

Inhaltsverzeichnis

I Die Quantenmechanik – eine didaktische Analyse	11
1 Ziele und Möglichkeiten des Quantenphysik-Unterrichts	13
1.1 Mögliche Zielsetzungen des Quantenphysik-Unterrichts – eine Übersicht	13
1.2 Traditionelle Vorgehensweise im Unterricht	15
1.3 Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten	17
1.3.1 Frühe Untersuchungen in Bremen	17
1.3.2 Die Untersuchungen von Wiesner	20
1.3.3 Die Untersuchung von Lichtfeldt und Fischler	26
1.3.4 Die Studie von Petri	31
1.3.5 Studien im englischsprachigen Raum	33
1.4 Vorstellungen von Lehramtsstudierenden zur Quantenmechanik – Ergebnisse einer empirischen Untersuchung	35
2 Übersicht über die Unterrichtsvorschläge aus der fachdidaktischen Literatur	41
2.1 Das Unterrichtskonzept von Brachner und Fichtner	41
2.1.1 Die inhaltliche Struktur des Unterrichtskonzepts	41
2.1.2 Das Fundamentalprinzip	43
2.1.3 Der Trickfilm zum Doppelspaltexperiment	43
2.2 Das Berliner Konzept	44
2.2.1 Didaktische Ziele und Inhalte des Berliner Konzepts	44
2.2.2 Evaluation des Berliner Konzepts	45
2.3 Das Bremer Unterrichtskonzept	46
2.3.1 Ziele und Inhalte des Bremer Unterrichtskonzepts	46
2.3.2 Evaluation der Bremer Konzeption	48
2.4 Unterrichtskonzepte mit dem Zeigerformalismus	49
2.4.1 Der Unterrichtsentwurf von Küblbeck	49
2.4.2 Zeigerformalismus nach Bader	52
2.4.3 Der Unterrichtsvorschlag von Erb, Schön und Werner	53
2.5 Visual Quantum Mechanics	54
3 Interpretationsfragen im Quantenphysik-Unterricht	57
3.1 Die Rolle quantenmechanischer Interpretationsfragen im Physikunterricht	57
3.1.1 Die Deutung der Quantenmechanik als Inhalt des Physikunterrichtes?	57
3.1.2 Zugänge zur Interpretation der Quantenmechanik – Eine kleine Literaturübersicht	59
3.2 Konkrete und abstrakte Vorstellungen in der Quantenmechanik	60
3.2.1 Die Unzulänglichkeit klassischer Modelle: Thomson und Rutherford	61
3.2.2 Das Bohrsche Atommodell	64
3.2.3 Materiewellen: de Broglie und Schrödinger	65
3.2.4 Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation	67

3.2.5	Fazit	67
3.3	Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik	67
3.3.1	Unverzichtbarkeit der klassischen Begriffe	68
3.3.2	Komplementarität	70
3.3.3	Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene	72
3.3.4	Bemerkungen zur Interpretation Bohrs	74
3.3.5	Heisenbergs Version der Kopenhagener Deutung	74
3.4	Die statistische Interpretation der Quantenmechanik	76
3.4.1	Die Entstehung der Statistischen Interpretation	76
3.4.2	Ensemble, Präparation, Messung und Zustand	77
3.4.3	Formulierung der Statistischen Interpretation	79
3.4.4	Die Auffassungen von Einstein und Born	79
3.4.5	Die Statistische Interpretation und verborgene Parameter	83
3.4.6	Fachdidaktische Überlegungen zur Statistischen Interpretation	83
3.5	Stabilität und Spektrum der Atome	84
3.5.1	Problemstellung	84
3.5.2	Verschiedene Begründungen der Stabilität	85
3.6	Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation im Unterricht	88
3.6.1	Ansätze zur Vermittlung der Unbestimmtheitsrelation	88
3.6.2	Heisenberg-Mikroskop	89
3.6.3	Unschärfe von Wellenpaketen	90
3.6.4	Potentialtopf	91
3.6.5	Beugung am Einzelspalt	93
3.6.6	Impulsverteilung und Interferenzmuster beim Einzelspalt	94
3.7	Messprozess, Schrödingers Katze und Dekohärenz	97
3.7.1	Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses	97
3.7.2	Quantenmechanische Beschreibung einer Messung	98
3.7.3	Die Reduktion der Wellenfunktion	99
3.7.4	Der Einfluss der Umgebung: Dekohärenz	100
3.7.5	Der Tod von Schrödingers Katze	102
3.7.6	Beschreibung von quantenmechanischen Systemen durch Dichtematrizen	103
II	Didaktische Prinzipien des Münchener Unterrichtskonzepts	107
4	Die Grundziele des Münchener Unterrichtskonzepts	109
5	Qualitativer Basiskurs und quantitativer Aufbaukurs	113
5.1	Photonen und Photoeffekt (Kapitel 1 des Lehrtextes)	114
5.1.1	Einstieg mit Photonen oder mit Elektronen?	114
5.1.2	Semiklassische Theorie als Argument gegen den Einstieg mit Photonen?	115
5.2	Präparation dynamischer Eigenschaften (Kapitel 2)	116
5.2.1	Gründe für die Einführung des Präparationsbegriffs	116
5.2.2	Der Präparationsbegriff in der physikalischen Literatur	116
5.2.3	Umsetzung im Unterrichtskonzept	117
5.3	Wahrscheinlichkeitsinterpretation	119
5.3.1	Die „Rätsel“ der Quantenmechanik in Simulationsexperimenten	119
5.3.2	Formulierung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation	120
5.3.3	Determinismus und statistische Vorhersagbarkeit	120

5.4	Interferenzexperimente	121
5.4.1	Quantenobjekte in Interferenzexperimenten	121
5.4.2	Experimente mit dem Mach-Zehnder-Interferometer	122
5.4.3	Schülervorstellungen und quantenmechanische Vorstellungen	122
5.4.4	Photonen und die Eigenschaft „Weg“	123
5.4.5	Das Detektoren-Experiment	123
5.4.6	Beugung von Elektronen und Atomen	124
5.4.7	Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsinterpretation	125
5.4.8	Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation und die Erklärung der Welle-Teilchen-Problematik	126
5.4.9	Überlagerungszustände	127
5.5	Der quantenmechanische Messprozess (Kapitel 6)	127
5.5.1	Eigenschaft „Ort“ im Doppelspaltexperiment	128
5.5.2	Messpostulat der Quantenmechanik	129
5.5.3	Bohrsches Komplementaritätsprinzip	129
5.5.4	Zustandsreduktion	130
5.5.5	Schrödingers Katze und Dekohärenz	132
5.6	Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation (Kapitel 7)	133
5.6.1	Die Unbestimmtheitsrelation als Aussage über die Präparierbarkeit von Quantenobjekten	133
5.6.2	Die Güte einer Präparation	133
5.6.3	Die quantitative Formulierung der Unbestimmtheitsrelation	134
5.7	Möglichkeiten und Grenzen bei der Vermittlung des quantenmechanischen Formalismus in der Schule	134
5.7.1	Verzicht auf komplexe Zahlen	135
5.7.2	Beschreibung quantenmechanischer Systeme durch Wellenfunktionen	136
5.7.3	Operatoren	137
5.7.4	Eigenwerte und Eigenzustände	138
5.7.5	Operator der Gesamtenergie und Schrödingergleichung	138
5.7.6	Potentialtopf	139
5.8	Atome (Kapitel 9)	139

III Evaluation des Unterrichtskonzepts 141

6	Anlage der Evaluation	143
6.1	Zum Evaluationsbegriff	143
6.2	Ziele und Methoden der Evaluation	144
6.3	Ablauf der Evaluation	147
7	Evaluationsergebnisse	149
7.1	Auswertungsmethoden	149
7.2	Gesamtbeurteilung der Vorstellungen	152
7.3	Wahrscheinlichkeitsdeutung	153
7.3.1	Ergebnisse der Fragebogenauswertung	153
7.3.2	Interviewergebnisse	155
7.4	Atomvorstellung	158
7.4.1	Ergebnisse der Fragebogenauswertung	158
7.4.2	Freie Atomdarstellungen	160

7.4.3	Interviewergebnisse	162
7.4.4	Gesamtwertung der Ergebnisse zur Atomvorstellung	164
7.5	Verständnis der Unbestimmtheitsrelation	165
7.5.1	Ergebnisse der Fragebogenauswertung	165
7.5.2	Interviewergebnisse	167
7.6	Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff	169
7.6.1	Ergebnisse der Fragebogenauswertung	169
7.6.2	Interviewergebnisse zum Präparationsbegriff	170
7.6.3	Beurteilung der Nützlichkeit der eingeführten Begriffe	172
7.6.4	Interviewergebnisse zum Thema Ortseigenschaft	173
7.6.5	Begründungsmuster zur fehlenden Ortseigenschaft	175
7.6.6	Ergebnisse zum Messpostulat	176
7.6.7	Ergebnisse zu Überlagerungszuständen	177
7.7	Verständnis der formalen Elemente der Quantenmechanik	179
7.7.1	Bedeutung der Wellenfunktion	180
7.7.2	Bedeutung der Eigenwertgleichung	181
7.8	Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse und Gesamtwertung des Unterrichtskonzepts	182
IV	Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik – Lehrtext	183
1	Photonen	185
1.1	Der Photoeffekt: Licht löst Elektronen aus Metalloberflächen	185
1.2	Deutung des Photoeffekts mit Photonen	186
1.3	Experimentelle Überprüfung der Energiebilanz	187
1.4	Impuls von Photonen	189
2	Präparation dynamischer Eigenschaften	191
2.1	Prismenversuch mit Licht	191
2.2	Halbdurchlässiger Spiegel (Strahlteiler)	193
2.3	Polarisation	194
3	Wellen und Teilchen	197
3.1	Licht im Interferometer	197
3.2	Vom Lichtstrahl zu einzelnen Photonen	198
3.3	Interferometrie mit einzelnen Photonen	199
3.4	Kann man einem Photon einen Weg zuschreiben?	201
3.5	Anschauliche Erklärung des Ergebnisses	203
3.6	Teilt sich das Photon?	204
4	Die statistischen Aussagen der Quantentheorie	205
4.1	Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen	205
4.2	Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen und die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantentheorie	206
4.3	Präparation und Wahrscheinlichkeitsaussagen	208
5	Elektronen als Quantenobjekte	211
5.1	Elektronenbeugung	211
5.2	Doppelspaltexperiment mit Elektronen und Atomen	212
5.3	Die Wellenlänge von Elektronen	214

5.4	Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen und mit Elektronen	215
5.5	Wahrscheinlichkeitsinterpretation und Wellenfunktion	218
5.6	Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsverteilung beim Doppelspalt-Experiment	220
6	Eigenschaften von Elektronen und der quantenmechanische Messprozess	223
6.1	Die Eigenschaft „Ort“ im Doppelspaltexperiment	223
6.2	Messprozess und Komplementarität	224
6.3	Messungen und Eigenschaften	226
6.4	Zustandsreduktion	228
6.5	Schrödingers Katze, Messprozess und Dekohärenz	229
7	Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation	233
7.1	Gleichzeitige Präparation verschiedener Eigenschaften	233
7.2	Präparation von Ort und Impuls bei Photonen	234
7.3	Ein Maß für die „Güte“ einer Präparation	235
7.4	Messverfahren und Eigenschaften	236
7.5	Quantitative Formulierung der Unbestimmtheitsrelation	237
7.6	Unbestimmtheitsrelation und Bahnbegriff	241
8	Der Weg zur Schrödinger-Gleichung	243
8.1	Mathematische Beschreibung von Quantenobjekten	243
8.2	Präparation von Elektronen auf bestimmte kinetische Energie	244
8.3	Wellenfunktion eines freien Elektrons	244
8.4	Operatoren für physikalische Größen	245
8.5	Der Operator der kinetischen Energie	247
8.6	Eigenwertgleichung	249
8.7	Operator der Gesamtenergie	251
8.8	Die Grundgleichung der Quantenmechanik	254
8.9	Das Auffinden stationärer Zustände mit der Schrödinger-Gleichung	255
8.10	Elektronen im Potentialtopf	256
9	Atome	261
9.1	Was sind Atome?	261
9.2	Linienpektren	261
9.3	Das Bohrsche Atommodell	263
9.4	Abschied vom Bohrschen Atommodell	265
9.5	Quantisierung der Energie im Franck-Hertz-Versuch	266
9.6	Dreidimensionaler Potentialtopf und Orbitale	267
9.7	Das Wasserstoff-Atom	270
V	Literatur	277