

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Einleitung	9
1 Bemerkungen zum Karlsruher Physikkurs	13
1.1 Vorbemerkungen	13
1.2 Physikalische Vorbetrachtungen	15
1.2.1 Energie und der Energieerhaltungssatz	15
1.2.2 Die physikalische Arbeit	17
1.2.3 Die statistische Definition der Entropie	18
1.2.4 Ein wenig Thermodynamik	21
1.2.4.1 Zustandsgrößen	22
1.2.4.2 Entropie als Zustandsgröße	23
1.2.4.3 Irreversible Prozesse und der Satz von Clausius	26
1.2.4.4 Das Nernstsche Wärmetheorem	29
1.2.5 Die Gibbssche Fundamentalbeziehung	32
1.2.5.1 Die kanonische Gesamtheit	32
1.2.5.2 Die verallgemeinerte großkanonische Gesamtheit	35
1.2.6 Anleihen aus der Strömungsmechanik	39
1.3 Zwölf Argumente gegen den Karlsruher Physikkurs	41
1.3.1 Physikalische Aspekte	41
1.3.1.1 Die Bedeutung der Thermodynamik	41
1.3.1.2 Energieträger oder Energieformen?	43
1.3.1.3 Fehlvorstellungen zur Entropie	48
1.3.1.4 Quantenmechanik	51
1.3.2 Wissenschaftstheoretische Probleme	52
1.3.2.1 Was sind die physikalischen Grundgrößen?	52
1.3.2.2 Woher kommt der universelle Antrieb?	55
1.3.2.3 Rückkehr zur Kontinuumsphysik?	56
1.3.2.4 Fehlende Begriffsdefinitionen	58
1.3.3 Didaktische Überlegungen	59
1.3.3.1 Präkonzepte	59
1.3.3.2 Analogien	61
1.3.3.3 Verzicht auf wichtige Begriffe	62
1.3.3.4 Was ist mit der etablierten Fachsprache?	63

2	Bemerkungen zum Zeigerformalismus	66
2.1	Quantenmechanik und Schulphysik	66
2.2	Pfadintegrale in der Quantenmechanik	68
2.2.1	Der Schrödinger-Propagator	68
2.2.2	Pfadintegral-Darstellung des Schrödinger-Propagators	70
2.2.3	Feynman-Integrale und Standard-Quantenmechanik	79
2.2.4	Die Methode der stationären Phase	83
2.2.5	Pfadintegrale im Phasenraum	84
2.3	Der Satz von Cameron	86
2.3.1	Integraldarstellung des Zeitentwicklungsoperators	87
2.3.1.1	Die Trotter-Produktformel	87
2.3.1.2	Anwendung auf den Zeitentwicklungsoperator	92
2.3.2	Mathematische Unzulänglichkeiten der Feynman-Integrale	95
2.3.2.1	Unendlichdimensionale Maße	95
2.3.2.2	Maße auf Räumen stetiger Funktionen	96
2.3.2.3	Komplexe Maße	97
2.3.2.4	Weitere Schwierigkeiten	99
2.4	Die Feynman-Kac-Formel	101
2.4.1	Wiener-Prozess, Wiener-Maß und Wiener-Integrale	101
2.4.1.1	Grundbegriffe aus der Stochastik	102
2.4.1.2	Integration über Brownsche Pfade	104
2.4.2	Beweis der Feynman-Kac-Formel	107
2.4.3	Analytische Fortsetzung	110
2.4.3.1	Operatorwertige Funktionalintegrale	110
2.4.3.2	Anwendung auf Feynman-Integrale	111
2.4.3.3	Euklidische Feldtheorie	114
2.5	Fresnel-Integrale	116
2.5.1	Definition und Eigenschaften	116
2.5.2	Die Feynman-Itô-Formel	119
2.5.3	Unendlichdimensionale oszillatorische Integrale	126
2.6	Weißes Rauschen	129
2.6.1	Gelfandsche Raumtripel	129
2.6.2	Analysis des weißen Rauschens	131
2.6.3	Verallgemeinerte Funktionenräume	137
2.6.3.1	Distributionen und Fock-Raum	137
2.6.3.2	Weitere Räume verallgemeinerter Funktionen	140
2.6.3.3	Hida- und Kondratiev-Distributionen	143
2.6.3.4	Das Charakterisierungstheorem	144
2.6.4	Feynman-Integrale und weißes Rauschen	149
2.7	Weitere Varianten	152
2.7.1	Promasse und Prodistributionen	153
2.7.2	Imaginäre Resolventen	155
2.7.3	Non-Standard-Analysis	156
2.7.4	Pfadintegrale im Phasenraum	157
2.8	Erkenntnistheoretische Einordnung der Pfadintegrale	160
2.9	Quantenmechanik und rotierende Zeiger	161

2.9.1	Zeigerformalismus und klassische Wellenoptik	162
2.9.2	Zeigerformalismus und Quantenmechanik	164
2.10	Zehn Argumente gegen den Zeigerformalismus	169
2.10.1	Physikalische Aspekte	169
2.10.1.1	Nichtrelativistische Quantenmechanik	169
2.10.1.2	Klassische Näherung und Quantenmechanik	170
2.10.1.3	Anschaulichkeit und Unanschaulichkeit	171
2.10.1.4	Quantenmechanik und Quantenelektrodynamik	173
2.10.2	Erkenntnistheoretische Aspekte	174
2.10.2.1	Quantenmechanik als Naturbeschreibung	174
2.10.2.2	Defizite der Feynmanschen Pfadintegrale	175
2.10.3	Didaktische Aspekte	176
2.10.3.1	Pfadintegrale für die Schule	176
2.10.3.2	Klassische Physik durch die Hintertür	177
2.10.3.3	Aufwand und Nutzen des Zeigerformalismus	179
2.10.3.4	Blick über den Horizont	181
3	Entropie in Klasse 10	183
3.1	Vorbemerkungen	184
3.2	Notwendige Vorkenntnisse	185
3.3	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	186
3.3.1	Entropie als Maß des inneren Durcheinanders	186
3.3.2	Entropiedifferenzen	189
3.3.3	Der zweite Hauptsatz	190
3.4	Nutzbare und verlorene Arbeit	192
3.4.1	Entropieübertragung und Entropieerzeugung	192
3.4.2	Verlorene Arbeit	194
3.4.3	Der Carnotsche Wirkungsgrad	198
3.4.4	Beispiele	201
3.5	Der dritte Hauptsatz der Thermodynamik	203
3.6	Entropie in Technik und Natur	204
3.6.1	Wärmepumpen	204
3.6.2	Entropiebilanzen der Natur	206
4	Quantenmechanik in der Oberstufe	208
4.1	Vorbemerkungen	208
4.2	Axiomatische Basis der Quantenmechanik	212
4.2.1	Die Axiome der Quantenmechanik	212
4.2.2	Bemerkungen zu den Axiomen	213
4.2.2.1	Zustände und Zustandsvektoren	213
4.2.2.2	Observablen und Operatoren	215
4.2.2.3	Meßwerte und Spektren	216
4.2.2.4	Quantenmechanische Wahrscheinlichkeiten	217
4.2.2.5	Das Projektionspostulat	221
4.2.2.6	Zeitentwicklungsoperator und Schrödingergleichung	222
4.3	Welle-Teilchen-Dualismus	231

4.3.1	Das Komplementaritätsprinzip	232
4.3.2	Welcher-Weg-Information und Sichtbarkeit von Interferenzmustern	236
4.3.2.1	Interferenzexperimente mit einzelnen Quantenobjekten	236
4.3.2.2	Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer	238
4.3.2.3	Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster	241
4.3.2.4	Exakte Formulierung des Welle-Teilchen-Dualismus	246
4.3.3	Englerts Dualitätsrelation	249
4.3.3.1	Sichtbarkeit von Interferenzmustern	249
4.3.3.2	Unterscheidbarkeit der Wege	252
4.3.3.3	Beweis der Dualitätsrelation	254
4.3.3.4	Verallgemeinerungen des Formalismus	257
4.4	Notwendige Vorkenntnisse	260
4.5	Klassische Physik und Quantenmechanik	261
4.5.1	Rückblick: Klassische Physik	261
4.5.2	Quantenmechanik als Neuformulierung	263
4.5.2.1	Teilchen, die sich wie Wellen zu verhalten scheinen	263
4.5.2.2	Wellen, die sich wie Teilchen zu verhalten scheinen	266
4.5.3	Der Welle-Teilchen-Dualismus	269
4.5.3.1	Experimente mit Zwei-Wege-Interferometern	270
4.5.3.2	Das Prinzip vom Welle-Teilchen-Dualismus	274
4.5.3.3	Anwendung: Wechselwirkungsfreie Messungen	275
4.5.3.4	Vorüberlegungen zum Zustandsbegriff	277
4.5.4	Elementare Axiomatik der Quantenmechanik	280
4.5.4.1	Die Grundregeln der Quantenmechanik	281
4.5.4.2	Interpretation und Bemerkungen	281
4.5.4.3	Beispiele	286
4.5.5	Die Heisenbergsche Unschärferelation	292
4.5.5.1	Streuungen von Meßwerten	293
4.5.5.2	Unschärferelation für Ort und Impuls	294
4.5.5.3	Das Komplementaritätsprinzip	296
4.5.6	Einfache quantenmechanische Systeme	298
4.5.6.1	Beschreibung quantenmechanischer Systeme	299
4.5.6.2	Der lineare Potentialtopf	300
4.5.6.3	Das Wasserstoffatom	304
4.5.6.4	Quantenmechanik schwererer Atome	314
4.5.7	Superpositionsprinzip und verschränkte Zustände	318
4.5.7.1	Lokalitätseigenschaften der Physik	318
4.5.7.2	Das Superpositionsprinzip der Quantenmechanik	319
4.5.7.3	Verschränkte Zustände	322
4.5.7.4	Verborgene Variable und Bellsche Ungleichungen	325

Anhang	338
A Der thermodynamische Limes	339
A.1 Thermodynamische Systeme	339
A.2 Existenz des thermodynamischen Limes	342
A.3 Die mikrokanonische Gesamtheit	349
A.4 Die kanonische Gesamtheit	352
A.5 Die großkanonische Gesamtheit	355
B Der Fock-Raum	358
B.1 Definition und mathematische Eigenschaften	358
B.2 Basissysteme für Fock-Räume	360
C Lösungen der Aufgaben	362
Literaturverzeichnis	381