

I	Klassische Mechanik nach LAGRANGE und HAMILTON	1
	Überblick	3
1	Grundgesetz der Dynamik	4
2	Systeme und Kräfte bei eingeschränkter Bewegungsfreiheit	6
3	Generalisierte Koordinaten	9
4	Lösungswege bei gebundenen Systemen	11
4.1	Virtuelle Verrückungen	11
5	Prinzip der virtuellen Arbeit	13
6	D'ALEMBERT'sches Prinzip	16
7	LAGRANGE'sche Gleichungen	18
8	Forminvarianz der LAGRANGE'schen Gleichungen	24
9	Kanonisch konjugierte Impulse und Wirkung	26
10	HAMILTON-Funktion und kanonische Bewegungsgleichungen	28
11	Integralprinzipien in Mechanik und Physik	33
12	HAMILTON'sches Prinzip der stationären Wirkung	35
13	Orts-, Konfigurations- und Phasenraum	38

14 Bewegungen im Phasenraum, LIOUVILLE'scher Satz	40
15 Zyklische Variable und Erhaltungsgrößen	43
15.1 Zyklische Variable	43
15.2 Erhaltungssätze der Physik, NOETHER-Theorem	45
16 Kanonische Transformationen	49
16.1 Allgemeiner zeitabhängiger Fall	49
16.2 Zeitunabhängiger Fall	52
16.3 Bedeutung der Methoden	53
17 POISSON-Klammern	54
18 Lösungsverfahren von HAMILTON-JACOBI	58
18.1 Allgemeiner zeitabhängiger Fall	58
18.2 Zeitunabhängiger Fall	61
19 Separation der Variablen	64
20 Wirkungs- und Winkelvariable	67
21 Beispiele zu LAGRANGE- und HAMILTON-Funktion	70
21.1 Harmonischer Oszillator	70
21.1.1 Aufstellung der HAMILTON-Funktion	70
21.1.2 Lösung nach HAMILTON-JACOBI	71
21.1.3 Lösung mit kanonischer Transformation	73
21.1.4 Lösung mit Wirkungs- und Winkelvariablen	75
21.2 KEPLER-Problem	76
21.3 Geladenes Teilchen im elektromagnetischen Feld	84
21.3.1 LAGRANGE- und HAMILTON-Funktion	84
21.3.2 Bewegte Ladung im homogenen Magnetfeld	88
22 Kinetische Energie und RIEMANN'sche Geometrie	90
23 Geometrische Optik und Wellenmechanik	93
23.1 Der kühne Schritt zur Quantenmechanik	99
Literatur zu Teil I	104

II	Ältere Quantentheorie	109
	Überblick	111
24	Quantenmechanik - Ursprung, Tragweite und Bedeutung	112
25	Klassische Physik	114
26	Entdeckungen zur Struktur der Materie	116
27	COULOMB-Gesetz, Feldstärke, Potential und Arbeit	118
28	Anfänge der Quantentheorie	120
29	Frühe Atommodelle	125
30	BOHR'sches Atommodell und Wasserstoffspektrum	127
31	Quantenzahlen und Aufbau der Atome	135
32	Erfolg und Krise der Quantentheorie der Anfangszeit	142
33	COMPTON-Effekt	144
34	DE BROGLIES Welleneigenschaften der Materie	147
	34.1 Wellenausbreitung und Phasengeschwindigkeit	148
	34.2 Gruppengeschwindigkeit von Wellen	150
	34.3 Relativistische Betrachtung	153
	Literatur zu Teil II	157
III	Quantenmechanik nach SCHRÖDINGER	161
	Überblick	163
35	Der Weg zur modernen Quantentheorie	164
36	Die SCHRÖDINGER-Gleichung	166
	36.1 Zeitfreie SCHRÖDINGER-Glg. aus HAMILTON'scher Mechanik .	166
	36.2 Zeitabhängige SCHRÖDINGER-Gleichung	168

36.2.1	Differentialgleichung der Wellenfunktion	168
36.2.2	Heuristischer Zugang zur SCHRÖDINGER-Gleichung . .	170
36.2.3	Teilchenbewegung im konservativen Kraftfeld	172
36.2.4	Struktur der SCHRÖDINGER-Gleichung	173
37	Darstellung von Wellenpaketen, FOURIER-Transformation	174
38	Physikalische Deutung der Wellenfunktion $\Psi(\mathbf{r}, t)$	178
38.1	Doppelspaltversuch mit Elektronen	178
38.2	Wahrscheinlichkeitsdeutung der Wellenfunktion	180
39	Wahrscheinlichkeit, Erwartungswerte und Momente	185
39.1	Klassische Wahrscheinlichkeitsaussagen	185
39.2	Quantenmechanische Wahrscheinlichkeit	187
40	GAUSS-Paket	188
40.1	GAUSS-förmige Wellenfunktion in Impuls- und Ortsraum . . .	188
40.2	Unschärferelation	190
40.3	Zeitentwicklung des GAUSS-Pakets	191
41	HAMILTON-Operator	195
41.1	Zeitabhängige SCHRÖDINGER-Gleichung	195
41.2	Zeitunabhängige SCHRÖDINGER-Gleichg., stationäre Zustände	197
41.3	Eigenwertproblem	198
42	Inneres Produkt komplexer Funktionen	201
43	Operatoren und ihre Eigenschaften	204
43.1	Lineare und hermitesche Operatoren	204
43.2	Hermitesches Eigenwertproblem	206
43.3	Entwicklung nach Eigenfunktionen	208
43.4	Kontinuierliche und gemischte Eigenwertspektren	209
43.5	Produkte von Operatoren	211
43.6	Unitäre Operatoren und Transformationen	211
43.7	Darstellung von Operatoren durch Matrizen	214
43.8	Ergebnisse für den hermiteschen HAMILTON-Operator $\mathcal{H}$. .	216
43.9	Kommutator	217
43.10	Paritätsoperator	220

IV	Zeitunabhängige SCHRÖDINGER-Gleichung, Eindimensionale Beispiele und Lösungsmethoden	229
	Überblick	231
44	Eigenschaften der Wellenfunktionen	232
44.1	Allgemeine Eigenschaften aus physikalischer Sicht	232
44.2	Stetigkeitsbedingungen	233
44.3	Klassifizierung und Energiequantisierung	233
45	Freies Teilchen im Raum	239
45.1	Lineare Bewegung	239
45.2	Normierung der Wellenfunktion bei freien Teilchen	242
45.3	Kreisendes Teilchen als ebener Rotator	245
45.4	Kenngrößen von Bewegungen	248
46	Einfache Potentialvorgaben	249
46.1	Potentialstufe	250
46.1.1	Fall A) $W_{\text{ges}} > W_0$	251
46.1.2	Fall B) $W_{\text{ges}} < W_0$	253
46.2	Potentialwall	255
46.2.1	Fall A) $W_{\text{ges}} > W_0$	257
46.2.2	Fall B) $W_{\text{ges}} < W_0$	260
46.2.3	Transmission und Tunneleffekt	262
46.3	Potentialtopf	263
46.3.1	Fall A) $W_{\text{ges}} > W_0$	264
46.3.2	Fall B) $W_{\text{ges}} < W_0$	267
47	Verschiebung der Basislinie von Potentialfunktionen	274
48	Methode der Transfer-Matrix	278
48.1	Transfer-Beschreibung von Potentialstufen	278
48.2	Transfer-Beschreibung des Potentialwalls	281
48.2.1	Darstellung der Transitions-Matrizen	281
48.2.2	Diagonalmatrix bei konstanter potentieller Energie	284
48.2.3	Symmetrischer Potentialwall	285

48.3	Transfer-Beschreibung des Potentialtopfs	287
48.3.1	Fall A) $W_{\text{ges}} > W_0$	287
48.3.2	Fall B) $W_{\text{ges}} < W_0$	288
48.4	Doppelwall	291
48.5	Finite periodische Strukturen	294
48.5.1	Rekursionsbeziehung bei Streuproblemen	294
48.5.2	Mehrfachwall aus Elementarzellen	296
48.5.3	Mehrfachtopf aus Elementarzellen	300
49	Periodische Potentialfunktion, KRONIG-PENNEY-Modell	306
50	Linearer harmonischer Oszillator	313
50.1	Bedeutung	313
50.2	Differentialgleichung und KUMMER'sche Funktion	314
50.3	Lösungsmethoden der Differentialgleichung	317
50.4	Entwicklung der Lösung, HERMITE'sche Polynome	318
50.5	Eigenwerte und Eigenfunktionen	322
	Literatur zu Teil IV	327
V	SCHRÖDINGER-Gleichung in Kugelkoordinaten	333
	Überblick	335
51	Dreidimensionale Probleme in Kugelkoordinaten	336
51.1	Zentrale Kraftfelder	336
51.2	Separation in Kugelkoordinaten	338
52	Lösung der Winkelgleichung	340
52.1	Kugelfunktionen	340
52.2	Kugelflächenfunktionen	344
53	Drehimpuls als Operator	348
53.1	Komponenten des Drehimpulsoperators	348
53.2	Eigenwerte und Eigenfunktionen der Drehimpulsoperatoren	352

54 Lösung der Radialgleichung	358
54.1 Differentialgleichung und Normierung	358
54.2 Freier Massenpunkt im Raum, sphärische BESSEL-Funktionen	360
54.3 Sphärischer Potentialtopf mit undurchdringlicher Oberfläche .	363
54.4 Sphärischer Potentialtopf mit endlichem Potential	366
54.5 Räumlicher harmonischer Oszillator	374
55 Wasserstoffatom	379
55.1 Aufstellung der Differentialgleichung	380
55.2 Eigenwerte des Wasserstoffatoms	382
55.3 Eigenfunktionen, LAGUERRE'sche Polynome	384
55.4 Besonderheiten von Eigenfunktionen und Orbitalen	389
55.5 Vergleich und Bewertung	393
55.6 ZEEMAN-Effekt im homogenen Magnetfeld	394
56 KRATZER'sches Potential für zweiatomige Moleküle	397
57 Zwei-Körper-Probleme	404
Literatur zu Teil V	408
 VI Axiomatische Quantenmechanik	 413
Überblick	415
58 Axiome, Notation, Postulate	417
58.1 Axiomatik des HILBERT-Raumes	417
58.2 DIRAC-Notation für Größen im HILBERT-Raum	420
58.3 Postulate der Quantenmechanik	424
59 Erwartungswerte, Operatoren und Vertauschungsregeln	428
59.1 Quantenmechanische Erwartungswerte	428
59.2 Erwartungswert des Ortsvektors	431
59.3 Erwartungswert des Impulses	432
59.4 Erwartungswerte nichthermitescher Operatoren	435
59.5 Vertauschungsregeln von Koordinaten und Impulsen	436
60 HAMILTON-Operator im elektromagnetischen Feld	439

61 Zeitliche Änderungen und Einfluss von Feldern	441
61.1 Zeitliche Änderung von Erwartungswerten	441
61.2 Theorem von EHRENFEST	443
61.3 Sätze der Quantenmechanik und Erhaltung von Größen . . .	445
61.3.1 Energiesatz der Quantenmechanik	445
61.3.2 Ortsvektor im elektromagnetischen Feld	446
61.3.3 Impuls im elektromagnetischen Feld	447
61.3.4 Drehimpuls im elektromagnetischen Feld	448
61.3.5 Virialsatz	450
62 Eigenschaften des Drehimpulsoperators	452
62.1 Vertauschungsregeln des Drehimpulsoperators	452
62.2 Eigenwerte des Drehimpulsoperators	456
62.3 Graphische Darstellung der Richtungsquantisierung	461
62.4 Drehimpulsoperator in Zentralfeldern	463
63 Eigenwerte des linearen harmonischen Oszillators	464
64 Symmetrien und Erhaltungsgrößen	468
64.1 Verschiedene Betrachtungsweisen bei Transformationen . . .	468
64.2 Translation von Systemen	469
64.3 Zeitverschiebung von Systemen	473
64.4 Rotation von Systemen	474
64.4.1 Vektorkomponenten beim passiven Standpunkt	474
64.4.2 Vektorkomponenten beim aktiven Standpunkt	476
64.4.3 Transformation der ebenen Drehung	477
64.4.4 Eigenschaften der Rotation	478
64.4.5 Wellenfunktion und Rotationsoperator	479
64.5 NOETHER-Theorem	482
65 Elektronenspin	484
65.1 Detaillierte Darstellung des STERN-GERLACH-Versuchs . . .	485
65.2 Spin und Spinoperator als Folgerungen aus dem Versuch . .	490
65.3 PAULI-Theorie für Teilchen mit Spin $1/2$	493
65.3.1 Spin-Matrizen, Eigenwerte und Eigenvektoren	495
65.4 Anmerkung zur Schreibweise von Spingrößen	501
65.5 Eigenwerte und Eigenzustände bei beliebiger Spin-Richtung	503
65.6 Spinnmoment und LANDÉ-Faktor	505

65.7	Wellenfunktionen für Teilchen mit Spin	506
65.8	PAULI-Gleichung	509
65.9	PAULI-Prinzip	510
66	Eigenschaften und Addition allgemeiner Drehimpulse	515
66.1	Vertauschungsregeln von Drehimpulsoperatoren	515
66.2	Eigenwerte allgemeiner Drehimpulsoperatoren	517
66.3	Drehimpuls-Matrizen	519
66.4	Addition von Drehimpulsen	522
66.4.1	Vertauschungsregeln, Eigenwerte und Eigenvektoren	522
66.4.2	Eigentliche Addition	524
66.4.3	Konkrete Einzeldrehimpulse	530
66.4.4	Addition zweier Spins	531
66.4.5	Addition von Bahndrehimpuls und Spin	534
	Literatur zu Teil VI	548
VII	Relativistische Quantenmechanik	553
	Überblick	555
67	Vierervektoren der Raumzeit	556
67.1	Bedeutung der Vierer-Formulierung	556
67.2	Invarianzeigenschaften	557
67.3	Raumzeit der speziellen Relativitätstheorie	558
67.4	Physikalische Vierervektoren	562
67.5	Ableitung von Vierervektor-Komponenten	565
68	KLEIN-GORDON-Gleichung	566
68.1	Freies Teilchen	566
68.2	Teilchen im elektromagnetischen Feld	569
68.2.1	Stationäre Zustände	572
68.2.2	Wasserstoffatom aus relativistischer Sicht	573
69	DIRAC-Gleichung	578
69.1	Grundgedanke und Einführung von Matrizen	578
69.2	HAMILTON-Operator und DIRAC-Gleichung	583
69.2.1	Kanonische DIRAC-Gleichung	583

69.2.2	DIRAC-Gleichung im elektromagnetischen Feld	584
69.3	Wahrscheinlichkeitseigenschaften	584
69.4	DIRAC-Spin-Operator	586
69.5	DIRAC-HAMILTON-Kommutatoren	590
69.5.1	Kommutator mit Bahndrehimpulsoperator $\mathbf{L}$	590
69.5.2	Kommutator mit Spinoperator $\mathbf{S}$	591
69.5.3	Kommutator mit Gesamtdrehimpulsoperator $\mathbf{J}$	592
69.5.4	Kommutator mit Operator $\mathbf{K}$	593
69.5.5	Relativistischer Paritätsoperator	594
69.6	DIRAC-Gleichung in kovarianter Form	595
69.6.1	Bedingungen für die Kovarianz	598
69.7	Stationäre Lösungen im elektromagnetischen Feld	601
69.7.1	Nichtrelativistischer Grenzfall	602
69.8	Lösung durch ebene Wellen	603
69.9	DIRAC-Gleichung in Zentralfeldern	609
69.9.1	Freies Teilchen	615
69.9.2	Wasserstoffatom	616
69.10	Negative Energiezustände, DIRAC'S LÖCHER-THEORIE	623
70	Quantenmechanische Wellengleichungen	626
	Literatur zu Teil VII	628
	Nachwort	631
	Anhang	633
	Schreibweisen und Formelsymbole	634
	Abbildungsverzeichnis	642
	Tabellenverzeichnis	645
	Berühmte Wissenschaftler	646
	Personenverzeichnis	650
	Sachverzeichnis	652