

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>1 Bemerkungen zum Karlsruher Physikkurs</b>	<b>13</b>
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

<b>2 Bemerkungen zum Zeigerformalismus</b>	<b>66</b>
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
<b>3</b>	<b>Entropie in Klasse 10</b>	<b>183</b>
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
<b>4</b>	<b>Quantenmechanik in der Oberstufe</b>	<b>208</b>
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 Prinzips 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	Umschärferelation 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

<b>Anhang</b>	<b>338</b>
<b>A Der thermodynamische Limes</b>	<b>339</b>
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>B Der Fock-Raum</b>	<b>358</b>
B.1 Definition und mathematische Eigenschaften . . . . .	358
B.2 Basissysteme für Fock-Räume . . . . .	360
<b>C Lösungen der Aufgaben</b>	<b>362</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>381</b>