
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Didaktische Rekonstruktion zur Erarbeitung von Leitlinien für die Lehrerfortbildung	5
2.1	Adaption der Didaktischen Rekonstruktion zum Zwecke der Leitlinienentwicklung von Lehrerfortbildungen	5
2.2	Leitfragen im Prozess der Didaktischen Rekonstruktion	7
2.3	Entwicklung der Forschungsfragen	9
3	Analyse didaktischer Konzeptionen zur Quantenphysik	11
3.1	Quantenphysik in der Schule	11
3.2	Unterrichtskonzepte zur Vermittlung von Quantenphysik in der Schule . . .	13
3.3	Quantenphysik in der universitären Ausbildung für das Lehramt (1. Phase Lehrerbildung)	19
3.4	Schülerpräkonzepte in der Quantenphysik	21
3.5	Fazit	23
4	Die Delphi-Methode	25
4.1	Klassischer Ablauf der Delphi-Methode und Begriffsklärung	25
4.2	Typisierung von Delphi-Studien nach Häder	27
4.3	Delphi-Studien in der Physikdidaktik	30
4.4	Abgrenzung gegenüber anderen methodischen Zugängen	40
5	Erfassung der subjektiven Ansichten von Lehrkräften zu fachdidaktischen Konzeptionen in der Quantenphysik	43
5.1	Ablauf der Delphi-Studie	43
5.2	Exemplarisches Vorgehen: Von der ersten Frage bis zur quantitativen Auswertung	50

6	Delphi-Runde 1	55
6.1	Erstellung des ersten Fragebogens – Ergebnisse der Pilotstudie	55
6.2	Resultate der ersten Delphi-Runde	60
6.2.1	Themen, die zu einer intellektuell redlichen Auseinandersetzung mit der Quantenphysik beitragen	60
6.2.2	Quantenphysik als besondere Herausforderung für Schülerinnen und Schüler	64
6.2.3	Retrospektive: Die Sicht auf die eigene Ausbildung	68
6.2.4	Inhalte/Themen/Anwendungen persönlichen Interesses	69
6.2.5	Nutzung und Einstellungen zu Unterrichtsmaterialien zur Quanten- physik	72
6.2.6	Einstellungen zum aktuellen Lehrplan in der Quantenphysik	74
7	Delphi-Runde 2	77
7.1	Erarbeitung des zweiten Fragebogens aus den Resultaten der ersten Runde	77
7.2	Resultate der zweiten Delphi-Runde	84
7.2.1	Motivierende Themen aus der Quantenphysik	85
7.2.2	Internetangebot oder herkömmliche Fortbildung	87
7.2.3	Unterrichtskonzeptbestandteile zur Quantenphysik von denen der Unterricht im besonderen Maße profitiert	89
7.2.4	Einsatz des Zeigerformalismus	92
7.2.5	Erfahrungen aus dem Unterricht zu Wesenszügen	94
7.2.6	Der Dualismus-Begriff im Unterricht zur Quantenphysik	96
7.2.7	Quantenphysik als Teil der modernen Physik im Unterricht	100
7.2.8	Unterrichtserfahrungen aus Kursen auf grundlegendem Niveau	102
8	Delphi-Runde 3	105
8.1	Erarbeitung des dritten Fragebogens aus den bisherigen Resultaten	105
8.2	Resultate der dritten Delphi-Runde	114
8.2.1	Schulbezug als Anforderung an das Fortbildungsangebot	114
8.2.2	Akzeptieren und Diskutieren im Unterricht zur Quantenphysik	116
8.2.3	Die Rolle von Experimenten im Unterricht	118
8.2.4	Die Sicht der Experten auf die Wesenszüge	120
8.2.5	Die Diskussion um den Dualismus-Begriff	124
8.2.6	Einzelphotonenexperimente	128
8.2.7	Anwendungen aus der Quantenphysik	130

8.2.8	Motivierende Themen für eine Fortbildung	134
9	Konstruktion von Leitlinien für eine Lehrerfortbildung zur Quantenphysik	139
9.1	Zusammenfassung der Delphi-Ergebnisse	139
9.2	Leitlinien für eine Lehrerfortbildung	144
10	Binary Optics: Ein Konzept für die Lehre von Quantenoptik	149
10.1	Quantenphysikalische Betrachtung von Licht am Strahlteiler	150
10.2	Quantenphysikalische Betrachtung von Licht am Polarisationsfilter	163
10.3	Der Experiment-Pfad für die Lehrerfortbildung	165
10.3.1	Fazit	177
11	Korrelationsmessung beim Nachweis der Quantisierung des Lichts	179
11.1	Auf dem Weg zur Klassifikation von Licht: Wichtige Eigenschaften der g^2 -Funktion	179
11.2	g^2 in Beispielen	180
11.3	Korrelationsanalyse mit Binärdetektoren	181
12	Photonen in der Lehrerfortbildung: Der Aufbau zur Präparation von Fockzuständen	189
12.1	Erzeugung von Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz	189
12.2	Koinzidenz-Elektronik	194
12.2.1	Funktionsweise der Koinzidenz-Zähleinheit	196
12.2.2	Bestimmung der Timing-Charakteristik	201
12.3	Detektoren	205
12.4	Laser	209
13	Experimente für die Lehrerfortbildung	215
13.1	Statistische Optik mit Binärdetektoren	215
13.1.1	Poissonstatistik – Detektion seltener Ereignisse	215
13.1.2	Die mittlere Ereignishäufigkeit verhält sich linear zur Irradianz	219
13.1.3	Die Impulse zweier Detektoren sind bei konstanter Irradianz unkorreliert	220
13.1.4	Korrelationen sinusoidal modulierter Lichtquellen	220
13.2	Quantenoptik mit Fockzuständen	224
13.2.1	Charakterisierung der Zwillingsphotonenquelle	224

13.2.2	Nachweis der Unteilbarkeit von Einzelphotonenzuständen am Strahlteiler	228
13.2.3	Das Gesetz von Malus mit einzelnen Photonen	230
13.2.4	Einzelphotonenzustände im Michelson-Interferometer	233
13.2.5	Der Quantenradierer	238
14	Begleitmaterial	243
15	Fazit und Ausblick	247
15.1	Die subjektiven Überzeugungen von Lehrkräften zu fachdidaktischen Konzepten in der Quantenphysik	247
15.2	Binary Optics als Konzept	249
15.3	Die Experimente	250
	Literatur	257
	Anhang	277
A	Delphi-Studie	277
A.1	Pilotstudie	278
A.2	Delphi-Runde 1	279
A.3	Delphi-Runde 2	283
A.4	Delphi-Runde 3	287
A.5	Akquirierungsmaterial	297
B	Ausgaben statistischer Tests zu den Experimenten	307
C	Technische Details der Experimente	313
C.1	Fluoreszenzfilter Thorlabs FGL515M	313
C.2	Verwendete Strahlteilerwürfel	314
C.3	Berechnung des Phasenanpassungswinkels	315
C.4	Justage Anleitung	318
D	Begleitmaterial zur Lehrerfortbildung	323
D.1	Statistische Optik	324
D.2	Unteilbarkeit des Photons	328
D.3	Michelson-Interferometer mit einzelnen Photonen	331

D.4 Einzelphotonenzustände am Polarisationsfilter	335
D.5 Analogie-Experiment zum Quantenradierer	338
D.6 Anleitung zum Programm g2Analyzer	341
D.7 Semiklassische Erklärung des Photoeffekts	343