

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
1.2	Bestehende Ausbildungskonzepte zur Quantenphysik	3
1.3	Auswahl des Quantenobjektes	6
1.4	Experimente zur Quantennatur von Licht	7
1.5	Kohärentes Licht: Quantenzustand vs. klassische e-m Welle	10
2	Repräsentation der Experimente	13
2.1	Animationen und Programme zur Quantenphysik	13
2.2	Lehrfilme zur Quantenphysik	14
2.3	Remotely-Controlled-Labs	15
2.4	Interaktive Bildschirmexperimente	16
2.5	Vergleich und Realisierung	17
2.5.1	Anpassung der IBE auf quantenoptische Experimente	18
2.5.2	Herstellung von quantenoptischen IBE	20
3	Experimente mit einzelnen Photonen	23
3.1	Experimentelle Grundlagen	24
3.1.1	Detektoren	24
3.1.2	Lasersysteme	25
3.1.3	Datenauswertung	27
3.1.4	Erzeugung von Photonenpaaren	29
3.1.5	Phasenanpassung im Kristall	31
3.1.6	Justierung der Experimente	35
3.1.7	Optimierung zum Zweck der Ausbildung	38
3.1.8	Messung der Koinzidenzen	41
3.2	Existenz des Photons	44
3.2.1	Korrelationsfunktion	44
3.2.2	Experiment	47

3.2.3	Anwendung des Experimentes in der Ausbildung	49
3.3	Photonenstatistik mit einem Strahlteiler	51
3.3.1	Photonenzahldarstellung	52
3.3.2	Experiment	53
3.4	Photonenstatistik mit einem TMD	55
3.4.1	Theorie	56
3.4.2	Experiment	59
3.4.3	Vergleich der Statistiken	61
3.5	Interferenz im Interferometer	61
3.5.1	Theorie	63
3.5.2	Experiment	65
3.5.3	Interferenz und Quantennatur	69
3.5.4	Interferenz und Weginformation	70
3.5.5	Analogieexperiment für die Schule	74
3.6	Interferenz am Doppelspalt	75
3.6.1	Theorie	75
3.6.2	Experiment	77
3.6.3	Doppelspalt vs. Interferometer	79
3.7	Zweiphotoneninterferenz am Strahlteiler	80
3.7.1	Interferenz zweiter und vierter Ordnung	80
3.7.2	Theorie zur Hong-Ou-Mandel Interferenz	81
3.7.3	Experiment zur Hong-Ou-Mandel Interferenz	83
3.8	Quantenkryptographie	86
3.8.1	Forschung	86
3.8.2	Grundlagen	87
3.8.3	Demonstrationsexperiment	89
3.8.4	Analogieexperiment für die Schule	89
3.9	Verschränkung	91
3.9.1	Forschung	92
3.9.2	Quelle für verschränkte Photonen	93
3.9.3	Bell-Zustände	97
3.9.4	Winkelabhängigkeit	99
3.9.5	Nichtlokalität nach CHSH	101
3.9.6	Nichtlokalität nach Wigner	102
3.9.7	Nichtlokalität nach Hardy	103
3.9.8	Nichtlokalität für die Schule	105

3.10	Quantenzufall	109
3.10.1	Einführung	110
3.10.2	Prinzip des Quantenzufalls	110
3.10.3	Photonische Quantenzufallsgeneratoren	111
3.10.4	Demonstrationsexperiment	112
3.10.5	Zufall an einem Strahlteiler	113
3.10.6	Experiment mit separablen Photonenpaaren	114
3.10.7	Experiment mit verschränkten Photonenpaaren	116
3.10.8	Analyse der Quantenzufallszahlen	117
3.10.9	Quantenzufall für die Ausbildung	119
3.11	Sonstige Experimente	121
3.11.1	Gesetz von Malus	122
3.11.2	Abgeschwächtes Licht	122
4	Integration der Experimente in die Ausbildung	127
4.1	Ausbildungslabore	127
4.1.1	Vorüberlegungen	128
4.1.2	Station 1: Musikalischer Lichtleiter	129
4.1.3	Station 2: Prinzip der Quantenkryptographie	130
4.1.4	Station 3a: Interferenz und Prinzip Quantenradierer	130
4.1.5	Station 3b: Gesetz von Malus	131
4.1.6	Durchführung eines Labortages	132
4.2	Curriculum für die Schulausbildung	133
4.2.1	Vorüberlegungen	134
4.2.2	Schülervorstellungen und Konzeptwechsel	136
4.2.3	Methode des Lerntagebuchs	138
4.2.4	Unterrichtskonzept Teil 1: Unterrichtseinheit	139
4.2.5	Unterrichtskonzept Teil 2: Projektarbeit	146
4.2.6	Unterrichtskonzept Teil 3: Ausbildungslabor	148
4.2.7	Integration in die Lehramtsausbildung	148
4.3	Homepage QuantumLab	150
5	Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick	153
5.1	Diskussion zur Annahme des Konzepts	153
5.2	Zusammenfassung	155
5.3	Ausblick auf weitere Arbeiten	157
A	Übersicht interaktive Bildschirmexperimente	159

B CD-ROM mit Materialien	161
Danksagung	163
Literaturverzeichnis	165