absorption, spontane und induzierte Emission . . . . .	242
<b>8.3.2</b>	Maser . . . . .	248
<b>8.3.2.1</b>	Gasmaser . . . . .	248
8.3.2.2	Festkörpermaser . . . . .	251
<b>8.3.3</b>	Laser . . . . .	253
8.3.3.1	Resonator, Erzeugung der Besetzungsinversion . . . . .	253
<b>8.3.3.2</b>	Lasertypen . . . . .	258
8.3.3.2.1	Gaslaser . . . . .	258
8.3.3.2.2	Festkörperlaser . . . . .	265
<b>8.3.3.2.3</b>	Farbstofflaser . . . . .	267
8.3.3.2.4	Halbleiterlaser . . . . .	270
8.3.3.2.5	Röntgen-Laser . . . . .	271

8.3.3.2.6	Freie-Elektronen-Laser. . . . .	271
8.3.3.3	Eigenschaften des Laserlichtes, Mehrphotonenprozesse, ultrakurze Lichtimpulse. . . . .	273
8.4	Aufgaben. . . . .	279
<b>9</b>	<b>Schalenmodell der Atomhülle . . . . .</b>	<b>281</b>
9.1	Pauli-Prinzip, atomtheoretische Deutung des Periodensystems der Elemente. . . . .	281
9.2	Röntgen-Spektren. . . . .	292
9.2.1	Anregung und Rekombination durch Stoßprozesse. . . . .	293
9.2.2	Erzeugung und Eigenschaften von Röntgenstrahlen. . . . .	295
9.2.3	Emission und Absorption von Röntgenstrahlen. . . . .	297
9.2.3.1	Röntgen-Bremsspektrum. . . . .	297
9.2.3.2	Charakteristisches Röntgen-Spektrum. . . . .	298
9.2.3.3	Röntgen-Absorptionsspektrum. . . . .	302
9.2.4	Polarisation der Röntgenstrahlung. . . . .	303
9.3	Aufgaben. . . . .	305
<b>10</b>	<b>Allgemeine Eigenschaften der Atomkerne . . . . .</b>	<b>307</b>
10.1	Stabile und instabile Nuklide. . . . .	307
10.2	Massedichte von Atomkernen. . . . .	311
10.3	Elektrisches Quadrupolmoment der Atomkerne. . . . .	312
10.4	Kernspin. . . . .	314
10.4.1	Hyperfeinstruktur der Spektren. . . . .	314
10.4.2	Messung des Kernspins. . . . .	317
10.4.3	Messung des magnetischen Kernmomentes. . . . .	321
10.5	Neutronen. . . . .	325
10.6	Aufbau der Atomkerne aus Nukleonen. . . . .	327
10.7	Kernmassendefekt und Bindungsenergie der Atomkerne. . . . .	331
10.8	Kernkräfte. . . . .	335
10.9	Aufgaben. . . . .	341
<b>11</b>	<b>Experimentelle Methoden der Kernphysik und Elementarteilchenphysik . . . . .</b>	<b>343</b>
11	Kernstrahlungsmessungen. . . . .	343
11 1.1	Durchgang von Kernstrahlung durch stoffliche Materie. . . . .	344
11 1.1.1	Teilchen mit von Null verschiedener Ruhmasse. . . . .	344
11 1.1.2	Photonen. . . . .	346
11 1.1.3	Ionisationsverluste, Reichweite, spezifische Ionisation. . . . .	347
11 1.1.3.1	Ionisationsverluste schwerer Teilchen. . . . .	347
11 1.1.3.2	Reichweite schwerer Teilchen. . . . .	352
11 1.1.3.3	Spezifische Ionisation. . . . .	354
11 1.1.4	Energieverluste von Elektronen. . . . .	356
11 1.2	Kernstrahlungsmeßgeräte. . . . .	358
11 1.2.1	Teilchenspurdetektoren. . . . .	358
11 1.2.1.1	Kernemulsionen. . . . .	358
11 1.2.1.2	Expansionsnebelkammer. . . . .	359
11 1.2.1.3	Diffusionsnebelkammer. . . . .	360

11.1.2.1.4	Blaskammer	361
11.1.2.1.5	Funken- und Streamerkammer	362
11.1.2.1.6	Proportionalkammer und Driftkammer	364
11.1.2.1.7	Spektrometrieverfahren	365
11.1.2.2	Zur Auswertung von Teilchenspuraufnahmen	366
11.1.2.3	Teilchendetektoren	368
11.1.2.3.1	Ionisationskammer, Proportionalzählrohr, Geiger-Müller-Zählrohr, Funkenzähler	368
11.1.2.3.2	Halbleiterdetektoren	372
11.1.2.3.3	Szintillationsdetektoren, Cerenkov-Detektor	373
11.1.2.4	Zur Auswertung von Messungen mit Teilchendetektoren	375
11.1.2.5	Dosimetrie	378
11.2	Teilchenbeschleuniger	381
11.2.1	Linearbeschleuniger	382
11.2.2	Zirkularbeschleuniger	384
11.2.3	Speicherringe und Collider	392
11.2.4	Beschleunigung von Schwerionen	394
11.3	Aufgaben	396
<b>12</b>	<b>Kernumwandlungen</b>	<b>398</b>
12.1	Kernreaktionen	398
12.1.1	Inzidentteilchen, Target, Kernfotoeffekt	398
12.1.2	Erhaltungssätze	401
12.1.3	Q-Wert	402
12.1.4	Reaktionsmechanismen	403
12.1.4.1	Zwischenkernprozess	404
12.1.4.2	Direkte Kernreaktionen	406
12.1.5	Wirkungsquerschnitt	409
12.1.6	Anregungsenergien der Atomkerne und ihre Bestimmung	412
12.2	Spontaner Kernzerfall	416
12.2.1	Radioaktives Zerfallsgesetz, mittlere Lebensdauer und Halbwertszeit von Radionukliden	417
12.2.2	Radioaktive Familien	420
12.2.3	Künstlich hergestellte Radionuklide	424
12.2.4	$\alpha$ -Zerfall	424
12.2.5	$\beta$ -Zerfall	428
12.2.5.1	$\beta$ -Zerfall, Elektron-Neutrino	430
12.2.5.2	$\beta^+$ -Zerfall	433
12.2.5.3	Elektroneneinfang	434
12.2.6	Zum Nachweis des Elektron-Neutrinos	436
12.2.7	$\gamma$ -Zerfall, Kernisomerie	439
12.2.7.1	Mößbauer-Effekt	442
12.2.8	Neutronen- und Protonenemission	446
12.3	Kernspaltung	446
12.3.1	Induzierte Kernspaltung	447
12.3.2	Spontane Kernspaltung	452
12.3.2.1	Transurane	452
12.4	Kernfusion	455
12.5	Kernumwandlungen zur Erzeugung von Neutronen, Neutronenwechselwirkung	461
12.5.1	Neutronenquellen	461
12.5.2	Zur Neutronenwechselwirkung in verschiedenen Energiebereichen, Moderatoren	464
12.5.3	Kernreaktionen zum Nachweis von Neutronen	467
12.6	Aufgaben	469

<b>13</b>	<b>Kernmodelle</b> . . . . .	471
13.1	Tröpfchenmodell, Bethe-Weizsäcker-Beziehung . . . . .	473
13.1.1	Zu einigen Folgerungen aus der Bethe-Weizsäcker-Beziehung . . . . .	476
13.2	Schalenmodell . . . . .	480
13.3	Weitere Kernmodelle . . . . .	488
13.4	Aufgaben . . . . .	490
<b>14</b>	<b>Anwendung der Kernenergie</b> . . . . .	491
14.1	Technische und militärische Anwendung der Kernspaltung . . . . .	492
14.1.1	Kernkettenreaktion, Vierfaktorenformel, kritische Masse. . . . .	492
14.1.2	Kernspaltungsreaktor. . . . .	495
14.1.3	Atombombe. . . . .	500
14.2	Anwendung der Kernfusion . . . . .	502
14.3	Aufgaben. . . . .	507
<b>15</b>	<b>Elementarteilchen</b> . . . . .	508
15.1	Kosmische Strahlung . . . . .	509
15.2	Die vier fundamentalen Wechselwirkungen . . . . .	512
15.3	Zur Systematisierung der Elementarteilchen . . . . .	516
15.3.1	Leptonen . . . . .	518
15.3.1.1	Elektron . . . . .	519
15.3.1.2	Positron, Antiteilchen . . . . .	519
15.3.1.3	Elektron-Neutrino . . . . .	522
15.3.1.4	Müon . . . . .	522
15.3.1.4.1	Müonenatome . . . . .	522
15.3.1.4.2	Müonium . . . . .	523
15.3.1.5	Müon-Neutrino . . . . .	524
15.3.1.6	Tauon, Tauon-Neutrino . . . . .	525
15.3.1.7	Zu einigen Problemen der Neutrinophysik . . . . .	525
15.3.2	Hadronen . . . . .	528
15.3.2.1	Mesonen . . . . .	528
15.3.2.1.1	Mesonenatome . . . . .	535
15.3.2.2	Baryonen . . . . .	536
15.3.2.2.1	Nukleonen . . . . .	536
15.3.2.2.2	Hyperonen, seltsame Teilchen . . . . .	538
15.3.2.2.2.1	Hyperkerne . . . . .	542
15.4	Erhaltungssätze . . . . .	543
15.4.1	Streng gültige Erhaltungssätze . . . . .	543
15.4.1.1	Erhaltungssätze von Energie, Impuls und Drehimpuls . . . . .	543
15.4.1.2	Erhaltungssätze ladungsartiger Eigenschaften . . . . .	544
15.4.2	Bedingt gültige Erhaltungssätze . . . . .	546
15.4.2.1	Erhaltungssatz des Isospins . . . . .	546
15.4.2.2	Seltsamkeit, Erhaltungssatz der Seltsamkeit . . . . .	548
15.5	Symmetrieprinzipien . . . . .	550
15.5.1	Antiteilchensymmetrie, C-Invarianz . . . . .	550
15.5.2	Raumspiegelung, Parität . . . . .	552
15.5.3	C-P-Invarianz . . . . .	556
15.5.4	C-P-T-Invarianz . . . . .	558

15.6	Quarks als Fundamentalteilchen der Hadronen . . . . .	559
15.7	Feldquanten . . . . .	568
15.8	Aufgaben . . . . .	576

**Anhang . . . . . 577**

A.1	Matrizen . . . . .	577
A.2	Orthogonalsysteme . . . . .	580
A.3	Hermiteische Polynome. . . . .	583
A.4	Legendresche Polynome. . . . .	587
A.5	Zugeordnete Legendresche Polynome. . . . .	595
A.6	Darstellung des skalaren und des vektoriellen Produktes, der Vektordifferentialoperationen Gradient, Divergenz und Rotor und des Operators $V^2$ in krummlinigen Koordinaten. . . . .	603
A.7	Zur Polargleichung der Hyperbel. . . . .	608
A.8	Rayleigh-Jeanssches Abzählverfahren für die Anzahl der möglichen stehenden Wellen im Hohlraum. . . . .	610
A.9	Herleitung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes und des Wienschen Verschiebungsgesetzes. . . . .	612
A.10	Zur Deutung des Compton-Effektes. . . . .	615
A.11	Rutherfordsche Streuformel. . . . .	616
A.12	Zum Übergang der Quantenmechanik in die klassische Mechanik. . . . .	623
A.13	Zur Berechnung von $\langle \hat{C} \rangle$ . . . . .	627
A.14	Zur quantenmechanischen Bewegungsgleichung. . . . .	627
A.15	Zur Heisenbergschen Unschärferelation. . . . .	628
A.16	Zur quantenmechanischen Behandlung des Elektrons im Coulomb-Feld eines Atomkernes. . . . .	630
A.17	Zur gleichzeitigen Meßbarkeit der Drehimpulskomponenten . . . . .	631
A.18	Berechnung von $S_z$ und $3^2$ in Kugelkoordinaten. . . . .	632
A.19	Zum Spinoperator. . . . .	634
A.20	Zu den Übergangsregeln. . . . .	638
A.21	Zum Interkombinationsverbot. . . . .	640
A.22	Zum Yukawa-Potential. . . . .	642
A.23	Lösungen der Aufgaben. . . . .	643
A.24	Literatur. . . . .	723

**Namen- und Sachverzeichnis . . . . . 725**