

# **Wirkung eines quantenoptischen Realexperiments auf das physikalische Reasoning**

*Von der Fakultät für Mathematik und Physik  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover zur Erlangung des  
Grades*

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat

*Genehmigte Dissertation von  
Herrn M.Ed. Moritz Waitzmann  
Erscheinungsjahr: 2023*

---

Referat: Dr. Susanne Weßnigk  
Korreferat: Prof. Dr. Andreas Nehring  
Korreferat: Prof. Dr. Stefan Heusler

Tag der Disputation: 28.06.2023

---

*„Zur Untersuchung wählen wir ein Phänomen aus, das auf klassische Art zu erklären absolut unmöglich ist und das in sich den Kern der Quantenmechanik birgt. In Wirklichkeit enthält es das einzige Geheimnis.“ (Feynman et al., 2007, S.2)*

# Kurzfassung

Quantenphysikalische und klassische Erklärungen unterscheiden sich fundamental hinsichtlich ihres Reasoning, da sich die Theorien in ihren physikalischen Grundprinzipien unterscheiden. Die Schulquantenphysik benötigt daher eine klare, eindeutige und nicht-klassische Sprache, um klassisch geprägte Alternativkonzepte zu vermeiden (McNeill und Krajcik, 2008; Müller, 2003; Scholz et al., 2020). In dieser Arbeit wird ein quantenphysikalisches Reasoning mit den Grundprinzipien Probabilistik, Superposition und Interferenz (PSI) betrachtet. PSI ist ein Satz gedanklicher und sprachlicher Werkzeuge, mit deren Hilfe die prototypischen Phänomene der Schulquantenphysik erklärt werden können, ohne Rückgriff auf Konzepte der klassischen Physik (Scholz et al., 2020).

Um quantenphysikalisches Reasoning zu motivieren, braucht es ein geeignetes Schlüsselexperiment. Dieses muss sowohl einen eindeutigen Widerspruch zu den bestehenden Konzepten aufzeigen als auch einen neuen, fruchtbaren Erklärungsansatz motivieren (Laumann et al., 2019). Die Kombination aus einem Strahlteilerexperiment und einem Michelson Interferometer mit Einzelphotonen könnte ein solches Experiment sein, da die zeitgleiche Beobachtung von Unteilbarkeit und Interferenz des Photons klassisch nicht erklärt werden kann. Erst durch quantenphysikalisches Reasoning kann das Phänomen widerspruchsfrei erklärt werden (Scholz et al., 2020). Die antizipierte Schlüsselwirkung ist jedoch bisher nicht untersucht. Diese Arbeit nimmt sich dem Desiderat an. Um das Reasoning der Lernenden zu untersuchen, wurde ein Mixed-Format Test mit 26 Items entwickelt und mit Hilfe eines Gruppeninterviews, eines Expertenratings, der Methode des lauten Denkens sowie einer Feldstudie mit 84 Studierenden (1. und 3. Semester Physik), mit einer anschließenden Rasch Analyse und einer explorativen Faktorenanalyse validiert. Weiterhin wurde ein Interviewleitfaden entwickelt, welcher die Charakterisierung des Photons sowie die Erklärung der Teilerperimente in den Fokus nimmt.

In einer abschließenden Mixed-Methods-Pre-Post Studie im Eingruppendesign wurden 80 Studierende im (2. Semester Physik) untersucht (36 Studierende interviewt). Die Auswertung zeigt eine signifikante Zunahme der mittleren Personenfähigkeit von Pre nach Post. Ebenso zeigt sich, dass die Studierenden zum Post-Zeitpunkt ein quantenphysikalisches Reasoning für die Erklärung der Interferenz von einzelnen Quantenobjekten favorisierten. Für die Erklärung des Strahlteilerexperiments wurde jedoch ein klassisches sowie ein dualistisches Teilchen-basiertes Reasoning attraktiver. Das Experiment scheint dennoch eine grundsätzliche Schlüsselwirkung zu besitzen.

---

**Schlagworte:** Quantenphysik, Reasoning, Mixed-Methods

# Abstract

Quantum and classical explanations differ fundamentally due to their reasoning, since the theories differ in their basic physical principles. Therefore, school quantum physics needs a clear, unambiguous and non-classical language to avoid classical misconceptions (McNeill und Krajcik, 2008; Müller, 2003; Scholz et al., 2020). In this work a quantum reasoning with the basic principles of probabilistic, superposition and interference (PSI) is considered. PSI is a set of mental and linguistic tools with the help of which the prototypical phenomena of school quantum physics can be explained without resorting to concepts of classical physics (Scholz et al., 2020).

To motivate quantum-physical reasoning, a suitable key experiment is needed. This must both show a clear contradiction to the existing concepts and motivate a new, fruitful explanatory approach (Laumann et al., 2019). The combination of a single photon beam-splitter experiment and a Michelson interferometer could be such an experiment, because of the concurrent observation of indivisibility and interference of single photons cannot be explained classically. Only through quantum reasoning the phenomenon can be explained without contradiction (Scholz et al., 2020). However, the anticipated key effect has not been investigated so far. This work addresses the problem.

To investigate the students' reasoning, a mixed-format test with 26 items was developed and validated with the help of a group interview, an expert rating, the method of thinking aloud and a field study with 84 physics students (1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> semester), with a subsequent Rasch analysis and an explorative factor analysis. Furthermore, an interview guide was developed, which focuses on the characterisation of the photon as well as the explanation of the beam-splitter experiment and the Michelson interferometer.

In a final mixed-methods pre-post study in a single-group design, 80 physics students in (2<sup>nd</sup> semester) were examined (36 students interviewed). The evaluation shows that the person ability increased on average significantly from pre to post. Similarly, it shows that at the post time point, the students favoured quantum reasoning for explaining the interference of single quantum objects. For the explanation of the beam-splitter experiment, however, a classical as well as a dualistic particle-based reasoning became more attractive. The experiment thus seems to have a key effect in principle.

**Keywords:** quantum physics, reasoning, mixed-methods

# Publikationen und Förderhinweis

Teile dieser Arbeit wurden in Waitzmann et al. (2022) veröffentlicht.

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 274200144 - SFB 1227 DQ-*mat*

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Publikationen und Förderhinweis	VI
1. Einleitung	1
<b>I. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2. Kernziel des Quantenphysikunterrichts	4
2.1. Naturwissenschaftliche Grundbildung als Ziel von naturwissenschaftlichem Unterricht . . . . .	4
2.2. Quantenphysik und naturwissenschaftliche Grundbildung . . . . .	5
2.3. Zum Begriff der naturwissenschaftlichen Erklärung . . . . .	7
2.4. Die Natur quantenphysikalischer Erklärungen . . . . .	8
2.5. Quantenphysikalische Erklärungen - Eine andere Form des Reasoning .	11
2.5.1. Welle-Teilchen Dualismus . . . . .	13
2.5.2. Grundprinzipien der Quantenphysik als Bestandteile quantenphysikalischen Reasoning . . . . .	14
2.5.3. PSI-Reasoning und Wesenszüge der Quantenphysik . . . . .	20
2.6. Zusammenfassung . . . . .	21
<b>3. Quantenphysikunterricht - eine Bestandsaufnahme</b>	<b>23</b>
3.1. Gegenwärtige Lernziele und Kernthemen des Quantenphysikunterrichts	23
3.2. Kritik am quasi-historischen Zugang . . . . .	24
3.3. Restrukturierung des Quantenphysikunterrichts . . . . .	27

3.4.	Phänomene im Quantenphysikunterricht . . . . .	29
3.5.	Zusammenfassung . . . . .	30
<b>4.</b>	<b>Lernschwierigkeiten und Alternativkonzepte</b>	<b>32</b>
4.1.	Übersicht ausgewählter Alternativkonzepte . . . . .	32
4.1.1.	Wahrscheinlichkeitsdeutung . . . . .	32
4.1.2.	Superposition . . . . .	33
4.1.3.	Interferenz und Dualismus . . . . .	34
4.1.4.	Photon . . . . .	35
4.1.5.	Schlussfolgerung . . . . .	35
4.2.	Zusammenfassung . . . . .	37
<b>5.</b>	<b>Einordnung der Ergebnisse in konstruktivistische Lerntheorien</b>	<b>38</b>
5.1.	Konzeptwechsel - Eine Charakterisierung . . . . .	38
5.2.	Konzeptwechseltheorien . . . . .	39
5.2.1.	Framework Theorie Ansatz . . . . .	40
5.2.2.	Knowledge in Pieces . . . . .	41
5.2.3.	Kohärent vs. Fragmentiert . . . . .	45
5.3.	Einordnung der Erkenntnisse zum Lernen von Quantenphysik . . . . .	46
5.4.	Zusammenfassung . . . . .	47
<b>6.</b>	<b>Zwischenfazit</b>	<b>48</b>
<b>7.</b>	<b>Schlüsselphänomen</b>	<b>50</b>
7.1.	Der Doppelspalt als prototypisches Schlüsselexperiment . . . . .	51
7.2.	Die Elektronenbeugung als alternatives Schlüsselexperiment . . . . .	52
7.3.	Kombinationsexperiment . . . . .	53
7.4.	Zusammenfassung . . . . .	56
<b>II.</b>	<b>Grundkonzeption des Forschungsprojektes</b>	<b>58</b>
<b>8.</b>	<b>Desiderat</b>	<b>59</b>

<b>9. Forschungsziel und Forschungsfragen</b>	<b>61</b>
9.1. Forschungsfragen . . . . .	61
<b>10. Forschungsdesign und -methode</b>	<b>63</b>
10.1. Forschungsdesign . . . . .	63
10.1.1. Wahl der Messzeitpunkte . . . . .	63
10.1.2. Grundsätzliches Studiendesign - Feld- vs. Laborstudie . . . . .	63
10.1.3. Gruppendesign . . . . .	65
10.1.4. Methode . . . . .	66
10.1.5. Stichprobenauswahl . . . . .	66
<b>11. Fragebogen</b>	<b>68</b>
11.1. Fragebögen zum Verständnis von Quantenphysik . . . . .	68
11.1.1. Schlussfolgerung . . . . .	71
11.2. Methode . . . . .	71
11.2.1. Itementwicklung - Grundlegende Anforderungen und Iteminhalt	71
11.2.2. Validität . . . . .	72
11.2.3. Methoden zur Prüfung der Validität . . . . .	73
11.2.4. Zusätzliche statistische Analyse - Explorative Faktorenanalyse .	78
11.3. Ergebnisse . . . . .	79
11.3.1. Qualitative Studien zur Prüfung der Annahmen 3-5 . . . . .	82
11.3.2. Felderprobung und Rasch Analyse . . . . .	86
11.4. Problematische Items - Explorative Faktorenanalyse . . . . .	90
11.4.1. Bestimmung der Anzahl der Faktoren . . . . .	90
11.4.2. Ausschluss weiterer Items . . . . .	92
11.5. Parsimonität und Dimensionalität . . . . .	94
11.6. Bewertung des Interpretation-Use-Argumentes . . . . .	95
11.7. Limitationen der Validierungsstudien . . . . .	95
11.7.1. Limitation der Stichprobe der Think-Aloud-Studie . . . . .	95
11.7.2. Limitationen des Expertenratings . . . . .	96
11.8. Zusammenfassung . . . . .	96

<b>12. Interviewleitfaden</b>	<b>98</b>
12.1. Konstruktion des Leitfadens . . . . .	98
12.1.1. Grundgestalt der Aufgaben . . . . .	99
12.1.2. Visualisierung der Phänomene . . . . .	100
12.2. Pilotierung des Interviewleitfadens . . . . .	102
12.3. Auswertung der Interviews . . . . .	103
12.4. Zusammenfassung . . . . .	105
<b>13. Gestaltung der Lernumgebung</b>	<b>106</b>
13.1. Herausforderungen im Umgang mit dem Schlüsselexperiment . . . . .	106
13.2. Lernpfad . . . . .	108
13.2.1. Methodisch-Didaktische Entscheidung . . . . .	110
13.2.2. Gestaltung des Lernpfads . . . . .	117
13.3. Pilotierung der Lernumgebung . . . . .	120
13.3.1. Ablauf . . . . .	120
13.3.2. Methodik der Evaluation . . . . .	120
13.3.3. Ergebnisse der Evaluation . . . . .	121
13.3.4. Schlussfolgerung . . . . .	124
13.4. Zusammenfassung . . . . .	126
<b>III. Hauptstudie</b>	<b>128</b>
<b>14. Durchführung und Stichprobenbeschreibung</b>	<b>129</b>
14.1. Randbedingungen der Versuchsdurchführung . . . . .	130
<b>15. Auswertung des Fragebogen</b>	<b>132</b>
15.1. Methode . . . . .	132
15.1.1. Aufbereitung der Daten . . . . .	132
15.1.2. Auswertung von Pre- und Post . . . . .	132
15.2. Ergebnisse . . . . .	133
15.2.1. Modellgüte . . . . .	133
15.2.2. Gleichheit der Itemschwierigkeiten . . . . .	133

15.3. Analyse des Lernzuwachses von Pre-Test zu Post-Test . . . . .	134
15.3.1. Globale Betrachtung - Veränderung der mittleren Personenfähigkeit . . . . .	134
15.3.2. Inhaltsbezogene Analyse des Lernzuwachses . . . . .	135
15.4. Schlussfolgerung . . . . .	138
15.5. Zusammenfassung . . . . .	138
<b>16. Auswertung der Interviews</b>	<b>140</b>
16.1. Methode . . . . .	140
16.1.1. Aufbereitung der Daten . . . . .	140
16.1.2. Entwicklung des Kategoriensystems . . . . .	141
16.1.3. Auswerteverfahren . . . . .	146
16.1.4. Interraterreliabilität . . . . .	146
16.1.5. Darstellung der Ergebnisse . . . . .	147
16.2. Ergebnis . . . . .	148
16.2.1. Charakterisierung des Photons . . . . .	148
16.2.2. Strahlteilerexperiment . . . . .	151
16.2.3. Michelson Interferometer . . . . .	154
16.2.4. Reasoningmuster . . . . .	158
16.3. Zusammenfassung . . . . .	160
<b>17. Gesamtergebnis und Diskussion</b>	<b>161</b>
17.1. Forschungsfrage 1 - Konzeptverständnis von PSI . . . . .	161
17.2. Forschungsfrage 2 - Veränderung im Reasoning . . . . .	163
17.3. Forschungsfrage 3 - Transfer der Erklärung . . . . .	166
17.4. Zusammenfassung . . . . .	166
<b>18. Limitationen</b>	<b>168</b>
18.1. Studiendesign . . . . .	168
18.2. Stichprobe . . . . .	168
18.3. Evaluation des Erklärungsansatzes . . . . .	169
18.4. Wirkung des Experiments auf Lernende im Moment der Auseinandersetzung . . . . .	170
18.5. Vorgehen zur Auswertung des Fragebogens . . . . .	170

<b>19. Fazit und Ausblick</b>	<b>172</b>
<b>IV. Verzeichnisse</b>	<b>177</b>
20. Abbildungsverzeichnis	178
21. Tabellenverzeichnis	180
22. Literatur	182
<b>V. Anhang</b>	<b>194</b>
23. Infit und Outfit MNSQ Felderprobung des Fragebogens	195
23.1. Itemfit-Statistik . . . . .	195
23.2. Abschließende Personfit-Statistik . . . . .	197
24. Zusätzliche Berechnungen Validierung	198
24.1. Wright-Map . . . . .	198
24.2. Explorative Faktorenanalyse . . . . .	199
25. Fragebogen	200
26. Interviewleitfaden	224
27. Interviewmaterial	230
28. Theoriematerial	236
29. MNSQ-Fit Statistiken Auswertung des Fragebogens	242
29.1. MNSQ-Fitstatistik für Pre- und Post-Test . . . . .	242
29.1.1. Itemfit . . . . .	242
29.1.2. Person Outfit . . . . .	244
29.2. MNSQ-Fitstatistik für Pre- und Post-Test nach erster Bereinigung . . . . .	245
29.2.1. Itemfit . . . . .	245
29.2.2. Person Outfit . . . . .	247

29.3. MNSQ-Fitstatistik für Pre- und Post-Test nach zweiter Bereinigung . . .	248
29.3.1. Itemfit . . . . .	248
29.3.2. Person Outfit . . . . .	250
<b>30. Kategoriensystem</b>	<b>251</b>
30.1. Photon . . . . .	251
30.2. Strahlteilerexperiment . . . . .	252
30.3. Michelson Interferometer . . . . .	253
<b>31. Lebenslauf</b>	<b>254</b>
<b>32. Danksagung</b>	<b>255</b>
<b>33. Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>257</b>

# 1. Einleitung

Die Physik des 20. Jahrhunderts ist durch die Entwicklung der Quantenphysik geprägt, die als die am besten geprüfte Theorie gilt (Feynman, 1990). Auch wenn die theoretische Beschreibung der Hohlraumstrahlung durch Max Planck 1900 gemeinhin als Geburtsstunde der Quantenphysik angesehen wird, ebneten Phänomene wie die Entdeckung der Radioaktivität (Becquerel, 1896), die Entdeckung des Elektrons 1887 (Falconer, 1987) oder die Entdeckung der Röntgenstrahlung (Röntgen, 1898) bereits den Weg in Richtung Quantenphysik.

Aus heutiger Sicht und vor allen Dingen in der Darstellung gängiger Lehrbücher wirkt die Entwicklung der Quantenphysik als linearer Prozess, in dessen Verlauf die Theorien der klassischen Physik freimütig abgelegt und neue quantenphysikalische Theorien angeeignet wurden. Tatsächlich war die Entwicklung allerdings zunächst geprägt durch ein Ringen um den Erhalt klassischer Theorien. Niels Bohr verwehrt sich beispielsweise bis weit in die 1920er Jahre gegenüber einer Lichtquantenhypothese. Somit geht, anders als oftmals in Lehrbüchern dargestellt, im Bohrschen Atommodell der Übergang zwischen zwei Energieniveaus nicht mit der Emission von Lichtquanten einher. Vielmehr beschrieb Bohr die Emission elektromagnetischer Wellen mit einer spezifischen Frequenz  $f = \frac{E}{h}$  (Passon, 2022). Erst die Beobachtung immer neuer Phänomene machten die Unzulänglichkeit der klassischen Physik deutlich. Somit wurden in einem langsamen und graduellen Prozess klassische Theorien von quantenphysikalischen überkommen (Heisenberg, 1973).

Heute verzeichnet die Quantenphysik große wissenschaftliche Erfolge, die sich in Schlagwörtern wie der *zweiten Quantenrevolution* widerspiegeln. Trotzdem sind einige grundsätzliche philosophischen Fragen der Quantenphysik bis heute nicht verstanden (Friebe, 2018).

Und auch aus der Lehre ist die Quantenphysik seit vielen Jahren sowohl in der Sekundarstufe II als auch der Universität nicht mehr wegzudenken (Stadermann et al., 2019).

Und auch hier besteht die größte Herausforderung im Widerspruch zur klassischen Physik (Franz und Müller, 2016). Die in der klassischen Physik und damit auch im Alltag bewährten Konzepte Determinismus und lokale Realität sind in der Quantenphysik nicht mehr anwendbar. Daher wird ein Konzeptwechsel als Notwendigkeit für das Lernen von Quantenphysik angesehen (Kalkanis et al., 2003). Dass sich Lernende tatsächlich quantenphysikalische Denkweisen aneignen, wurde im Rahmen fachdidaktischer Beforschung von Lehrkonzepten der Quantenphysik gezeigt (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Unklar hingegen ist, wie einzelne Versatzstücke wie Experimente oder Simulationen derartiger Lehrgänge tatsächlich wirken (ebd.).

Ein unverzichtbares Versatzstück ist wahrscheinlich ein Schlüsselphänomen. Als Ausgangspunkt und Motivator einer Konzeptveränderung muss es sowohl die Unzulänglichkeit bestehender Konzepte aufzeigen und gleichzeitig einen dem neuen Konzept entstammenden Erklärungsansatz anbieten (Laumann et al., 2019). Die Schlüsselwirkung des Phänomens besteht bildlich gesprochen darin, die Tür zur Quantenwelt aufzuschließen und einen Weg in diese zu bereiten (Scholz et al., 2020). In der Literatur lassen sich verschiedene Experimente finden, denen aus theoretischer Sicht eine Schlüsselwirkung zugeschrieben wird. Eine Evaluation der „erhofften“ Schlüsselwirkung lässt sich jedoch selten finden, sodass konkrete Erkenntnisse über die Wirkung der Experimente auf Lernenden zumeist fehlen.

Die vorliegende Arbeit nimmt sich dieser Problematik an und betrachtet die aus klassisch-physikalischer Sicht zueinander komplementären Phänomene Unteilbarkeit des Photons und Phasenabhängigkeit der Superposition von Einzelphotonenzuständen (= Quanteninterferenz) als ein quantenphysikalisches Phänomen. Ausgehend von der inneren Struktur der Quantenphysik wird ein spezifisches, quantenphysikalisches Reasoning für die Erklärung des Phänomens vorgeschlagen. Dieses basiert auf den Grundprinzipien Probabilistik, Superposition und Interferenz (PSI). Zur Motivation dieses Reasoning wird ein potenziell geeignetes Experiment vorgeschlagen, welches die Unteilbarkeit und Interferenz als Schlüsselphänomen zeigt. Eine Mixed-Methods Studie wird eingesetzt, um Aufschluss darüber zu erhalten, inwieweit die Diskussion dieses Phänomens tatsächlich eine Verständnisenwicklung anbahnt. Die Studie nimmt sich somit der Frage an, ob es sich bei dem vorgeschlagenen Experiment tatsächlich um ein mögliches Schlüsselexperiment für das Lernen von Quantenphysik handelt.

Teil I.

Theoretische Grundlagen

## 2. Kernziel des Quantenphysikunterrichts

### 2.1. Naturwissenschaftliche Grundbildung als Ziel von naturwissenschaftlichem Unterricht

Die naturwissenschaftliche Grundbildung (im engl. Scientific Literacy) ist das übergeordnete Ziel des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Dabei treten fachspezifische Inhalte in den Hintergrund und es wird definiert, „*what people should know in order to live more effectively with respect to the natural world*“ (DeBoer, 2000, S.594). Das Ziel ist somit die Ausbildung eines informierten und kritischen Nutzers naturwissenschaftlichen Wissens (DeBoer, 2000; OECD, 2017). Das Ziel von naturwissenschaftlichem Unterricht sollte daher sein, dass die Lernenden Naturwissenschaften als relevant ansehen, sodass sie auch nach der Schulzeit weiter über Naturwissenschaften informiert bleiben, diese in ihrer Lebenswelt anwenden können und an naturwissenschaftlich orientierten Diskussionen innerhalb der Gesellschaft teilhaben können. Wie das Ziel von naturwissenschaftlicher Grundbildung tatsächlich durch Kompetenzen expliziert werden kann, differiert je nach Autor (DeBoer, 2000; OECD, 2007, 2017). Diese Arbeit orientiert sich an der Definition der naturwissenschaftlichen Grundbildung der PISA Studie 2015. Darin wird naturwissenschaftliche Grundbildung als mehrdimensionales Konstrukt definiert (OECD, 2017). Naturwissenschaftliche Grundbildung wird als Fähigkeit verstanden, sich als reflektiertes Mitglied der Gesellschaft mit Ideen der Naturwissenschaften sowie der Anwendung dieser zur Bewertung gesellschaftlich relevanter Problemstellungen (z. B. Kernenergie, Klimawandel, Quantentechnologien) auseinanderzusetzen. Weiterhin ist eine naturwissenschaftliche grundgebildete Person Willens, sich mit einem Diskurs aus Naturwissenschaft und Technik auseinanderzusetzen.

Dafür bedarf es dreier Kompetenzen:

- **Naturwissenschaftliche Erklärung von Phänomenen:** Das Erinnern, Anbieten und Evaluieren von Erklärungen für eine Reihe von natürlichen, aber auch technischen Phänomenen.
- **Evaluation und Design von naturwissenschaftlichen Untersuchungen:** Beschreibung und Bewertung von naturwissenschaftlichen Untersuchungen sowie das Vorschlagen von Vorgehensweisen, um naturwissenschaftliche Fragestellungen zu beantworten.
- **Naturwissenschaftliche Interpretation von Daten und empirischer Evidenz:** Analyse und Evaluation von Daten, die Darstellung von Behauptungen und Argumenten in verschiedenen Repräsentationsformen sowie das Ziehen von angemessenen naturwissenschaftlichen Schlussfolgerungen (OECD, 2017).

## 2.2. Quantenphysik und naturwissenschaftliche Grundbildung

An das Vorherige anknüpfend stellt sich auch für das Themenfeld Quantenphysik die Frage: Was sollen Lernende darüber lernen (Müller und Wiesner, 2002). Einen Rahmen für mögliche, durch den Unterricht entwickelte Kompetenzen definiert das Konstrukt der naturwissenschaftlichen Grundbildung. Ebenso macht die öffentliche Wahrnehmung von Quantenphysik auf mögliche Schwerpunkte eines Unterrichts aufmerksam:

Quantenphysik wird innerhalb der breiten Öffentlichkeit als naturwissenschaftliche Kuriosität, ohne jeglichen Nutzen für technische Anwendungen wahrgenommen (QUTEGA, 2017). Diese Wahrnehmung wird sowohl durch esoterische Praktiken wie die Quantenheilung als auch durch eine Mystifizierung der Quantenphysik unterstützt. Bei dieser Mystifizierung wird die Quantenphysik als eine selbst für ExpertInnen unverständliche Theorie beschrieben (Passon et al., 2020).

Die gegenwärtige Entwicklung von Quantensensoren oder dem Quantencomputer (2. Quantenrevolution) zeichnet jedoch ein ganz anderes Bild: Die Quantenphysik ist Gegenstand des gegenwärtigen Diskurses über Wissenschaft und Technik (Pospiech, 2021).

Naturwissenschaftliche Grundbildung soll, wie bereits ausgeführt, eine Partizipation an diesem Diskurs ermöglichen. Dazu muss der naturwissenschaftliche Unterricht die drei oben genannten Teilkompetenzen bei Lernenden entwickeln. Fraglich ist jedoch, ob alle drei Kompetenzen gleich relevant für einen Quantenphysikunterricht sind oder ob diese nicht vielleicht bereits durch den vorherigen Physikunterricht entwickelt werden können.

### **Design und Evaluation naturwissenschaftlicher Untersuchungen**

Die Methodik des Experimentierens selbst ist nicht genuin quantenphysikalisch, sondern obliegt denselben Vorgehensweisen und Gütekriterien wie in der klassischen Physik. Das Experimentieren in der Quantenphysik folgt damit ebenso wie in der klassischen Physik dem Ziel, eine „Kohärenz zwischen Theorien, Gedanken, Praktiken, Materialien und Zeichen herzustellen“ (Höttecke und Rieß, 2015, S.132).

### **Interpretation von Daten und empirischer Evidenz**

Die Interpretation von Daten und empirischer Evidenz ist Teil des Prozesses zur Erzeugung der Kohärenz und geschieht im Licht des jeweiligen Theoriegebäudes (Höttecke und Rieß, 2015). Somit besteht zwangsläufig ein Unterschied zwischen der Interpretation von Messdaten in der klassischen Physik und der Quantenphysik, da sich die Theoriegebäude unterscheiden.

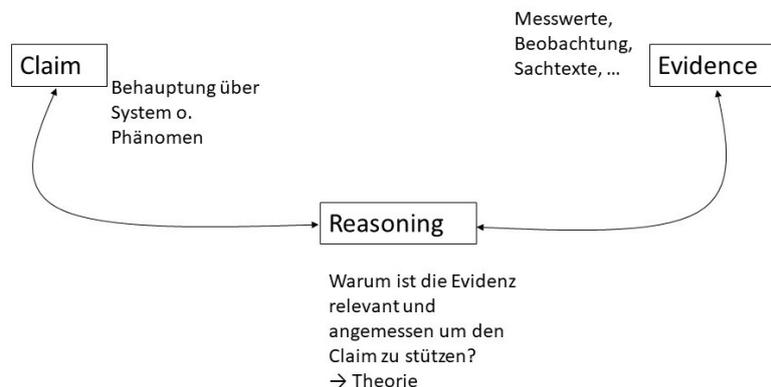
### **Anbieten naturwissenschaftlicher Erklärungen**

Eine substanzieller Unterschied zum vorherigen Unterricht über klassischer Physik zeigt sich jedoch bei der Erklärung quantenphysikalischer Phänomene: Viele Phänomene der Quantenphysik wirken vom Standpunkt der klassischen Physik widersprüchlich und geradezu absurd. Zudem zwingt das quantenphysikalische Theoriegebäude zu einer Aufgabe der Konzepte Determinismus, Lokalität und lokaler Realität, die sich in der klassischen Physik sowie dem Alltag bewähren (Friebe, 2018; Müller und Wiesner, 2002). Daher bedarf es neuer Erklärungsansätze, um quantenphysikalische Phänomene konsistent und widerspruchsfrei zu erklären (Küblbeck und Müller, 2002; Scholz et al., 2020). Neben dieser erkenntnistheoretischen Perspektive erscheint auch aus der Perspektive konstruktivistischer Lerntheorien ein Fokus auf dem Formulieren von Erklä-

rungen sinnvoll, da das eigenständige Formulieren von Erklärungen bei Lernenden ein tiefer gehendes Konzeptverständnis voraussetzt (Berland und Reiser, 2009; Osborne und Patterson, 2011).

## 2.3. Zum Begriff der naturwissenschaftlichen Erklärung

Grundsätzlich führen naturwissenschaftliche Erklärungen (im Folgenden Erklärungen) die gemachten Beobachtungen auf grundlegende Prinzipien eines naturwissenschaftlichen Theoriegebäudes zurück (Berland und Reiser, 2009; Hempel und Oppenheim, 1948; Kulgemeyer und Tomczyszyn, 2015). Ein für die unterrichtliche Praxis adaptiertes Begriffsverständnis der Erklärung lässt sich bei McNeill und Krajcik (2008) finden. In diesem werden Erkenntnisse der Forschung zum naturwissenschaftlichen Argumentieren und Erklären synergetisch zusammengefasst, sodass ein eindeutiges, erlernbares und überprüfbares Framework definiert werden kann (Abb. 2.1). Eine Erklärung wird



**Abb. 2.1.:** Aufbau einer naturwissenschaftlichen Erklärung nach McNeill und Krajcik (2008).

hier als ein Gefüge von drei Bestandteilen aufgefasst: *Claim*, *Reasoning* und *Evidence*. Zunächst einmal bedarf eine Erklärung einer Behauptung oder Schlussfolgerung über das beobachtete Phänomenen (**Claim**). Zur Stützung der Behauptung wird Evidenz benötigt (**Evidence**). Dies können empirische Daten sein, die selbst aufgenommen oder

bereitgestellt wurden. Es kann aber auch die Beobachtung selbst oder anderes Material wie Texte und dergleichen sein. Um dieser Funktion nachzukommen, muss die Evidenz einerseits angemessen, d. h. relevant sowie hilfreich sein die Behauptung zu stützen und andererseits suffizient, also hinreichend überzeugend sein, sodass in der Erklärung nach Möglichkeit mehrere Daten zu Rate gezogen werden sollten. Eine Behauptung und Evidenz verbindende Funktion hat das **Reasoning**, indem es unter Zuhilfenahme naturwissenschaftlicher Prinzipien begründet, warum die Evidence den Claim unterstützt (McNeill und Krajcik, 2008).

### 2.4. Die Natur quantenphysikalischer Erklärungen

Die Art und Weise über Quantenphysik zu sprechen unterscheidet sich grundlegend von den Sprechweisen in der klassischen Physik (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2018; Küblbeck und Müller, 2002; Lautesse et al., 2015). Die klassische Physik ist grundsätzlich von der Annahme geprägt, über Objekte zu sprechen, „*die eine von den wahrnehmenden Subjekten unabhängige «reale Existenz beanspruchen»*“ (Einstein, 1948, S.321), wobei sich der Begriff der Realität nicht auf materielle Eigenschaften beschränkt. Dies wird am Beispiel des elektrischen Feldes deutlich. Diesem kann keine materielle Eigenschaft zugeschrieben werden und dennoch wird dessen Existenz auch ohne die Vermessung durch eine Probeladung nicht in Frage gestellt (Zeh, 2012). Im Allgemeinen gilt ein System  $S_1$ , welches sich in einem endlichem Gebiet der Raumzeit befindet, als real. Informationen zwischen dem System  $S_1$  und einem weiteren realen System  $S_2$  können maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausgetauscht werden (relativistische Kausalität). Daraus ergibt sich die von Einstein (1948) verfochtene Konsequenz des lokalen Realismus: Eine Veränderung in  $S_1$  ruft keine instantane Veränderung in  $S_2$  hervor, wenn diese raumzeitlich getrennt sind. Wäre dem so, dann müsste sich die Information mit Überlichtgeschwindigkeit ausbreiten (Alain Aspect in Gisin, 2014). In der Quantenphysik hingegen erscheinen die Charakteristika klassisch-physikalischer Erklärungen problematisch. Spätestens die Messung an raumzeitlich getrennten, aber verschränkten Quantensystemen 1 und 2 zeigt, dass eine Veränderung auf System 1 sehr wohl eine Auswirkung auf System 2 hat (Gisin, 2014). Somit ergibt sich die Frage, ob die Einsteinschen Prinzipien auch in der Quantenphysik ihre Gültigkeit haben?

Die Aufgabe des Prinzips der Realität hat nach Alain Aspect fundamentale Folgen: „Die Infragestellung des Konzepts der physikalischen Realität an sich überzeugt mich nicht, denn mir scheint, dass die Rolle des Physikers darin besteht, die Realität der Welt zu beschreiben, und nicht nur in der Fähigkeit zum Ausdruck kommt, die von Messgeräten festgestellten Ergebnisse vorherzusagen“ (in Gisin, 2014, S. VII).

Und auch die Aufgabe der relativistischen Kausalität erscheint nicht angemessen, da die experimentellen Bestätigung der Relativitätstheorie ein Festhalten an der Geschwindigkeitsgrenze unterstützen.

Wenn also die bestehenden Prinzipien unantastbar sind, muss der bestehende Prinzipiensatz aus Realität und relativistischer Kausalität um ein drittes Prinzip ergänzt werden und zwar um einen fundamentalen Indeterminismus: Es ist prinzipiell, also nicht nur thermodynamisch oder komplexitätsbedingt unmöglich, das Ergebnis eines einzelnen Experimentes vorherzusagen, wenn quantenphysikalisch mehrere Ergebnisse möglich sind. Allerdings sind die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Ergebnisse präzise vorhersagbar. Bei hinreichend großer Messwiederholung entsprechen diese den gemessenen relativen Häufigkeiten. Als Konsequenz dessen muss das Konzept der Lokalität aufgegeben werden, da der Zufall der Quantenphysik nicht-lokal ist. Das bedeutet, dass *derselbe* Zufall die Ergebnisse in zwei, raumzeitlich getrennten Systemen  $S_1$  und  $S_2$  bestimmt.

Ogleich das Prinzip der Realität in der Quantenphysik erhalten bleibt, werden die klassisch-physikalischen Vorstellungen herausgefordert, da nur unter bestimmten Bedingungen über reale Objekte gesprochen werden kann. Die Erklärungen in der Quantenphysik folgen speziellen Regeln, die von ihrem mathematischen Formalismus und im Besonderen dessen Interpretation geprägt sind.

Die Deutung mathematischer Formalismen mit komplexen Zahlen stellt zwar keine genuin quantenphysikalische Herausforderung dar, doch ist der Rückgriff auf komplexe Zahlen in klassisch-physikalischen Rechnungen nur ein Kunstgriff zur Erleichterung der Rechnungen. Im Prinzip benötigt die klassische Physik keine komplexen Zahlen. So lassen sich beispielsweise mechanische oder elektromagnetische Wellen anstelle komplexwertiger Exponentialfunktion mit Hilfe der Sinus- und Kosinusfunktionen darstellen. Daher sind Interpretationen der klassischen, komplexwertigen Entitäten nicht nur konsensual, sondern offensichtlich (Friebe, 2018; Mohan, 2020). In der Quantenphysik gilt dies nicht. Vielmehr liegen unterschiedlich Deutungen und im Falle der *Kopenha-*

*gener Deutung* verschiedene Schattierungen derselben Deutung vor, die verschiedene philosophische Strömungen widerspiegeln (z.B. Positivismus oder Neo-Kantianismus; Camilleri, 2009; Friebe, 2018; Pade, 2012b)<sup>1</sup>.

Die grundsätzliche Herausforderung in der Interpretation der Quantenphysik besteht darin, dass der komplexwertige Formalismus im Hilbertraum aus sich heraus keine Verbindung zur realen, im Experiment vermessbaren Welt schafft. Zudem beschreibt nicht jeder selbst-adjungierte Operator eine korrespondierende physikalische Größe in der Realität (Friebe, 2018; Pade, 2012b). Der wissenschaftliche Erfolg der Quantenphysik zeigt aber auch, dass es durchaus eine pragmatische Deutung gibt. Diese, bei Pade (2012) als Standardinterpretation bezeichnete Deutung, enthält im Kern folgende Aussagen:

- Im Gegensatz zur Annahme Niels Bohrs existiert etwas, das man etwas unscharf als Quantenwelt nennen kann (Pade, 2012b).
- Die vollständige Beschreibung eines quantenphysikalischen Systems liefert der Zustandsvektor  $|\Psi\rangle$  im Hilbertraum. Dieser repräsentiert jedoch keine realen Eigenschaften (Pade, 2012b).
- Die Wahrscheinlichkeit an einem quantenphysikalischen System mit dem Gesamtzustand  $|\Psi\rangle$  den Messwert mit dem verknüpften Zustand  $|\phi\rangle$  zu finden, wird durch das Betragsquadrat des Skalarprodukts des zu messenden Zustandsvektors  $|\langle\phi|\Psi\rangle|^2$  mit dem Gesamtzustandsvektor bestimmt. Dieses Vorgehen zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit wird als *Bornsche Regel* bezeichnet (Pade, 2012a).
- Mathematisch kann die Messung an einem quantenphysikalischen Zustand als die Anwendung eines selbst-adjungierten Operators auf den Zustandsvektor beschrieben werden. Dabei reduziert sich der Zustandsvektor auf den mit dem Messwert korrespondierenden Einheitsvektor. Welcher Messwert bzw. welcher Basisvektor bei einer Messung realisiert wird, kann nicht vorhergesagt werden (Indeterminismus, Pade, 2012a)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Entgegen der von Heisenberg in den 1950er Jahren veröffentlichten Darstellung, existiert keine kohärente und eindeutige Fassung der Kopenhagener Deutung, sodass bereits die engsten Mitarbeiter Niels Bohrs eine unterschiedliche Auffassung des Komplementaritätsprinzips vertraten (Camilleri, 2009).

<sup>2</sup>**Anm.:** Die Zustandsreduktion wird hier als verkürzte Darstellung des komplexen Prozesses der Messung in der Quantenphysik verstanden, der im Bilde von Neumanns eine Verschränkung des Messapparates mit dem Quantensystem zur Folge hat (Pade, 2012b).

Dieser Interpretation folgend ergeben sich Randbedingung für die Eigenschaften von Quantenobjekten:

- Der Zustandsvektor enthält zwar alle Information über ein quantenphysikalisches Objekt / System. Allerdings ist durch diesen das Ergebnis eines quantenphysikalischen Messprozesses zur Beobachtung realer Systemeigenschaften in der Regel nur eindeutig festgelegt, wenn er Eigenvektor des Messoperators ist (Heisenberg, 1973; Pade, 2012b). Er liefert jedoch im Sinne eines Vorhersagekatalogs Wahrscheinlichkeiten, mit denen eine Eigenschaft gemessen werden kann (Schrödinger, 1935b).
- Eine moderne Darstellung beschreibt die Zuordnung von Eigenschaften durch eine quantenphysikalische Messung als eine Verschränkung des physikalischen Systems mit der Messapparatur, was außer bei der zerstörungsfreien Quantenmessung zu einem neuen Systemzustand führt. Somit können Eigenschaften nicht mehr unabhängig vom Messapparat zugeordnet werden. Dies widerspricht der lokalen Realität der klassischen Physik (Friebe, 2018; Pade, 2012b).
- Besondere Eigenschaften von Quantenobjekten sind nicht unabhängig voneinander. Der Zusammenhang kanonisch konjugierter Variablen wird durch die Unbestimmtheitsrelation beschrieben (Heisenberg, 1973).

Dies hat zur Folge, dass das Verständnis von physikalischen Größen, deren Veränderungen in der klassisch-physikalischen Modellbildung kontinuierlich und deterministisch vorhersagbar sind, aufgegeben werden muss.

### 2.5. Quantenphysikalische Erklärungen - Eine andere Form des Reasoning

Ein Aufgeben des klassischen Eigenschaftsbegriffes führt zu einem Unterschied zwischen quantenphysikalischer und klassisch-physikalischer Erklärung. Während in der klassischen Physik Phänomene formal durch die kontinuierliche Veränderung physikalischer Größen (reale Eigenschaften) beschrieben werden, ist eine solche Beschreibung in der Quantenphysik ohne Bedeutung. Hier führt die quantenphysikalische Messung möglicherweise zu einer diskontinuierlichen und irreversiblen Veränderung der

Zustandsfunktion. Erst in diesem Fall kann dem Quantenobjekt eine reale Eigenschaft attribuiert werden. Die Konzepte Determinismus, Realität und Lokalität, die die klassische Physik und die Alltagserfahrung bestimmen, gelten in der Quantenphysik nicht mehr. Somit müssen in der Quantenphysik andere, die Erklärung bestimmende Grundprinzipien genutzt werden. Mit Blick auf die Beschreibung der Erklärung von McNeill und Krajcik (2008) zeigt sich, dass sich klassisch-physikalische und quantenphysikalische Erklärung im Reasoning unterscheiden:

- **Evidence:** Messwerte und Beobachtungen sind grundsätzlich reale Entitäten und unterliegen somit der klassischen Physik. Daher ist Evidence grundsätzlich klassisch-physikalisch.
- **Reasoning:** Reasoning rekurriert auf physikalischen Grundprinzipien / Axiomen. In der Quantenphysik unterscheiden sich diese fundamental von denen der klassischen Physik. Somit muss sich auch quantenphysikalisches Reasoning fundamental von dem der klassischen Physik unterscheiden.
- **Claim:** Claim ist abhängig vom Subjekt und kann frei gewählt werden. So können beispielsweise für ein quantenphysikalisches Phänomen klassische Claims formuliert werden, wobei diese jedoch nicht durch Evidence gestützt werden können, weil sie nicht zu der passenden Phänomenwelt gehören.

Damit sollten Lernende ein quantenphysikalisches Reasoning erlernen, um eigenständig quantenphysikalische Erklärungen zu formulieren, was wiederum mit einem tiefer gehenden Konzeptverständnis von Quantenphysik einhergeht (s. o.).

Im höchstens Maße präzise und unmissverständlich gelingt ein quantenphysikalisches Reasoning in der Sprache der Mathematik (Friebe, 2018; Pade, 2012a). Das Erlernen eines mathematischen Reasoning erscheint jedoch unter zwei Gesichtspunkten problematisch:

1. Untersuchungen im Kontext der universitären Lehre zeigen, dass die Fähigkeit quantenphysikalische Rechnungen durchzuführen, nicht notwendigerweise mit der Entwicklung eines quantenphysikalischen Grundverständnisses einhergeht und Lernende oftmals in klassisch-geprägten Denkmustern verbleiben (Koopman et al., 2008; Müller, 2003).

2. Lernende der Sekundarstufe II verfügen nicht über die notwendigen, mathematischen Fähigkeiten, die für den Rechenapparat der Quantenphysik nötig sind. Für dessen Einübung ist ein zusätzlicher Zeitaufwand erforderlich, der in der Schule nicht verfügbar ist (Stadermann et al., 2019).

Nicht-mathematische Reasoningformen können diese Schwierigkeiten überwinden und scheinen sowohl für Lernende der Sekundarstufe 2 als auch für Studierende der Studiengangphase lernförderlicher zu sein als mathematische Formen (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Küblbeck und Müller, 2002; Lautesse et al., 2015; Scholz et al., 2020).

### 2.5.1. Welle-Teilchen Dualismus

Eine physikhistorisch bedeutsame Form des nicht-mathematischen, quantenphysikalischen Reasoning ist der Welle-Teilchen Dualismus, welcher eine Sonderform des Bohrschen Komplementaritätsprinzips darstellt. Als Konsequenz *„kann das unter verschiedenen Versuchsbedingungen gewonnene Material nicht in einem einzelnen Bilde erfasst werden; es ist vielmehr als komplementär in dem Sinne zu betrachten, daß erst die Gesamtheit der Phänomene die möglichen Aufschlüsse über die Objekte erschöpfend wiedergibt“* (Bohr, 1983, S.92). Im Bild des Welle-Teilchen Dualismus heißt dies, dass einzelne Quantenobjekte, wie Elektronen oder Photonen in verschiedenen Experimenten komplementäres Wellen- oder Teilchenverhalten zeigen. Die Beobachtung dieses Phänomens lässt sich dann mittels Analogiebildung zur klassischen Welle oder zum klassischen Teilchen erklären.

Diese Analogiebildung ist aber aus verschiedenen theoretischen Aspekten problematisch:

- Der mathematische Formalismus der Quantenphysik enthält keine Annahmen über Wellen oder Teilchen. Es existiert lediglich der Zustandsvektor. Daher erlaubt die Quantentheorie an sich keine Ontologie in Welle und Teilchen (Bunge, 1968; Lautesse et al., 2015).
- Die Deutung der Orts-Impuls Unschärfe als Ausdruck des Dualismus ( $\Delta x$  als Teilcheneigenschaften und  $\Delta p$  als delokalisierte Welle) steht im Widerspruch zu der

Bornschen Wahrscheinlichkeitsdeutung, welche  $\Delta p$  und  $\Delta x$  als der Theorie inhärente Ungenauigkeit der Präparation des Zustands auffasst (Bunge, 1968).

- Obwohl die dualistische Analogie fruchtbar für die Weiterentwicklung der Quantenphysik war, erweist sie sich als inkonsistent, denn das Verhalten von Quantenobjekten kann theoretisch nicht widerspruchsfrei mit klassisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden, sodass eine Ableitung klassischer Sprechweisen ein semantischer Fehlschluss ist (Bunge, 1968)

Weiterhin erscheint der Welle-Teilchen Dualismus aus didaktischer Sicht ungeeignet, da dessen Verwendung die wohl dokumentierte Alternativvorstellung des naiven Welle-Teilchen Dualismus evoziert. In diesem werden Quantenobjekte als Hybrid aus Welle und Teilchen aufgefasst, welches sich abhängig vom experimentellen Kontext als klassische Welle oder klassisches Teilchen zeigt. Dieser Dualismus ermöglicht das Festhalten an einem klassischen Reasoning. Lediglich eine Kontextsensitivität der Quantenobjekte muss ergänzt werden (siehe Kap. 4.1.3).

Bunge (1968) kommt daher zu folgendem Schluss: „*The opto-mechanical analogy [der Welle-Teilchen Dualismus, Anm. Autor], which used to be a fertile hypothesis, should be abandoned for it has outlived his purpose by becoming a source of confusion*“ (S. 275).

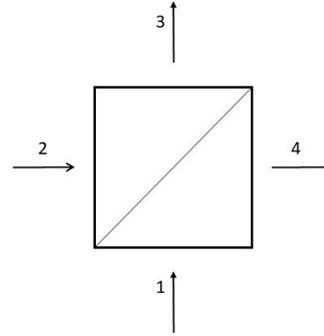
Vielmehr bedarf es einer konsistenten sowie anschlussfähigen Form des nicht-mathematischen Reasoning, welche keinen Rückgriff auf klassisch-physikalische Konzepte erfordert.

### 2.5.2. Grundprinzipien der Quantenphysik als Bestandteile quantenphysikalischen Reasoning

Die Zustandsfunktion und die korrespondierenden mathematischen Operationen sind unstrittig Dreh- und Angelpunkt eines quantenphysikalischen Reasoning, da nur hier eindeutige und widerspruchsfreie Aussagen getroffen werden können. Allerdings lassen sich aus der Systematik dieser quantenphysikalischen Rechenweise drei Grundprinzipien ableiten, mit deren Hilfe prototypische Experimente der Schulquantenphysik, wie bspw. das Strahlteilerexperiment oder Interferenzexperimente fachlich angemessen und ohne Rückgriff auf klassische Analogien sowie den mathematischen Formalismus

erklärt werden können. Damit kann eine klare Abgrenzung zur klassischen Physik gelingen (Feynman et al., 2007; Küblbeck und Müller, 2002; Scholz et al., 2020).

Der optische 50/50 Strahlteiler ist eines der konzeptionell einfachsten Experimente zur Demonstration der quantenphysikalischen Eigenschaften von Licht (Passon und Grebe-Ellis, 2015). In diesem werden bereits zwei wesentliche Grundprinzipien der Quantenphysik deutlich: Die Probabilistik und die Superposition.



Grundsätzlich erzeugt der Strahlteiler (Abb. 2.2) aus dem Eingangszustand  $|\Psi\rangle_{in}$

**Abb. 2.2.:** Ein- und Ausgänge des optischen 50/50 Strahlteilers.

$$|\Psi\rangle_{in} = |1\rangle_1 |0\rangle_2 \rightarrow |\Psi\rangle_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |1\rangle_3 |0\rangle_4 + e^{-i\frac{\pi}{2}} |0\rangle_3 |1\rangle_4 \right) \quad (2.1)$$

den Ausgangszustand  $|\Psi\rangle_{out}$ . Dieser entsteht als Superposition der beiden Unterzustände  $|1\rangle_3 |0\rangle_4$  bzw.  $|0\rangle_3 |1\rangle_4$ . Die Unterzustände repräsentieren die möglichen Ergebnisse der Wechselwirkung des Lichts mit dem Strahlteiler: Ein Photon an Mode (3) und keines an (4) (= *Transmission*) sowie ein Photon an Mode (4) und keines an (3) (= *Reflexion*). Gewichtet werden die Unterzustände mit Hilfe der Funktion,

$$c_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e^{-i \cdot 0} \text{ bzw. } c_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi}{2}}, \quad (2.2)$$

die als *Wahrscheinlichkeitsamplitude* bezeichnet wird. Allgemein lässt sich diese als

$$c(\varphi) = \sqrt{P} \cdot q(\varphi), \quad (2.3)$$

also als eine Funktion der Phase des Unterzustands und die Wurzel der jeweiligen Messwahrscheinlichkeit, schreiben.

Nach der *Bornschen Regel* würde ein Photodetektor am Ausgang 3 mit einer Wahr-

scheinlichkeit von

$$P(3) = |{}_3\langle 1|\Psi\rangle_{out}|^2 = \left|\frac{1}{\sqrt{2}}\right|^2 = \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

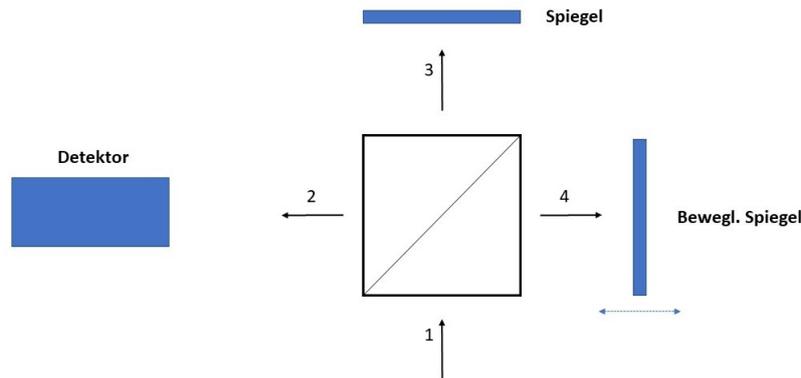
klicken. Analog würde ein Detektor in Ausgang 4 ebenfalls mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% klicken (Loudon, 2010).

An diesem Beispiel werden zwei grundlegende Prinzipien der Quantenphysik deutlich:

1. Der probabilistischen Deutung des Zustandsvektors  $|\Psi\rangle$  folgend kann am optischen Strahlteiler nicht vorhergesagt werden, an welchem der Ausgänge ein einzelnes Photon detektiert wird. Es ist lediglich möglich, eine Wahrscheinlichkeit  $P(3)$  respektive  $P(4)$  anzugeben. Diese intrinsische **Probabilistik** ist ein Grundprinzip der Quantenphysik, welches in der klassischen Physik nicht existiert und daher unverzichtbar für ein quantenphysikalisches Reasoning ist (Feynman et al., 2007; Küblbeck und Müller, 2002; Pospiech, 2021; Scholz et al., 2020).
2. Bei der Betrachtung des Ausgangszustandes  $|\Psi\rangle_{out}$  wird ein weiteres Grundprinzip deutlich: Der Strahlteiler erzeugt aus dem Eingangszustand (ein Photon am Eingang 1, keines an Eingang 2) einen Superpositionszustand, als Überlagerung der klassischen Möglichkeiten *Reflektiert* und *Transmittiert*. Für jeden dieser superponierten Unterzustände existiert eine Wahrscheinlichkeitsamplitude, aus der die Wahrscheinlichkeit für das Klicken des entsprechenden Detektors berechnet werden kann (Feynman et al., 2007; Loudon, 2010; Pade, 2012a). Dieses Beispiel zeigt prototypisch, dass der Zustandsvektor  $|\Psi\rangle_{out}$  zwar formal alle Informationen über den Ausgangszustand enthält, es aber unmöglich ist vorherzusagen, welcher dieser Unterzustände im Falle einer Messung realisiert wird. An diesem einfachen Beispiel wird bereits der Unterschied zum Superpositionsprinzip in der klassischen Mechanik oder Elektrodynamik deutlich. Diesen Kontrast zur klassischen Physik stellt Schrödinger (1935a) überspitzt dar, als er einen „burlesken Fall“[!] konstruiert, in dem eine Katze in der Superposition aus Leben und Tot betrachtet wird. Daher ist auch die **Superposition** ein fundamentales Grundprinzip der Quantenphysik und unverzichtbar für ein quantenphysikalisches Reasoning (Feynman et al., 2007; Pospiech, 2021; Scholz et al., 2020).

Mit der Betrachtung von prototypischen Interferenzexperimenten der Schulquantenphy-

sik, wie dem Doppelspaltexperiment oder dem Mach-Zehnder Interferometer (z. B. Bruns und Rode, 2019), wird deutlich, dass neben der **Probabilistik** und der **Superposition** als der Theorie inhärente Grundprinzipien, die **Interferenz** als ein weiteres, interpretatorisches Grundprinzip für die Erklärung prototypischer Schulexperimente benötigt wird (Feynman et al., 2007; Pospiech, 2021; Scholz et al., 2020; Zeilinger, 2000).



**Abb. 2.3.:** Schematische Darstellung des Michelson Interferometers.

Durch das Aufstellen von Spiegeln an den Ausgängen 2 und 3 des optischen Strahlteilers entsteht ein Michelson Interferometer (Abb. 2.3). Die Spiegel haben nun zur Folge, dass der Zustand auf den Strahlteiler zurück reflektiert wird und erneut ein Superpositionszustand

$$|\Psi\rangle_{final} = c_1 |\psi\rangle_1 + c_2 |\psi\rangle_2 \quad (2.5)$$

erzeugt wird<sup>3</sup>. Dem Superpositionsprinzip folgend müssen nun alle Möglichkeiten betrachtet werden, die dazu führen würden, dass ein Photon potenziell in den Ausgängen 1 oder 2 gemessen werden kann.

1. Transmission am Strahlteiler → Reflexion am Spiegel → Transmission in Ausgang 1
2. Transmission am Strahlteiler → Reflexion am Spiegel → Reflexion in Ausgang 2

<sup>3</sup>Die Eingänge 1 und 2 sind ebenfalls die Ausgänge des Interferometers

3. Reflexion am Strahlteiler → Phasenverschiebung → Reflexion am Spiegel → Transmission in Ausgang 2
4. Reflexion am Strahlteiler → Phasenverschiebung → Reflexion am Spiegel → Reflexion zu Ausgang 1

Die letzten beiden Möglichkeiten berücksichtigen dabei eine Phasenverschiebung von  $\Delta\varphi$  durch die Verschiebung des Spiegels. Zur Sicherung der Energieerhaltung wird angenommen, dass bei der Reflexion am Strahlteiler der reflektierte Unterzustand einen Phasensprung von  $\pi/2$  erhält (Loudon, 2010), dass der transmittierte Unterzustand keinen Phasensprung erhält und dass der Phasensprung an den Endspiegeln vernachlässigt wird<sup>4</sup>, so wird

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{final} &= \frac{1}{2} \left[ \underbrace{|1\rangle_1}_{\text{Möglichkeit 1}} + \underbrace{e^{i\frac{\pi}{2}} |1\rangle_2}_{\text{Möglichkeit 2}} + \underbrace{e^{i\frac{\pi}{2}} \cdot e^{i\Delta\varphi} |1\rangle_2}_{\text{Möglichkeit 3}} + \underbrace{e^{i\pi} \cdot e^{i\Delta\varphi} |1\rangle_1}_{\text{Möglichkeit 4}} \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + \underbrace{e^{i\pi}}_{=-1} \cdot e^{i\Delta\varphi} \right) |1\rangle_1 + \left( e^{i\frac{\pi}{2}} + e^{i\frac{\pi}{2}} \cdot e^{i\Delta\varphi} \right) |1\rangle_2 \right] \\
 &= \underbrace{\frac{1 - e^{i\Delta\varphi}}{2}}_{\text{Wahrscheinlichkeitsamplitude 1}} |1\rangle_1 + \underbrace{\frac{(1 + e^{i\Delta\varphi}) e^{i\frac{\pi}{2}}}{2}}_{\text{Wahrscheinlichkeitsamplitude 2}} |1\rangle_2 \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

als schlussendlicher Zustand an den Ausgängen des optischen Strahlteilers erhalten. Auffällig ist bereits an dieser Stelle, dass die Wahrscheinlichkeitsamplitude für jeden der Ausgänge, im Gegensatz zum einfachen Strahlteilerexperiment, nun eine Funktion der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  ist.

Gemäß der *Bornschen Regel* wird im Detektor in Ausgang 2 ein Photon mit der Wahr-

---

<sup>4</sup>Jeder der vier zu berücksichtigenden Beiträge enthält einen Phasenbeitrag von  $e^{i\pi}$  durch die Reflexion am Endspiegel. Da aber nur der Phasenunterschied zwischen den Unterzuständen die Verschiebung des Interferenzmusters bestimmt, ist dieser Faktor irrelevant.

scheinlichkeit

$$\begin{aligned}
 P(2) &= |{}_2\langle 1|\Psi\rangle_{final}|^2 \\
 &= \left| \frac{1}{2} \left[ (1 - e^{i2\Delta\varphi}) \underbrace{{}_2\langle 1|1\rangle_1}_{=0} + (1 + e^{i\Delta\varphi}) e^{i\frac{\pi}{2}} \underbrace{{}_2\langle 1|1\rangle_2}_{=1} \right] \right|^2 \\
 &= \frac{1}{4} \left[ 1 + e^{i\Delta\varphi} + e^{-i\Delta\varphi} + 1 \right] \underbrace{e^{i(\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{2})}}_{=1} \\
 &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{e^{i\Delta\varphi} + e^{-i\Delta\varphi}}{2} \right] \\
 &= \frac{1 + \cos(\Delta\varphi)}{2} \\
 &= \frac{1 + 2\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - 1}{2} \\
 &= \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

gemessen. Mit einer analogen Rechnung wird für den Ausgang 1 eine Wahrscheinlichkeit von

$$P(1) = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \tag{2.8}$$

erhalten, sodass die Wahrscheinlichkeit generell ein Photon zu detektieren

$$\begin{aligned}
 P(1 \text{ oder } 2) &= \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\
 &= 1 \tag{2.9}
 \end{aligned}$$

beträgt. Es geht somit keine Energie verloren (Loudon, 2010).

Die Rechnung macht deutlich, dass eine phasenabhängige Klickwahrscheinlichkeit und damit eine phasenabhängige Zählrate erhalten wird. Diese wird in Analogie zur Wellenoptik am Michelson Interferometer als Interferenz interpretiert. Allerdings wird diese nicht durch die Überlagerung von realen elektromagnetischen Wellenamplituden hervorgerufen, sondern durch die phasenabhängige Wahrscheinlichkeitsamplituden im Zustandsvektor. Die Interferenz unterstreicht somit die fundamentale Stellung der Zustandsfunktion innerhalb der Quantenphysik. Interferenzeffekte sind daher spezifische

Effekte der Quantenphysik (Feynman et al., 2007; Scholz et al., 2020; Zeilinger, 2000). Insgesamt heben die drei Grundprinzipien **Probabilistik**, **Superposition** und **Interferenz (PSI)** die grundlegende Rolle der Zustandsfunktion in der Quantenphysik hervor. Sie ermöglichen somit ein Reasoning mit Hilfe der Zustandsfunktion ohne den mathematischen Formalismus zu bemühen. Ein solches Reasoning ist daher sowohl indeterministisch als auch nicht-lokal und demonstriert deshalb den Unterschied zwischen klassisch-physikalischer und quantenphysikalischer Erklärung. Ein Abgleich mit den gegenwärtigen Lehrplänen in Kap. 3.1 wird zeigen, dass PSI ausreicht die prototypischen Experimente der Schulquantenphysik fachlich angemessen und widerspruchsfrei zu erklären, indem wie folgt vorgegangen wird:

1. Beschreibung der Präparation eines Superpositionszustandes
2. Identifikation der Ursache für das Auftauchen von Phasenunterschieden zwischen den Unterzuständen (z. B. Phasensprünge an Bauteilen oder Flugzeitunterschiede)
3. Berechnung der Wahrscheinlichkeit nach der Bornschen Regel

### 2.5.3. PSI-Reasoning und Wesenszüge der Quantenphysik

Das Reasoning mit PSI, im Folgenden PSI-Reasoning genannt, ist nicht die einzige Form eines fachlich angemessenen, nicht-mathematischen Reasoning. Bereits in den 2000er Jahren wurde von Küblbeck und Müller (2002) mit den *Wesenszügen der Quantenphysik* eine Form des quantenphysikalischen Reasoning ohne Welle-Teilchen Dualismus vorgeschlagen. In diesem Ansatz werden die *stochastische Vorhersagbarkeit*, die *Fähigkeit zur Interferenz*, die *Eindeutigkeit der Messergebnisse* sowie die *Komplementarität* als Wesenszüge ausgezeichnet und damit ein Narrativ für den Unterricht bereitgestellt.

PSI-Reasoning kann zwar in Kongruenz mit den Wesenszügen gebracht werden, doch unterscheidet es sich von den Wesenszügen, weil keine spezifischen Objekteigenschaften im Fokus stehen. Vielmehr werden spezifische Denkweisen genutzt, die prototypisch für die Quantenphysik sind. Es werden somit nicht nur Merkmale genutzt, die phänomenologisch zugänglich sind, sondern strukturelle Fundamente der Quantentheorie (Probabilistik und Superposition) ergänzt um eine phänomenologische Folge dieser Fundamente (Interferenz). PSI geht somit über eine bloße Beschreibung der Tatsache

hinaus, dass „Quantenobjekte zur Interferenz“ gebracht werden können und führt die Wahrscheinlichkeitsamplitude und damit die Zustandsfunktion als interferierende Entität an.

### 2.6. Zusammenfassung

Das vorgeschlagene Ziel für einen Quantenphysikunterricht ist das Erwerben der Kompetenz, quantenphysikalische Phänomene angemessen erklären zu können. Die Überlegungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das eigenständige Formulieren naturwissenschaftlicher Erklärungen stellt nach OECD (2017) eine der Kompetenzen einer naturwissenschaftlich-grundgebildeten Person dar.
- Das Themenfeld Quantenphysik zeichnet sich durch eine von der klassischen Physik stark abweichende Art und Weise aus, wie Erklärungen von Phänomenen gebildet werden. Diese stellen die Analyse abstrakter Systemzustände in den Mittelpunkt. Das hat zur Folge, dass physikalische Größen und Eigenschaften ihre Bedeutung verlieren. Im Bild von McNeill und Krajcik (2008) unterscheiden sich klassisch-physikalische und quantenphysikalische Erklärungen durch ihre Art des Reasoning.
- Lernende besitzen nicht die nötigen mathematischen Fähigkeiten für die mathematische Analyse von Zustandsfunktionen. Zudem erlaubt der begrenzte Zeitrahmen des Physikunterrichts nicht das Einüben solcher Fähigkeiten. Daher ist ein nicht-mathematisches, quantenphysikalisches Reasoning nötig. Der prominente Welle-Teilchen Dualismus, der ein Reasoning über die Bildung von Analogien zu klassischen Wellen oder klassischen Teilchen ermöglicht, ist jedoch aus physikalisch / philosophischer Sicht ungeeignet, da keine klare Abgrenzung zur klassischen Physik erfolgt. Aus didaktischer Sicht ist der Welle-Teilchen Dualismus problematisch, da er die Ausbildung des naiven Welle-Teilchen Dualismus hervorruft. Siehe Kap. 4.1.3 für eine ausführliche Beschreibung.
- Die quantenphysikalischen Grundprinzipien **Probabilistik**, **Superposition** und **Interferenz (PSI)** sind ein Satz von Grundprinzipien der Quantenphysik, die pro-

## 2. Kernziel des Quantenphysikunterrichts

---

totypische Experimente der Schulquantenphysik physikalisch korrekt erklären. Sie greifen die pragmatische Deutung des Zustandsvektors als Vorhersagekatalog möglicher Messergebnisse auf. Sie stellen somit Werkzeuge für ein quantenphysikalisches Reasoning dar (Feynman et al., 2007; Küblbeck und Müller, 2002; Pospiech, 2021; Scholz et al., 2020).

## 3. Quantenphysikunterricht - eine Bestandsaufnahme

Die Nutzung der drei quantenphysikalischen Grundprinzipien Probabilistik, Superposition und Interferenz (PSI-Reasoning) ermöglicht die Formulierung fachlich angemessener Erklärungen für prototypischer Phänomene des Lehrkanons, indem die beobachteten Phänomene auf dieselben quantenphysikalischen Grundprinzipien zurückgeführt werden können. Weiterhin kann mittels PSI-Reasoning der fundamentale Unterschied zur klassischen Physik herausgestellt werden, indem der nicht-lokale Indeterminismus der Quantentheorie als Kernidee genutzt wird. Somit kann es gelingen, ein zeitgemäßes Verständnis der Quantenphysik zu transportieren, ohne auf klassisch-physikalische Analogien des Welle-Teilchen Dualismus zu rekurren.

Sowohl gegenwärtige Lehrpläne als auch ExpertInnen befürworten einen quasi-historischen Zugang zur Quantenphysik. In diesem wird Entwicklung der Quantentheorie ausgehend vom Photoeffekt hin zur Atomphysik als linearer Prozess idealisiert und historisch inkorrekt nachgezeichnet. Kernelement dieses Zugangs ist der Welle-Teilchen Dualismus, wobei im quantenmechanischen Weltbild der 1920er / 1930er Jahre verharret wird, ohne die nachfolgende Entwicklung der Quantenfeldtheorie zu berücksichtigen.

### 3.1. Gegenwärtige Lernziele und Kernthemen des Quantenphysikunterrichts

Der Quantenphysikunterricht hat im deutschsprachigen Raum eine lange Tradition und auch im europäischen Ausland lässt sich Quantenphysik in den Lehrplänen für den Physikunterricht finden (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2018; Stadermann et al., 2019). Es zeigt sich, dass bei aller Diversität, die sich bereits in den jeweiligen Lehrplänen der

Bundesländer manifestiert und die sich international ebenfalls fortsetzt, so etwas wie ein inhaltliches Kerncurriculum der Quantenphysik gefunden werden kann (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2018). In einer 15 Länder umfassenden Lehrplananalyse mit insgesamt 23 Lehrplänen (sieben davon aus Deutschland), haben Krijtenburg-Lewerissa und Kollegen (2019) die folgenden Kernthemen identifiziert:

In 12 von 15 Ländern sind die Themen *diskrete Energieniveaus*, *Wechselwirkung von Licht und Materie*, *Welle-Teilchen Dualismus*, *Materie und Wellen quantitative* sowie *technische Anwendungen* Bestandteil der Lehrpläne. Die *Heisenbergsche Unschärfe* sowie die *probabilistische Deutung* ist Bestandteil der Lehrpläne von 8 Ländern. Somit nimmt die probabilistische Deutung trotz ihrer zentralen Rolle im Theoriegebäude der Quantenphysik eine eher nachgeordnete Stellung im Lehrplan ein. Allerdings vermuten die Autoren auch, dass Schulbücher und andere Unterrichtsmaterialien trotzdem auf dieses Thema eingehen.

Zu einer ähnlichen Übersicht von Kerninhalten eines Unterrichts über Quantenphysik kommt eine Expertenbefragung unter FachphysikerInnen. Auch diese zeichnen den Dualismus, die Wellenfunktion und Atomtheorien als notwendige Kerninhalte des Quantenphysikunterrichts aus (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2018).

Insgesamt zeigen die Lehrpläne sowie die Meinung der ExpertInnen einen scheinbaren Konsens über die Themen des Unterrichts, welcher sich an dem quasi-historischen, universitären Lehrkanon von Einführungsveranstaltungen zur Quantenphysik orientiert.

## 3.2. Kritik am quasi-historischen Zugang

Die Ausführungen von Heisenberg (1973) zeigen genau das Gegenteil zum quasi-historischen Zugang: Die Hauptakteure in der Entwicklung der Quantenphysik haben geradezu darum gerungen, die Konzepte der klassischen Physik zu erhalten.

Neben einer verzerrten und falschen Darstellung der historischen Entwicklung und damit einem völlig falschem Verständnis der Natur der Naturwissenschaften (Passon, 2022) präsentiert der quasi-historische Ansatz die Quantenphysik ausschließlich in Form der Quantenmechanik zur Erklärung der Stabilität von Materie. Aus historischer Perspektive war die Atomphysik ohne Zweifel einer der Motivatoren für die Entwicklung der Quantenphysik, doch gilt sie heute innerhalb der Physik als beherrscht. Der Fokus der quantenphysikalischen Forschung liegt nun auf der Entwicklung und Anwendung

von Quantentechnologien, in der die Quantenfeldtheorie, d. h. die Wechselwirkung von Licht und Materie, als Theoriegebäude steht (Pospiech, 2021; QUTEGA, 2017; VDI Technologiezentrum, 2017). Diese Beherrschbarkeit der Atomphysik manifestiert sich zudem in der Tatsache, dass Vorlesungen zur Atom- und Molekülphysik fester Bestandteil des Physikgrundstudiums sind (Konferenz der Fachbereiche Physik, 2010).

Wie aber bereits in Kap. 2.1 dargelegt, ist das primäre Ziel des naturwissenschaftlichen Unterrichts nicht die Vorbereitung auf wissenschaftliche Karrieren bzw. in diesem Fall auf das Physikstudium. Es erscheint daher fraglich, inwieweit die Kenntnis über eine inkorrekte historische Entwicklung der Quantenphysik zur naturwissenschaftlichen Grundbildung beiträgt. Am quasi-historischen Zugang sei daher exemplarisch folgende Kritik geäußert:

- Die dargestellte historische Entwicklung ist überidealisiert und spiegelt daher ein falsches Bild wider. So hat Einsteins Lichtquantenhypothese nicht die Entwicklung des Bohrschen Atommodells befruchtet, da Bohr bis weit in die 1920er Jahre ein Gegner einer Quantentheorie des Lichts war (Passon, 2022).
- Der Photoeffekt wurde bereits in den 1920er Jahren semiklassisch (Metall: Quantisiert, Licht: Klassische Welle) erklärt, wobei die räumliche Verteilung der austretenden Elektronen exakt vorhergesagt werden konnte. Einstein gelang dies nicht (Beck, 1927; Passon und Grebe-Ellis, 2015). Die Interpretation des Photoeffektes als experimentellen Fürsprecher für eine Quantentheorie des Lichtes ist damit aus fachlicher Sicht falsch, da eine klassische Beschreibung des Lichtes weiterhin für die Erklärung des Effektes ausreicht (Passon und Grebe-Ellis, 2015; Rode, 2017b).
- Die Fähigkeit, chemische Reaktionen erklären und vorhersagen zu können, bedarf lediglich eines Kern-Hülle Modells. Erkenntnisse aus der Atomtheorie, wie Quantenzahlen, Gestalt von Orbitalen oder Effekte, wie der Zeemann-Effekt spielen dafür und damit auch in der Schulchemie keine Rolle (Barke et al., 2015). Erst komplexere Probleme, wie beispielsweise die Erklärung der Stereoselektivität der Diels-Alder Reaktion (2+4-Cycloaddition) bedürfen die Kenntnis von Atomorbitalen (Clayden et al., 2012).
- Die Erkenntnisse der Atomphysik lassen sich direkt aus der Lösung der *Schrö-*

*ding*er Gleichung für entsprechend definierte Hamiltonoperatoren ableiten. Lernende der Sekundarstufe II besitzen jedoch nicht die mathematischen Fähigkeiten, die Schrödinger Gleichung zu lösen (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2018; Stadermann et al., 2019) und können daher diese Erkenntnisse nicht ableiten.

- Die prototypischen Rechnungen des universitären Lehrkanons ermöglichen zwar ein Erlernen des quantenphysikalischen Rechenapparats, jedoch geht eine Beherrschung der Rechnungen nicht notwendigerweise mit dem Verständnis von Grundprinzipien der Quantenphysik einher, sodass Lernende oftmals an klassischen Denkweisen, z. B. Lokalität und Determinismus, festhalten (Greca und Freire, 2014; Johansson et al., 2018; Müller, 2003; Schöne und Pospiech, 2015). Andererseits scheinen die mathematischen Fähigkeiten keine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung eines Grundverständnisses zu sein (Koopman et al., 2008).
- Die Spezifika quantenphysikalischer Erklärungen (Kap. 2.4) werden auf Grund der Komplexität des zu betrachtenden Problems nicht deutlich. So folgt beispielsweise das Superpositionsprinzip direkt aus der Linearität der Schrödinger Gleichung, doch wird dieses nicht phänomenologisch zugänglich. Leichter zugänglich sind hingegen 2-Zustandssysteme, wie bspw. der optische Strahlteiler oder das Michelson Interferometer (Dür und Heusler, 2012; Kohnle et al., 2015; Michelini et al., 2000; Scholz et al., 2020), sodass die grundlegenden Eigenschaften der Quantenphysik prinzipiell im Experiment darstellbar sind.

Schon ohne annähernd vollständig zu sein, macht diese Auflistung deutlich, dass der quasi-historische Zugang zur Quantenphysik wenig geeignet ist, dem Ziel der naturwissenschaftlichen Grundbildung gerecht zu werden, da ...

... quantenphysikalisches Reasoning in der Komplexität der Atomtheorie untergeht, insofern das Phänomen quantenmechanisch behandelt wird.

... durch Übersimplifizierung das Phänomen auf klassische oder semiklassische Grundprinzipien reduziert wird.

Letzteres soll an zwei Beispielen verdeutlicht werden:

1. Das Bohrsche Atommodell sagt die Energie des Grundzustandes des Wasserstoffatoms mit 13.6 eV korrekt vorher, doch werden für diese Energieberechnung ausschließlich entsprechend angepasste klassisch-physikalische Größen verwendet. Lediglich die Borschen Postulate zwingen den Berechnungen eine Quantentheorie auf.
2. Der Welle-Teilchen Dualismus reduziert die Komplexität quantenphysikalischer Phänomene auf die klassisch-physikalische Entitäten Welle und Teilchen.

Ein quantenphysikalisches Reasoning wird somit nicht erlernt.

### 3.3. Restrukturierung des Quantenphysikunterrichts

Es bedarf daher einer Restrukturierung des Quantenphysikunterrichts, bei der echte quantenphysikalische Phänomene in den Fokus genommen werden und die Atomtheorie in den Hintergrund tritt, um Grundprinzipien der Quantenphysik zu erarbeiten. Mit Blick auf die aktuelle Forschung im Themenfeld der Quantentechnologie wird zudem deutlich, dass der quasi-historische Zugang ein antiquiertes Bild der Quantenphysik vermittelt, in dem die Quantenphysik als Werkzeug der Atomphysik klassifiziert wird und man in einem physikalischem Weltbild der 1920er / 1930er verbleibt. Bezüge zu aktueller Forschung, welche auf der Quantenfeldtheorie beruht, bleiben aus. Es besteht daher die Forderung nach zeitgemäßen Zugängen, ohne die Verwendung veralteter Begrifflichkeiten des Welle-Teilchen Dualismus sowie die Einbringung moderner Inhalte der Quantenphysik (Bitzenbauer, 2020; QUTEGA, 2017; Stadermann et al., 2019; VDI Technologiezentrum, 2017).

Aus der fachdidaktischen Forschung wurden mit dem *Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik* (Müller, 2003) und dem *Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik* (Bitzenbauer, 2020) zwei deutschsprachige und evaluierte Beispiele für einen derartigen zeitgemäßen Ansatz entwickelt.

## **Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik**

Das Münchener Unterrichtskonzept der Quantenphysik verfolgt das Ziel, einen deutlichen Unterschied zwischen klassischer Physik herauszustellen und einen klaren Satz an Begriffen herauszustellen. Dazu werden anhand von wenigen prototypischen Experimenten Wesenszüge der Quantenphysik eingeführt (siehe Kap. 2.5.3). Sie ermöglichen die Verwendung einer klaren und eindeutigen Sprache über Quantenphysik sowie die Vermeidung semiklassischer Alternativkonzepte. Die Wesenszüge beschränken sich dabei auf phänomenologische Merkmale / Eigenschaften der Quantenobjekte bzw. der Phänomene selbst, ohne dahinter liegende Denkprinzipien, wie die Superposition zu thematisieren.

Die Evaluation des Konzeptes hat gezeigt, dass Lernende ein, im Vergleich zum traditionellen Lehrkanon, tiefer gehendes Grundverständnis der Quantenphysik entwickeln und mechanistische Denkweisen überwunden werden können (Küblbeck und Müller, 2002; Müller, 2003).

## **Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik**

Das Erlanger Unterrichtskonzept fußt auf der Analyse der Antikorrelation und Interferenz einzelner Photonen am optischen Strahlteiler und dem Michelson Interferometer. In vier Unterrichtseinheiten à 90 Minuten werden die Detektion von nicht-klassischem Licht, die Präparation von Einzelphotonenzuständen, der optische Strahlteiler und das Michelson Interferometer behandelt. Analog zum Münchener Unterrichtskonzept werden auch hier die Wesenszüge der Quantenphysik zur Vermeidung von semiklassischen und mechanistischen Alternativkonzepten verwendet, aber nicht aus den Experimenten abgeleitet. Das Unterrichtskonzept scheint geeignet, eine quantenphysikalische Grundkonzeption zu entwickeln und mechanistische Denkweisen zu vermeiden (Bitzenbauer, 2020).

Beide Unterrichtskonzepte beschränken sich somit auf die oberflächliche Beschreibung und Erklärung von quantenphysikalischen Phänomenen mittels der Wesenszüge. Ein Einüben quantenphysikalischer Denkweisen und damit eines quantenphysikalischen Reasonings wie PSI wird durch beide Konzepte nicht ermöglicht.

Die Evaluationen beider Konzepte zeigen, dass die Rigorosität in der Sprache, d. h. die Vermeidung klassisch-geprägter Sprechweisen, zu einem Zuwachs des deklarativen

Wissens führt und mechanistisch geprägte Alternativkonzepte vermieden werden können (Bitzenbauer, 2020; Müller, 2003). Obgleich beide Unterrichtskonzepte für einen fachdidaktisch fundierten Wandel im Unterricht über Quantenphysik stehen, beklagen Krijtenburg-Lewerissa und Kollegen (2017), dass es zwar in Summe viele Entwicklungen in der Lehre der Quantenphysik gibt (Sekundarstufe II und Hochschullehre), die Evaluation dieser Entwicklungen sich zumeist nur auf die praktische Umsetzung und die Lernwirksamkeit des Gesamtkonzeptes bezieht. Einzelne Versatzstücke (z. B. Experimente oder Simulationen) dieser Unterrichtskonzepte sind bisher wenig in den Fokus der Evaluation genommen worden.

Ein Wandel in der quantenphysikalischen Lehre zeigt sich nicht nur in der Entwicklung neuer Unterrichtskonzepte, sondern auch in den deutschen Lehrplänen der Sekundarstufe II. War bereits mit der Einführung der einheitlichen Prüfungsanforderungen (EPA) eine Trennung von Atom- und Quantenphysik vorgesehen (KMK, 2004), zeigt die Lehrplananalyse von Stadermann und Kollegen (2019), dass dennoch der historische Zugang in einigen Bundesländern vertreten blieb, wohingegen beispielsweise das Land Niedersachsen einen an das Münchener Unterrichtskonzept angelegten Unterrichtsgang verfolgt (Niedersächsisches Kultusministerium, 2017).

Mit Einführung der Bildungsstandards für das Abitur in Physik wurde dieser zeitgemäße Zugang zur Quantenphysik weiter zementiert. Zusätzlich wurde die besondere Rolle des Superpositionsprinzips in der Quantenphysik unterstrichen, indem es als Basiskonzept für den Unterricht ausgezeichnet wurde (KMK, 2020).

## 3.4. Phänomene im Quantenphysikunterricht

*„Neben der einfachen didaktischen Aufbereitung des Lehrstoffs muss (...) ebenfalls die Entwicklung von geeigneten Quantenexperimentiersystemen vorangetrieben werden.“*

*(VDI Technologiezentrum, 2017, S.26)*

In der Quantenphysik lassen sich nur schwer geeignete Experimente für den Unterricht finden: Vor allem Experimente, die das Verhalten einzelner Quantenobjekte demonstrieren, lassen sich mit den Bestandteilen schulischer Sammlungen nicht realisieren. Der quantenphysikalische Zufall bleibt damit experimentell unzugänglich. Es erscheint daher nicht verwunderlich, dass Lehrkräfte einen Wunsch nach mehr realen und zeitge-

mäßen Experimenten für den Unterricht haben (Weber, 2018). Auch fachwissenschaftliche Interessensgruppen der Physik und Industrie sprechen sich für die Entwicklung neuer, experimenteller Zugänge zur Quantenphysik aus (QUTEGA, 2017; VDI Technologiezentrum, 2017). Um echte Quantenphänomene zu demonstrieren, müssen echte Quantenobjekte verwendet werden. Vergleichsweise einfach gelingt dies mit einzelnen Photonen (Bronner, 2010). Einen Vorschlag, diese im Unterricht zugänglich zu machen, wurde von Bronner (2010) mit den interaktiven Bildschirmexperimenten des Erlanger Quantumlabs gestaltet. Hier wurden Einzelphotonenexperimente, wie das Strahlteilerexperiment oder das Hong-Ou-Mandel Experiment zur Zweiphotoneninterferenz realisiert und digitalisiert. Inwieweit diese Experimente lernförderlich sind, wurde seinerzeit nicht untersucht. Erst mit der Arbeit von Bitzenbauer (2020) wurde ein Teil der Experimente im darauf aufbauenden Erlanger Unterrichtskonzept (s.o.) evaluiert. Aus der attestierten, lernförderlichen Wirkung des Unterrichtskonzepts lässt sich schließen, dass die eingesetzten Experimente (Strahlteilerexperiment und Michelson Interferometer) das Lernen von Quantenphysik unterstützen. Inwieweit diese Experimente sich im Detail auf das Lernen auswirken, ist jedoch aus der Untersuchung nicht ableitbar. Dabei erscheint diese Frage durchaus relevant, da beide Experimente die quantenphysikalischen Grundprinzipien PSI demonstrieren (Kap. 2.4). Beide Experimente könnten somit potenzielle Schlüsselexperimente für das Lernen von Quantenphysik sein.

## 3.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Status quo des Unterrichts über Quantenphysik in Deutschland sowie dem europäischen Ausland dargelegt:

- Quantenphysik ist traditioneller Bestandteil der Physiklehrpläne der Sekundarstufe II im deutschsprachigen sowie im europäischen Raum (Stadermann et al., 2019).
- Eine Lehrplananalyse von Stadermann und Kollegen (2019) sowie eine Delphi Studie mit ExpertInnen der Naturwissenschaften von Krijtenbourg-Lewerissa und Kollegen (2018) zeigen auf, dass es einen Grundkonsens über zu unterrichtende Inhalte der Quantenphysik zu geben scheint, welcher vor allem durch den quasi-historischen Zugang des universitären Lehrkanons (vom Photoeffekt zum Atom)

geprägt ist.

- Ein Beitrag dieses Zugangs zur naturwissenschaftlichen Grundbildung erscheint fraglich, da
  - ein antiquiertes Verständnis der Quantenphysik vermittelt wird.
  - grundlegende Eigenschaften der Quantenphysik (z. B. das Superpositionsprinzip) in der Komplexität der Atomphysik versteckt sind.
- Die 2020 eingeführten Bildungsstandards für das Fach Physik in der Sekundarstufe II lehnen sich an die Erkenntnisse des Münchener Unterrichtskonzeptes an und zeichnen zusätzlich die zentrale Rolle des Superpositionsprinzips heraus.
- Unterrichtskonzepte, die ein zeitgemäßes Bild der Quantenphysik sowie eine klare Sprache vermitteln, existieren und fördern ein quantenphysikalisches Grundverständnis (Bitzenbauer, 2020; Müller, 2003). Dennoch ist über die Wirksamkeit einzelner Bausteine wenig bekannt.
- Das Strahlteilerexperiment und das Michelson Interferometer mit Einzelphotonen scheint im Hinblick auf die Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzeptes lernförderlich. Inwieweit sich die beiden Experimente auf das Lernen von Quantenphysik auswirken, ist allerdings bisher unbekannt.

## 4. Lernschwierigkeiten und Alternativkonzepte

*„Die fundamentale Eigenschaft der Quantenphysik stellt gleichzeitig die größte Herausforderung beim Lernen dar: Quantenphysik ist keine klassische Physik.“ (Franz und Müller, 2016, S.19)*

### 4.1. Übersicht ausgewählter Alternativkonzepte

Die ontologischen und begrifflichen Unterschiede zwischen klassischer Physik und Quantenphysik machen die Quantenphysik nicht anschlussfähig an Erfahrungen aus dem bisherigen Unterricht bzw. an Alltagserfahrungen. Die bekannten Alternativkonzepte sind davon geprägt, die mangelnde Anschlussfähigkeit zu ignorieren. Sie sind daher von klassisch-physikalischen Konzepten geprägt (Singh und Marshman, 2015). Im Folgenden sollen bekannte Alternativkonzepte zur Wahrscheinlichkeit, der Superposition und der Interferenz von Quantenobjekten sowie solche zum Quantenobjekt Photon zusammengefasst werden.

#### 4.1.1. Wahrscheinlichkeitsdeutung

Das Konzept der intrinsischen Zufälligkeit bestimmt die Quantenphysik und begegnet den Lernenden bereits in der Sekundarstufe I im Themengebiet Radioaktivität. Die dokumentierten Alternativkonzepte eint alle, dass das Auftreten der Zufälligkeit für die Lernenden nicht im Widerspruch zum Determinismus steht. Vielmehr verhindern äußere Einflüsse die exakte Vorhersage von Ereignissen, sodass die intrinsische Zufälligkeit als quasi-Zufälligkeit angesehen wird (Hopf und Schecker, 2018; Müller, 2003; Wittmann et al., 2006). Die Alternativkonzepte differieren jedoch hinsichtlich der Ursache

für die quasi-Zufälligkeit.

- **Wahrscheinlichkeit als Unkenntnis / Ungenauigkeit:** Lernende vertreten den Standpunkt, dass die Physik prinzipiell keine Wahrscheinlichkeiten enthalte und somit vollständig deterministisch sei. In der messbaren Realität sei dies allerdings anders, sodass entweder auf Grund unvollständiger Kenntnis aller Anfangs- und Randbedingungen nur probabilistische Aussagen getroffen werden können oder durch ungenaue Messungen nicht der wahre Messwert aufgedeckt werden könne (Hopf und Schecker, 2018; Müller, 2003).
- **Zugrundeliegende Kausalität:** Lernende sind der Auffassung, dass es Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Messwerten gäbe und diese auch experimentell zugänglich seien. Dennoch sind sie der Ansicht, dass es eine zugrundeliegende Kausalität für diese Verteilung geben müsse (Müller, 2003). Daher müsse bei gleicher Ursache auch immer die gleiche Wirkung erwartet werden (Hopf und Schecker, 2018).
- **Gleichverteilung der Ergebnisse:** Lernende sind der Ansicht, dass die Einzelergebnisse einer Messung zwar zufällig verteilt seien, aber bei hinreichend großer Zahl der Messwiederholung jedes Einzelereignis gleich wahrscheinlich sei. Diese Orientierung zur Gleichverteilung führe dazu, dass sich die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des jeweiligen Ereignisses verändern müssten und somit vorausgegangene Ereignisse die zukünftigen Ereignisse beeinflussen müssten (Hopf und Schecker, 2018; Wittmann et al., 2006).
- **Zufälligkeit heißt unsortiert:** Lernende mit diesem Alternativkonzept sind der Meinung, dass sich die Zufälligkeit von Messereignissen in der Unsortiertheit der Messwerte äußert. Aus der Perspektive dieses Alternativkonzeptes ist beispielsweise die Ziehung der Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 (nicht unbedingt in der Reihenfolge) beim Lotto unwahrscheinlicher als eine unsortierte Zahlfolge (z. B.: 1, 49, 23, 7, 19) (Hopf und Schecker, 2018).

#### 4.1.2. Superposition

Auch wenn das Superpositionsprinzip ein Grundprinzip der Quantenphysik ist, lassen sich nur wenig Untersuchungen zu dessen Verständnis und dokumentierte Alternativ-

konzepte finden. Im Bereich der universitären Lehre bzw. der College Physik zeigt sich allerdings, dass Studierende den Superpositionszustand mit dem Zustandsgemisch gleichsetzen (Passante et al., 2015). Auch hier kann ein zugrundeliegender Determinismus als treibende Kraft vermutet werden, da die Messwertverteilung noch am weitesten klassischen Messwertverteilungen ähnelt und einzelne Messwerte „eigentlich“ wohlbestimmt sind.

### 4.1.3. Interferenz und Dualismus

Wie bereits in Kapitel 2.5.1 dargelegt, ist der Welle-Teilchen Dualismus eine physikhistorisch bedeutsame Analogiebildung. Dabei werden Merkmale klassischer Wellen und Teilchen formal mit Merkmalen quantenphysikalischer Zustände in Analogie gebracht. Es wird bspw. die kontinuierliche Propagation der Zustandsfunktion als Wellenverhalten und diskontinuierliche Detektion von Quantenobjekten als Teilchenverhalten interpretiert, wohl wissend, dass Quantenobjekte weder Welle noch Teilchen sind. Quantenobjekten wird damit ein dualer Charakter zugeschrieben, um koinzidente, aber komplementäre Merkmale von Quantenobjekten mit klassischen Vorstellungen und Begriffen anschaulich zu fassen (Heisenberg, 1979; Lautesse et al., 2015).

Problematisch wird die dualistische Analogiebildung, wenn sie vom mathematischen Formalismus losgelöst gelehrt wird, da Widersprüche zur klassischen Physik verdeckt bleiben und die Spezifika quantenphysikalischer Erklärungen nicht eindeutig dargelegt werden können (Lautesse et al., 2015). Die Lernendenvorstellungsforschung zeigt, dass die Verwendung des Welle-Teilchen Dualismus eine als naiver Welle-Teilchen Dualismus bekannte Alternativvorstellung unterstützt. In dieser werden Quantenobjekte als Hybride aus Welle und Teilchen aufgefasst, deren Eigenschaft durch externe Randbedingungen, also durch das Experiment, festgelegt werden (Lautesse et al., 2015; Müller, 2003; Singh und Marshman, 2015).

Auf Grund der hohen Anschaulichkeit, die mentale Bilder beispielsweise von Wasserwellen und kleinen Billardkugeln liefern, wirkt diese Alternativvorstellung sehr attraktiv und ist schwer zu überwinden. Neben der Anschaulichkeit begünstigt auch das Beibehalten von klassischen Prinzipien des Determinismus und einer lokalen Realität<sup>1</sup> die

---

<sup>1</sup>Korrekterweise sei angemerkt, dass zwar das Realitätsprinzip erhalten bleibt, aber die reale Erscheinung nicht, da ein Wechsel der Randbedingungen mit einem Wechsel des Seins (Teilchen oder Welle)

Attraktivität semiklassischen Reasoning. Lediglich der Dualismus, also die Sensitivität für experimentelle Randbedingungen, muss als scheinbares, quantenphysikalisches Grundprinzip gelernt werden.

#### 4.1.4. Photon

Da sich dualistische Vorstellungen als tragbar erweisen, das Verhalten von einzelnen Quantenobjekten zu erklären, prägen sie auch die Alternativkonzepte zu den Quantenobjekten selbst (z. B. Ayene et al., 2011; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Müller, 2003). Ayene und Kollegen (2011) haben bei einer Befragung von Studierenden drei Arten von Vorstellungen zum Photon gefunden

1. Klassische Beschreibung: Licht wird entweder als klassische Welle oder klassisches Teilchen beschrieben („entweder-oder“-Vorstellung).
2. Gemischte Beschreibung: Koexistenz von Wellen- und Teilcheneigenschaften, wobei klassische Begriffe beibehalten werden („sowohl-als-auch“-Vorstellung).
3. Quasi-quantenphysikalische Beschreibung: Lernende verwenden eine quantenphysikalische Beschreibung für dualistisches Verhalten, haben aber weiterhin Schwierigkeiten mit der Nicht-Determiniertheit („weder-noch“-Vorstellung).

Ähnliches zeigt sich in der Untersuchung von Lichtfeld (1992) (zit. nach Müller, 2003). Ein Teil der Lernenden weist eine vom allgemeinen Unterrichtsgang geprägte Vorstellung auf. In dieser Vorstellung besteht das Licht selbst aus Lichtbündeln, welche wiederum aus Lichtwellen aufgebaut sind, die sich aus den Lichtteilchen konstituieren. Grundsätzlich konstatiert Lichtfeld, dass Lernende mit einer Fülle an Vorstellungen zum Licht in den Unterricht kommen und diese je nach Situation in ihrer Wahrnehmung erfolgreich anwenden (Hybridisierung von Modellen, siehe Kap. 5.2.1).

#### 4.1.5. Schlussfolgerung

Zusammengefasst lassen sich zwei Fallstricke identifizieren, die bei der Diskussion eines Schlüsselexperiments vermieden oder überwunden werden müssen, um PSI-Reasoning

---

des Quantenobjekts einhergeht. Dennoch können dem Quantenobjekt somit sequenziell kontinuierlich Eigenschaften zugewiesen werden. D. h. wird bspw. die Eigenschaft Wellesein durch das Experiment festgelegt, kann jedem Punkt der Raumzeit fälschlicherweise eine Amplitude zugewiesen werden.

ning und damit ein Reasoning ohne Dualismus zu motivieren:

### **Quasi-Zufälligkeit und Determinismus**

Das quantenphysikalische Grundprinzip der intrinsischen Zufälligkeit stellt sich als sehr herausfordernd dar, da klassisch-physikalische Phänomene wie das Würfeln für den Beobachter ebenfalls zufällig sind. Jedoch führt nur die unvollständige Kenntnis über Anfangs- und Randbedingung zu dieser Zufälligkeit, denn jedes Ereignis ist im Prinzip durch die Gesetze der klassischen Physik vollständig determiniert (Quasi-Zufälligkeit). Ein potenzielles Schlüsselexperiment muss diesen Unterschied der Theorie inhärenten Zufälligkeit der Quantenphysik zur klassischen quasi-Zufälligkeit demonstrieren können (Laumann et al., 2019).

### **Dualismus**

Der Welle-Teilchen Dualismus stellt einen weiteren Fallstrick dar. Auf Grund der großen Robustheit und der hohen Attraktivität sollte der Dualismus direkt zu Beginn des Lernens von Quantenphysik vermieden werden. Im Rahmen des Münchner und Erlanger Unterrichtskonzeptes wurde der Dualismus durch die klare und einheitliche Sprache begrifflich erfolgreich vermieden. Eine ebensolche Vermeidung ist Ziel des vorgeschlagenen PSI-Reasoning, da ein scheinbares Teilchenverhalten des Photons z. B. am optischen Strahlteiler auf eine Zerstörung der Kohärenz des Superpositionszustandes zurückgeführt wird. Ebenso wird die als Interferenz interpretierte, phasenabhängige Zählrate auf die kohärente Superposition von Zuständen zurückführt.

Neben einer sprachlichen Vermeidung sollte auch ein Schlüsselphänomen direkt ein solches Phänomen sein, welches nicht widerspruchsfrei mit den klassischen Konzepten Welle und Teilchen erklärt werden kann. Daher erscheint eine reine Demonstration von Teilchenverhalten in einem Versuch und Wellenverhalten in einem anderen Versuch wenig lernförderlich. Vielmehr müssen die beiden scheinbaren Eigenschaften zeitgleich demonstrierbar sein.

## 4.2. Zusammenfassung

- Die klassisch-physikalischen Konzepte Determinismus und Realität prägen die Alternativkonzepte zu Grundprinzipien der Quantenphysik
- Der naive Welle-Teilchen Dualismus stellt ein robustes Alternativkonzept dar, bei welchem die klassisch-physikalischen Konzepte Welle sowie Teilchen beibehalten werden können und lediglich ein dualistisches Reasoning als fälschliches, quantenphysikalisches Charakteristikum eingeübt werden muss.
- Die Vermeidung dualistischen Reasoning unter Verwendung eines quantenphysikalischen Reasoning ist hingegen lernförderlich und vermeidet klassisch geprägte Alternativkonzepte.

## 5. Einordnung der Ergebnisse in konstruktivistische Lerntheorien

Auf Grund der fundamentalen, strukturellen Unterschiede zwischen klassischer Physik und Quantenphysik wurde von Kalkanis et al. (2003) ein radikaler Konzeptwechsel als notwendig für das Lernen von Quantenphysik angesehen. Allerdings legt das hartnäckige Festhalten an klassischen Konzepten nahe, dass ein solcher Konzeptwechsel gar nicht oder zumindest nur teilweise vollzogen wird. Andererseits zeigen die Ergebnisse von Müller (2003) und Bitzenbauer (2020), dass klassische bzw. semiklassische Denkweisen vermieden werden können. Dies legt den Schluss nahe, dass ein Konzeptwechsel gelungen wäre. Der Blick in die Literatur zeigt jedoch, dass nicht wirklich klar ist, was man unter einem Konzeptwechsel im Detail verstehen soll und eine Vielzahl von Begriffen wie Konzeptwechsel, Konzeptentwicklung oder Konzepterweiterung existiert. Selbst bei Verwendung der gleichen Begriffe weisen die jeweiligen Konzeptwechseltheorien eine unterschiedliche Semantik auf (Duit und Treagust, 2003).

### 5.1. Konzeptwechsel - Eine Charakterisierung

Obgleich der Begriff im Detail uneinheitlich verwendet wird, lässt er sich approximativ charakterisieren. Becker-Carus und Wendt (2016) charakterisieren ein Konzept als *„nicht [!] sprachliches Wissen im Langzeitgedächtnis über Objekte, Zustände, Geschehnisse oder Handlungen“* (S.576). Die Veränderung eben solcher Konzepte charakterisiert den Lernweg der Lernenden (Duit und Treagust, 2003). Missverständlicher hingegen ist der Begriff des Wechsels: *„the term change has often been misunderstood as*

being an exchange of the pre-instructional conceptions for the science concepts to be learned “ (Duit und Treagust, 2003, S.673). Die Konzepte werden nicht gewechselt, sondern restrukturiert, sodass sich immer Kontexte finden lassen, in denen die alten Konzepte zur Anwendung kommen (Duit und Treagust, 2003).

Art und Umfang der Restrukturierung unterscheiden sich, sodass es zu einer schwachen Wissensumstrukturierung, der Assimilation bis hin zu einer starken bzw. radikalen Umstrukturierung, die einem Konzeptaustausch gleicht, der Akkommodation, kommt (Duit und Treagust, 2003).

## 5.2. Konzeptwechseltheorien

In der Literatur lassen sich verschiedene Ansätze zum Konzeptwechsel finden (siehe Vosniadou (2008) für eine Übersicht). Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Annahme zur Natur der vorunterrichtlichen Konzepte in kohärente und fragmentierte Theorien einteilen (diSessa, 2017).

Im Rahmen dieser Arbeit werden der *Framework Theorie* Ansatz sowie der Ansatz *Knowledge in Pieces* als prominente Stellvertreter der kohärenten bzw. fragmentierten Theorien dargestellt und die Erkenntnisse zum Lernen von Quantenphysik entsprechend eingeordnet. Auf den traditionellen Ansatz von Posner et al. (1982), der einen kognitiven Konflikt als Ausgangspunkt für einen Konzeptwechsel ansieht, wird verzichtet. Argumente für diesen Verzicht sind:

- Vorunterrichtliche Konzepte werden in dem Ansatz als grundsätzlich negativ / falsch angesehen (diSessa, 2008).
- Ein kompletter Austausch der existierenden vorunterrichtlichen Konzepte findet einerseits in der Regel nicht statt und andererseits verlaufen konzeptuelle Veränderungen selten spontan und plötzlich (Duit und Treagust, 2003; Vosniadou et al., 2008).
- Die direkte Konfrontation mit eigenen Fehlern oder widersprüchlichen Daten ist in der Regel nicht der Ausgangspunkt eines Konzeptwechsels. Lernende versuchen den Widerspruch durch Einordnung in bestehende Modelle aufzulösen (Chinn und Brewer, 1998; diSessa, 2008; Limón, 2001).

### 5.2.1. Framework Theorie Ansatz

#### Ausgangspunkt

Kinder organisieren ihre multiplen, sensorischen Erfahrungen unter dem Einfluss des Alltags und der Sprache in relativ abgeschlossene Domänen. Diese Domänen werden als Framework Theorien bezeichnet. Aus der Entwicklungspsychologie sind mindestens vier Domänen bekannt: Naturwissenschaften, Mathematik, Psychologie und Sprache. Jede Domäne besitzt eine eigene Ontologie, die wiederum auf einen, ihr eigenen Satz an Entitäten angewendet wird. Sie sind durch einen spezifischen Satz an Grundprinzipien, Handlungsweisen sowie Prozeduren zur Identifikation der domänenspezifischen Entitäten gekennzeichnet. Ein wichtiger Lernmechanismus in der Kindesentwicklung ist die Kategorisierung, also das Zuordnen von Objekten in die ontologischen Kategorien innerhalb der Domäne. Wird ein Objekt einer Kategorie zugeordnet, besitzt es alle inhärenten Eigenschaften dieser Kategorie.

Um aus den Framework Theorien, Vorhersagen und Erklärungen ableiten zu können, bedarf es eines Mechanismus', um mentale Repräsentationsformen zu erzeugen, die die Struktur der jeweiligen domänenspezifischen Kategorie wiedergeben und als Bilder vor dem inneren Auge aufgerufen werden können.

Innerhalb der Domänen können Konzepte als spezifische Theorien angesiedelt werden, die einerseits die Eigenschaften der Domäne besitzen, aber auch zusätzliche Merkmale besitzen können. Allerdings sind die Konzepte zunächst wenig stabil, sodass Wissensakquise zu deren Veränderung bzw. Festigung führt, aber gleichzeitig auch zu Veränderung der Domäne führen kann (Vosniadou et al., 2008).

#### Dynamik des Konzeptwechsels

Die kognitive Entwicklung von vorunterrichtlichen Konzepten hin zu den zu lernenden Konzepten geschieht über Anreicherungsprozesse. Dieser Konzeptwechsel ist vor allen Dingen gekennzeichnet durch einen Wechsel der ontologischen Kategorien und begleitet durch einen Wechsel der eigenen Epistemologie sowie der inneren Repräsentationsformen.

Derartige Prozesse verlaufen allerdings nicht schlagartig, sondern sind langsam und graduell: Zunächst einmal werden bestehende Konzepte durch neues Wissen angereichert

ohne dabei die Kohärenz und Konsistenz des eigenen Wissens zu hinterfragen. Dies führt zur Bildung von synthetischen bzw. Hybridkonzepten sowie zur Fragmentierung von Wissensstrukturen. Diese Fragmentierung wird im weiteren Verlauf des Konzeptwechsels wieder aufgehoben und ist nicht mit der Fragmentierung des vorunterrichtlichen Wissen bei Knowledge in Pieces zu verwechseln (Vosniadou und Skopeliti, 2014). Der Framework Theorie Ansatz bietet daher die Möglichkeit eine Konzeptentwicklung ausgehend von vorunterrichtlichen Wissen über Hybridkonzepten hin zu fachlich angemessenen Konzepten zu beschreiben (Vosniadou und Skopeliti, 2014; Vosniadou et al., 2008).

### 5.2.2. Knowledge in Pieces

Im Kontrast zur Annahme eines eher kohärenten intuitiven Wissens steht der Ansatz *Knowledge in Pieces* (KiP), der das intuitive physikalische Wissen als reichhaltigen Ausgangspunkt für das Lernen von Physik sieht. KiP ermöglicht eine „feinkörnige“ Analyse von Wissensstrukturen und kann erfassen, wie sich individuelle, vorwissenschaftliche, intuitive Wissensbestandteile beim Lernen in komplexere Strukturen verändern und sich daraus reichhaltigere Konzepte und Kompetenzen herausbilden (diSessa, 1993). Auch wenn sich KiP zunächst auf das Lernen von Physik beschränkte, fanden sich im Verlauf der Theorieentwicklung vielversprechende Ansätze auch für den Mathematikunterricht (diSessa, 2017).

#### Ausgangspunkt

Die zentrale Fragestellung von KiP ist, welchen Einfluss mentale Vorstrukturen (das Vorwissen) auf das Erlernen von Physik haben. Dabei werden sowohl kurzzeitige Prozesse, das Erlernen von Wissensbröckchen als auch langfristige Konzeptentwicklungen betrachtet.

Einige Eckpfeiler des Ansatzes seien hier in Kürze zusammengefasst:

**Wissen als komplexes System:** KiP nimmt an, dass Wissen von Novizen ein fragmentiertes Gefüge zahlreicher unterschiedlicher, aber auch identischer Wissens Elemente oder auch Mikronetzwerke aus diesen Wissens Elementen ist. Das Wissen von Experten hingegen lässt sich als komplexes, aber organisiertes System aus Wissensbestandteilen beschreiben. Lernen versteht sich somit als eine Transformation von diesem lockeren

Gefüge aus nahezu unabhängigen Wissens-elemente hin zu einem zunehmend komplexer organisiertem System. Am Ende steht ein stabiles Konzept, ein komplexes, dynamisches, emergentes System koordinierter Bestandteile (diSessa, 1993). diSessa und Sherin (1998) sprechen hier von Koordinationsklassen (coordination classes). Dabei können einzelne Wissens-elemente des Vorwissens erhalten bleiben. Nur ihre Gesamtorganisation ändert sich.

**Vielfältige Skalenvarianz von Lernprozessen:** KiP nutzt die Unterscheidung zweier unterschiedlicher Zeit- und Strukturskalen beim Lernen von Physik: Auf kurzen Zeitskalen sucht KiP einen Zugang, um die Umwandlung von Wissensstrukturen durch die Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand zu beschreiben. Dies manifestiert sich durch einen Wechsel der Erklärungen für ein spezifisches Phänomen. Tiefer gehende und nachhaltig wirksame Veränderung von umfangreicheren Konzepten erfordern hingegen längere Zeitskalen. Auf diese Weise lassen sich auch Konzeptwechsel-Studien konstruieren, die über das übliche pre-post-Design hinausgehen und den Augenblick des Nachdenkens in den Fokus nehmen. Dies gelingt, indem Aneinanderreihungen von Erklärungswechseln betrachtet werden. Zusätzlich zur Veränderung der Sammlung von Wissens-elementen und intuitiven Grundideen erlaubt die Betrachtung der Transformation der Organisation der Wissens-elemente die Modellierung nachhaltiger und stabilerer Wissensformen. Mit der Beschreibung dieser zunehmenden Defragmentierung des Systems der Wissens-elemente unterscheidet sich KiP von zahlreichen Framework-Theorien des Framework Theorie Ansatzes, die komplette kohärente Lern- und Wissenstheorien bereitstellen (diSessa, 2017).

**Reichhaltigkeit und Produktivität:** Empirische Studien zeigen, dass jedes Individuum über ein breites Erfahrungsspektrum hilfreicher und nützlicher Vorstellungen verfügt, mit dessen Hilfe Ereignisse vorhergesagt und erklärt werden können. Dieses Vorwissen bildet die außerordentlich produktive Grundlage für den Lernprozess unter Beibehaltung von Teilen der bestehenden Wissens-elemente und Veränderung der mentalen Struktur (diSessa, 1993).

**Kontextspezifität:** Die genannten Wissens-elemente und deren Mikronetzwerke bilden sich in aller Regel eng am Kontext ihrer Entstehung aus. Auf diese Weise ist es denkbar, dass unterschiedliche Wissens-elemente für identische Phänomene vorliegen und identische Wissens-elemente für widersprüchliche Phänomene Erklärungen liefern können. Der Wechsel zwischen sich widersprechenden Erklärungsansätzen erfolgt auf die-

ser Strukturebene ohne Probleme. Erst die Wissensstabilisierung durch Neuorganisation der Wissens Elemente führt zu einer Dekontextualisierung und damit zur Wahrnehmung einer möglichen Widersprüchlichkeit von Erklärungen (diSessa, 1993).

### Intuitives Wissen

KiP geht davon aus, dass jedes Individuum über ein intuitives Wissen verfügt, das als lockeres Gefüge kontextspezifischer Mikronetzwerke aus Wissens Elementen organisiert ist. Diese Struktur konstituiert einen *Sense of Mechanism*, ein Arsenal an Grundideen von dem, was plausibel ist, was passieren kann und was nicht. Die zugehörigen Wissens Elemente werden als *phenomenological primitives* oder in kurz *p-prims* bezeichnet. p-prims sind unverknüpfte (oder nur lose verbundene), sofort einleuchtende Verallgemeinerungen von Erfahrungen. Viele der bekannten Schülervorstellungen basieren auf derartigen p-prims (siehe diSessa (1993) für eine ausführliche Diskussion zu Vorstellungen zur Mechanik). Sie wirken zumeist insofern, als sie im Kontext eines physikalischen Systems oder dessen Verhalten erinnert werden.

**Primitivität und Erklärungswert der p-prims:** Obgleich p-prims primitive Elemente eines komplexen, kognitiven Mechanismus sind, umfassen sie in bestimmten, aber wichtigen Fällen ein Verhalten oder ziehen ein Verhalten nach sich, sodass sie bedeutend für die Erklärung physikalischer Phänomene sind. p-prims dieser Art sind selbst erklärend und übernehmen die Rolle physikalischer Gesetze (diSessa, 1993). Sie bieten somit einen Erklärungswert für Individuen. Jedoch ist eine Kategorisierung in richtig oder falsch für p-prims unangemessen, da sie kontextabhängig plausible Erklärung liefern (in anderen Kontexten allerdings auch scheitern können).

**Phänomenologie der p-prims:** p-prims sind in dem Sinne phänomenologisch, als dass sie einer oberflächlichen Interpretation der erlebten Welt entstammen. Sind sie mental etabliert, reichern sie die Begrifflichkeit und Semantik an, die den Phänomenen entsprechen und durch die individuellen Erfahrungen strukturiert, interpretiert und erinnert werden. Sie stellen folglich sprachliche Schemata dar, mit welchen ein Individuum die Welt erlebt und erklärt.

**Stabilität von p-prims:** p-prims können von den Individuen weder aufgegeben noch überdacht werden, da kein direktes Bewusstsein für deren Existenz besteht und deren kontextspezifische Fruchtbarkeit einer Löschung entgegensteht (diSessa, 2017).

**Epistemische Wirkung von p-prims:** p-prims beeinflussen unsere Erkenntnis hauptsächlich dadurch, dass sie die Wahrnehmung prägen. Wahrnehmung meint hier die Aktivierung eines kognitiven Zustandes. Diese aktivierbaren Zustände können in unterschiedlichen Bewusstseins- und Wahrnehmungsschichten liegen, von der untersten Schicht der elektrischen Impulse der Sensorik bis in die oberste Schicht der Konzepte und Kategorien. p-prims lassen sich im mittleren Bereich dieser Schichtung ansiedeln, sodass sie im Prozess der Aktivierung beteiligt sind. Daher sollte Lernen immer die Aktivierung von p-prims umfassen, die wiederum weitere Wissensstrukturen aktivieren (diSessa, 2017).

### Dynamik des Konzeptwechsels

Relevanter im Rahmen dieser Arbeit ist der Prozess des Lernens, also die Umwandlung vom komplexen Wissenssystem vorunterrichtlicher Physik in das komplexe Wissenssystem Physik. Das vorunterrichtliche Wissen über Physik ist ein großes Gebilde aus verschiedenen p-prim-Clustern, welche durch die Bindung an spezifische Kontexte charakterisiert ist. Möglicherweise existiert für die im Unterricht betrachteten Phänomene nicht einmal ein Sense of Mechanism, sodass unklar ist, welche p-prims aktiviert werden sollen (diSessa, 1993, 2017).

Während des Lernprozesses verändert sich nun die Aktivierungsstärke der p-prims, wobei deren Einfluss verstärkt oder verkleinert werden kann sowie der Kontextradius erweitert oder verkleinert werden kann, je nach der neuen Rolle im sich entwickelnden System *physikalisches Wissen*. Zudem ist es nicht ausgeschlossen, dass neue Verknüpfungen von p-prims und neue p-prims gebildet werden, wenn der deskriptive Apparat seinen Fokus auf andere Aspekte oder Randbedingungen der physikalischen Welt verlegt (diSessa, 1993). Das Erlernen physikalischer Konzepte verantwortet somit einen Wechsel des Fokus der Aufmerksamkeit, damit korrekte Schlussfolgerungen gezogen werden können. Allerdings verläuft dieser Prozess diskontinuierlich, sodass das Erlernen von Konzepten verschiedene Kontexte umfassen muss, um reliabel dieselben Rückschlüsse auf dieselben Grundprinzipien ziehen zu können. KiP erlaubt somit Vorhersagen über Veränderungen der kognitiven Struktur auf kurzen und langen Zeitskalen (diSessa, 2017).

Deutlich drastischer verändert sich die Funktion der p-prims. Hatten p-prims im vor-

unterrichtlichen Wissen die Funktion des selbsterklärenden Prinzips, können sie diese Rolle in einem elaborierten System physikalischen Wissens nicht mehr einnehmen. Physikalische Gesetze und Prinzipien nehmen nun diese Rolle ein. Die p-prims übernehmen nun eine deutlich schwächere Position in der Heuristik, um die entscheidenden physikalischen Grundprinzipien zu erkennen (diSessa, 1993).

### 5.2.3. Kohärent vs. Fragmentiert

Obgleich die beiden Paradigmen kohärent und fragmentiert in ihren Grundnahmen fundamental voneinander abweichen, betonen beispielsweise Vosniadou und Skopeliti (2014) als Vertreter eines kohärenten Ansatzes sowie diSessa (2008) als Verteter der Fragmentierung, sowohl Gemeinsamkeiten als auch komplementäre Ergänzungen der beiden Paradigmen, da beide Paradigmen mittlerweile auf einer breiten Datengrundlage beruhen (diSessa, 2014).

Grundsätzlich vereint beide Ansätze die Idee, dass das Vorwissen der Lernenden ein reichhaltiges Wissenssystem ist, welches aus einer Vielzahl verschiedener Elemente konstituiert ist. Weiterhin nehmen beide Ansätze an, dass das Vorwissen hauptsächlich auf Grundlage der Wahrnehmung bzw. sensorischen Eindrücken aus der Auseinandersetzung mit der Umgebung sowie der Beobachtung von Objekten und Phänomenen basiert (Vosniadou und Skopeliti, 2014).

Zudem widerspricht KiP dem Framework Theorie Ansatz nicht, da p-prims den beobachtungsbasierten Vorstellungen entsprechen (Vosniadou et al., 2008). Allerdings sind es vor allen Dingen die Zeitskalen, die einen Unterschied zwischen beiden Paradigmen erzeugen: Während der Framework-Theorie Ansatz vornehmlich lange Zeitskalen in den Fokus nimmt, die bspw. mit Quer- oder Längsschnittstudie analysiert werden, betrachtet KiP vor allen Dinge kurze Lernprozesse, wie sie bspw. in einer Unterrichtssequenz stattfinden, sodass die Frage ob KiP oder Framework Theorie Ansatz eine pragmatische Frage der Korngröße sowie der Bedeutung der Zeitskalen ist. Der Anschluss an eine der Theorien ist somit letztlich eine individuelle Entscheidung (diSessa, 2008, 2014, 2017).

### 5.3. Einordnung der Erkenntnisse zum Lernen von Quantenphysik

Auch wenn das vorherige Kapitel beide Ansätze kontrastierend dargestellt hat, soll im Rahmen dieser Arbeit keine Debatte um ein Für und Wider der jeweiligen Theorien geführt werden. Vielmehr lassen sich die Erkenntnisse beider Ansätze mit den Erkenntnissen zum Lehren und Lernen von Quantenphysik in Einklang bringen.

Die vorgestellten empirischen Befunde haben bereits darauf hingedeutet, dass das Lernen von Quantenphysik ein eher mühsamer und Zeit beanspruchender Prozess mit graduellen Veränderungen der Lernendenvorstellung ist. Klassisch-physikalische Konzepte werden mit Aspekten der unterrichteten, quantenphysikalischen Konzepte angereichert. Der, als notwendig erachtete, radikale Konzeptwechsel wurde empirisch nicht gefunden. Dies steht im Einklang mit der Beschreibung der Konzepterweiterung nach dem Framework Theorie Ansatz, welche langsame und graduelle Veränderungen postuliert, die durch Hybride aus bestehenden und unterrichteten Konzepten charakterisiert ist.

KiP bietet zudem eine Erklärung für eine detaillierte Betrachtung des Prozesses auf kurzen Zeitskalen. Dabei ist unklar, inwieweit p-prims für die Quantenphysik vorliegen. P-prims entstammen der Interpretation der erlebten Welt. Die Quantenphysik ist jedoch nicht Bestandteil dieser Wirklichkeit, sodass eine Existenz von quantenphysikalischen p-prims unwahrscheinlich ist. Jedoch sind p-prims zur Zufälligkeit, die als Quasi-Zufälligkeit im Alltag durchaus erlebbar ist, nicht ausgeschlossen. Deutlich wahrscheinlicher erscheint die Anwendung von klassisch-physikalischen p-prims für die Erklärung quantenphysikalischer Phänomene, so wie es die Lernendenvorstellungsforschung zeigt (Kap. 4.1.1).

Gleichzeitig stützt KiP die Verwendung von Grundprinzipien (z. B. PSI) als Werkzeuge für ein quantenphysikalisches Reasoning für die Erklärung verschiedener Quantenphänomene. Mit Hilfe von PSI gelingt es, einen Satz prototypischer Experimente der Schulquantenphysik durch das Zurückführen auf immer dieselben Grundprinzipien zu erklären. Somit gelingt eine Dekontextualisierung der Erklärung und die Entwicklung einer Art quantenphysikalischen Sense of Mechanism kann ermöglicht werden. Dem Schlüsselphänomen kommt in diesem Prozess eine wichtige Rolle zu, da bei der Auseinandersetzung mit dem Phänomen die Grundprinzipien etabliert werden müssen. Zu

analysieren, inwieweit die Lernenden diese Grundprinzipien dann im Anschluss für ihre Erklärung nutzen, ist daher sinnvoll. Somit können Hinweise darauf gesammelt werden, inwieweit die Präsentation der Grundprinzipien gelungen ist, bzw. welche Rückbezüge zum Schlüsselphänomen in anderen Kontexten gezogen werden müssen.

Die Erkenntnisse aus der Evaluation des Münchner Unterrichtskonzeptes stützen diese These der Dekontextualisierung von quantenphysikalischen Erklärungen. Im Rahmen des Unterrichtsganges wurden verschiedene Phänomene diskutiert und deren Erklärung auf immer die gleichen Wesenszüge der Quantenphysik zurückgeführt. Somit scheint die Verwendung von PSI aus fachlicher, fachdidaktischer und lerntheoretischer Sicht geeignet, um quantenphysikalisches Reasoning zu erlernen.

## 5.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei Konzeptwechseltheorien als prominente Vertreter der Paradigmen kohärente Struktur vs. fragmentierte Struktur des Vorwissens präsentiert und anschließend die Erkenntnisse der Forschung zum Lehren und Lernen von Quantenphysik in diese Theorien eingeordnet. Für das Lehren und Lernen von Quantenphysik sind vor allem folgende Aspekte relevant:

- Aus der Perspektive des Framework Theorie Ansatzes ist ein radikaler Konzeptwechsel von klassischer Physik zu Quantenphysik unwahrscheinlich.
- Eine langsame und graduelle Entwicklung über klassisch-physikalische und quantenphysikalische Hybride hin zu einer geschlossenen quantenphysikalischen Konzeption ist eher erwartbar als ein radikaler Konzeptwechsel.
- Die graduelle Konzeptentwicklung lässt sich aus der Perspektive von KiP als eine Anreicherung von kontextgebundenen Mikro-Konzeptwechseln, die im Folgenden Erklärungswechsel genannt werden, beschreiben.
- Die Verwendung immer gleicher Grundprinzipien als Werkzeuge für ein quantenphysikalisches Reasoning für die Erklärung verschiedener Quantenphänomene fördert die von KiP geforderte Dekontextualisierung von Erklärungen und unterstützt die Entwicklung eines quantenphysikalischen Sense of Mechanism.

## 6. Zwischenfazit

Bisher wurde ausgehend vom Gedanken der naturwissenschaftlichen Grundbildung eine Notwendigkeit eines zeitgemäßen Quantenphysikunterrichts abgeleitet. Dabei wurde ein Fokus auf die fachlich angemessene Erklärung quantenphysikalischer Phänomene gelegt. Dafür wird ein quantenphysikalisches Reasoning vorgeschlagen, welches die prototypischen Phänomene der Schulquantenphysik auf die drei quantenphysikalischen Grundprinzipien **Probabilistik**, **Superposition** und **Interferenz** (PSI-Reasoning) zurückführt. Somit gelingt ein Reasoning, das analog zur Grundstruktur der Quantenphysik auf dem Zustandsvektor und dessen zeitlicher Entwicklung fußt und daher auf die klassisch-physikalischen Eigenschaftsbegriff von Wellen und Teilchen verzichten kann.

Dieser Erklärungsansatz erscheint auf Grundlage der Erkenntnisse der Lernendenvorstellungsforschung geeignet, da die klassischen Konzepte Welle und Teilchen, die das robuste Alternativkonzept des naiven Welle-Teilchen Dualismus fördern, vermieden werden können (Lautesse et al., 2015). Mit dem PSI-Reasoning werden eindeutige sprachliche Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die sowohl eine Abgrenzung zur klassischen Physik schaffen als auch dem Regelwerk des quantenphysikalischen Formalismus sowie dessen Interpretation gerecht werden. Somit wird der Anforderung nach einer lernförderlichen, klaren und eindeutigen Sprache nachgekommen, was bereits durch die *Wesenszüge der Quantenphysik* gelungen ist. Diese stellen jedoch nur eine Beschreibung der Quantenphänomene bzw. der Eigenschaften von Quantenobjekten auf Sichtebe-  
ne dar. PSI-Reasoning hingegen fußt auf der inneren Struktur der Quantenphysik und spiegelt deshalb die spezifischen Denkweisen der Quantenphysik wider. PSI-Reasoning ist somit anschlussfähig an die Hochschullehre der Quantenphysik.

Aus Sicht der Konzeptwechselforschung und hier im Besonderen aus Sicht des Ansatzes *Knowledge in Pieces* erscheint das PSI-Reasoning zudem geeignet, da in einem breiten Kontextbereich quantenphysikalische Phänomene auf immer denselben Satz physikalischer Grundprinzipien zurückgeführt werden können. Dies ermöglicht eine Folge

## 6. Zwischenfazit

---

kontextspezifischer Erklärungswechsel, was als eine quantenphysikalische Konzeptentwicklung gedeutet wird.

## 7. Schlüsselphänomen

Den vorherigen Kapiteln folgend, scheint PSI-Reasoning ein geeigneter sprachlicher Werkzeugsatz für einen zeitgemäßen Unterricht über Quantenphysik zu sein. Die Evaluation des Münchner Unterrichtskonzeptes zeigt, dass eine angemessene Sprache bei hinreichend langer Auseinandersetzung die Entwicklung eines angemessenen Grundverständnisses der Quantenphysik fördert. Unklar ist hingegen, wie einzelne Versatzstücke solcher Unterrichtskonzepte, d. h. Experimente oder Lernmaterialien wirken (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017) und damit auch, welches Experiment ein geeignetes Schlüsselexperiment für das Thema Quantenphysik sein könnte.

Zwar zeigt die Konzeptwechselforschung, dass der als notwendig erachtete radikale Konzeptwechsel von klassischer Physik zur Quantenphysik unwahrscheinlich ist, doch mahnt der naive Welle-Teilchen Dualismus, dass das Festhalten an klassischen Konzepten attraktiv, aber für eine quantenphysikalische Konzeptentwicklung der Lernenden ungeeignet ist (Küblbeck und Müller, 2002; Lautesse et al., 2015; Müller, 2003). Vielmehr braucht es eine deutliche Kontrastierung der klassischen Physik (Küblbeck und Müller, 2002; Müller, 2003).

Ein geeignetes Schlüsselphänomen muss eine solche Kontrastierung ermöglichen, um die Unzulänglichkeit bestehender Konzepte aufzuzeigen, das Phänomen widerspruchsfrei erklären zu können und somit eine Konzeptentwicklung zu motivieren. Allerdings zeigen die bereits referierten Erkenntnisse der Konzeptwechselforschung, dass ein sofortiger Konzeptwechsel nicht durch einen einzigen, experimentellen Widerspruch eingeleitet wird. Ebenso zeigt die Wissenschaftsgeschichte keine Beispiele für einen radikalen Paradigmenwechsel durch ein einzelnes Experiment (Hoyningen-Huene, 1989). Dennoch zeichnet sich ein Schlüsselexperiment durch seine besondere Funktion in der Lehre aus, da es schlagartig zu neuen Erkenntnissen und somit zur Erklärung einer Reihe von Phänomenen führt (Laumann et al., 2019).

Im Sinne dieser Charakterisierung sollte ein quantenphysikalisches Schlüsselexperi-

ment ein Experiment sein, welches einerseits Erklärungen der klassischen Physik (klassisches Reasoning) sowie dualistische Erklärungen (dualistisches Reasoning) als unzureichend herausstellt und gleichzeitig PSI-Reasoning als fruchtbaren quantenphysikalischen Erklärungsansatz etabliert. Dabei sollten die Grundprinzipien PSI für die Lernenden in dem Experiment klar erkennbar sein und nicht auf Umwegen in das Experiment hineininterpretiert werden.

### 7.1. Der Doppelspalt als prototypisches Schlüsselexperiment

Der Doppelspaltversuch mit einzelnen Quantenobjekten wird vielfach als prototypisches Schlüsselexperiment für die Quantenphysik betrachtet, um Grundprinzipien der Quantenphysik abzuleiten (z. B. Feynman et al., 2007; Kral et al., 2019; Küblbeck und Müller, 2002). In dem von Jönsson (1961) realisierten Experiment zeigen einzelne Elektronen, denen in der klassischen Physik Teilcheneigenschaften zugeordnet wurden, Interferenz. Dies ist jedoch die charakteristische Eigenschaft einer Welle. Wird der Versuch hingegen mit klassischen Teilchen durchgeführt, wird die Addition zwei Gaußverteilungen der beiden Einzelspalte erhalten.

Auch wenn Feynman nachfolgend die Grundprinzipien PSI ableitet, bietet das Experiment das Potenzial ein dualistisches Reasoning zu fördern, da Folgendes beobachtbar ist:

- Einzelne Quantenobjekte zeigen genau wie klassische Wellen Interferenz.
- Wird einer der Spalte verdeckt, wird eine von klassischen Teilchen erwartbare Gaußverteilung erhalten.
- Wird die Kohärenz Superpositionszustand zum Beispiel durch eine Ortsbestimmung zerstört, wird ebenfalls die gleiche Verteilung wie beim Einzelspalt erhalten.

Derartige Ergebnisse können widerspruchsfrei mit einer naiv-dualistischen Vorstellung in Einklang gebracht werden: Je nach Konfiguration des Versuchsaufbaus wird das Wellen- oder Teilchenverhalten des Welle-Teilchen-Hybrids beobachtbar.

An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass der lehrbuchtypische Erhalt einer Gauß-Verteilung für den Einzelspalt nur bei ungenauer Messung erhalten wird. Analog zur Beugung am Einzelspalt in der klassischen Optik wird eigentlich eine Streuwahrscheinlichkeit

$$P \sim \text{sinc} \left( \frac{p_y b}{2\hbar} \right)^2 \quad (7.1)$$

erhalten, wobei  $p_y$  der Impuls in  $y$ -Richtung und  $b$  die Breite des Spalts ist.

Der Doppelspaltversuch scheint daher als Schlüsselexperiment weniger geeignet, da sich die Ergebnisse auch mit einem dualistischen Reasoning widerspruchsfrei erklären lassen (bei Vernachlässigung der Streuung am Spalt). Werden hingegen die scheinbaren Wellen- und Teilcheneigenschaften gemeinsam beobachtet, scheitern dualistische Erklärungsversuche (Müller, 2003; Scholz et al., 2020).

## 7.2. Die Elektronenbeugung als alternatives Schlüsselexperiment

Die Beugung von Elektronen am polykristallinen Graphit stellt eines der wenigen Experimente dar, das als reales Demonstrationsexperiment in der Schulquantenphysik verfügbar ist. Der beobachtete Effekt kann klassisch nicht erklärt werden, jedoch birgt auch dieses Experiment das Potenzial für eine Interpretation im Sinne des Welle-Teilchen Dualismus: In den Versuchen der klassischen Elektrodynamik (z. B. Fadenstrahlrohr oder Elektronenkanone) werden Elektronen mit klassischen Teilchen assoziiert, welche in der Elektronenbeugungsröhre nun zur Interferenz gebracht werden. Es scheint daher so, als würde eine bisher verborgen gebliebene Welleneigenschaft dieser Teilchen entdeckt werden, sodass das Experiment das Potenzial birgt, Elektronen als Hybrid aus Wellen und Teilchen aufzufassen. Der Beugungsröhre kann nun die Verantwortlichkeit zugeschrieben werden, das Elektron als Welle auftreten zu lassen, da eine scheinbare Teilcheneigenschaft nicht auftritt.

Eine quantenphysikalische Erklärung basierend auf PSI-Reasoning ermöglicht zwar eine fachlich korrekte Erklärung, kann jedoch schwerlich als Einstieg motiviert werden. Der Grund dafür ist, dass die komplexe Gitterstruktur der Graphitkristalle den Superpo-

sitionszustand präpariert. Diese Struktur ist aber von außen nicht beobachtbar und damit eine Blackbox. Die besondere Rolle der Superposition als Unbestimmtheit verschiedener klassisch denkbaren Möglichkeiten, wie das Elektron von der Quelle zum Detektor (bzw. den Leuchtschirm) kommt, tritt auf Grund dieser Komplexität in den Hintergrund. Erst mit Hilfe eines zusätzlichen Analogieversuches mit zweidimensionalen Gittern aus Metallstäben und Ultraschall wird die Interferenz auf Grund der Gitterstruktur zugänglich (Rode, 2022).

Die Elektronenbeugung scheint somit als Schlüsselexperiment weniger geeignet, da sie einerseits nur ein von der klassischen Welle bekanntes Phänomen (Interferenz) zeigt und andererseits die besondere Rolle des Superpositionsprinzips in der Quantenphysik auf Grund der Komplexität der Gitterstruktur nicht sichtbar wird.

### 7.3. Kombinationsexperiment

Die obige Diskussion zeigt, dass eine Reduktion auf scheinbare Wellen- oder Teilchenphänomene kontraproduktiv für die Konzeptentwicklung sein kann. Durch die Exklusivität der scheinbaren Eigenschaften, also entweder Welle oder Teilchen, liefert sie Evidenz für ein dualistisches Reasoning. Erst die gemeinsame Demonstration dieser beiden Eigenschaften in einem Aufbau kann das dualistische Reasoning herausfordern (Müller, 2003; Scholz et al., 2020).

Physikhistorisch bedeutsam sind die Experimente von Grangier, Roger und Aspect (1986), in welchen an einem optischen Strahlteiler die Unteilbarkeit, als Antikorellation der Detektionsergebnisse in den Ausgängen beobachtet und die Interferenz von Einzelphotonen in einem Mach-Zehnder Interferometer demonstriert wurde. Auch diese beiden Experimente lassen ein dualistisches Bild zu.

*„Indeed, if we want to use classical concepts, or pictures, to interpret these experiments for the first one [...], since we violate an inequality holding for any classical wave model. On the contrary, we are compelled to use a wave picture [...] to interpret the second (interference) experiment. Of course the complementary description corresponds to mutually exclusive experimental set-ups“* (Grangier et al., 1986, S.178, f.).

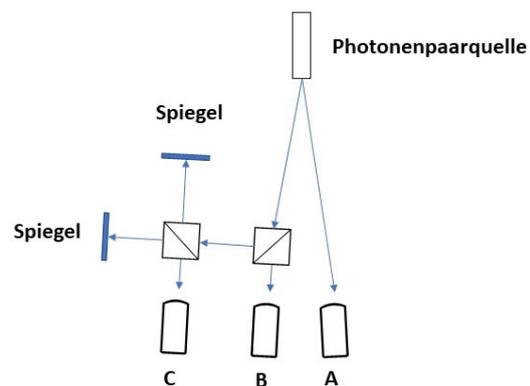
Allerdings lässt sich die Exklusivität der beiden Aufbauten, also die Demonstration von entweder Welle oder Teilchen, überwinden, indem Strahlteilerexperiment und Interfero-

## 7. Schlüsselphänomen

---

meter in Kombination betrachtet werden. Somit gelingt es vom quantenphysikalischen Standpunkt aus „to demonstrate a situation with some properties of a « single-photon state»“(Grangier et al., 1986, S.179).

Im didaktischen Kontext äußerte Müller (2003) die Idee, dass die Kombination aus Strahlteiler und Mach-Zehnder Interferometer vermutlich geeignet erscheine, um ein dualistisches Reasoning zu überwinden. Rund 20 Jahre später bestärken Scholz et al. (2020) die Idee, indem sie eine leicht abgewandelte Kombination aus Strahlteilerexperiment und Michelson Interferometer (Abb. 7.1) vorschlagen. Die Ergebnisse bleiben dieselben. Auf Grund fehlender Trippelkoinzidenzen zwischen den Detektoren A, B und C kann eine Unteilbarkeit einzelner Photonen bei gleichzeitigem Ausmessen eines Interferenzmusters in den Koinzidenzen AC beobachtet werden (Scholz et al., **Abb. 7.1.: Schlüsselexperiment** nach Scholz et al. (2020)).



Mittels eines dualistischen Reasoning kann dieses experimentelle Ergebnis nun nicht mehr widerspruchsfrei erklärt werden, da weder ausschließlich eine scheinbare Welleneigenschaft beobachtbar ist noch eine scheinbare Teilcheneigenschaft. Dies stellt somit einerseits eine hybride Photonenvorstellung aus Welle und Teilchen (naiver Welle-Teilchen Dualismus) infrage. Andererseits widerspricht es dem Bohrschen Komplementaritätsprinzip, der Grundlage des Welle-Teilchen Dualismus, nach dem komplementäre Phänomene (Interferenz und Unteilbarkeit) nicht in einem Experiment beobachtbar sein können. Die Erklärung bedarf somit einer neuen Form des Reasoning. Eine Form eines neuen Reasoning ist das vorgeschlagene PSI-Reasoning:

- **Probabilistik:** Das Klicken eines Detektors kann nicht vorhergesagt werden, es sind lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Diese Klickwahrscheinlichkeit ist gegeben durch das Betragsquadrat einer Zustandsfunktion, die Wahrscheinlichkeitsamplitude genannt wird. Diese Wahrscheinlichkeitsamplitude ist das Pro-

dukt aus einem Wahrscheinlichkeitsfaktor  $\sqrt{P}$  und einem Phasenfaktor  $\exp(i\phi)$  zusammen.

$$\Psi = \sqrt{P} \cdot e^{(i\phi)} \rightarrow P = |\Psi|^2 = \Psi^* \Psi$$

- **Superposition:** Erlaubt ein Experiment mehrere Möglichkeiten, in die sich ein Zustand entwickeln kann (am Strahlteiler: *Reflektiert* und *Transmittiert*), dann ist der Zustand des Systems durch die Superposition

$$\Psi = \Psi_R + \Psi_T$$

beider korrespondierenden Unterzustände beschrieben. Das bedeutet, dass jede Möglichkeit ständig zugleich existiert, wobei jede Möglichkeit durch eine Wahrscheinlichkeitsamplitude charakterisiert ist.

- **Interferenz:** Ist der Zustand eines Quantensystems durch einen Superpositionszustand beschrieben und werden die Unterzustände nicht separat detektiert, sondern nur als kohärente Überlagerung (z. B. im Michelson Interferometer), wird die Phasendifferenz  $\Delta\phi$  zwischen den Unterzuständen relevant, sodass die Klickwahrscheinlichkeit

$$P_{\text{Detektion}} = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (7.2)$$

abhängig von der Phasendifferenz  $\Delta\phi$  ist.

Somit gelingt es, eine widerspruchsfreie Erklärung des beobachteten Phänomens zu formulieren, ohne auf klassisch-physikalische Analogien zurückgreifen zu müssen. Zugleich gelingt ein quantenphysikalisches Reasoning und damit eine fachlich angemessene Form der Erklärung. Weiterhin stellt der Aufbau die zentrale Rolle des Superpositionsprinzips heraus: Mit der isolierten Betrachtung des Strahlteilerexperiments kann zunächst herausgearbeitet werden, dass die Detektionsereignisse nicht vorhergesagt werden können. Sie sind zufällig. Wird nun zusätzlich das Michelson Interferometer betrachtet, zeigt sich, dass die einzelnen Beiträge des Superpositionszustandes relevant werden und Interferenz beobachtbar wird.

Auf Grund des eindeutigen Widerspruchs zur klassischen Physik, dem Widerspruch zu

einem dualistischen Reasoning, einer fruchtbaren Anwendung von PSI-Reasoning und der Möglichkeit, die zentrale Rolle des Superpositionsprinzips in der Quantenphysik herauszustellen, scheint dieses Experiment ein geeignetes Schlüsselexperiment für die Quantenphysik zu sein (Müller, 2003; Scholz et al., 2020).

### 7.4. Zusammenfassung

Von der Theorie ausgehend wurden die quantenphysikalischen Grundprinzipien als fruchtbare Werkzeuge für ein quantenphysikalisches Reasoning (PSI-Reasoning) ausgezeichnet. Fraglich scheint bisher jedoch dessen Motivation in einem Lernprozess. Daher wurde in diesem Kapitel ein potenzielles, quantenphysikalisches Schlüsselexperiment erörtert. Die Diskussion lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die klassisch-physikalisch geprägten Alternativkonzepte der Lernenden geben klare Bedingungen für ein potenzielles Schlüsselexperiment. Ein Schlüsselexperiment sollte sich ausschließlich durch einen quantenphysikalischen Erklärungsansatz (z. B. PSI-Reasoning) erklären lassen. Ein dualistischer Erklärungsansatz muss hingegen zu Widersprüchen führen.
- Der Doppelspaltversuch sowie die Elektronenbeugung als prominente Experimente erfüllen diese Anforderung nicht. Je nach Konfiguration des Versuchsaufbaus können im Doppelspalt entweder scheinbare Wellen- oder scheinbare Teilcheneigenschaften beobachtet werden. Bei der Elektronenbeugung können hingegen bisher unbeachtete Welleneigenschaften eines aus dem vorherigen Unterricht als Teilchen betrachtetes Objekt entdeckt werden. Beide Experimente bergen daher das Potenzial, ein dualistisches Reasoning zu motivieren.
- Die Kombination aus Michelson Interferometer und Strahlteilerexperiment demonstriert gleichzeitig die Antikorellation der Detektionsereignisse in den Ausgängen des optischen Strahlteilers und die Interferenz einzelner Photonen. Dieses Phänomen kann nicht widerspruchsfrei mit einem dualistischen Reasoning erklärt werden. Mit einem PSI-Reasoning hingegen gelingt dies. Zudem kann die fundamentale Rolle des Superpositionsprinzips in beiden Telexperimenten diskutiert werden.

- Auf Grund des Widerspruchs zur klassischen Physik sowie zum Dualismus und der Fruchtbarkeit des PSI-Reasoning wird das Experiment als potenzielles Schlüsselexperiment für die Quantenphysik angesehen. Evidenz für dessen Wirkung fehlt bisher.

## Teil II.

# Grundkonzeption des Forschungsprojektes

## 8. Desiderat

Mit dem Kombinationsexperiment aus Strahlteilerexperiment und Michelson Interferometer wurde im theoretischen Hintergrund ein Experiment mit potenzieller Schlüsselwirkung für das Thema Quantenphysik vorgeschlagen. Die beobachtbare Antikorellation der Detektionsereignisse, die auch als Unteilbarkeit des Photons interpretiert wird und die gleichzeitige Beobachtung von Interferenz einzelner Photonen stellen ein Phänomen dar, welches mittels klassischer Physik nicht erklärbar ist. Der Widerspruch zum Bohrschen Komplementaritätsprinzip stellt zudem ein Gegenargument zum Welle-Teilchen Dualismus dar, weil die komplementären Phänomene Unteilbarkeit und Interferenz in einem Experiment sichtbar werden. Somit lassen sich die Ergebnisse vor allem nicht im Bild eines naiven Welle-Teilchen Dualismus deuten. Das Experiment scheint daher geeignet, eine Unzulänglichkeit der bestehenden Konzepte aufzuzeigen und damit ein geeignetes Schlüsselexperiment zu sein (Bitzenbauer, 2020; Scholz et al., 2020). Inwieweit das Kombinationsexperiment jedoch tatsächlich eine Schlüsselwirkung für Lernende hat, ist bisher unbekannt.

Die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment muss den Lernenden deutlich machen, dass ihre bisherigen Erklärungsansätze unzulänglich sind, das Experiment widerspruchsfrei zu erklären. Im Gegenzug muss den Lernenden ein Erklärungsansatz angeboten werden, der eine widerspruchsfreie Erklärung ermöglicht. Mit dem PSI-Reasoning wurde ein Reasoning vorgeschlagen, das auf quantenphysikalischen Grundprinzipien basiert und bis zum mathematisch-quantentheoretischen Formalismus weiter entwickelt werden kann. Die Erklärung ist somit auch anschlussfähig an universitäre Lehrkonzepte.

PSI-Reasoning ermöglicht das Formulieren eindeutiger und fachlich angemessener Erklärungen von quantenphysikalischen Phänomenen ohne den mathematischen Formalismus und ohne semiklassische Analogiebildung. Die Arbeiten von Müller (2003) und Bitzenbauer (2020) haben gezeigt, dass die Verwendung eben jener klaren und eindeu-

tigen Sprache lernförderlich ist. Die Lernförderlichkeit von PSI-Reasoning erscheint auch lerntheoretisch durch KiP begründet: Die Erklärung von verschiedenen physikalischen Phänomenen durch Zurückführen auf einen phänomenunabhängigen Satz physikalischer Grundkonzepte führt zu der bei KiP geforderten Dekontextualisierung des Erklärungsansatzes und damit zu der Entwicklung eines physikalischen Sense of Mechanism.

Das vorgeschlagene Kombinationsexperiment bietet die Möglichkeit alle drei Grundprinzipien  $P$ ,  $S$  und  $I$  zu demonstrieren und dabei die zentrale Rolle des Superpositionsprinzips in der Quantenphysik zu diskutieren. Allerdings ist bisher unklar, inwieweit das Kombinationsexperiment diesen neuen Erklärungsansatz motiviert und inwieweit durch eine Auseinandersetzung mit dem Experiment ein Grundverständnis von PSI entwickelt werden kann.

Somit wird die bisher fehlende Untersuchung der von Müller (2003) vorgeschlagenen und von Scholz et al. (2020) explizierten antizipierten Schlüsselwirkung dieses Kombinationsexperiments (im Folgenden Schlüsselexperiment) als Desiderat für diese Forschungsarbeit abgeleitet.

# 9. Forschungsziel und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der antizipierten Schlüsselwirkung des Schlüsselexperimentes. Der Begriff der Schlüsselwirkung meint, die Motivation eines quantenphysikalischen Reasoning auf Grundlage der drei Grundprinzipien **Probabilistik**, **Superposition** und **Interferenz** (PSI-Reasoning).

Um das Forschungsziel zu erreichen, müssen zwei methodische Teilziele zunächst erfüllt werden:

**Teilziel 1:** Bereitstellung geeigneter Messinstrumente für das PSI-Reasoning.

**Teilziel 2:** Bereitstellung einer geeigneten Lernumgebung, die eine Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment ermöglicht.

## 9.1. Forschungsfragen

Aus dem Forschungsziel, der Untersuchung der antizipierten Schlüsselwirkung lassen sich drei Forschungsfragen ableiten:

**FF1:** Inwieweit führt die Auseinandersetzung mit dem Experiment zu einer Veränderung des Konzeptverständnisses<sup>1</sup> der Grundprinzipien PSI?

*Hypothese:* Lernende verfügen durch den typischen Physikunterrichtsgang bereits über ein Konzeptverständnis der Interferenz von Wellen. Zudem besitzen sie durch den Mathematikunterricht der Sekundarstufe I ebenfalls ein Konzeptverständnis von Wahrscheinlichkeit im Kontext von Zufallsversuchen (KMK, 2005, 2020). Durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment kann es zu einer Veränderung des Wissens über die Interferenz und der Wahrscheinlichkeit sowie zur Ausbildung eines Wissens

---

<sup>1</sup>Konzeptverständnis meint deklaratives Wissen über die Grundprinzipien sowie die Fähigkeit diese für ein Reasoning zu nutzen.

über Superposition kommen. Die Erkenntnisse der Konzeptwechselforschung lassen jedoch vermuten, dass diese Veränderungen graduell und unterschiedlich ausfallen werden und bestehende Vorstellungen in der Regel bestenfalls erweitert werden.

**FF2:** Inwieweit führt die Auseinandersetzung mit dem Experiment zu einer Veränderung des verwendeten Reasoning bei der Erklärung von gleichzeitiger Unteilbarkeit und Interferenzfähigkeit?

*Hypothese:* Die Erkenntnisse der Konzeptwechselforschung zeigen, dass Lernende ihre bereits existierenden Konzepte nicht sprunghaft ablegen und durch die neuen unterrichtlichen Konzepte ersetzen. Vielmehr findet eine Anreicherung bestehender Konzepte statt. Daher ist zu erwarten, dass Lernende auch nach der Bearbeitung der Lernumgebung weiterhin ein mehr oder weniger klassisch-geprägtes Reasoning nutzen. Ein widerspruchsfreies quantenphysikalisches Reasoning kann nicht erwartet werden.

**FF3:** Inwieweit gelingt Lernenden der Transfer der Erklärung auf physikalisch vergleichbare Phänomene?

*Hypothese:* KiP beschreibt die Konzeptentwicklung des Framework Theorie Ansatzes als eine Reihe kontextspezifischer Erklärungswechsel. Auf Grund dieser Kontextualität der Erklärungsansätze ist zu erwarten, dass eine sich am PSI-Reasoning orientierende Erklärung vornehmlich für das Schlüsselexperiment genutzt wird und in anderen Kontexten auf das bisherige Reasoning (klassisch oder dualistisch) zurückgegriffenen wird.

# 10. Forschungsdesign und -methode

## 10.1. Forschungsdesign

### 10.1.1. Wahl der Messzeitpunkte

Die Evaluation der Wirkung des Schlüsselexperimentes beruht auf der Hypothese, dass eine Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment zu einer Veränderung im Reasoning der Lernenden und damit zu einer Veränderung in der Erklärung der beobachteten Phänomene führt. Derartige Veränderung lassen sich in Studien mit Messwiederholungen abbilden. Typische Verfahren sind das Pre-Post-Design sowie das Pre-Post-Follow-up-Design (Döring und Bortz, 2016). Für die Evaluation des Schlüsselexperiment erscheint das Pre-Post-Design nicht nur aus forschungsökonomischer Sicht sinnvoll (es existieren nur zwei Messzeitpunkte), sondern auch aus lerntheoretischer Sicht. Die Beschäftigung mit dem Experiment ist eine vergleichsweise kurze Intervention, die das Ziel hat, ein quantenphysikalisches Reasoning zu motivieren und im besten Fall einen Erklärungswechsel für das beobachtete Phänomen zu erreichen. Dieser kann bereits mit dem gewählten Pre-Post-Design untersucht werden. Inwieweit der Effekt nachhaltig ist (Follow-up Test) ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

### 10.1.2. Grundsätzliches Studiendesign - Feld- vs. Laborstudie

Hinsichtlich des Studiendesigns lässt sich grundsätzlich zwischen Feld- und Laborstudie unterscheiden. Feldstudien finden im natürlichen Umfeld der Lernenden statt, so dass die Untersuchungsbedingungen ähnlich zu den alltäglichen Unterrichtsbedingun-

gen sind und eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den gemeinen Unterricht möglich ist. Problematisch ist dabei jedoch die geringe Kontrollierbarkeit der Störvariablen wie Klassen- oder Lehrkrafteffekte. Diese schränken die Interpretierbarkeit der Ergebnisse ein und bedürfen größerer Stichproben, um die Effekte statistisch auszuschließen. Das Gegenstück zur Feldstudie ist die Laborstudie. Auf Grund eines hohen Grads der Kontrollierbarkeit können Störvariablen ausgeschlossen werden. Gleichzeitig erschwert die hohe Kontrolliertheit der Situation die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Unterrichtsalltag (geringe externe Validität) (Döring und Bortz, 2016). Laborstudien ermöglichen es, Lernmaterial unter kontrollierten Bedingungen zu erproben, um den Umgang der Lernenden mit dem Material sowie die möglichen Lernprozesse zu evaluieren. Sie erlauben es, Hypothesen zu bestimmten Lernaktivitäten zu testen und zu evaluieren, inwieweit Vorstellungen aktiviert, generiert oder gefestigt werden. Weiterhin erlauben Laborstudien, den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf Lernprozesse im Detail zu beobachten und Hypothesen über den Einfluss der Randbedingungen für das Feld abzuleiten. Laborstudien können somit Vorläufer für Feldstudien, aber auch Ergänzungen bei undurchsichtiger Datenlage sein (von Aufschnaiter, 2014).

Die interne Validität beider Designformen variiert mit der Zusammensetzung der Stichprobe. So sind experimentelle Untersuchungsdesigns (randmomisierte Experimental- und Kontrollgruppe) im Feld oder im Labor durch eine hohe interne Validität gekennzeichnet. Die interne Validität quasi-experimenteller Designs (nicht-randmomisierte Experimental- und Kontrollgruppe) ist hingegen geringer (Döring und Bortz, 2016).

In ihrer Reinform stellen Labor- und Feldstudie zwei Pole eines Spektrums der Kontrollierbarkeit der Einflussfaktoren dar, sodass beispielsweise auch bei Feldstudien mit entsprechendem Aufwand unter laborähnlichen Bedingungen gearbeitet werden kann, wobei mit den jeweiligen Einschränkungen der internen und externen Validität umgegangen werden muss (Döring und Bortz, 2016; von Aufschnaiter, 2014).

Die Untersuchung des Schlüsselexperimentes ist geleitet von der Hypothese, dass eine Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment ein klassisches bzw. dualistisches Reasoning infrage stellt und ein quantenphysikalisches Reasoning motiviert bzw. möglicherweise einen Erklärungswechsel evoziert. Da bisher keinerlei Information über die Wirkung der Auseinandersetzung mit dem Experiment vorliegen, ist ein stark kontrolliertes Untersuchungsdesign geeigneter. So können Hypothesen über die Wirkung der Auseinandersetzung mit dem Experiment auf Lernenden in einer weniger kontrollierten

Umgebung (im Feld) generiert werden. Von Nachteil ist jedoch der hohe organisatorische Aufwand der Laborsituation.

Die Studie wird in einem quasi-experimentellen Design durchgeführt, wobei die Lernenden mit Hilfe der Aufgabenstellungen durch das Experiment geleitet werden sollen. Dieses Maß an Kontrolle ist notwendig, um den Einfluss von Lehrenden so gering wie möglich zu halten und lediglich den Einfluss von Experiment und Lernumgebung auf die Lernende zu untersuchen. Dies hat zwar eine geringe externe und interne Validität zur Folge, ermöglicht aber grundsätzlich die Ableitung von Hypothesen über die Wirkung des Schlüsselexperiments auf Lernende. Diese Hypothesen können in nachfolgenden Untersuchungen weiter getestet werden.

### 10.1.3. Gruppendesign

Um eine Kausalerklärung, d. h. die eindeutige Rückführung des beobachteten Effektes auf das Treatment zu ermöglichen, bedarf es einer Vergleichsgruppe / Kontrollgruppe. Durch den Vergleich mit einer zweiten Gruppe, die das Treatment nicht erfahren hat, kann ausgeschlossen werden, dass der Effekt nicht durch äußere Störfaktoren hervorgerufen wurde. Trotz geringer interner Validität und mangelnder Möglichkeit für Kausalerklärungen, wird das Schlüsselexperiment dennoch im Ein-Gruppendesign analysiert, da ...

- ... zunächst die Wirkung des Schlüsselexperimentes auf Lernende untersucht werden soll, um daraus Hypothesen für die Wirksamkeit des Schlüsselexperiments im Feld zu generieren.
- ... die Motivation von PSI-Reasoning durch externe Störfaktoren zwar nicht ausgeschlossen werden kann, aber unwahrscheinlich ist, denn
  - PSI-Reasoning lässt sich als Ansatz bisher nicht in Lehrbüchern oder Unterrichtskonzepten finden, obwohl Feynmans Vorlesung zur Quantenmechanik auf dem Gedanken beruht.
  - das Superpositionsprinzip bisher nicht Gegenstand des Physikunterrichts war und erst mit den neuen Bildungsstandards in den Unterricht kommt.
- ... ein Vergleich mit der Wirkung anderer in Kap. 7 diskutierter Phänomene erst

sinnvoll ist, wenn grundsätzlich Erkenntnisse über die Wirkung des Schlüsselexperiment vorliegen.

#### 10.1.4. Methode

In dieser Arbeit wird ein Mixed-Methods Ansatz im Vertiefungsmodell genutzt. Dabei wird die komplette Stichprobe quantitativ untersucht. Somit gelingt es die Hypothesen an einer Vielzahl von Fällen mit Hilfe von strukturierten Erhebungsmethoden zu prüfen. Zusätzlich wird mit einer Subgruppe eine qualitative Untersuchungsmethode angewendet, die auch erwartungswidrige Befunde erlaubt und die Gegenstandsbeschreibung zum Ziel hat. Vorteil des Mixed-Methods Ansatzes ist es, dass die komplementären Ergebnisse beider Untersuchungsmethoden direkt aufeinander abgebildet werden können (Döring und Bortz, 2016).

Für die quantitative Untersuchung wird ein Fragebogen (Kap. 11) eingesetzt, welcher das Konzeptverständnis (s. o.) der Lernenden über die Grundprinzipien PSI erfasst. Letztlich lässt sich jedoch mit einem Fragebogen nur eine Tendenz der Lernenden für die Wahl des Reasoning ergründen, da möglicherweise Schlüsselbegriffe in den Antworten erkannt werden. Detaillierte Rückschlüsse auf die Vorstellungen der Lernenden und damit auf die Form des tatsächlich eigenständig verwendeten Reasoning erlauben leitfadengestützte Interviews (Niebert und Gropengießer, 2014), in welchen Lernende aufgefordert werden sollen, die Unteilbarkeit und Interferenzfähigkeit einzelner Photonen zu erklären (Kap. 12).

#### 10.1.5. Stichprobenauswahl

Nicht-mathematische Zugänge zur Quantenphysik scheinen sowohl für Studierende der Studieneingangsphase als auch für Lernende der Sekundarstufe II geeignet, um ein Konzeptverständnis von Quantenphysik zu entwickeln (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Daher ist der Einsatz des Schlüsselexperimentes für beide Zielgruppen gleichermaßen geeignet. Dennoch werden in dieser Studie Studierende in der Studieneingangsphase betrachtet. Auf Grundlage der so gewonnen Erkenntnisse können dann Hypothesen über die Wirkung des Schlüsselexperiments auf Lernende der Sekundarstufe II formuliert werden. Darauf aufbauend kann dann in späterer Arbeit die Lernumgebung adressaten-

gerecht für die Sekundarstufe II gestaltet werden. Die nachfolgend vorgestellten Testinstrumente sollen jedoch bereits auch für einen Einsatz in der Sekundarstufe II mitentwickelt werden, sodass diese adressatengerecht hinsichtlich Schwierigkeit und Sprache gestaltet sein müssen.

# 11. Fragebogen

Zur Untersuchung des Konzeptverständnisses der Lernenden von PSI wird ein Fragebogen eingesetzt. Im nun folgenden Kapitel werden zunächst existierende Erhebungsinstrumente diskutiert und deren mangelnde Passung zwischen Forschungsziel und Inhalt der Fragebögen herausgearbeitet. Anschließend wird die Entwicklung und Validierung eines Rasch-skalierten Mixed-Format Tests beschrieben.

## 11.1. Fragebögen zum Verständnis von Quantenphysik

In der Literatur lassen sich mehrere Fragebögen finden, die das Verständnis von Quantenphysik messen (Di Uccio et al., 2019; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Ihr inhaltlicher Schwerpunkt lässt sich in zwei Gruppen einteilen:

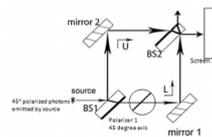
### **Quantentheoretischer Formalismus, Wellenfunktion und dualistische Argumente**

Ein Großteil der vorliegenden Fragebögen adaptiert die Perspektive der universitären Lehre und fordert Lernende auf, die Schrödinger Gleichung für unterschiedliche Potentiale  $V$  zu lösen. Ebenso lassen sich einige nicht-mathematische Fragebögen mit diesem inhaltlichen Schwerpunkt finden. In diesen Fragebögen werden die Lernenden aufgefordert, das gegebene Potenzial  $V$  und die korrespondierenden Wellenfunktionen zu visualisieren. Ebenso werden sie aufgefordert, den Doppelspaltversuch mit Hilfe des Welle-Teilchen Dualismus zu erklären (Goldhaber et al., 2009; McKagan et al., 2010; Wutti-prom et al., 2009).

## Nicht-dualistisches Reasoning und das Verhalten von einzelnen Quantenobjekten

Für die Evaluation der *Quantum Physical Interactive Learning Tutorials (QuILTs)* wurde von Singh (2008) ein Fragebogen verwendet. Die Befragten werden in Multiple-Choice sowie Single-Choice Items gebeten, das Verhalten von Einzelphotonen im Mach-Zehnder Interferometer zu erklären. Die meisten der eingesetzten Fragen erscheinen allerdings für Lernende der Sekundarstufe II zu anspruchsvoll, sodass sie für späteren Einsatz des Fragebogens in der Oberstufe Physik nicht infrage kommen. Dies sei beispielhaft an dem in Abb. 11.1 gezeigten Item illustriert: Im gezeigten Item wird der

Case 3.2.2:  $45^\circ$  polarized single photons emitted by the source and polarizers with  $+45^\circ$  or  $-45^\circ$  polarization axes in the U and L paths



37. You insert polarizer 1 with a  $+45^\circ$  polarization axis (see figure above). When you turn on the  $45^\circ$  polarized single photon source, what do you expect to observe on the screen after a very large number of photons ( $N$ ) are emitted from the source? Assume the source emits a highly collimated beam of photons.
- No interference pattern is observed but approximately  $N/4$  photons reach screen 1.
  - An interference pattern is observed, but it is dimmer (harder to discern) than when no polarizers are present.
  - An interference pattern is observed, and there is no difference between the pattern observed in the setup shown above and when there are no polarizers present.
  - No photons reach the screen.

Abb. 11.1.: Beispielitem zum Mach-Zehnder QuILT von Singh (2008).

Einfluss eines Polarisationsfilters auf das zu detektierende Interferenzmuster behandelt. Dieser Einfluss lässt sich zwar mit Hilfe von PSI erklären, stellt jedoch einen schwierigen Anwendungsfall dar. Zusätzlich lassen sich bei Singh (2008) Items finden, in welchen fiktive Unterhaltungen zwischen zwei Personen hinsichtlich ihrer Richtigkeit bewertet werden sollen. Diese erscheinen auf Grund ihrer Textlast zu schwierig für den Fragebogen.

Für die Evaluation des *Erlanger Unterrichtskonzeptes* wurde neben leitfadengestützten Interviews ein Multiple-Choice Fragebogen eingesetzt, welcher die Realisierung der eingesetzten Experimente sowie das Reasoning der Lernenden thematisiert (Bitzenbauer, 2020). Allerdings erscheint der Fragebogen für die Evaluation des Schlüsselexperimentes ungeeignet, da der Schwerpunkt auf der technischen Realisierung der Experi-

mente liegt. So fragt beispielsweise das in Abb. 11.2 dargestellte Item nach der Erzeu-

<b>Frage 5. Im nichtlinearen Kristall werden aus dem einfallenden Laserstrahl Photonenpaare generiert. Diese Photonenpaare entstehen unter Beachtung der Energieerhaltung und jedes Photon hat daher...</b>				
<input type="checkbox"/> ...die halbe Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.				
<input type="checkbox"/> ...die gleiche Wellenlänge, wie das einfallende Licht des Lasers.				
<input type="checkbox"/> ...die doppelte Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.				
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sehr sicher.	Sicher.	Unentschlossen.	Unsicher.	Geraten.

*Abb. 11.2.: Beispielitem von Bitzenbauer (2020).*

gung von Photonenpaaren durch parametrische Fluoreszenz (PDC). Der PDC-Prozess wird in der Behandlung des Schlüsselexperiment aber nicht im Detail aufgegriffen.

Ein weiterer potenziell geeigneter Fragebogen wurde von Di Uccio et al. (2019) entwickelt. In diesem wird das Verständnis des Wellencharakters von Materie, der quantenphysikalische Messprozess sowie das Verhalten von Elektronen und Photonen thematisiert. Zudem lassen sich Items zum Superpositionsprinzip finden. Insgesamt orientiert

**Q7\_T1** Indicate whether the following three statements are true (T) or false (F)

The wave function of a particle is given by the superposition of two stationary states each corresponding to a different energy value. Then,

I. After any measurement, the particle will end up in an intermediate state in-between the initial states

\*II. There is no way to know the particle energy until an energy measurement is performed.

III. The particle energy is the sum of the energies of the two states in the superposition

*Abb. 11.3.: Beispielitem von Di Uccio et al. (2019).*

sich der Fragebogen an einem narrativen Zugang zum quantenphysikalischen Formalismus (Abb. 11.3), sodass er für die Untersuchung des Schlüsselexperiments ungeeignet erscheint.

### 11.1.1. Schlussfolgerung

Es lassen sich einige Erhebungsinstrumente finden, die zumindest teilweise Lernende auffordern, quantenphysikalische Phänomene nicht-mathematisch und ohne Rückgriff auf den Welle-Teilchen Dualismus zu erklären, sodass diese ein Grundverständnis von PSI untersuchen. Allerdings scheint keines der Instrumente vollständig geeignet zu sein, um ein Konzeptverständnis von PSI zu untersuchen. Dies macht die Entwicklung und Validierung eines geeigneten Fragebogens notwendig. Für diesen sollen nach Möglichkeit so viele Items wie möglich aus den existierenden Fragebögen übernommen werden, um den Arbeitsaufwand bei der Entwicklung geeigneter Distraktoren so gering wie möglich zu halten.

## 11.2. Methode

Im folgenden Kapitel werden die methodischen Grundlagen für die Entwicklung und Validierung des Fragebogens beschrieben.

### 11.2.1. Itementwicklung - Grundlegende Anforderungen und Iteminhalt

Um die Items von Bitzenbauer (2020), Di Uccio et al. (2019), Singh (2008) und Mešić et al. (2019) nachvollziehbar für den Fragebogen zu adaptieren, wurden die folgenden Kriterien formuliert:

1. Das Item adressiert *klassisches* (Wellenoptik), *semiklassisches* oder *PSI-Reasoning*.
2. Das Item ist sowohl sprachlich als auch hinsichtlich der Schwierigkeit angemessen für Lernende der Sekundarstufe II sowie für Studierende der Studieneingangsphase.
3. Es ist möglich, das Item so umzuformulieren, dass es die Kriterien 1 und / oder 2 erfüllt.

28 Items konnten so aus den bestehenden Fragebögen adaptiert werden. Weitere 12 Items wurden entwickelt. Diese betrachten neben dem klassischen Reasoning in der

Wellenoptik, das quantenphysikalische Reasoning für Phänomene mit Zwei-Zustandssystemen. Mit Hilfe von Oberstufenschulbüchern sowie den Lehrplänen zur Quantenphysik wurden der optische Strahlteiler, das Michelson sowie das Mach-Zehnder Interferometer und die Elektronenbeugung als prototypische Phänomene mit Zwei-Zustandssystemen identifiziert.

Allerdings handelt es sich bei der Elektronenbeugung um kein Zwei-Zustandssystem, dennoch ist eine solche Modellierung bei niedrigen Energien angemessen. Dies ist vergleichbar mit der Erklärung von Interferenz am Gitter in der Wellenoptik, bei der typischerweise die Interferenz am Doppelspalt für die Erklärung herangezogen wird (Bruns und Rode, 2019; Gross und Marx, 2014). Daher ist eine Erklärung des Phänomens mit Hilfe von PSI-Reasoning möglich.

Um Informationen über das Reasoning der Lernenden zu bekommen, wurden sowohl Single- und Multiple-Choice Items, mit klassischem, semiklassischen und PSI-Reasoning in den Antwortmöglichkeiten als auch offene Items verwendet. Single- und Multiple-Choice Items können mit hoher Objektivität dichotom kategorisiert werden. Andererseits erfassen sie nur die Tendenz der Lernende für ein Reasoning. Die drei offenen Items ermöglichen daher einen tieferen Einblick, da die Lernenden ihre Erklärung in eigenen Worten aufschreiben müssen.

### 11.2.2. Validität

Das Konstrukt der Validität beschäftigt sich grundsätzlich mit der Frage: *Misst das Testinstrument das, was es messen soll?* Die Beantwortung dieser Frage wird in verschiedenen Ansätzen der Validierung unterschiedlich vorgenommen. Für diese Arbeit wird der argumentbasierte Ansatz verfolgt. Herzstück dieses Ansatzes ist das Interpretation-Use-Argument (IUA), welches alle inhärenten Annahmen über die Testskala sowie alle daraus folgenden Schlussfolgerungen expliziert (Kane, 2013). Validität ist somit keine Eigenschaft des Testes, welche nach einmaliger Prüfung dauerhaft besteht. Vielmehr ist es eine Bewertung der Testskala sowie deren Interpretation, die bei jedem Einsatz vorgenommen werden muss (Meinhardt et al., 2018).

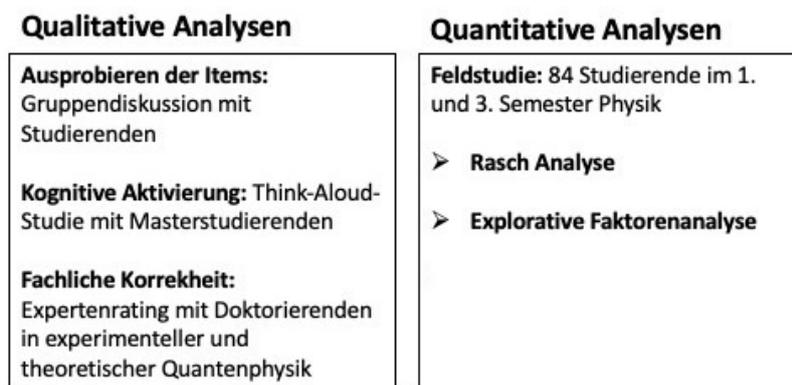
Um das IUA überprüfen zu können, muss dessen Formulierung so präzise wie möglich sein und jegliche Annahme über den Einsatz der Messskala umfassen. Eine Testskala gilt genau dann als valide, wenn alle Annahmen durch die gesammelte Evidenz unter-

stützt werden können und das IUA kohärent und vollständig erscheint (Kane, 2013). Für den entwickelten Fragebogen wird folgendes IUA angenommen:

1. Der Fragebogen misst quantenphysikalisches Reasoning (PSI-Reasoning) von Lernenden der Sekundarstufe II sowie der Studieneingangsphase.
2. Der Umfang der Items sowie deren Schwierigkeit ist angemessen für die Zielgruppe.
3. Die Items aktivieren das Wissen der Lernenden.
4. Die Items können nicht durch das Erkennen von auffälligen Formulierungen im Itemstamm sowie den Antwortmöglichkeiten beantwortet werden.
5. Die Items sind physikalisch korrekt und verwenden eine angemessene und zeitgemäße Fachsprache.

### 11.2.3. Methoden zur Prüfung der Validität

Um die Annahmen des IUA und damit die Validität des Fragebogens zu prüfen, werden Studien mit kleinen Stichproben und qualitativen Analysemethoden sowie eine Felderprobung mit großem Stichprobenumfang und quantitativer Auswertung genutzt (Abb. 11.4). Mit Hilfe qualitativer Methoden wird die fachliche Korrektheit sowie die Wir-



*Abb. 11.4.: Qualitative und quantitative Analyse zur Evaluation des IUA.*

kung der Items auf die Lernenden untersucht. Mit Hilfe der quantitativen Auswertung einer Feldstudie mit 84 Studierenden im 1. und 3. Semester wird die Eindimensionalität der Messskala geprüft. Eine zusätzliche explorative Faktorenanalyse gibt Einblicke in das Zusammenwirken der Items.

### **Gruppendiskussion - Erster Eindruck vom Itempool**

Um einen ersten Eindruck von der Wirkung der Items auf Probanden zu bekommen, wurden sechs Physikstudierende (fünf Lehramtsstudierende) gebeten, die Items zu beantworten und bei Problemen mit den Items diese ggf. zu kommentieren (z. B. Schwierigkeiten bei der Beantwortung). Zur Auswertung wurden zunächst die relativen Antworthäufigkeiten bestimmt und anschließend diejenigen Items für eine Gruppendiskussion ausgewählt, bei denen

- a.) eine Abweichung zwischen der von den Studierenden favorisierten Antwort und der korrekten Antwort vorlag.
- b.) keine Antwort als eindeutig favorisiert identifiziert werden konnte.

In der Gruppendiskussion wurde nach Motiven für die Antwortwahl gesucht, um fehlerhaft formulierte oder zu herausfordernde Items zu identifizieren.

### **Think-Aloud Studie - Antwortstrategie der Lernenden**

Um zu evaluieren, ob Studierende die Items tatsächlich mit Hilfe ihres Wissens, durch die Identifikation auffälliger Antworten oder durch Erraten lösen, sind Think-Aloud Interviews eine übliche Methode (Berger et al., 2019; Mešić et al., 2019; Planinic et al., 2019).

Für die vorgestellte Studie wurden vier Lehramtsstudierende gebeten, die Items zu beantworten und anschließend ihre Sicherheit bei der Auswahl zu bewerten. Zusätzlich hat der Interviewer notiert, wenn die Studierenden Schwierigkeiten bei der Bearbeitung hatten oder Fehler im Itemstamm bzw. den Antwortmöglichkeiten fanden.

Um das laute Denken zu erleichtern, wurden die Studierenden gebeten, in Paaren zusammenzuarbeiten, da die so entstehende Diskussion als fruchtbar angesehen wurde, das laute Denken zu motivieren. Es wurden zwei Gruppen mit einer Dauer von 104:54 und 55:26 Minuten interviewt.

Für die Auswertung wurde die Lösungsstrategie der Studierenden in einer qualitativen Inhaltsanalyse betrachtet. Dafür wurde das von Groth (2016) entwickelte und in Berger et al. (2019) publizierte Kategoriensystem adaptiert (Ergänzung der Kategorie *Interaktion mit dem Partner*).

**Tab. 11.1.:** Kategoriensystem nach Groth (2016).

Kategorie	Sicherheit der Antwort	Item	Relevante Strategie	Nicht-relevante Strategie	Interaktion mit dem Partner	Sonstiges
Def.	Sicherheit der Antwort	Interviewte lesen das Item o. diskutieren dessen Formulierung	Interviewte nutzen Fachwissen zur Lösung des Items	Interviewte raten die Antwort, nutzen Schlüsselwörter o. Antworten ohne Begründung	Interviewte reden ohne Bezug zum Item mit einander	Alles andere, z. B. Lachen

### Expertenrating - Prüfung der fachlichen Korrektheit

Zur Prüfung der fachlichen Korrektheit wurden Doktorierende des Sonderforschungsbereichs 1227 Designed Quantum States of Matter (DQ-mat) als ExpertInnen der Quantenphysik gebeten, den Fragebogen zu beantworten und ggf. die Items zu kommentieren. 13 Doktorierende haben teilgenommen.

Zur Auswertung wurden zunächst für jedes Item die relativen Häufigkeiten der Antwortmöglichkeiten berechnet. Anschließend wurden die Items betrachtet, bei denen signifikante Abweichung zwischen der von den Doktorierenden favorisierten Antwort und der als richtig antizipierten Antwort vorlagen. Die angefügten Kommentare wurden genutzt, um das Item (Stamm und / oder Antwortmöglichkeiten) zu überarbeiten.

## Felderprobung und Quantitative Auswertung

### Messen und probabilistische Testtheorie

Um eine eindeutige Zuordnung zwischen Theorie und Realität zu ermöglichen, beruhen Messungen in der Physik auf eindimensionalen und wohl-definierten Messskalen (Bond und Fox, 2012; Planinic et al., 2019). Die probabilistische Testtheorie (IRT) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Antwort eines Testteilnehmers auf ein Item und dem zugrundeliegenden, zu messenden latenten Merkmal, indem eine Wahrscheinlichkeit für die korrekte Beantwortung des Items berechnet wird (Fun und Sun, 2013; Planinic et al., 2019). Dieser mathematische Zusammenhang kann natürlich unterschiedlich komplex sein. Die geringste Komplexität besitzt die dichotome probabilistische Testtheorie, die das latente Merkmal, wie in dieser Arbeit PSI-Reasoning, durch eine eindimensionale Messskala abbildet, indem angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Testperson ein gegebenes Item korrekt beantwortet, ausschließlich von der Personenfähigkeit der Testperson und der Itemschwierigkeit abhängt.

Ein verbreitetes Model der dichotomen IRT ist das eindimensionale Rasch Modell (Bond und Fox, 2012; Planinic et al., 2019). Um die Eindimensionalität der Messskala zu erreichen, muss das Testinstrument aus zueinander passenden Items bestehen. Zueinander passend meint, dass die Items das zugrunde liegende Merkmal möglichst exakt und in verschiedenen Ausprägungen beschreiben. Dieses Zusammenspiel der Items ist unabdingbar. Fehlt es, kann das Rasch Modell eine Eindimensionalität nicht „hervorzaubern“ (K. Neumann, 2014; Planinic et al., 2019).

Mit Hilfe des Rasch Modelles kann der Grad der Ausprägung des zugrunde liegenden Merkmals bestimmt und damit eine Rangfolge der Testpersonen hinsichtlich ihrer Fähigkeit erstellt werden. Zusätzlich bieten die Modelfitparameter die Möglichkeit, die Modellgüte und damit die Annahme der Eindimensionalität der Messskala zu überprüfen (Bond und Fox, 2012; Boone et al., 2014; K. Neumann, 2014).

Auf eine mathematische Beschreibung des Models wird in dieser Arbeit verzichtet. Es wird auf gängige Lehrwerke zur Einführung in die Rasch Modellierung wie bspw. Boone et al. (2014) oder Bond und Fox (2012) verwiesen. Für einen Überblick siehe Planinic et al. (2019) bzw. K. Neumann (2014).

### Datenerhebung und Stichprobenauswahl

Die Daten für die Felderprobung wurden in einer Befragung von Studierenden des ersten und dritten Semesters Physik generiert. Studierende im ersten Semester haben keine Veranstaltungen zur Quantenphysik in der Universität gehört und verfügen daher nur über das Wissen aus dem Physikunterricht der Oberstufe. Die Personfähigkeit von Erstsemesterstudierenden kann daher für das Thema Quantenphysik als nahezu identisch mit der Fähigkeit von Lernenden der Oberstufe angesehen werden. Studierende des dritten Semesters haben jedoch mindestens in der Experimentalphysikvorlesung Quantenphysik gehört, sodass die Personfähigkeit als höher vermutet wird.

Der Fragebogen wurde den Studierenden online über die Plattform *Limesurvey* zugänglich gemacht und 84 Studierende haben teilgenommen. 39 Studierende dieser Stichprobe waren im ersten Semester.

Gemäß Linacre (1994) ist die Stichprobe hinreichend groß, um ein stabiles Rasch Modell schätzen zu können.

### Datenaufbereitung

Zur Berechnung des Rasch Modelles wurde das *R*-Paket *eRm* (Mair et al., 2020) verwendet. Dieses benötigt dichotomisierte Items. Daher wurden die offenen Items mit *1* kodiert, wenn die Antwort korrekt war und mit *0*, wenn die Antwort falsch war. Weiterhin wurden die Items, wie Item 9 (Abb. 11.5), bei denen mehrere Antworten korrekt

Markiere für jede der nachfolgenden Aussagen, ob sie richtig (R) oder falsch (F) ist.

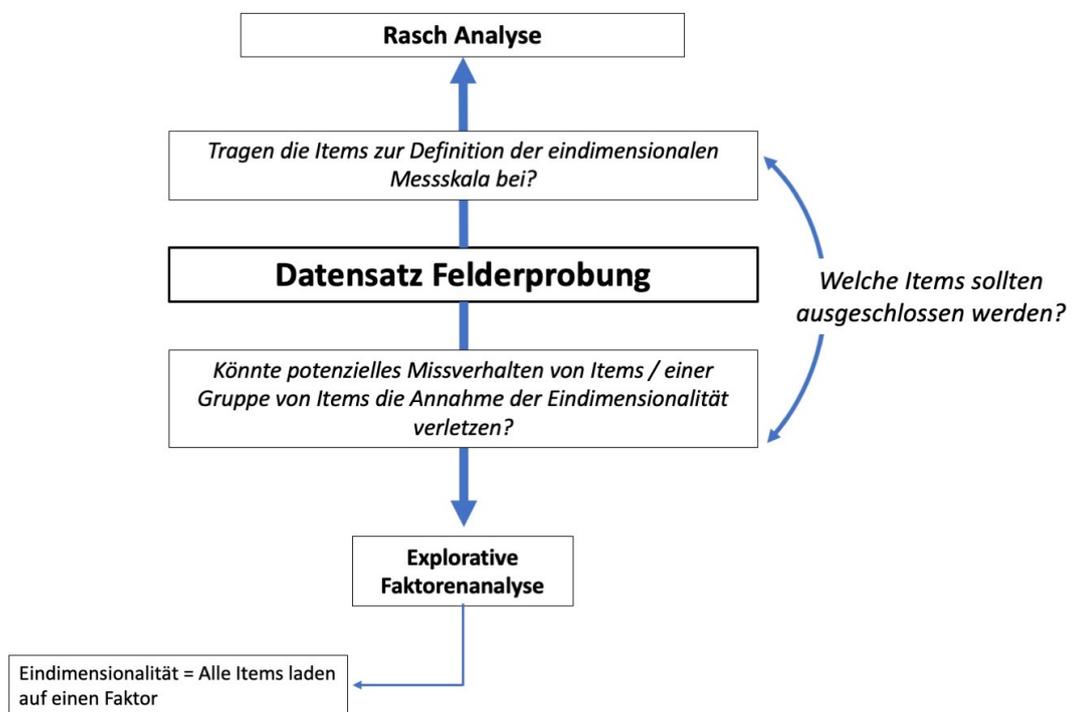
1. Wenn wir beobachten, dass das Elektron an einem bestimmten Ort ist, dann war es schon vor der Messung an diesem Ort.
2. Wenn wir für das Elektron eine bestimmte Geschwindigkeit messen, dann legt die Messung die Geschwindigkeit fest.
3. Wenn wir die kinetische Energie des Elektrons messen, dann wird es diese Energie beibehalten, insofern es sich gleichförmig bewegt.

#### *Abb. 11.5.: Beispielitem Item 9*

sein können, mit *1* kodiert, wenn alle Antworten korrekt waren und mit *0* sonst.

### 11.2.4. Zusätzliche statistische Analyse - Explorative Faktorenanalyse

Quantenphysikalisches Reasoning kann durch verschiedene Konstrukte wie bspw. ein Wissen über Modelle und die Fähigkeit, zwischen Modellen wechseln zu können, beeinflusst sein. Zudem zeigen die Erkenntnisse der Konzeptwechseltheorien, dass Erklärungen für physikalisch gleiche Phänomene in unterschiedlichen Kontexten koexistieren können. Eine Eindimensionalität des zu messenden Konstruktes quantenphysikalisches Reasoning ist somit nicht unbedingt gegeben. Auch wenn die Itemfitstatistik bereits



**Abb. 11.6.:** Zusätzliche statistische Verfahren zur Identifikation von potenziell nicht-modellkonformen Items.

zur Evaluation der Eindimensionalität der Messskala genutzt wird, gibt eine explorative Faktorenanalyse (EFA) zusätzlich Aufschluss über das Zusammenspiel der Items (Abb. 11.6).

Eine eindimensionale Messskala korrespondiert zu der Identifikation von einem Faktor im Datensatz. Lassen sich jedoch Items finden, die nur marginal oder gar nicht auf diesen Faktor laden, demonstriert dies eine Abweichung von der Eindimensionalität. Eine zusätzliche inhaltliche Analyse kann dann weiteren Aufschluss über diese Items geben. Zur Berechnung der Faktorenanalyse wird das R-Paket *psych* verwendet (Revelle, 2020). Um zu bewerten, ob ein Datensatz überhaupt für eine EFA geeignet ist, wird das Kaiser-Maier-Olkin Kriterium (KMO) herangezogen, bei dem die *measure of sample adequacy* (MSA) berechnet wird. Eine Faktorenanalyse ist dann sinnvoll, wenn der mittlere MSA-Wert größer 0.5 ist (Backhaus et al., 2016).

Um die Anzahl der Faktoren zu bestimmen, wird die Parallelanalyse verwendet. Bei dieser werden zufällige Korrelationen im Datensatz von den Korrelationen mit den zugrundeliegenden Faktoren unterschieden. Die Faktorladungen werden dann mit Hilfe der *Varimax*-Rotation und einer Minimal-Residuals Solution (*minres*) berechnet (Moosbrugger und Schermelleh-Engel, 2008).

Basierend auf den Ergebnissen der EFA, der Rasch Analyse sowie einem inhaltlichen Abgleich der Items mit dem inhaltlichen Rahmen des Fragebogens wird abschließend über den Ausschluss von Items entschieden.

### 11.3. Ergebnisse

Mit Hilfe der formulierten Auswahlkriterien wurde ein Pool von 28 Items erstellt. Zwei Items sollen diesen Pool exemplarisch illustrieren:

#### Item 11

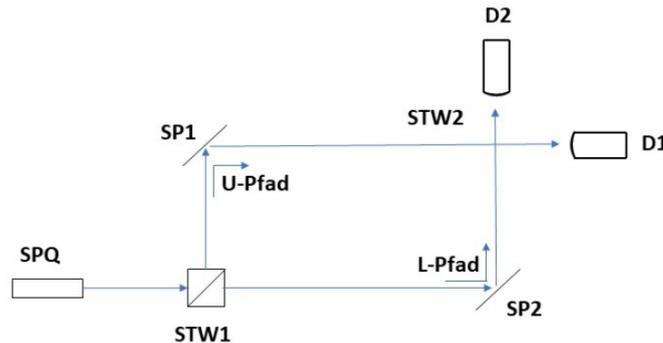
Das *Item 11* adressiert das Superpositionsprinzip und dessen Interpretation im Kontext eines Einzelphotons im Mach-Zehnder Interferometers, aus dem der zweite Strahlteiler ausgebaut wurde. Mit Blick auf den experimentellen Aufbau wird deutlich, dass sich die Aufgabenstellung auf das Strahlteilerexperiment reduzieren lässt: Der Strahlteiler STW1 präpariert einen Superpositionszustand aus *Reflektiert* (U-Pfad) und *Transmitiert* (L-Pfad). Somit muss der Gesamtzustand nach dem ersten und vor dem zweiten Strahlteiler als Superpositionszustand beschrieben werden, was als *“nimmt beide Pfade zugleich“* interpretiert werden kann (Antwort 1). Von einem naiv-dualistischen Stand-

## 11. Fragebogen

---

Der Aufbau des unten gezeigten Mach-Zehnder Interferometers ist wie folgt:

- Das Interferometer ist perfekt justiert, sodass bei klassischem Licht destruktive Interferenz auf dem Ausgang D2 liegt und konstruktive Interferenz auf dem Ausgang D1.
- Die Einzelphotonenquelle sendet einen Strahl von Photonen aus. Es befindet sich immer **nur ein Photon** im Aufbau.
- Die Detektoren sind ideale Detektoren (100 % Ansprechvermögen).
- Der zweite Strahlteiler wurde ausgebaut.



Ein einzelnes Photon wird von der Quelle ausgesendet. Ist es möglich, dass ein Photon zugleich den U-Pfad und den L-Pfad nimmt, nachdem es den ersten Strahlteiler STW1 passiert hat?

1. Ja. Ein einzelnes Photon kann den U-Pfad und den L-Pfad zugleich nehmen.\*
2. Nein. Ein einzelnes Photon, kann nur einen der beiden Pfade (U oder L) nehmen.
3. Nein. Ein einzelnes Photon, nimmt den U-Pfad, wenn es unpolarisiert ist und den L-Pfad, wenn es polarisiert ist.

**Abb. 11.7.:** Item 11 zum Superpositionsprinzip.

punkt betrachtet, legt das Experiment das Photon als Teilchen fest, welches nur an einem Ort sein kann (Realitätsargument), sodass nur entweder Reflexion oder Transmission möglich ist (Antwort 2). Die dritte Antwortmöglichkeit spiegelt die Vorstellung eines zu Grunde liegenden Determinismus der Versuchsergebnisse wider. In diesem Fall determiniert die Polarisationsrichtung die Versuchsergebnisse. Dem Beobachter ist der Determinismus jedoch durch das Experiment nicht zugänglich. Daher erscheinen die Ereignisse *Reflektiert* oder *Transmittiert* zufällig.

## 11. Fragebogen

---

Bewerte die nachfolgende Aussage:

*Photonen müssen Wellen sein, da auch ein einzelnes Photon Interferenz erzeugt.*

- Die Aussage ist falsch. Photonen sind sowohl Wellen als auch Teilchen zugleich. Erst das Experiment entscheidet, ob das Photon eine Welle oder ein Teilchen ist.
- Die Aussage ist falsch. Photonen sind weder Wellen noch Teilchen. Die Interferenz im Michelson Interferometer wird durch die Überlagerung der Wahrscheinlichkeitsamplituden erzeugt.\*
- Die Aussage ist falsch. Die Photonen sind winzige Teilchen, die von der Lichtwelle umhüllt sind und sich mit ihr mitbewegen. Im Interferometer sieht man die Interferenz nur, weil die umhüllenden Wellen interferieren.

**Abb. 11.8.:** Item 17 zur Erklärung der Interferenz von Einzelphotonen.

### Item 17

Item 17 thematisiert die Frage, ob Photonen Wellen sein müssten, da Interferenz beobachtbar ist. Die drei Antwortmöglichkeiten repräsentieren die drei möglichen Reasoning Formen:

**Klassisches Reasoning:** Hinter dem klassischen Reasoning verbirgt sich die Vorstellung, dass Licht aus Lichtbündeln bestehe, die wiederum aus Wellen konstituiert seien, welche dann die Photonen als klassische Teilchen transportierten. Somit ist das beobachtete Interferenzmuster eine Folge der Interferenz der umhüllenden Lichtwelle (Antwort 3).

**Dualistisches Reasoning:** Der Aufbau des Mach-Zehnder Interferometers erlaubt keine Möglichkeit festzustellen, ob das Photon am Strahlteiler STW 1 transmittiert oder reflektiert wurde. Daher legt der Versuchsaufbau das Auftreten von Wellen fest und Antwort 1 erscheint korrekt.

**PSI-Reasoning:** Aufgrund des zweiten Strahlteilers STW2 werden die beiden Beiträge des Superpositionszustandes additiv detektiert. Somit muss das Betragsquadrat über die Summe der Unterzustände, also den gesamten Superpositionszustand gebildet werden, weshalb Phasenunterschiede zwischen den Wahrscheinlichkeitsamplituden der Unterzustände relevant werden. Es ist eine Interferenz der Detektionswahrscheinlichkeit beobachtbar (Antwort 2).

Weiterhin umfasst der Fragebogen Items zur Wellenoptik. Um diese von den Items zur

Quantenphysik zu unterscheiden, werden diese mit VW (Vorwissen) bezeichnet.

### 11.3.1. Qualitative Studien zur Prüfung der Annahmen 3-5

#### Gruppendiskussion mit Studierenden der Physik

Die Gruppendiskussion hat zwei Probleme mit dem Itempool (pool28) deutlich gemacht:

1. Der Itempool ist auf Grund vieler textlastiger Items zu schwierig. Besonders die von Singh (2008) adaptierten Items umfassen zu viel Text.
2. Die spezifisch quantenphysikalischen Begriffe wie bspw. der *Kollaps der Zustandsfunktion* erhöhen zusätzlich die Verständlichkeit und damit die Schwierigkeit der Items.

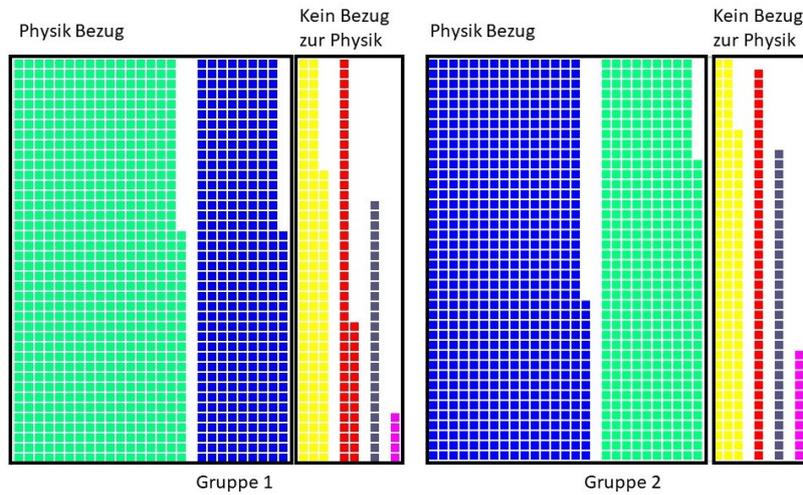
Aufgrund dieser Ergebnisse wurden sieben Items aus dem Pool aussortiert. Zudem wurden mehrere Items sprachlich überarbeitet, um diese verständlicher zu gestalten. Zusätzlich wurden 12 Items entwickelt, die das Strahlteilerexperiment, das Michelson Interferometer, die Elektronenbeugungsröhre, die Wellenoptik und den Determinismus der klassischen Physik behandeln. Der überarbeitete Pool mit 33 Items (pool33) wurde für die weiteren Studien verwendet.

#### Think-Aloud-Studie

Im Verlauf der Analyse wurde eine mangelnde Trennschärfe der Kategorien *Item* und *relevante Strategie* festgestellt. So kann bspw. die Aussage „und du weißt außerdem, dass es ein Interferometer ist und es so aussieht“ (Gruppe 2, Aussage 398) entweder als *Item* kategorisiert werden (das Item enthält das Mach-Zehnder Interferometer inkl. Skizze) oder als *relevante Strategie* (die Studierenden versuchen herauszufinden, wie beim Knallertest gemessen werden kann, ob eine Bombe eingebaut ist oder nicht) kategorisiert werden.

Obwohl Abb. 11.9 eine Trennung der beiden Kategorien zeigt, lag auf Grund einer mangelnden Trennschärfe eine Subsumierung der einzelnen Kategorien zu zwei übergeordneten Kategorien *Physik Bezug* und *Kein Bezug zur Physik* nahe. Auf diese Weise lassen sich alle Äußerungen eindeutig den beiden übergeordneten Kategorien zuordnen. Abb.

11.9 zeigt, dass mehr als die Hälfte aller Codes der Kategorie *Physik Bezug* (grün und blau) zugeordnet werden kann. Somit unterstützt die Auswertung der beiden Interviews die Annahme, dass die Beantwortung der Items kognitive Aktivitäten anregt.



**Abb. 11.9.:** Kodierung der beiden Transkripte (links: Gruppe 1): Grün: relevante Strategie, Blau: Item, Gelb: Interaktion mit dem Partner, Grau: Sicherheit der Antwort, Rot: nicht-relevante Strategie, Pink: Sonstiges

## Expertenrating mit Doktorierenden

Die relativen Häufigkeiten in Tab. 11.2 zeigen für drei Items eine deutliche Abweichung zwischen der korrekten Antwort (markiert in Grün) und der von den Doktorierenden favorisierten Antwort. Für Item 26 merkten zudem zwei Personen an, dass das Item

**Tab. 11.2.:** Abweichend beantwortete Items. Grün: Korrekte Antwort

Item	1	2	3	4
Item 26	0.2	0.3	0.3	
VW2	0.545	0.364	0	0.91
VW5	0.583	0.333	0.084	

nicht zu beantworten sei, da keine der Antwortmöglichkeiten richtig sei. Im Folgenden werden die drei Items diskutiert.

### Item 26 (Welle-Teilchen Dualismus)

Die Doktorierenden, die angaben, sie könnten das Item nicht beantworten, bemängelten vor allen Dingen die Formulierung „*Im Photonenmodell ...*“, welches eine Teilchentheorie von Licht

Bewerte die folgende Aussage:

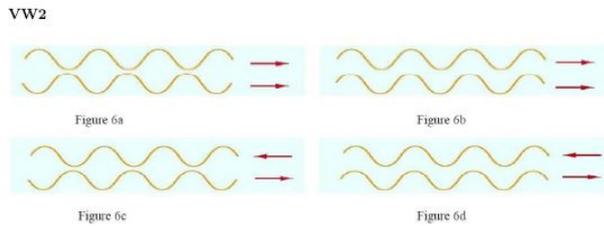
*Im Photonenmodell wird Licht als Teilchen angesehen.*

1. Die Aussage ist richtig. Experimente, wie das Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen oder der Photoeffekt demonstrieren das Teilchenverhalten des Lichts.
2. Die Aussage ist falsch. Experimente wie der Doppelspaltversuch mit Einzelphotonen oder Interferometerversuche, demonstrieren weiterhin das Wellenverhalten des Lichts.
3. Die Aussage ist falsch. Experimente wie das Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen oder Interferometerversuche können weder durch Wellen noch Teilchen zusammenhängend erklärt werden.

impliziere. Die Antwortmöglichkeiten behandelten hingegen die quantentheoretische Beschreibung von Licht. Dieses Problem wurde bereits in der vorherigen Think-Aloud-Studie festgestellt, sodass die Formulierung des Itemstammes zu „*In der Quantenphysik wird Licht als Teilchen betrachtet*“ umformuliert wurde.

### VW2 (Interferenz monochromatischer Wellen)

Die Mehrheit der Befragten erkannte die konstruktive Interferenz in der Fig. 6b, übersah jedoch das Phänomen der stehenden Welle in Fig. 6d. Allerdings beruht dieses Phänomen ebenfalls auf der Interferenz von Wellen mit entgegengesetzter Propagationsrichtung. Dies wurde bereits in der Think-Aloud-Studie im Interview der 2. Gruppe festgestellt. Gruppe 1 beantwortete das Item hingegen korrekt, indem dazu ein Vergleich mit Wasserwellen herangezogen wurde. Daher bedarf dieses Item einer sorgfältigen Überprüfung bei der Rasch Analyse.



Zwei monochromatische Lichtwellen haben die selbe Ausbreitungsrichtung. Die obigen Abbildungen zeigen die räumliche Abhängigkeit des elektrischen Feldes zur Zeit  $t_0$ , wobei der Pfeil die Ausbreitungsrichtung anzeigt.

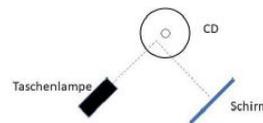
Welche der nachfolgenden Aussagen ist richtig bei der Betrachtung von Interferenz der gegebenen Wellen:

1. Nur die Wellen in Figure 6b werden konstruktiv interferieren.
2. Die Wellen in Figure 6b sowie die Wellen in Figure 6d werden konstruktiv miteinterferieren.
3. Die Wellen in Figure 6b sowie die Wellen in Figure 6c werden konstruktiv interferieren.
4. Die Wellen in Figure 6c sowie die Wellen in Figure 6d werden nicht miteinander interferieren.

### VW5 (Interferenz am Reflexionsgitter auf der Oberfläche einer CD)

Die Mehrheit der Doktorierenden wählte Antwort 1 (Beugung) als Ursache für den beobachteten Regenbogen anstelle der Interferenz von Lichtwellen, die von der gitterartigen Oberfläche der CD reflektiert werden. Nahezu dasselbe Ergebnis ließ sich bei Gruppe 1 der Think-aloud Studie feststellen. Obwohl beide Studien ein Problem mit diesem Item aufzeigen, wurde das Item im Itempool zunächst beibehalten. Der Grund ist die starke Bindung an die einheitlichen Prüfungsanforderungen Physik (KMK, 2004). Somit bedarf auch dieses Item einer sorgfältigen Überprüfung bei der Rasch Analyse.

vW5



Eine CD wird mit weißem Licht einer Taschenlampe beleuchtet (siehe Abb.). Dabei wird auf dem Schirm ein Regenbogenmuster sichtbar. Diese Phänomen kann physikalisch durch...

1. ... Beugung ...
  2. ... Interferenz ...
  3. ... Brechung ...
- ... beschrieben werden.

## Zusammenfassung des Ergebnisses

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Expertenrating ...

- ... auf Probleme in der Formulierung der Items aufmerksam machte.
- ... die Items VW2 und VW5 (klass. Wellenoptik) als besonders herausfordernd kennzeichnete.
- ... den Items eine grundsätzliche fachliche Korrektheit sowie die Verwendung zeitgemäßer Sprechweisen über Quantenphysik attestierte.

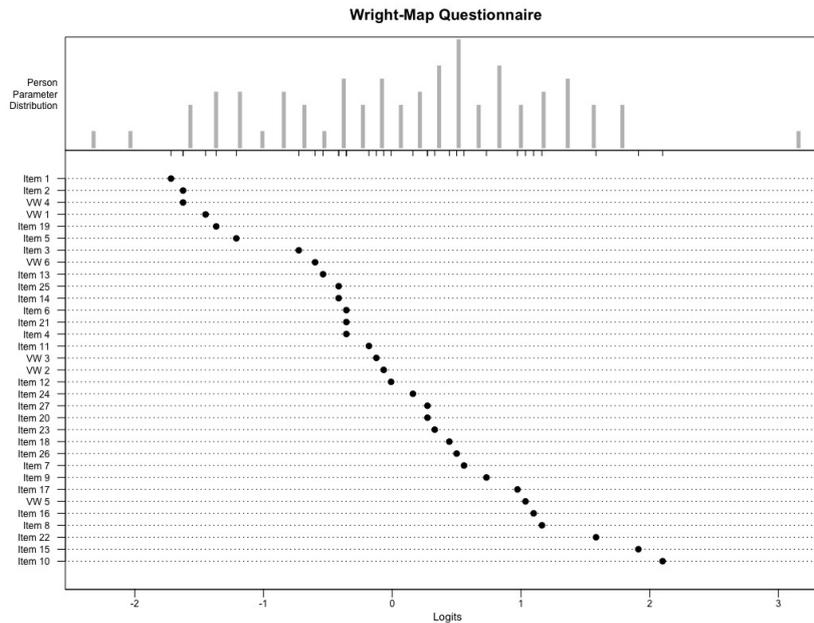
### 11.3.2. Felderprobung und Rasch Analyse

#### Passung zwischen Zielgruppe und Fragebogen

Die Person-Item-Map (genannt Wright-Map, Abb. 11.10) bildet die Personenfähigkeit der Befragten und die Itemschwierigkeit der einzelnen Items entlang derselben (Logit<sup>1</sup>)-Skala ab. Die Personenfähigkeit ist auf der oberen Skala von niedriger zu hoher Personenfähigkeit (links nach rechts) dargestellt und die von oben nach unten zunehmende Itemschwierigkeiten werden in Form von Punkten dargestellt (siehe Bond und Fox (2012) für mehr Details).

---

<sup>1</sup>Logit stellt eine Verschmelzung der Begriffe Log-Odds Unit, also der logarithmischen Darstellung des Rasch Modells dar.



**Abb. 11.10.:** Die Wright-Map zeigt eine Passung der Itemschwierigkeit zur Personenfähigkeit.

Folgendes kann der Wright-Map entnommen werden:

- Die Items in Abb. 11.10 weisen einen Schwierigkeitsbereich von  $-2$  bis  $+3$  Logits auf, wobei keine Lücken größer  $0.5$  Logits<sup>2</sup> zu finden sind. Kritisch sind Lücken größer  $1$  Logit, da es zu einer Unterschätzung der Wahrscheinlichkeit einer korrekten Antwort des nächst schwereren Items führt (Fun und Sun, 2013).
- Der obere Bereich von Abb. 11.10 zeigt eine Verteilung der Personenfähigkeit der Stichprobe als Histogramm. Die Personenfähigkeit einer Person ( $3$  Logits) liegt weit über der Schwierigkeit des schwersten Items (ca.  $2$  Logits). Insgesamt lässt sich sagen, dass die Mehrzahl der Probanden mehr als die Hälfte der Items richtig beantworten kann. Allerdings scheinen einzelne Studierende Probleme mit den Items zu haben (Personen mit sehr niedriger Fähigkeit, unterhalb ca.  $-2$  Logits).
- Fünf Items (Item 25, Item 14, Item 6, Item 21 und Item 4) weisen nahezu gleiche Schwierigkeiten auf,  $-0.42 < D_i < -0.35$ . Allerdings erfragen sie alle verschie-

<sup>2</sup>Im Rahmen dieser Arbeit wird die amerikanische Dezimalschreibweise verwendet, um konsistent mit den Abbildungen aus  $R$  zu sein.

dene, fachlich relevante Inhalte (z. B. Item 25: Erklärung der Elektronenbeugung), sodass die Items nicht ausgeschlossen wurden.

### Modellkonformität - Itemfit

Zur Prüfung der Modellkonformität der Items wurden die standardisierten MNSQ-INFIT und -OUTFIT Werte betrachtet (siehe Tab. 23.1 im Anhang). Üblicherweise werden MNSQ Werte im Bereich von 0.5 - 1.5 als produktiv für die Messung angesehen, wobei gewöhnlich für Fragebögen der Wertebereich auf 0.7 - 1.3 eingeschränkt wird (Boone et al., 2014). Wird dies berücksichtigt, zeigen Item 1, VW 2, VW 4 und VW 5 ein

*Tab. 11.3.: Items mit Misfit und ihr Verhalten in den qualitativen Studien*

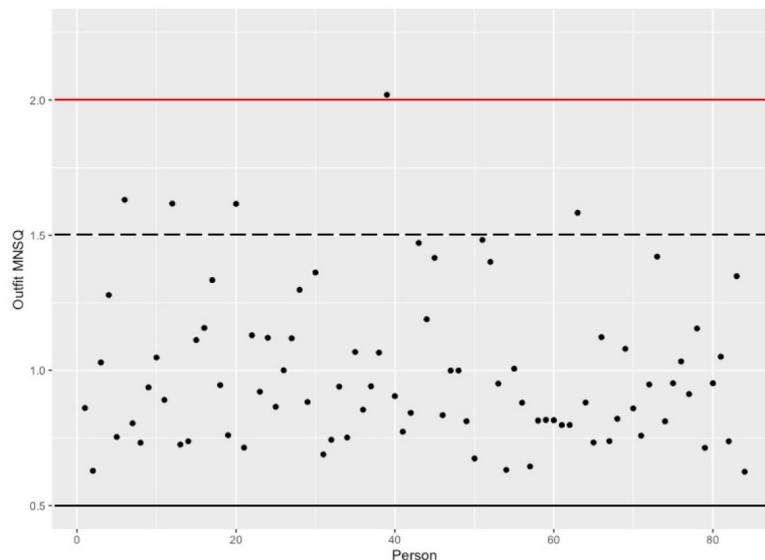
Item	Studie			
	Think-aloud	Experten Ra- ting	Rasch Analyse	Ausschluss
1. Rasch Modell				
Item 1	Kein Problem	Kein Problem	Misfit (Outfit)	Nein
VW 2	Problematisch	Problematisch	Misfit (Infit / Outfit)	<b>Ja</b>
VW 4	Kein Problem	Kein Problem	Misfit (Outfit)	Nein
VW 5	Problematisch	Problematisch	Misfit (Outfit)	<b>Ja</b>
2. Rasch Modell				
Item 1	Kein Problem	Kein Problem	Misfit (Outfit)	Nein
Item 8	Kein Problem	Kein Problem	Misfit (Outfit)	Nein
VW 3	Kein Problem	Kein Problem	Misfit (Outfit)	Nein

kritisches Verhalten (Tab. 11.3). Jedoch haben sich nur VW 2 und VW 5 in den vorherigen Studien bereits als problematisch erwiesen, sodass diese Items ausgeschlossen wurden (nun pool31). Mit pool31 wurde ein zweites Rasch Modell berechnet (rechte Seite Tab. 23.1 im Anhang). Obwohl Item 1, Item 8 und VW 3 weiterhin einen Misfit aufweisen, wurden die Items zunächst im Itempool behalten, da der MNSQ-Wert kleiner 1.5 ist und damit die Items noch produktiv für die Messung sind.

Auf Grundlage der Ergebnisse der EFA soll dann eine abschließende Entscheidung über das Beibehalten oder Ausschließen der Items getroffen werden.

### Modellkonformität - Personfit

Um zu bewerten, inwieweit die befragten Personen mit dem Rasch Modell modelliert werden können, wurde die Personfit-Statistik für den ursprünglichen Itempool pool33 betrachtet (Abb. 23.1). Boone et al. (2014) sprechen sich dafür aus, den Outfit MNSQ-



**Abb. 11.11.:** Person-*Outfit MNSQ* Werte und Grenzwerte. 0.5 (Schwarz) - 1.5 (gestrichelt) Produktiv für die Messung. <2 (Rot) Abwertung der Messung.

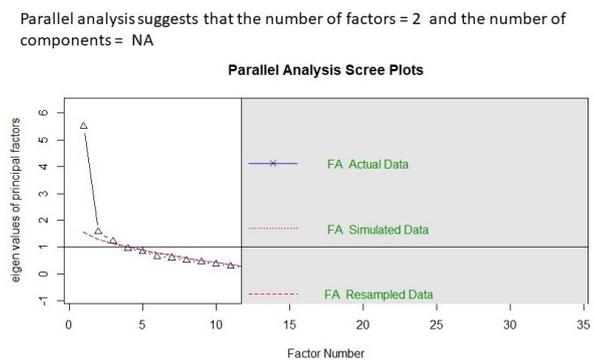
Wert zu betrachten, da dieser besonders sensibel für Ausreißer ist. In Abb. 23.1 ist der MNSQ-Wert für jede Personen aufgetragen und die gebräuchlichen Grenzen eingezeichnet: Der Bereich 0.5 - 1.5 (schwarze und gestrichelte Linie) entspricht Personen die produktiv zur Definition des Modells beitragen. Die Personen mit Werten zwischen 1.5 und 2.0 (rote Linie) sind unproduktiv für die Messung, aber wirken nicht degradierend. Personen mit Werten größer 2.0 sowie kleiner 0.5 wirken degradierend für die Messung (Boone et al., 2014). Abb. 23.1 zeigt, dass lediglich Person Nr. 39 einen Outfit-Wert größer 2.0 hat und vier Personen unproduktiv für die Messung sind. Die Mehrheit der Personen (79) weisen einen akzeptablen MNSQ-Wertebereich auf (0.5 - 1.5). Somit wurde Person 39 aus dem Itempool ausgeschlossen.

## 11.4. Problematische Items - Explorative Faktorenanalyse

### 11.4.1. Bestimmung der Anzahl der Faktoren

Die Berechnung des Overall MSA-Wertes für den Datensatz ergibt einen Wert von 0.6 (mäßiger Wert), sodass der Datensatz grundsätzlich für eine EFA geeignet ist.

In Abbildung 11.12 ist das Ergebnis der Parallelanalyse dargestellt. Der abgebildete Scree-Plot ist schwierig zu deuten, da die gestrichelte Linie den Rand des Fehlerbereiches eines dritten Faktors schneidet. Dennoch deutet der Scree-Plot auf zwei Faktoren hin, was rechnerisch durch die Parallelanalyse bestätigt wird. Nachfolgend wurden die Faktorladungen für eine Zwei-Faktor-Schätzung berechnet. In Tab. 11.4 wurden Ladungen kleiner 0.3 ausgelassen (Schwellenwert für signifikante Interpretation mit dem Faktor, Bortz und Schuster, 2010).



**Abb. 11.12.:** Ergebnisse der Parallelanalyse und Screeplot. In Dreiecken: Eigenwerte des Datensatzes. Rot-gestrichelt: Simulierte Daten

**Tab. 11.4.:** Faktorladungen der Items oberhalb des Grenzwertes von 0.3.

Item	Faktor 1	Faktor 2
Item 1	0.464	
Item 2	0.408	
Item 3	0.398	0.304
Item 4	0.408	
Item 5	0.434	
Item 6	0.522	
Item 7	0.409	
Item 8		
Item 9		
Item 10		
Item 11	0.393	
Item 12	0.624	
Item 13	0.610	
Item 14		
Item 15		
Item 16	0.376	
Item 17		0.759
Item 18	0.301	0.716
Item 19	0.368	
Item 20	0.543	
Item 21	0.473	
Item 23		0.591
Item 24	0.312	
Item 25	0.358	0.316
Item 26		0.441
Item 27		0.557
VW 1	0.389	
VW 3		
VW 4	0.561	
VW 6	0.432	

## Ergebnisse der explorativen Faktorenanalyse

Faktoren gelten als statistisch interpretierbar, wenn mindestens vier Items mit Ladungen größer als 0.6 oder mindestens 10 Items mit Ladungen größer als 0.4 auf sie laden (Bortz und Schuster, 2010). Somit kann nur der erste Faktor interpretiert werden (12 Ladungen größer 0.4). Der zweite Faktor ist hingegen nicht interpretierbar, aber weist dennoch vergleichsweise hohe Ladungen auf ( $> 0.4$  bei 5 Items):

Auffallend ist, dass mit Ausnahme von *Item 3* alle Items eigens entwickelte Items sind, die den naiven Welle-Teilchen Dualismus thematisieren. Z. B. Item 18 in Abb. 11.13: Von einem semiklassischen Standpunkt scheint Antwortmöglichkeit 2 die korrekte Antwort zu sein. Da die Items, die auf den zweiten Faktor laden, in der Rasch Analyse

Ist die nachfolgende Aussage richtig oder falsch?

*Photonen müssen Teilchen sein, da sie am Strahlteiler entweder reflektiert oder transmittiert werden.*

- Die Aussage ist richtig. Die Photonen sind winzige Teilchen, die von der Lichtwelle umhüllt sind und sich mit ihr mitbewegen. Der Strahlteiler verteilt diese Teilchen dann gleichmäßig.
- Die Aussage ist richtig. Photonen sind sowohl Wellen als auch Teilchen zugleich. Erst das Experiment entscheidet, ob das Photon eine Welle oder ein Teilchen ist.
- Die Aussage ist falsch. Photonen sind weder Wellen noch Teilchen. Der Strahlteiler reflektiert und transmittiert das Photon quasi zugleich. Bis es gemessen wird, ist das Photon nicht-lokalisiert.

**Abb. 11.13.:** *Item 5 als Beispiel Item für den zweiten Faktor*

unauffällig waren, wurden die Items im Itempool beibehalten. Die Ergebnisse der explorativen Faktorenanalyse machen jedoch deutlich, dass diese Items die Eindimensionalität der Skala des Testinstrumentes potenziell verletzen könnten, wenn die Testpersonen überwiegend über dualistisch geprägte Konzepte verfügen.

### 11.4.2. Ausschluss weiterer Items

Tab. 11.4 zeigt zudem Items, die auf keinen der beiden Faktoren laden. Diese Items zeigten ebenfalls keine Auffälligkeiten in der Rasch Analyse. Um zu entscheiden, ob die Items im Itempool verbleiben sollen oder nicht, wurde nochmals der Inhalt der Items betrachtet. Wie Tab. 11.5 zeigt, weisen die Items einen Schwierigkeitsbereich von  $-0.395$

**Tab. 11.5.:** Schwierigkeiten und IN- und OUTFIT-Werte der Items, die auf keinen Faktor laden.

Item	Schwierigkeiten [Logits]	Infit/Outfit MNSQ
Item 8	1.226	1.591 / 1.247
Item 9	0.784	1.092 / 1.089
Item 10	2.188	1.143 / 1.122
Item 14	-0.395	1.313 / 1.236
Item 15	1.955	1.064 / 0.953
Item 23	0.371	1.152 / 1.140
VW 3	-0.095	1.318 / 1.205

bis 2.188 Logits auf und mit Ausnahme von Item 8 sind MNSQ-Werte kleiner 1.5. Folgende Items wurden im Itempool behalten:

- *Item 8* wurde auf Grund der physikalischen Relevanz im Itempool belassen. Das Item betrachtet ein Mach-Zehnder Interferometer ohne den zweiten Strahlteiler. Somit werden dieselben experimentellen Ergebnisse erhalten wie bei einem einfachen Strahlteilerexperiment.
- *VW 3* wurde im Itempool belassen, da es fragt, warum Licht als Welle beschrieben werden kann. Das Item erfragt somit das relevante Vorwissen der Lernenden.

Durch Ausschluss der anderen in Tab. 11.5 aufgeführten Items wurde nun ein Fragebogen mit 26 Items (pool26) erhalten. Für diesen wurden die Wright-Map und die EFA erneut berechnet (siehe Kap 24):

- Die Wright-Map zeigt keine Lücken größer 0.5 Logits ohne Veränderungen der bestehenden Lücken.
- Die Separations-Reliabilität ist nun 0.830. Der somit verbundene geringfügige Rückgang der Selektivität (von 0.833 zu 0.830) ist nicht signifikant.
- Der Overall MSA-Wert ist nun 0.69. Erneut laden nun sechs Items auf den zweiten, dualistischen Faktor, wobei die geringen Faktorladungen weiterhin gegen die Interpretierbarkeit sprechen. *Item 3* lädt nun auf den ersten Faktor. Allerdings laden die Items *Item 8* und *VW 3* nach wie vor auf keinen Faktor (Tab. 24.1 in Kap. 24).

## 11.5. Parsimonität und Dimensionalität

Die Rasch Analyse und die EFA haben zwei zueinander komplementäre Ergebnisse: Während das Rasch Modell keinen Misfit der Items sowie eine gute Passung zwischen Items und Zielgruppe zeigt, lassen sich in der EFA Items finden, die entweder auf einen zweiten Faktor oder auf keinen Faktor laden. Somit liegen keine klaren Argumente für oder gegen eine eindimensionale Messskala vor.

Ob eine eindimensionale oder eine zweidimensionale Messskala bevorzugt werden sollte, kann mit Hilfe des philosophischen Prinzips der Parsimonität beurteilt werden. Diesem Prinzip folgend ist das einfachste (im Sinne von geringster Variablenzahl), den Sachverhalt vollständig beschreibende Modell komplexeren Modellen vorzuziehen (Sobber, 2009). Für Parsimonitatsbewertungen von Rasch Modellen kann die Anzahl der Modellparameter  $n_p$  herangezogen werden. Üblicherweise werden diese über die Koeffizienten der Informationstheorie *AIC* und *BIC* angegeben. Für große Stichproben findet üblicherweise der AIC-Wert (Akaike’s Information Criterion;  $AIC = \text{Varianz} + 2 \cdot n_p$ ) Verwendung. Für kleinere Stichproben der Größe  $N$  wird hingegen der BIC-Wert (Bayes’ Information Criterion;  $BIC = \text{Varianz} + \log(N \cdot n_p)$ ) verwendet. In der Interpretation ist nun ebenjenes Modell vorzuziehen, welches den geringsten AIC bzw. BIC aufweist (I. Neumann et al., 2011).

Das eindimensionale und das zweidimensionale Modell wurden mit dem R-Paket *TAM* berechnet, welches ebenfalls den AIC- und BIC-Wert für jedes Modell berechnet (Tab. 11.6).

**Tab. 11.6.:** AIC- und BIC-Wert für ein 1D- und 2D-Rasch-Modell

Dimensionen	AIC	BIC
1	2460	2525
2	2479	2606

Es kann eine eindeutige Differenz zwischen den Werten des 1D- und des 2D-Modelles festgestellt werden, wobei die Werte des 1D-Modelles am niedrigsten sind. Dem Prinzip der Parsimonität folgend hat ein zweidimensionales Rasch Modell keinen Vorteil gegenüber einem eindimensionalen Modell. Daher ist die Annahme einer eindimensionalen Messskala angemessen.

## 11.6. Bewertung des Interpretation-Use-Argumentes

Die Annahmen des IUA konnten durch die fünf durchgeführten Validierungsstudien bestätigt werden. Hierbei haben vor allen Dingen die Think-Aloud-Studie, das Experten Rating sowie die Rasch Analyse wertvolle Hinweise geliefert.

- Die Think-Aloud-Studie lieferte Hinweise darauf, dass die Auseinandersetzung mit den Items kognitive Aktivitäten evoziert. Der Anteil der Aussagen ohne Bezug zur Physik war bedeutend kleiner als der mit Bezug zur Physik.
- Das Experten Rating lieferte fruchtbare Hinweise für die Verbesserung der Itemformulierung und attestierte dem Fragebogen eine fachliche Korrektheit.
- Mittels Rasch Analyse konnte eine Messskala modelliert werden, die auf Grundlage der Modelfit Parameter als eindimensional angenommen werden kann. Limitiert wird diese Annahme jedoch durch die sechs Items, die auf einen zweiten Faktor (naiver Welle-Teilchen Dualismus) laden sowie durch die zwei Items, die auf keinen Faktor laden. Dem Prinzip der Parsimonität folgend besitzt ein zweidimensionales Rasch Modell jedoch keinen Mehrwert gegenüber dem eindimensionalen Modell.

Somit kann die Testskala und ihre Interpretation für die intendierte Nutzung (Messung von PSI-Reasoning bei Studierenden der Studieneingangsphase) als valide angesehen werden.

## 11.7. Limitationen der Validierungsstudien

### 11.7.1. Limitation der Stichprobe der Think-Aloud-Studie

In der Think-Aloud-Studie wurden nur zwei Gruppen mit unterschiedlicher Dauer und Tiefe der Diskussion interviewt. Allerdings zeigten beide Gruppen keine auffälligen Abweichungen bei der Bearbeitung der Items, sodass die Ergebnisse zueinander kongruent sind. Zudem zeigten auffällige Items der Think-Aloud-Studie diese Auffälligkeit ebenfalls im Expertenrating (z. B. problematische Formulierungen oder abweichende

Antworten) .

Weiterhin wurden ausschließlich Studierende des Masterstudiengangs Lehramt an Gymnasien mit dem Fach Physik interviewt, die bereits Vorlesungen zur Quantenphysik gehört haben. Allerdings zeigt sich, wie bereits in der Theorie dargelegt, dass Studierende zwar mit den prototypischen mathematisch zugänglichen Phänomenen der Vorlesungen (z. B. der Tunneleffekt oder das Wasserstoffatom) vertraut sind, aber nur ein geringes Verständnis von Grundlagen der Quantenphysik besitzen und zumeist klassische bzw. semiklassische Vorstellungen aufweisen (Müller, 2003; Schöne und Pospiech, 2015). Daher erscheint es angemessen, die Studierenden im Master Lehramt mit Studierenden zu Beginn der quantenphysikalischen Ausbildung in Bezug auf das Konzeptverständnis von PSI zu vergleichen. Für eine Nutzung des Fragebogens in der Sekundarstufe II sollte jedoch eine zusätzliche Think-Aloud-Studie durchgeführt werden, um Aufschluss über potenzielle Schwierigkeiten der Lernenden sowie deren Lösungsstrategien zu erhalten. Dies würde zudem zu einer Vergrößerung der Stichprobe führen.

### 11.7.2. Limitationen des Expertenratings

Zur Bewertung der fachlichen Korrektheit wurden ausschließlich Fachphysikerinnen und Fachphysiker befragt. Somit wurde das Konzept PSI-Reasoning nur vom physikalischen Standpunkt aus eingeordnet, eine didaktische Bewertung fehlt. Dies erscheint jedoch nicht problematisch, da PSI-Reasoning ein fachlich motivierter Ansatz ist, welcher der inneren Struktur der Quantenphysik gehorcht und auf drei physikalischen Grundprinzipien fußt.

## 11.8. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung und Validierung eines Fragebogens für die Messung der Fähigkeit Konzeptverständnis von PSI vorgestellt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- Aus bereits entwickelten Testinstrumenten wurde versucht, so viele Items wie möglich zu adaptieren und existierende Inhaltslücken durch eigens entwickelte Items zu füllen.

- Für die Validität der Testskala sowie ihre Interpretation wurde ein Interpretation-Use-Argument formuliert und dieses mittels qualitativer und quantitativer Analysen überprüft.
- Ausgehend von der Interpretation dieser Analysen wurde abschließend ein Mixed-Format Test mit 26 Items erhalten, dessen Validität für eine Befragung der Zielgruppe *Studierende der Studieneingangsphase* geprüft ist. Der Fragebogen ist Kap. 25 im Anhang zu entnehmen.

# 12. Interviewleitfaden

Um mehr Aufschluss über das tatsächlich von den Lernenden verwendete Reasoning zu erhalten, werden zusätzlich zum Fragebogen leitfadengestützte Interviews durchgeführt. In diesen wird ein konkreter Gesprächsanlass geschaffen, in dem die Befragten die im Schlüsselexperiment demonstrierten Phänomene Unteilbarkeit und Interferenz erklären.

## 12.1. Konstruktion des Leitfadens

Wie in Kap. 5.2 dargelegt, sind Erklärungen durch die zugrunde liegenden Konzepte bestimmt. KiP beschreibt zudem, dass Erklärungen kontextspezifisch sein können, sodass für verschiedene Kontexte verschiedene, möglicherweise zueinander komplementäre Erklärungen vorliegen können. Um diese Kontextabhängigkeit beobachten zu können, wurde das Interview in drei Kontexte aufgeteilt:

1. **Photonen:** Im Experiment wird mit einzelnen Photonen gearbeitet. Wie bereits in Kap. 4.1.4 dargelegt, lassen sich verschiedene Alternativkonzepte finden, welche dann möglicherweise die Erklärung des Schlüsselphänomens (Unteilbarkeit bei gleichzeitiger Interferenz) beeinflussen.

Das Schlüsselphänomen selbst kann in zwei Teilphänomene aufgeteilt werden, für die dann mehr oder weniger miteinander vereinbare Erklärungen vorliegen können:

2. **Strahlteilerexperiment:** Am Strahlteiler wird der Superpositionszustand präpariert, welcher durch Messung an den Ausgängen zu *Reflektiert* oder *Transmittiert* reduziert wird. Die so erhaltenen entweder-oder-Ereignisse werden als Nachweis der Photonenunteilbarkeit herangezogen (Passon und Grebe-Ellis, 2015; Rode, 2017b).

3. **Michelson Interferometer:** Das Auftreten des Superpositionszustandes kann durch die Detektion der Interferenz im Interferometer beobachtet werden. Dieses Phänomen steht, wie bereits mehrfach angeführt, aus klassisch-physikalischer Perspektive im Widerspruch zu einer Unteilbarkeit von Photonen.

Um zu analysieren, inwieweit die Charakterisierung des Photons sowie die Erklärung des Strahlteilerexperiment und der Interferenz im Michelson Interferometer einander widersprechen, besteht das Interview aus drei Teilaufgaben:

**Aufgabe 1:** *Erklären Sie, was Sie unter einem Photon verstehen.*

**Aufgabe 2:** *Erklären Sie die Ergebnisse des Strahlteilerexperiments.*

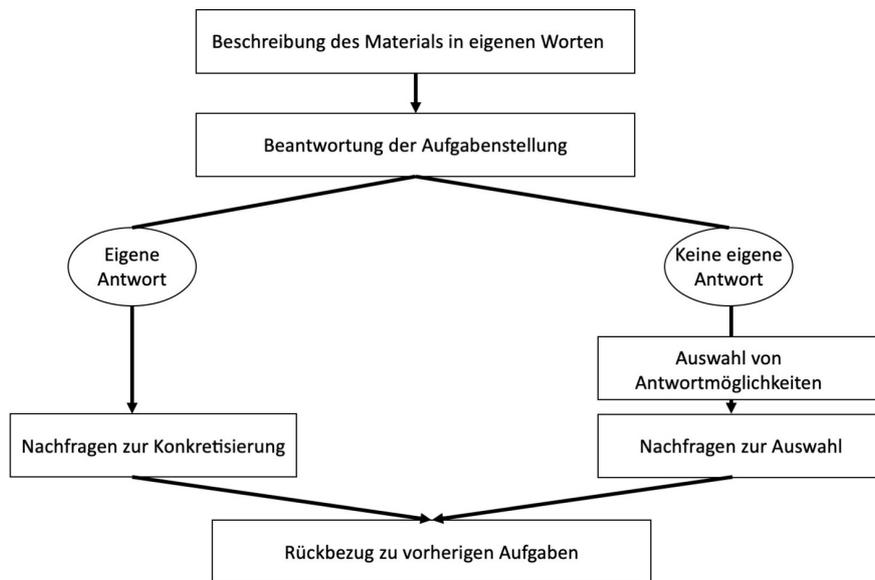
**Aufgabe 3:** *Erklären Sie die Ergebnisse des Michelson Interferometers.*

Zusätzlich werden die Interviewten direkt aufgefordert, Bezüge zwischen den Aufgaben herzustellen, indem sie gefragt werden, inwieweit beispielsweise die Erklärung des Strahlteilerexperiments mit der Charakterisierung des Photons in Einklang gebracht werden kann.

### 12.1.1. Grundgestalt der Aufgaben

Die Aufgabenstellungen sind grundsätzlich nach dem in Abb. 12.1 dargestellten Schema aufgebaut:

Existiert Material zur Visualisierung von Versuchsergebnissen (Aufgabe 2 und 3), soll dieses zunächst von den Befragten in eigenen Worten beschrieben werden, um sicherzustellen, dass alle relevanten Inhalte erkannt wurden. Gegebenenfalls können die Interviewenden Nachfragen stellen. Anschließend wird die eigentliche Aufgabenstellung beantwortet. Sollte die befragte Person keine eigene Antwort formulieren können, werden jeweils drei Antwortmöglichkeiten angeboten, welche die bekannten Lernendenvorstellung widerspiegeln. Orientierung gibt die von Ayene et al. (2011) beschriebene Kategorisierung in klassische, dualistische und quasi-quantenphysikalische Vorstellungen. Dies bedeutet konkret, dass die Befragten ein klassisches, ein dualistisches oder ein auf PSI basierendes Reasoning für die Erklärung der Phänomene angeboten bekommen. Analog wird für das Photon jeweils eine Beschreibung als klassisches Teilchen, dualistisches Hybrid aus Welle und Teilchen oder als Quantenobjekt angeboten.



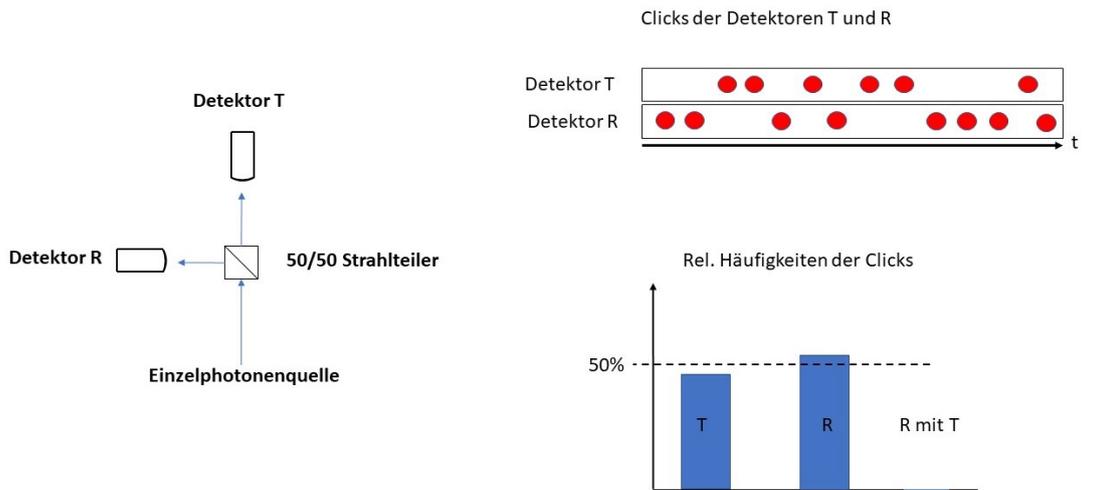
*Abb. 12.1.: Schema der Aufgaben im Interviewleitfaden.*

Nachfolgend werden Nachfragen zur Konkretisierung der eigenen Antwort bzw. zur Begründung der Auswahl durch die Interviewenden gestellt.

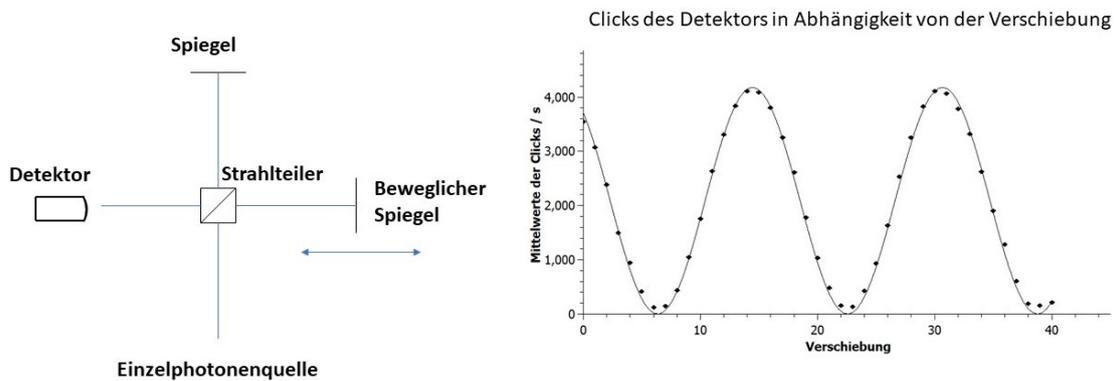
Abschließend werden die Befragten aufgefordert, die Erklärungen in Aufgabe 2 und 3 mit denen in den vorherigen Aufgaben in Beziehung zu setzen. Ziel ist zu ergründen, inwieweit eine in sich widerspruchsfreie Vorstellung über das Quantenobjekt Photon und dessen Verhalten vorliegt.

### 12.1.2. Visualisierung der Phänomene

Um eine Erklärung der Ergebnisse des Strahlteilerexperiments sowie des Michelson Interferometers einfordern zu können, müssen den Befragten die wesentlichen experimentellen Ergebnisse zugänglich gemacht werden. Dazu wurden für beide Aufgaben Materialien entwickelt, die neben dem schematischen Versuchsaufbau auch eine Visualisierung der Ergebnisse enthalten (Abb. 12.2). Die essenziellen Ergebnisse des Strahlteilerexperiments mit einem 50/50 Strahlteiler sind die Zufälligkeit des Messergebnisses, das Ausbleiben von Koinzidenzen der Detektoren *Detektor T* und *Detektor R* sowie die Wahrscheinlichkeit von 50%, dass ein Photon in *Detektor T* bzw. *Detektor R* gemes-



(a) Material Strahlteilerexperiment.



(b) Material zum Mach-Zehnder Interferometer.

**Abb. 12.2.:** Materialien zu Aufgabe 2 und 3.

sen wird. Die Zufälligkeit der Messergebnisse wird in Abb. 12.2a oben rechts symbolisiert: Dargestellt ist die zeitliche Auftragung des Klickens der Detektoren *Detektor T* und *Detektor R* für 14 Messungen. In den Klicks lässt sich kein Muster erkennen. Als Idealisierung wurde das Dunkelrauschen der Detektoren nicht dargestellt. Ebenso wird auf die Darstellung des Triggerdetektors in dieser Darstellung verzichtet. Dennoch zeigt die Auftragung sowie die darunter befindliche Balkendiagramm, dass die beiden Detektoren in diesem kurzen Zeitabschnitt nicht gleich häufig und nicht koinzident klicken.

Die Interferenz im Michelson Interferometer wird durch das im Versuch ausgemessene Interferenzmuster dargestellt (Abb. 12.2 unten). Aufgetragen ist der Mittelwert der Klickzahl gegen die Verschiebung des Spiegels. Letztere wird im nebenstehenden Diagramm als Anzahl der Verschiebungsschritte (immer die gleiche Erhöhung der Spannung am piezoelektrischen Kristall) angegeben. Somit ist eine dem  $\cos^2$  folgende Funktion der Mittelwerte zu sehen.

Zusätzlich zum Material wurden Nachfragemöglichkeiten entwickelt, die sicherstellen sollen, dass die Befragten die relevanten Ereignisse bewusst wahrgenommen haben:

Für das Strahlteilerexperiment bezieht sich die Frage auf die Koinzidenzen der Detektoren. Beim Michelsoninterferometer wird auf den Zusammenhang zwischen Verschiebung und Klickzahl eingegangen.

## 12.2. Pilotierung des Interviewleitfadens

**Ziel:** Identifikation von Schwachstellen in Aufgabenstellungen, Material, Nachfragemöglichkeiten und der grundsätzlichen Struktur des Leitfadens.

**Methode:** Digitale Pilotinterviews mit fünf Studierenden (Physik u. Lehramt Physik) inkl. Einschätzung der Materialien und angebotenen Erklärungen.

**Auswertung:** Probleme und Einschätzungen wurden notiert. Für etwaige Verständnisprobleme in den Notizen wurden die Interviews aufgezeichnet. Eine inhaltliche Auswertung mittels Kodiermanual wurde nicht vorgenommen. Eine Doppelkodierung ist ebenfalls zu dem Zeitpunkt nicht relevant.

### Ergebnisse

- Allgemeine Struktur des Leitfadens
  - Der Leitfaden ist zu unübersichtlich, da die Aufgabenstellungen nicht direkt erkannt werden können. Daher wurde eine optische Abtrennung der Aufgabenstellung und der Nachfragemöglichkeiten vorgenommen, um eine Übersichtlichkeit und besserer Nutzbarkeit des Interviewleitfadens zu erzeugen.
- Aufgabenstellung
  - Auf Grund des Satzanfangs unterscheidet sich eine der vorgeschlagenen Charakterisierungen des Photons von den anderen beiden. Die Satzanfänge

wurden nun angeglichen zu: *Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion . . . .*

- Nachfragemöglichkeiten
  - In der zweiten Aufgabe zum Strahlteilerexperiment wird das Ereignis *R klickt mit T* in der Beschreibung nicht erkannt. Daher wurde eine zusätzliche Nachfragemöglichkeit „*Können Sie etwas zu dem Ereignis R klickt mit T sagen?*“ ergänzt.
  - Die Studierenden nutzen sowohl in der Photoncharakterisierung als auch in den Erklärungen die Bezeichnung Wellen- und / oder Teilchencharakter bzw. -eigenschaft. Um Aufschluss über die Bedeutung des Wortes Eigenschaft oder Charakter zu erhalten, wurde die Nachfragemöglichkeit: „*Was bedeutet für Sie der Begriff Wellen- oder Teilchencharakter bzw. -eigenschaft?*“ ergänzt.
- Material
  - Zur besseren optischen Wahrnehmung des Ereignisses *R klickt mit T* im Balkendiagramm wurde ein Pfeil von der Beschriftung zum Balken auf der Abszisse hinzugefügt.

Der vollständige Interviewleitfaden inkl. Material ist dem Anhang (Kap. 26) zu entnehmen.

### 12.3. Auswertung der Interviews

Die Auswertung orientiert sich an dem Verfahren der *inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse* (Kuckartz, 2016). Ziel dieses Verfahrens ist es „*am Material ausgewählte inhaltliche Aspekte zu identifizieren, zu konzeptualisieren und das Material im Hinblick auf solche Aspekte systematisch zu beschreiben*“ (Schreier, 2014, S. 3). Konkret bedeutet dies, dass das verwendete Reasoning (inhaltliche Aspekte) identifiziert und mit bekannten Konzepten der Lernendenvorstellungsforschung abgeglichen werden soll (Konzeptualisierung).

Um den Inhalt der längeren Antworten auf das Wesentliche zusammenzufassen, werden

Tab. 12.1.: Deduktive Kategorien zur Auswertung der Interviews.

Aufgabe	Oberkategorien		
	Klassisch	Dualistisch	Quasi-Quantenphysikalisch
<b>Photon</b>	Klassisches Teilchen, welches die Teilcheneigenschaften von Licht verantwortet	Hybrid aus Welle und Teilchen, das je nach Experiment als Welle oder Teilchen auftritt	Weder Welle noch Teilchen, besitzt aber Eigenschaften von beidem
<b>Strahlteiler</b>	Photonen sind unteilbare Teilchen, die nur an einem Ort sein können	Das Experiment legt das Teilchensein fest, danach klass. Teilchenargumentation	Der Strahlteiler erzeugt einen Superpositionszustand, d. h. es sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich
<b>Interferometer</b>	Interferenz auf Grund der Lichtwellen	Das Experiment legt das Wellesein fest, danach klass. Wellenargumentation	Die Superposition lässt sich nicht durch Detektion zerstören, die beobachtete Interferenz ist eine Interferenz der Wahrscheinlichkeit

die zumeist längeren Aussagen der Befragten paraphrasiert. Die erhaltenen Paraphrasen werden dann für die Auswertung genutzt. Für die Auswertung wird ein, für die Analyseform charakteristisches, deduktiv-induktiv gebildetes Kategoriensystem verwendet (Kuckartz, 2016). Deduktiv werden die drei grundlegenden Reasoningformen, klassisch, dualistisch und quasi-quantenphysikalisch verwendet (Tab. 12.1). Anhand der vorliegenden Interviewdaten werden dann die beschriebenen Oberkategorien durch induktiv abgeleitete Unterkategorien ausgeschärft.

## 12.4. Zusammenfassung

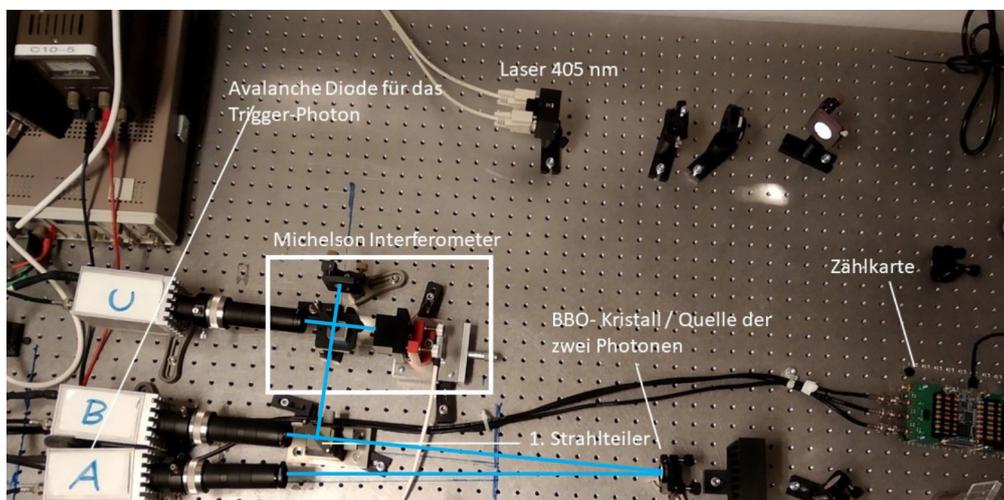
- Im Interview werden die Photonenvorstellung sowie die Erklärung von Unteilbarkeit und Interferenz in drei Aufgaben erfragt.
- Jede Aufgabe beinhaltet Erklärungsvorschläge, die ein klassisches, dualistisches oder quasi-quantenphysikalisches Reasoning widerspiegeln. Die Befragten können aus diesen auswählen, wenn sie eigenständig keine Erklärung formulieren können.
- Die Aufgaben 2 (Strahlteilerexperiment) und 3 (Michelson Interferometer) werden durch Material unterstützt, welches zentrale Versuchsergebnisse visualisiert.
- Der Leitfaden wurde mittels digitalen Interviews mit fünf Studierenden erprobt. Die Grundgestaltung des Leitfadens, die Aufgaben, das Material sowie die Nachfragemöglichkeiten wurden auf Grundlage dieser Interviews überarbeitet.
- Für die inhaltlich strukturierende qualitative Inhaltsanalyse wird ein deduktiv-induktiv gebildetes Kategoriensystem verwendet. Das klassische, dualistische und das quasi-quantenphysikalische Reasoning bilden dafür aus der Literatur abgeleitete Oberkategorien.

# 13. Gestaltung der Lernumgebung

## 13.1. Herausforderungen im Umgang mit dem Schlüsselexperiment

Bei dem Schlüsselexperiment handelt es sich um einen komplexen experimentellen Aufbau, welcher zum größten Teil aus der Einzelphotonenquelle sowie den Einzelphotonendetektoren besteht (Abb. 13.1). Im Rahmen der Auseinandersetzung mit dem Experiment sind die Lernenden mit einigen Herausforderungen konfrontiert:

1. Umfangreicher experimenteller Aufbau aus Lichtquelle, Detektoren, Telexperi-



**Abb. 13.1.:** Realer Aufbau des Schlüsselexperiments. In blau: Schematische Nachzeichnung der Lichtwege.

menten und Zähl Elektronik (siehe Weber (2018) für die Spezifikation der Bauteile).

- Erzeugung von Photonenpaaren durch parametrische Fluoreszenz in einem Beta-Bariumborat Kristall.
  - Präparation von Einzelphotonenzuständen durch Koinzidenzmessung. Nur Koinzidenzen zwischen dem Triggerdetektor A und den Detektoren B und C sind relevant für das Experiment.
  - Auf Grund der Kopplung von Strahlteilerexperiment und Michelson Interferometer ist der Detektor für den reflektierten Ausgang des Strahlteilerexperiment zugleich der Detektor C im Ausgang des Michelson Interferometers.
  - Detektionsereignisse können nur über die Zähl Elektronik ausgelesen werden bzw. über einen zusätzlichen Monitor visualisiert werden.
2. Auf Grund des hohen Justage-Aufwandes ist das Experiment Lernenden nur durch die Datenauswertung zugänglich.
- Ein Aufbau des Experiments durch die Lernenden sowie direkte Veränderungen am Aufbau sind nicht möglich, da Aufbau und Justage experimentelles Geschick bedürfen. Zudem erlauben die in RISU (Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht) definierten Laserschutzmaßnahmen nur einen Einsatz des Experiments als Demonstrationsexperiment (Belzer et al., 2019).
  - Die Beobachtung der Zählraten der Detektoren auf dem externen Monitor lässt das Ableiten von Hypothesen bzw. eine erste Sichtprüfung von Hypothesen zu.
  - Die zugrunde liegende Probabilistik erfordert umfangreiche Datensätze für überzeugend rauschfreie Ergebnisse.
  - Die statistischen Kenngrößen Mittelwert, Standardabweichung sowie relative Häufigkeiten müssen interpretiert werden.
3. Die quantenphysikalischen Grundprinzipien **Probabilistik**, **Superposition** und **Interferenz** können nicht aus dem Experiment abgeleitet bzw. in den Daten entdeckt werden (Bitzenbauer, 2020). Sie können lediglich anhand der Daten nachvollzogen werden.

- Die Probabilistik und die Interferenz ist in den Messdaten nachvollziehbar.
- Das Superpositionsprinzip kann hingegen nicht in den Messdaten nachvollzogen werden. Es kann lediglich dessen Gültigkeit im Aufbau nachvollzogen werden.

4. Modellbildung ohne Verwendung des Formalismus der Quantenphysik.

- PSI liefert ein Narrativ für die Erklärung von Phänomenen. Die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten ist nur über den quantenphysikalischen Formalismus bzw. die Born'sche Regel möglich. Dafür ist jedoch das Rechnen mit komplexen Zahlen nötig. Lediglich für den optischen 50/50 Strahlteiler kann die Wahrscheinlichkeit von 50% vorhergesagt werden.

## 13.2. Lernpfad

Ein geeigneter Lernpfad kann zwar die Gegebenheiten des Experimentes nicht verändern, jedoch hinsichtlich der Komplexität des Aufbaus, der Auswertung sowie der Interpretation der Ergebnisse durch geeignete methodische Entscheidungen Hilfestellung leisten. Ebenso ermöglicht er ein strukturiertes Vorgehen bei der Beobachtung der Zählraten sowie der Auswertung der Messdaten und hilft bei der sukzessiven Interpretation der experimentellen Daten.

### Lernziel

Ziel der Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment ist die Motivation von quantenphysikalischem Reasoning mit PSI für die Erklärung des Experiments. Damit ergibt sich das übergeordnete Lernziel:

*Die Lernenden erklären das Phänomen der Interferenz einzelner Photonen bei zeitgleicher Unteilbarkeit mit Hilfe der quantenphysikalischen Grundprinzipien **Probabilistik, Superposition und Interferenz (PSI-Reasoning)**.*

Um das Lernziel zu erreichen, müssen mehrere Zwischenziele erreicht werden:

1. Lernende beschreiben das Klicken der Detektoren als zufällige Ereignisse.

2. Lernende deuten koinzidente Klicks der Detektoren B und C mit dem Trigger A als Einzelphoton und beschreiben diese ebenfalls als zufällige Ereignisse.
3. Lernende berechnen die relativen Häufigkeiten für das Klicken eines Detektors mit Hilfe der Messwerte.
4. Lernende deuten das Ausbleiben von Koinzidenzen im Strahlteilerexperiment als Unteilbarkeit von Photonen.
5. Lernende erläutern den Unterschied zwischen den Wahrscheinlichkeiten eines klassischen Bernoulli Versuchs und der Wahrscheinlichkeit in der Quantenphysik.
  - a) Lernende vergleichen Wahrscheinlichkeitsberechnungen eines klassischen Bernoulliversuchs mit den gemessenen relativen Häufigkeiten der Klicks im destruktiv justierten Michelson Interferometer.
  - b) Lernende beschreiben die quantenphysikalische Wahrscheinlichkeit im Zusammenhang mit dem Zustand  $|\Psi\rangle$ .
  - c) Lernende berechnen die Klickwahrscheinlichkeit eines Detektors mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsamplitude als Funktion der Phase  $\varphi$ .
6. Lernende deuten die phasenabhängige Zählrate / Klickwahrscheinlichkeit des Detektors C als Folge der Detektion einer kohärenten Superposition, die durch Messung nicht zerstört werden kann.
7. Lernende deuten die phasenabhängige Zählrate / Klickwahrscheinlichkeit als Interferenz von Wahrscheinlichkeitsamplituden.
8. Lernende erklären das Phänomen der Interferenz einzelner Photonen bei zeitgleicher Unteilbarkeit mit Hilfe der quantenphysikalischen Grundprinzipien **Probabilistik, Superposition und Interferenz (PSI-Reasoning)**.
9. Lernende übertragen die Erklärung auf die Interferenz im Mach-Zehnder Interferometer.

### 13.2.1. Methodisch-Didaktische Entscheidung

Die folgenden methodischen und didaktischen Entscheidungen berücksichtigen die genannten Herausforderungen mit der Absicht, die zuvor formulierten Teilziele zu erreichen.

#### Aufgabenstellungen

Konstruktivistische Lerntheorien bewerten das eigenständige Forschen und Entdecken unter Moderation der Lehrenden als besonders lernförderlich. Dieser Prozess weist Parallelen zum Forschungsprozess der Naturwissenschaft auf (z. B. Bell, 2007; Pedaste et al., 2015). Im Rahmen der Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment sollen Lernende daher ebenfalls eigenständig Hypothesen aufstellen und diese mit Hilfe der Messdaten beurteilen. Allerdings ist die Offenheit der Lernumgebung durch die angeführten Herausforderungen begrenzt. Beispielsweise wird der Versuchsaufbau nicht von den Lernenden zur Hypothesenprüfung entwickelt, sondern ist bereits vorgegeben. Daher können die Lernenden nur für bereits vorgegebene Versuchsteile Hypothesen formulieren. Zusätzlich macht die Auswertung der Messwerte ein strukturiertes Vorgehen notwendig, um die wesentlichen Erkenntnisse daraus zu extrahieren. Eine Interpretation der falschen Messwerte, d. h. die Einzelzählraten der Detektoren, führt zu fehlerhaften Schlussfolgerungen. Ebenso kann die Modellbildung als kognitive Belastung angesehen werden, da die Grundprinzipien PSI dem bisherigen physikalischen Vorwissen widersprechen und die Diskussion abstrakter Größen in den Fokus nimmt. Somit sind die Aufgaben trotz Orientierung am naturwissenschaftlichen Forschungsprozess stark leitend und geschlossen. Mit Blick auf das Forschungsvorhaben kann somit auch der Einfluss der Betreuenden reduziert werden, da die Führung durch den Lernpfad primär von den Aufgaben übernommen wird.

#### Darstellung des Experimentes

Das Experiment stellt keine Möglichkeiten bereit, um praktisch tätig zu werden und bspw. den Aufbau zu justieren (Kap. 13.1). Lediglich die für die Verschiebung des Spiegels im Interferometer nötige Piezospannung kann mittels Drehregler verändert werden und die Aufnahme der Messwerte gestartet und gestoppt werden. Die Aufnahme von Messwerten geht jedoch auf Grund der Vielzahl der benötigten Messwerte mit einem

erhöhten Zeitaufwand einher.<sup>1</sup> Dabei kann die Zeit nicht effektiv für das Lernen genutzt werden. Somit kann das Experiment nur als Demonstrationsexperiment eingesetzt werden, wobei die Messwerte bereits vorher aufgenommen wurden.

Der Schwerpunkt der Auseinandersetzung mit dem Experiment liegt auf der Auswertung sowie der Interpretation der Messwerte. Dazu können die auf dem externen Monitor angezeigten Zählraten herangezogen werden, um abzuschätzen, ob die eingangs formulierte Hypothese verworfen oder beibehalten werden kann. Eine abschließende Entscheidung kann jedoch erst mit Hilfe der Messwerte vorgenommen werden. Anhand der Messwerte können die statistischen Kennwerte Mittelwert und Standardabweichung berechnet und die Wahrscheinlichkeit für die Trippelkoinzidenzen sowie der Zusammenhang zwischen Spiegelverschiebung und Zählrate berechnet werden.

Die notwendigen Informationen sind somit in den gemessenen Zählraten enthalten. Eine direkte Interaktion mit dem Aufbau führt hingegen nicht zu weiteren Informationen. Daher wird das Schlüsselexperiment in Form von Übersichtsabbildungen sowie Videoausschnitten der Zählraten zugänglich gemacht. Dies besitzt zudem den Vorteil, dass gezielt die Teilerperimente Strahlteilerexperiment und Michelson Interferometer betrachtet werden können. Dafür kann die Darstellung des Experiments auf dieses Teilerperiment reduziert werden, ohne den Aufbau zu demontieren.

#### Digitalisierung der Lernumgebung

Um die Aufgabenstellung, die Übersichtsfotografien, die Messwerte sowie die Videoausschnitte gebündelt bereitzustellen, werden diese auf der digitalen Lehr-Lern-Plattform Moodle zugänglich gemacht. Somit reduziert sich der Bedarf an benötigter Software auf einen Webbrowser für den Zugang zu Moodle und eine Software für die Datenauswertung (z. B. Excel). Die Lernenden können ihre Auswertung direkt wieder auf der Plattform hochladen bzw. einzelne Aufgaben direkt online beantworten.

---

<sup>1</sup>Aus der Messzeit 1s ergibt sich beispielsweise eine Messzeit von mindesten 300 s / 5 Min. für die Aufnahme von 300 Messwerten an **einer** Spiegelposition. Um ein Interferenzmuster mit nur einer Periode aufzunehmen, sollten ca. 15 Spiegelpositionen vermessen werden, was zu einem Zeitbedarf von mindesten 75 Minuten führt.

### Zeigerformalismus

Die Berechnung von Klickwahrscheinlichkeiten mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsamplituden bedarf komplexer Zahlen. Ein in der Schule verbreiteter Ansatz, diese zu substituieren ist der Zeigerformalismus, welcher auf Feynman (1990) zurückgeht (z. B. Rode, 2017a).

In diesem wird die jeweilige Wahrscheinlichkeitsamplitude durch einen rotierenden Zeiger der Länge  $\sqrt{P}$  dargestellt (Abb. 13.2). Die Zeigerstellung entspricht der Phase. Die Bildung des Betragsquadrates, d. h. die Anwendung der Bornschen Regel, berechnet die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Detektor klickt. Die, in der Schule übliche, graphische Darstellung der Zeiger lässt sich auch in eine algebraische Repräsentationsform umwandeln, bei der die Phasenwinkel berechnet werden (Scholz et al., 2020). Beide Repräsentationsformen werden am Beispiel des Michelson Interferometers (Abb. 13.3) dargestellt.

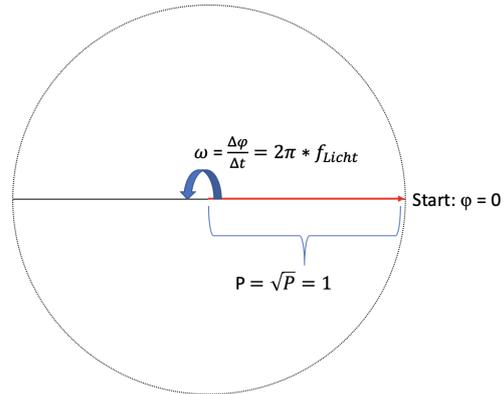


Abb. 13.2.: Darstellung der Wahrscheinlichkeitsamplitude als Zeiger.

### Graphischer Zeigerformalismus

Analog zur quantenphysikalischen Berechnungen in Kap. 2.5.2 müssen alle denkbaren Möglichkeiten berücksichtigt werden, die zum Ausgangszustand

$$|\Psi\rangle = c_1 |\psi_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle \quad (13.1)$$

führen. Die Wahrscheinlichkeitsamplituden  $c_1$  und  $c_2$  der jeweiligen Unterzustände des Superpositionszustandes lassen sich nun in Form eines Zeigers graphisch darstellen. Dies wird nur für den Zustand  $|\psi_2\rangle$  vorgestellt, da dieser der zur Detektion korrespondierende Unterzustand ist. Damit ein

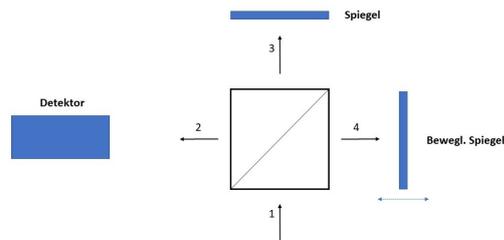
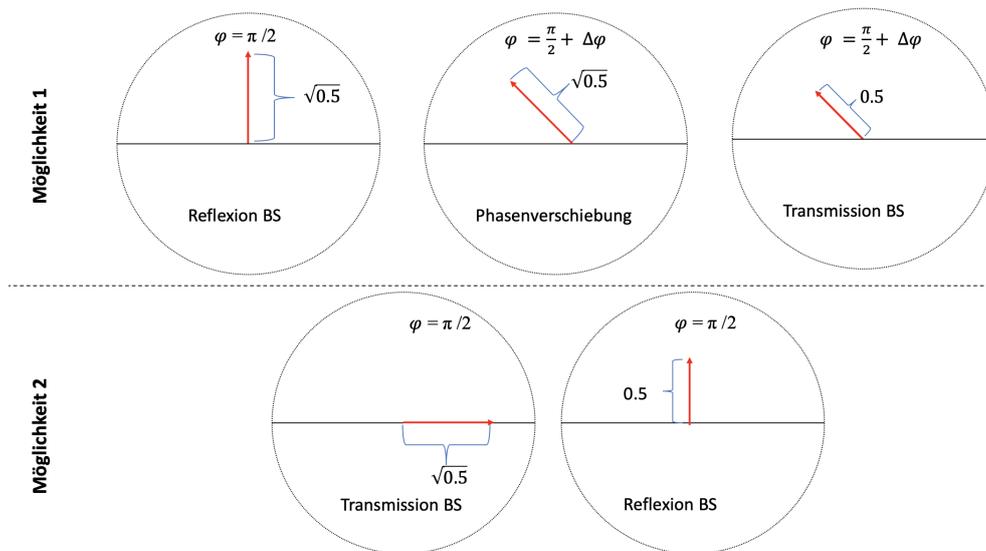


Abb. 13.3.: Schematische Darstellung des Michelson Interferometers.



**Abb. 13.4.:** Berechnung der Bestandteile der Wahrscheinlichkeitsamplitude für das Klicken des Detektors in Ausgang 2.

Photon im Detektor registriert wird, sind klassisch zwei Möglichkeiten denkbar, wie ein Photon durch die optischen Bauteile in den Detektor gelangen kann.<sup>2</sup>

**Möglichkeit 1:**

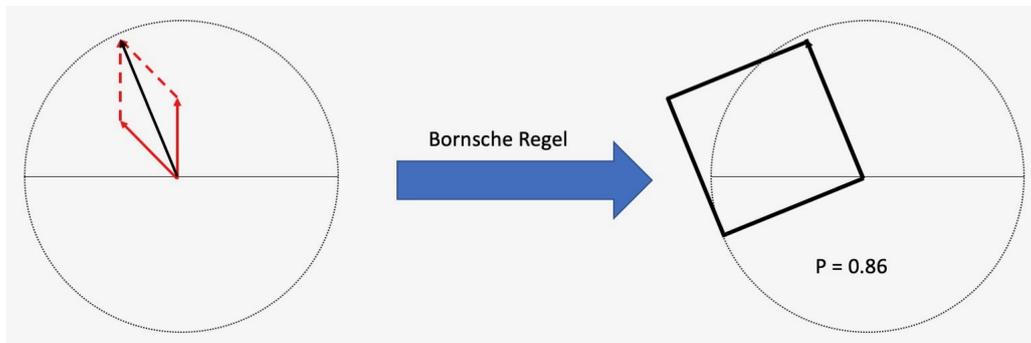
1. Reflexion am optischen Strahlteiler (BS) → Veränderung der Zeigerlänge zu  $\sqrt{P} = \sqrt{0.5}$  und Drehung des Zeigers um  $\pi/2$ .
2. Erzeugung einer Phasendifferenz zwischen den Unterzuständen durch Verschiebung des Spiegels → Drehung des Zeigers um  $\Delta\varphi$
3. Erneute Transmission am optischen Strahlteiler → Veränderung der Zeigerlänge auf  $\sqrt{P} = 0.5$ , keine Phasenverschiebung / Drehung des Zeigers.

<sup>2</sup>Auf die Phasensprünge an den Endspiegeln wird erneut verzichtet.

**Möglichkeit 2:**

1. Transmission am optischen Strahlteiler  $\rightarrow$  Änderung der Zeigerlänge auf  $\sqrt{P} = 0.5$ , keine Phasenverschiebung / Drehung des Zeigers.
2. Reflexion am optischen Strahlteiler  $\rightarrow$  Änderung der Zeigerlänge auf  $\sqrt{P} = 0.5$  und Drehung des Zeigers um  $\pi/2$ .

Die Manipulation des zu jeder Möglichkeit korrespondierenden Zeigers ist in Abb. 13.4 dargestellt. Der Ausgangspunkt, ein Zeiger der Länge 1 in „3-Uhr-Stellung“ (Abb.13.2), ist der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Die Wahrscheinlichkeitsamplitude  $c_2$  des Unterezustandes  $|\psi_2\rangle$  wird analog zur Rechnung durch die Summe der Wahrscheinlichkeitsamplituden der Möglichkeiten gebildet. Graphisch entspricht dies der Addition



**Abb. 13.5.:** Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Klicken des Detektors in Ausgang 2.

der beiden Zeiger (Abb. 13.5 links). Die Anwendung der Bornschen Regel entspricht der Bildung des Quadrates über die Zeigerlänge (Abb. 13.5 rechts)

$$\sqrt{P} \xrightarrow{\text{Born}} P.$$

**Algebraischer Zeigerformalismus**

In der von Scholz et al. (2020) vorgeschlagenen algebraischen Darstellung des Zeigerformalismus wird der rotierende Zeiger durch den Faktor  $q(\varphi)$  abgelöst, der den in Tab. 13.1 aufgeführten Rechenregeln gehorcht.

Um die Wahrscheinlichkeitsamplitude für das Klicken des Detektors in Ausgang 2 zu

**Tab. 13.1.:** Rechenregeln für den  $q(\varphi)$ -Faktor nach Scholz et al. (2020)

R1	Multiplikation	$q(\varphi_1) \cdot q(\varphi_2) = q(\varphi_1 + \varphi_2)$
R2	Spezielle Werte	$q(0) = 1, q(\pi) = -1$
R3	Betragsquadrat	$ q(\varphi) ^2 = q(\varphi) \cdot q(-\varphi) = q(0) = 1$
R4	Negative Phasenwinkel	$q(-\varphi) = 1/q(\varphi)$
R5	Addition	$q(\varphi_1) + q(\varphi_2) = 2 \cdot q((\varphi_1 + \varphi_2)/2) \cdot \cos((\varphi_1 - \varphi_2)/2)$

berechnen, müssen die Phasenbeiträge der oben beschriebenen Möglichkeiten „aufgesammelt“ werden. Für jede Möglichkeit  $n$  existiert dabei ein Beitrag  $c_{2,n}$  zur Wahrscheinlichkeitsamplitude  $c_2$ . Es ergibt sich

$$\begin{aligned}
 c_{2.1}(\varphi) &= \underbrace{\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot q\left(\frac{\pi}{2}\right)}_{\text{Reflexion am BS}} + \underbrace{q(\Delta\varphi)}_{\text{Phasenverschiebung}} + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot q(0)}_{\text{Transmission am BS}} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot q\left(\frac{\pi + \Delta\varphi}{2}\right) \tag{13.2}
 \end{aligned}$$

für die erste Möglichkeit. Und

$$\begin{aligned}
 c_{2.2}(\varphi) &= \underbrace{\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot q(0)}_{\text{Transmission am BS}} + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot q\left(\frac{\pi}{2}\right)}_{\text{Reflexion am BS}} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot q\left(\frac{\pi}{2}\right) \tag{13.3}
 \end{aligned}$$

für die zweite Möglichkeit. Die Wahrscheinlichkeitsamplitude  $c_2$  ist dann

$$\begin{aligned}
 c_2 &= c_{2.1}(\varphi) + c_{2.2}(\varphi) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot q\left(\frac{\pi + \Delta\varphi}{2}\right) + \frac{1}{2} \cdot q\left(\frac{\pi}{2}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \left[ q\left(\frac{\pi + \Delta\varphi}{2}\right) + q\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \tag{13.4}
 \end{aligned}$$

die Summe aus den Wahrscheinlichkeitsamplituden der beiden Möglichkeiten. Unter Anwendung der Rechenregel für die Addition aus Tab. 13.1 ergibt sich

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \left[ q \left( \frac{\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi + \frac{\pi}{2}}{2} \right) \cdot \cos \left( \frac{\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi - \frac{\pi}{2}}{2} \right) \right] \\ &= q \left( \frac{\pi + \Delta\varphi}{2} \right) \cdot \cos \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \end{aligned} \quad (13.5)$$

für die Wahrscheinlichkeitsamplitude. Mit Anwendung der Regel zur Bildung des Betragsquadrates wird

$$\begin{aligned} P(D_2) &= \underbrace{q \left( \frac{\pi + \Delta\varphi}{2} \right) \cdot q \left( \frac{-\pi - \Delta\varphi}{2} \right)}_{=1} \cdot \cos^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \\ &= \cos^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \end{aligned} \quad (13.6)$$

als Wahrscheinlichkeit für das Klicken des Detektors erhalten. Die Klickwahrscheinlichkeit folgt einer  $\cos^2$ -Funktion. Dies wird als Interferenzmuster interpretiert.

### Graphisch vs. Algebraisch

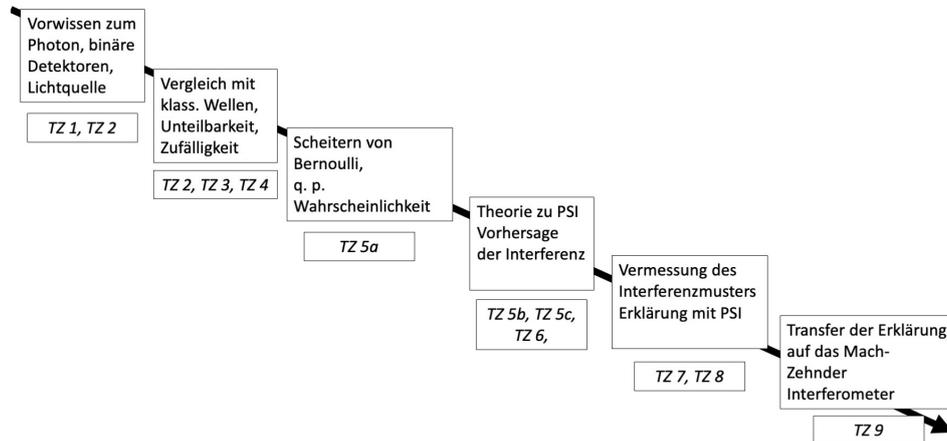
Zweifelsohne führen beide Verfahren zum selben Ergebnis. Allerdings erlaubt der algebraische Zeigerformalismus die Vorhersage der  $\cos^2$ -Funktion der Wahrscheinlichkeit. Dieses Ergebnis kann zwar auch mittels graphischem Zeigerformalismus erhalten werden, bedarf jedoch einer Vielzahl von Bildern.

Andererseits ermöglicht der graphische Zeigerformalismus eine Visualisierung der Wahrscheinlichkeitsamplitude sowie der Phasenabhängigkeit der Wahrscheinlichkeit, da ein Anwachsen und Verkürzen des resultierenden Zeigers und damit der Wahrscheinlichkeitsamplitude der Klickwahrscheinlichkeit sichtbar ist.

Für die Lernumgebung wurde keine der beiden Varianten favorisiert, sodass den Lernenden selbst die Entscheidung überlassen wurde, welche Form des Zeigerformalismus sie verwenden möchten.

### 13.2.2. Gestaltung des Lernpfads

Zur Erreichung der formulierten Teilziele werden in den Aufgaben sukzessiv Teile des Experiments betrachtet (Abb. 13.6). Die Aufgaben werden im Folgenden konkretisiert.



**Abb. 13.6.:** Lernpfad durch das Schlüsselexperiment und Zuordnung der Teilziele (TZ) vor der Pilotierung.

#### TZ 1 und TZ 2 - Zufälligkeit der Klicks und Koinzidenzmethode

Zur Aktivierung von möglichem Vorwissen werden die Lernenden in der ersten Aufgabe aufgefordert, ihre Definition des Photons aufzuschreiben. Diese soll zum Ende des Lernpfades nochmals reflektiert werden. Zur Erreichung von TZ 1 und TZ 2 wird nachfolgend die Charakteristik von binären Detektoren behandelt. Dazu wird in einem kurzen Vortrag auf die statistische Verteilung der Klicks der Detektoren (Mandel, 1959) sowie auf das Phänomen der zufälligen Koinzidenz eingegangen. Anschließend wird das Prinzip der parametrischen Fluoreszenz und der Koinzidenzmessung in einem Übersichtstext behandelt. Abschließend werden die Lernenden aufgefordert, zu begründen, warum nur Koinzidenzen mit dem Triggerdetektor A als relevante Zählereignisse betrachtet werden.

### TZ 3 und TZ 4 - Bestimmung relativer Häufigkeiten und Trippelkoinzidenzen

Nachfolgend wird das Strahlteilerexperiment betrachtet. Die Lernenden werden zunächst aufgefordert, eine Hypothese über die zu erwartenden Beobachtungen zu formulieren. Weiterhin soll ein Vergleich zum analogen Aufbau mit Laserlicht vorgenommen werden. In einem Hinweis wird auf die Koinzidenzen zwischen den Ausgängen des Strahlteilers als relevantes Ereignis hingewiesen. Anschließend betrachten die Lernenden eine Videosequenz. Dargestellt sind die Zählraten  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sowie die Koinzidenzen  $AB$ ,  $AC$  und  $ABC$  für das Einzelphotonenstrahlteilerexperiment. Die Lernenden werden aufgefordert, ihre Hypothese unter dem Eindruck des Videos zu bewerten. Um die Hypothese final zu bewerten, berechnen die Lernenden Mittelwert und Standardabweichung der Zählraten  $AB$ ,  $AC$  und  $ABC$  und interpretieren diese. Da der Mittelwert für das Ereignis  $ABC$  *klicken koinzident* signifikant kleiner (mehr als das 10-fache der Standardabweichung) als der Mittelwert der Ereignisse  $AB$  und  $AC$  ist (ca. 3 Hz vs. ca. 3100 Hz), kann dies als Unteilbarkeit des Photons gedeutet werden.

### TZ 5 - Bernoulliversuch vs. quantenphysikalische Wahrscheinlichkeit

Auf Grundlage der Auswertung lässt sich sagen, dass am Strahlteiler nur „entweder-oder“-Ereignisse, d. h. entweder *Reflektiert* oder *Transmittiert*, möglich sind. Die Lernenden sind aufgefordert, Parallelen zwischen dem Strahlteilerexperiment und einer Kugel im Galton-Brett zu ziehen. Damit soll die Idee erzeugt werden, dass die Wahrscheinlichkeiten für die Detektion analog zu einem

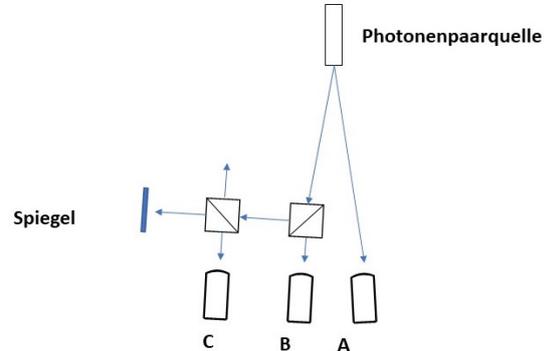


Abb. 13.7.: Gedankenexperiment.

Bernoulliversuch berechnet werden könnten. Für das in Abb. 13.7 dargestellte Experiment soll die Klickwahrscheinlichkeit bestimmt werden und anhand von experimentell bestimmten Daten überprüft werden. Dabei zeigt sich weiterhin eine Übereinstimmung zwischen der klassischen Berechnung und der experimentell bestimmten Wahrscheinlichkeit. Wird nun das Michelson Interferometer vervollständigt, versagt die Berech-

nung: Nach der Berechnung müsste sich die Wahrscheinlichkeit verdoppeln. Aus den Messdaten wird jedoch eine deutlich kleinere Wahrscheinlichkeit bestimmt.<sup>3</sup>

Ausgehend von diesem Widerspruch werden die Begriffe Zustand, Wahrscheinlichkeitsamplitude sowie der Zeigerformalismus durch einen Begleittext eingeführt und die Rechnung mit Zeigern demonstriert.

#### **TZ 6, TZ 7 und TZ 8 - Interferenz von Wahrscheinlichkeiten auf Grund von Superposition**

Auf Grundlage der Theorie sollen die Lernenden eine Hypothese über den Einfluss einer Phasenverschiebung auf die Wahrscheinlichkeitsamplitude aufstellen und mit Hilfe des Zeigerformalismus begründen. Anhand einer Videosequenz sowie den Messdaten sollen die Studierenden die Hypothese prüfen. Dazu muss zunächst für jede Spiegelposition Mittelwert und Standardabweichung der Zählrate AC aus den Messdaten bestimmt werden und dann der Mittelwert der Klicks gegen die Verschiebung aufgetragen werden.

Um der Frage nachzugehen, ob sich das Photon möglicherweise doch teilt, werden erneut die Trippelkoinzidenzen ABC betrachtet, wobei sich zeigt, dass der Mittelwert zwischen 0 und 3 Hz schwankt und damit weiterhin von einer Unteilbarkeit ausgegangen werden kann.

Anschließend werden die Lernenden aufgefordert, das Auftreten von Interferenz bei gleichzeitiger Unteilbarkeit in eigenen Worten zu erklären. Darüber hinaus soll die anfangs formulierte Photonendefinition nochmals hinterfragt und ggf. überarbeitet werden.

#### **TZ 9 - Transfer der Erklärung**

Als Transfer soll anschließend das Mach-Zehnder Interferometer betrachtet werden und die Klickwahrscheinlichkeiten für die Detektoren in den Ausgängen berechnet werden.

---

<sup>3</sup>Das Michelson Interferometer wurde so justiert, dass nahezu destruktive Interferenz auf dem Detektor liegt.

### 13.3. Pilotierung der Lernumgebung

Um die Lernumgebung, aber auch den Einsatz des Fragebogens zu erproben, wurde eine Pilotstudie mit 12 Studierenden (viertes Semester) im Praktikum *Experimentalphysik für Lehramtsstudierende* im Sommersemester 2020 durchgeführt. Auf Grund der seinerzeit geltenden Maßnahmen zur Eindämmung der Corona Pandemie wurde der Versuch als Onlineversuch via *Big Blue Button* durchgeführt.

#### 13.3.1. Ablauf

Das Schlüsselexperiment wurde als zweiteiliger Versuch in den Ablauf des Praktikums eingegliedert. Der erste Teil des Versuches thematisierte die Fluktuation von Licht und Eigenschaften binärer Detektoren, um die statistischen Auswerteverfahren einzuführen. Jeweils eine Woche vor und nach dem Versuch zum Schlüsselexperiment wurden die Studierenden aufgefordert den Fragebogen (Kap. 25) zu beantworten, welcher als Pflichtteil der Studienleistung galt. Bereitgestellt wurde der Fragebogen über die Onlineplattform Limesurvey.

Zur Bearbeitung der Aufgaben haben die Studierenden in einem Zeitraum von 4h zusammen mit ihrem Praktikumpartner in einem Breakoutroom zusammengearbeitet. Bei Fragen und Problemen standen der Autor dieser Arbeit sowie drei studentische Hilfskräfte zur Verfügung. Diese haben zeitgleich die Gruppen bei ihrer Arbeit beobachtet, um potenzielle Schwierigkeiten mit den Aufgaben identifizieren zu können.

#### 13.3.2. Methodik der Evaluation

Hauptziel dieser Pilotstudie war die Erprobung der Lernumgebung. Daher wurden zur Evaluation die Antworten der Studierenden auf die jeweiligen Aufgaben analysiert. Zusätzlich wurde ein Beobachtungsbogen eingesetzt. Ziel war es, Hinweise für mögliche Überarbeitungen der Lernumgebung zu sammeln.

#### Beobachtungsbogen

Um Hinweise sammeln zu können, inwieweit die Studierenden die Aufgabenstellungen bearbeiten können bzw. welche Schwierigkeiten bei der Bearbeitung auftauchen, wur-

den drei Gruppen (50% der Studierenden) bei der Bearbeitung von den studentischen Hilfskräften beobachtet. Dafür wurde den Hilfskräften ein Beobachtungsbogen zur Verfügung gestellt, der für jede Aufgabe die folgenden Fragen stellte:

1. Verständnis der Aufgabenstellung: Wissen die Studierenden, was sie zu tun haben oder erzeugt die Aufgabenstellung Verwirrung?
2. Inhaltliche Diskussion: Diskutieren die Studierenden während der Bearbeitung über inhaltliche Themen der Lernumgebung?
3. Verständnisprobleme: Verstehen die Studierenden den Wortlaut der Aufgabenstellung, aber wissen trotzdem nicht, was sie tun sollen (z. B. auf Grund mangelndem Wissens im Umgang mit Messdaten)?
4. Technische Umsetzung: Behindern technische Störungen die Bearbeitung?

Zudem existiert für jede Aufgabe eine Kommentarspalte in welcher Auffälligkeiten notiert werden konnten.

#### **Analyse der Aufgabe**

Neben sichtbaren Schwierigkeiten können mit Hilfe der Antworten der Studierenden auf die jeweilige Aufgabenstellung zusätzlich Hinweise auf Probleme mit den Aufgaben gesammelt werden. Dazu wurden die Antworten paraphrasiert, inhaltlich gruppiert und mit der zur jeweiligen Aufgabe antizipierten Antwort verglichen, um Hinweise über missverständliche Aufgabenformulierungen, fehlende Hilfestellungen oder zusätzlich benötigtes Material zu erhalten. Auf ein strukturiertes Analyseverfahren, wie eine qualitative Inhaltsanalyse wurde an dieser Stelle verzichtet, da lediglich der Abgleich zwischen antizipierter und tatsächlich gegebener Antwort vorgenommen werden soll.

#### **13.3.3. Ergebnisse der Evaluation**

Neben organisatorischen Problemen bei der Realisierung des Versuches sowie Details in der digitalen Umsetzung (z. B. Einlesen von CSV-Dateien oder Verwendung von bereitgestellten Tipps) wurden folgende Schwierigkeiten mit der Lernumgebung festgestellt.

**1. Zeitlicher Umfang**

Während der Bearbeitung wurde festgestellt, dass die zur Verfügung gestellte Zeit nicht für die Bearbeitung aller Aufgaben reicht. Neben Verständnisschwierigkeiten (nachfolgende Punkte) hat vor allen Dingen der Umfang sowie die Fülle an Aufgaben für eine deutlich längere Bearbeitungszeit gesorgt. So mussten beispielsweise für die Auswertung der Messungen zur Interferenz erst Mittelwert und Standardabweichung aus den jeweiligen Messreihen bestimmt werden, ehe das Interferenzmuster graphisch dargestellt und ausgewertet werden konnte.

**2. Relevante Messwerte und Auswertung**

Obwohl die Studierenden begründen sollten, warum nur die Koinzidenzen mit dem Triggerdetektor (in den Daten AB, AC und ABC) relevante Messwerte sind und sie dieses auch korrekt begründen konnten, haben die Studierenden die falschen Messwerte bzw. in den Videos die falschen Zählereignisse analysiert. So wurden häufig nur die Ereignisse der einzelnen Detektoren (B und C) betrachtet. Folglich konnten die antizipierten Erkenntnisse nicht aus den Messdaten gezogen werden. Zudem zeigte sich, dass die Studierenden trotz der Vorbereitungsaufgaben mit der statistischen Auswertung der Messwerte Schwierigkeiten hatten, sodass erst nach Hinweisen durch die Betreuenden die Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung bestimmt wurden.

**3. Analogie zum Galton-Brett**

In der Analyse der Antworten zeigte sich, dass ein Teil der Studierenden Schwierigkeiten mit der Analogie zwischen Photon am Strahlteiler und Kugel im Galton-Brett hatten. So hat beispielsweise eine Gruppe versucht, die Spalten in den Messdaten (A, B, C, AB, AC, ABC) mit der in der Skizze des Galton-Brettes dargestellten Häufigkeitsverteilung in Verbindung zu setzen.

**4. Zeigerformalismus und Theorie**

Obwohl den Studierenden die Wahl zwischen dem graphischem und dem algebraischem Zeigerformalismus gelassen wurde, haben alle Gruppen die algebraische Form genutzt. Trotz vorheriger Einführung in die Arbeitsweise durch das bereitgestellte Theoriematerial hatte die Mehrheit der Studierenden Probleme, die Klickwahrscheinlichkeit für das Michelson Interferometer korrekt zu berechnen.

So haben bspw. einige Gruppen nicht die allgemeine Phase  $\Delta\varphi$  mit einbezogen, sodass sie nur eine konstante Wahrscheinlichkeit berechneten. Ebenso haben Studierende zu viele Phasenbeiträge mit einbezogen, sodass sie eine Wahrscheinlichkeit von  $12 \cos(\Delta\varphi)^2$  erhielten.

Neben Schwierigkeiten bei der Berechnung von Wahrscheinlichkeiten erwies sich das Material zur Theorie als zu umfangreich und gleichzeitig als für die Studierenden unverständlich, sodass PSI als quantenphysikalische Grundprinzipien nicht deutlich wurden und daher das Lernziel erkennbar nicht erreicht wurde.

### 13.3.4. Schlussfolgerung

Um die identifizierten Probleme lösen zu können, wurden einige Änderungen an der Lernumgebung vorgenommen, wobei der grundsätzliche Lernpfad in gekürzter Form erhalten blieb (Abb. 13.8). Ein Vergleich zur klassischen Lichtwelle sowie die Erklä-

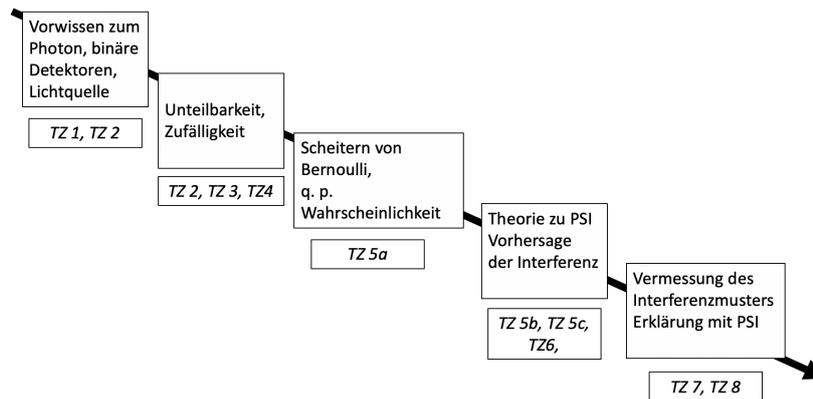


Abb. 13.8.: Lernpfad durch das Schlüsselexperiment für die Hauptuntersuchung

rung der Interferenz im Mach-Zehnder Interferometer (TZ 9) wurden gestrichen. Eine Erfassung des Transfers der Erklärung wurde im Fragebogen weiterhin beibehalten. Zusätzlich wurden folgende Änderungen vorgenommen:

#### 1. Reduktion der Komplexität

Die Auswahl der falschen Messwerte durch die Studierenden zeigt, dass es nicht gelungen ist aufzuzeigen, welche die relevanten Ereignisse und welche die irrelevanten sind. Um diese Auswahlprobleme zu vermeiden, wurde der Triggerdetektor für die Lernumgebung als Bestandteil der Einzelphotonenquelle subsumiert, da ausschließlich mit dem Trigger koinzidente Ereignisse auf die Einzelphotonen zurückzuführen sind. Somit wurden auch die Messwerttabellen auf die relevanten Ereignisse AB, AC und ABC reduziert. Um jedoch die Relevanz des Triggers deutlich zu machen, wurden die Detektoren in den Ausgängen des Strahlteilers (Detektor B) und des Michelson Interferometers (Detektor C) als AB und AC bezeichnet.

Weiterhin wurde für die Untersuchung der Interferenz auf die Mittelwertberechnung durch die Lernenden verzichtet, sodass der bereitgestellte Datensatz nun für jede Spiegelposition einen Mittelwert sowie die Standardabweichung enthielt. Somit können die Lernenden direkt auf die relevanten Informationen zugreifen, da die Bildung von Mittelwert und Standardabweichung bereits in den vorherigen Aufgaben angewendet wurde und zu keinen neuen Erkenntnissen führt.

#### 2. Theorie und Zeigerformalismus

Die theoretische Arbeit wurde auf das Wesentliche reduziert: Entgegen dem vorherigen Material wurde direkt am Experiment auf die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten aus dem Zustand, d. h. im Kern aus der Wahrscheinlichkeitsamplitude eingegangen. Diese wurde graphisch als Zeiger eingeführt. Auf eine algebraische Darstellung wurde verzichtet, um die aufgetretenen Rechenfehler zu vermeiden. Weiterhin wurden die Zeiger durch *GeoGebra*-Simulationen animiert, sodass die Lernenden nicht mehr selbst Zeiger zeichnen mussten und somit die Informationen direkt aus der Animation entnehmen konnten. Ebenfalls wurde in der Theorie nun konkret von Interferenz gesprochen, um die Verbindung zwischen phasenabhängiger Zählrate und Interferenz herzustellen. Die Lernenden können somit auf Grundlage der Simulation die Hypothese formulieren, dass ein Interferenzmuster in den Messwerten sichtbar werden muss. Vorher wurde lediglich von einem Einfluss der Phase gesprochen und die Lernenden sollten dann daraus die Interferenz ableiten, was nur einer Minderheit gelang. Siehe Kap. 28 für das eingesetzte Material.

#### 3. Hilfestellungen

Zusätzlich zu den beschriebenen Änderungen wurden auch interaktive Hilfestellungen zur Verfügung gestellt. Diese sollen bspw. das korrekte Vorgehen bei der Auswertung sicherzustellen. Dazu wurden mittels der Testfunktion von Moodle Single-Choice Fragen an die Lernenden gestellt. So wurde bspw. vor der Auswertung eine Frage zum Umgang mit den Messdaten gestellt (Abb. 13.9). Weitere dieser Testfunktionen wurden für die Galton-Brett Analogie sowie der Berechnung der Klickwahrscheinlichkeit für des Gedankenexperiments eingesetzt.

Öffnen Sie die Datei *Beispiel* mit einem geeigneten Tabellenkalkulationsprogramm und betrachten Sie die Daten

Wie würden Sie bei der **Auswertung** der aufgenommenen Messwerte vorgehen?

Wählen Sie eine Antwort:

- a. Ich vergleiche die Werte zeilenweise um Aussagen treffen zu können.
- b. Ich bestimme die statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung für jeden Detektor / jede Detektorkombination, um damit Aussagen treffen zu können.
- c. Ich bestimme die statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung für alle Messwerte, um damit Aussagen treffen zu können.

*Abb. 13.9.: Beispiel einer Testfrage zur Auswertung.*

## 13.4. Zusammenfassung

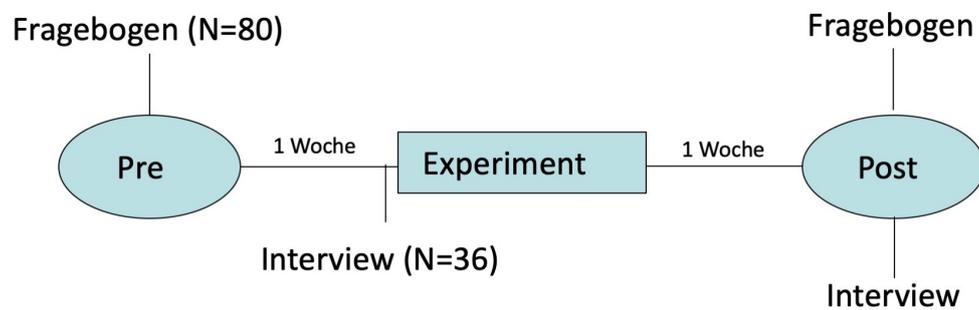
In diesem Kapitel wurde die Entwicklung und Erprobung einer geeigneten Lernumgebung für die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment vorgestellt. Die wesentlichen Aspekte dieses Kapitels sind:

- Auf Grund eingeschränkter Eingriffsmöglichkeiten in das Experiment wird dieses nur als Demonstrationsexperiment genutzt. Zur Demonstration sowie zur einfacheren Bereitstellung der Messdaten wurde eine Lernumgebung auf der digitalen Lehr-Lern-Plattform Moodle realisiert.
- Ein grundlegender Lernpfad thematisiert zunächst die Unteilbarkeit des Photons am optischen Strahlteiler, motiviert dann eine neue Theorie durch ein Gedankenexperiment und diskutiert abschließend die Interferenz bei gleichzeitiger Unteilbarkeit.
- Zur Berechnung der Klickwahrscheinlichkeiten wird der Zeigerformalismus genutzt. In diesem wird die phasenabhängige Wahrscheinlichkeitsamplitude durch einen rotierenden Zeiger repräsentiert. Eine graphische und eine algebraische Form erlauben die Vorhersage des Interferenzmusters in der Klickwahrscheinlichkeit.

- Eine erste Erprobung im Physikpraktikum konnte Schwierigkeiten in der Gestaltung der Aufgaben, der Repräsentation des Experiments sowie im Umgang mit dem Zeigerformalismus aufdecken. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde die Lernumgebung unter Beibehaltung des grundlegenden Lernpfades überarbeitet und der graphische Zeigerformalismus mittels *Geogebra* Simulation genutzt.

Teil III.  
Hauptstudie

# 14. Durchführung und Stichprobenbeschreibung



*Abb. 14.1.: Design der Datenerhebung*

Es wurden 80 Studierende des 2. Semesters Physik (B.Sc und FÜB. Sc.) im Anfängerpraktikum Physik im Sommersemester 2021 in einem Ein-Gruppen-Prä-Post-Design untersucht: Dazu wurden eine Woche vor bzw. eine Woche nach Versuchsdurchführung die komplette Stichprobe mittels Fragebogen befragt (Abb. 14.1). Dieser wurde den Studierenden online via Limesurvey zugänglich gemacht. Eine Subgruppe von 36 Studierenden wurde zusätzlich mittels Interviews befragt. Das Pre-Interview fand direkt vor Versuchsdurchführung statt. Das Post-Interview fand eine Woche nach Versuchsdurchführung statt.

## 14.1. Randbedingungen der Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde als Pflichtversuch für alle Studierenden des 2. Semesters in den Plan des Praktikums aufgenommen. Um etwaigen Wissenszuwachs durch Selbststudium zu vermeiden, wurden die Teilnehmenden gebeten, den Versuch weder vor- noch nachzubereiten. Zudem wurde auf den obligatorischen Praktikumsbericht verzichtet. Verpflichtend war hingegen die Beantwortung der Fragebögen sowie die Teilnahme am Versuchsnachmittag, um den Versuch erfolgreich zu bearbeiten. Die Teilnahme an den Interviews wurde mit Zusatzpunkten für die Versuchsdurchführung honoriert. Um die Daten für die Evaluation zu anonymisieren, wurde der Empfehlung von Pöge (2008) folgend ein Code eingesetzt, der sich aus sechs Beiträgen zusammensetzt:

1. Der erste Buchstaben des Vornamens des Vaters (oder einer Person, welche der Rolle des Vaters nahe kommt)
2. Der erste Buchstaben des Vornamens der Mutter (oder einer Person, welche der Rolle der Mutter nahe kommt)
3. Der erste Buchstaben des eigenen Vornamens
4. Der Tag des Geburtstages (zwei Stellen, d. h. 1 → 01)
5. Der erste Buchstabe des Geburtsortes
6. Die Hausnummer des gegenwärtigen Wohnortes

Somit ergibt sich am Beispiel des Autors:

**Rudolf, Heike, Moritz, 18.05., Bückeberg, 16 → RHM18B16**

Auf Grund der weiterhin geltenden Verordnungen zum Infektionsschutz wurden die Interviews digital via *Webex* und der Versuch digital via *BigBlueButton* durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 4h, jedoch erhielten die Studierenden die Möglichkeit die Aufgaben auch nach Ablauf der 4h zu beenden, wovon weniger als die Hälfte der Studierenden Gebrauch machte. Zur Unterstützung standen den Studierenden sowohl der Autor der

Arbeit sowie die MitarbeiterInnen des Schülerlabor *foeXlab* zur Verfügung.

Die nachfolgenden beiden Kapitel betrachten die Auswertung des Fragebogens und der Interviews im Detail. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Kap. 17.4 gegeben.

# 15. Auswertung des Fragebogen

## 15.1. Methode

### 15.1.1. Aufbereitung der Daten

Die geplante Auswertung erfordert zunächst eine Transformation der Rohdaten in eine für die Rasch-Analyse geeignete Form:

- Export in Excel
- Konsistenzprüfung der Codes aus dem Pre- und Post-Test
- vollständige Anonymisierung
- Dichotomisierung der Antworten

### 15.1.2. Auswertung von Pre- und Post

Mit Hilfe des Rasch-Modells ist es bei bekannter Itemschwierigkeit möglich, die Personenfähigkeit der Befragten zu schätzen und die Befragten hinsichtlich ihrer Fähigkeit zu vergleichen (Boone et al., 2014). Sind die Itemschwierigkeiten für den Pre- und den Post- Test gleich, so können auch Vergleiche zwischen den Pre- und Post-Fähigkeit der Studierenden vorgenommen werden. Um die Gleichheit der Itemschwierigkeiten zu prüfen, wird ein zweiseitiger t-Test für gepaarte Stichproben eingesetzt (vgl. Winkelmann (2020) für das Vorgehen sowie Bortz und Schuster (2010) zum t-Test).

#### Prüfung der Modellgüte

Zur Prüfung der Modellgüte wird die MNSQ Itemfit-Statistik und der MNSQ Person-  
Outfit für den Pre- und den Post-Test herangezogen. Items und Personen werden aus

dem Testdatensatz (Pre und Post) ausgeschlossen, wenn ein MNSQ-Wert zu einem Testzeitpunkt entweder größer 2.0 oder kleiner 0.5 ist, d. h. das Item oder die Person unproduktiv für die Messung ist (Boone et al., 2014).

### **Pre-Post-Vergleich der Lernenden**

Um die Änderung der mittleren Personenfähigkeit zu betrachten, wird ein t-Test für gepaarte Stichproben genutzt. Zusätzlich wird mit Hilfe des Rasch Modells eine inhaltliche Betrachtung vorgenommen. Dabei wird ausgenutzt, dass die Wahrscheinlichkeit für die korrekte Antwort einer Person auf das entsprechende Item 50% beträgt, wenn die Personenfähigkeit gleich der Itemschwierigkeit ist (Boone et al., 2014).

Zur Auswertung werden die Quartilsgrenzen der Personenfähigkeit bestimmt und durch Abgleich mit den korrespondierenden Items, die Quartile inhaltlich charakterisiert. Dieses Vorgehen ermöglicht es, inhaltspezifische Lernzuwächse zu identifizieren. Ebenso können inhaltliche Herausforderungen identifiziert werden, wenn Items weiterhin nur von Studierenden in den oberen Quartilen beantwortet werden können.

## **15.2. Ergebnisse**

### **15.2.1. Modellgüte**

Mit Hilfe der Fitstatistiken wurden das Item *VW 4* sowie 14 Personen (17.5% der Stichprobe) als nicht-modellkonform identifiziert und aus der Auswertung in zwei Schritten ausgeschlossen. Auch wenn *Item 16* nach der Bereinigung ebenfalls einen nicht-modellkonformen Outfit-MSNQ (ca. 0.48) zeigte, wurde es in der Analyse beibehalten, da es als einziges Item die wechselwirkungsfreie Messung (der Knallertest) und damit eine Anwendung des Superpositionsprinzips beinhaltet (Elitzur und Vaidman, 1993). Die vollständigen Fitstatistiken können dem Anhang (Kap. 29) entnommen werden.

### **15.2.2. Gleichheit der Itemschwierigkeiten**

Zur Beurteilung der Gleichheit der Itemschwierigkeit wird der zweiseitige t-test für gepaarte Stichproben verwendet.

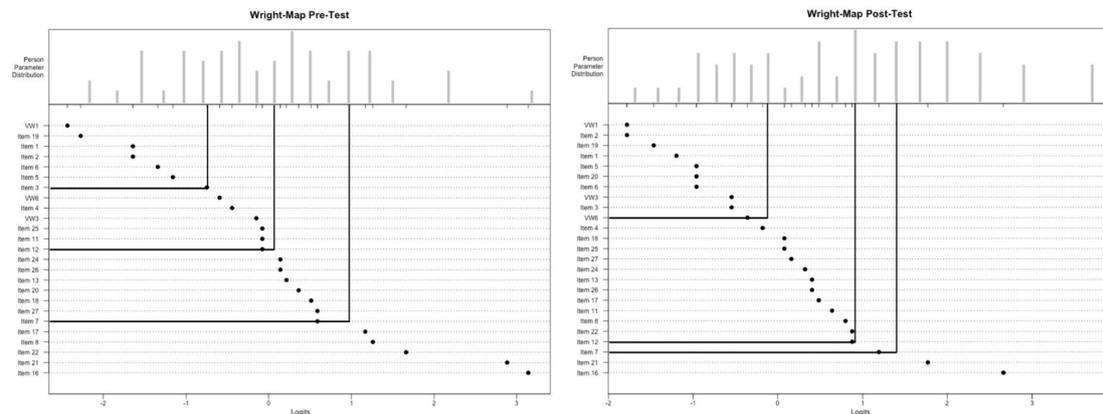
**Ergebnis des t-Test:**

t-Test:  $t=0.24901$ ,  $df=23$ ,  $p\text{-value}=0.8056$   
 alternative hypothesis: true mean difference is not equal to 0.  
 95 percent confidence interval:  $-0.1356725$   $0.1728052$   
 sample estimates: mean difference:  $0.01856638$

Der im t-Test erhaltene p-Wert ist mit 0.8056 deutlich oberhalb der gängigen Signifikanzniveaus  $p = 0.05$  bzw.  $p = 0.01$  (Bortz und Schuster, 2010), sodass die Nullhypothese der Gleichheit der Itemschwierigkeiten beibehalten werden muss.

### 15.3. Analyse des Lernzuwachses von Pre-Test zu Post-Test

#### 15.3.1. Globale Betrachtung - Veränderung der mittleren Personenfähigkeit



**Abb. 15.1.:** Wright-Map für den Pre- und Post-Test. In schwarz eingezeichnet: Quartile der Personenfähigkeit.

In Abb. 15.1 ist die zum Pre- bzw. Post-Test zugehörige Wright-Map dargestellt. Es zeigt sich, dass die Itemschwierigkeiten nahezu konstant bleiben, jedoch weisen *Item 16* und *Item 21* von Pre zu Post eine geringere Itemschwierigkeit auf.

Die Personenfähigkeit der Studierenden ist als Histogramm im oberen Bild dargestellt, wobei zusätzlich die Schwierigkeiten der Items durch Striche unterhalb des Histogramms angezeigt werden. Im Vergleich von Pre zu Post zeigt sich, dass sich das Maximum des Histogramms nach rechts verschoben hat, d. h. die Personenfähigkeit von Pre ( $M = 0.0153$ ,  $SD = 1.1112$ ) zu Post ( $M = 0.8433$ ,  $SD = 1.3102$ ) zugenommen hat.

Der berechnete t-Test für gepaarte Stichproben zeigt:

**Ergebnis des t-Test:**

$t = -8.1858$ ,  $df = 61$ ,  $p\text{-value} = 1.054e-11$   
*alternative hypothesis: true mean difference is less than 0.*  
*95 percent confidence interval: -Inf -0.7115945 sample estimates mean difference -0.8940068*

Der angegebene p-Wert liegt mit  $p = 1.054 \cdot 10^{-11}$  deutlich unter dem Niveau von  $p = 0.01$ , sodass von einem höchst-signifikantem Ergebnis gesprochen werden kann (Bortz und Schuster, 2010). Folglich bedeutet dies, dass die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment im Mittel zu einem Anwachsen im Konzeptverständnis von PSI zu führen scheint (Bortz und Schuster, 2010).

### 15.3.2. Inhaltsbezogene Analyse des Lernzuwachses

**Tab. 15.1.: Quartilsgrenzen der Personenfähigkeiten in Pre und Post.**

Quartil	Pre-Test		Post-Test	
	Untergrenze	Obergrenze	Untergrenze	Obergrenze
1	-2.166	-0.794	-1.687	-0.263
2	-0.794	0.070	-0.263	0.913
3	0.070	0.728	0.913	1.677
4	0.728	3.183	1.677	3.712

Graphisch sind die Quartilsgrenzen (Tab. 15.1) bereits in den Wright-Maps in Abb. 15.1 dargestellt, wobei die vertikale Linie die Quartilsgrenze repräsentiert und die Horizontale das letzte zum Quartil korrespondierende Item repräsentiert. Der Einfachheit halber wurden die Items unterhalb der Untergrenze des ersten Fähigkeitsquartils diesem zugeordnet, da die Person mit der niedrigsten Personenfähigkeit das Item mit einer Wahrscheinlichkeit größer 50% korrekt beantworten kann.

Auf den ersten Blick lässt sich feststellen, dass von Pre zu Post die Zahl der Items, die potenziell korrekt beantwortet werden können, in den unteren Quartilen zugenommen hat. In den oberen beiden Quartilen hat die Anzahl der korrespondierenden Items hingegen abgenommen.

Inhaltlich lassen sich die Quartile, wie in Tab. 15.2 dargestellt, wie folgt charakterisieren:

Auch wenn das erste Quartil bereits im Pre-Test durch Items zu prototypischem Schulwissen charakterisiert wird, korrespondieren Items zur Interferenz in der klassischen Optik (VW 3 und VW 6) zum zweiten Quartil. Im Post-Test können die Items dann bereits von Studierenden im ersten Quartil beantwortet werden.

Weiterhin zeigt sich, dass die Studierenden von Pre zu Post vermehrt die Interferenz einzelner Quantenobjekte korrekt erklären können. Während im Pre-Test nur Studierende im dritten und vierten Quartil Items zur Quanteninterferenz potenziell korrekt beantworten können, gelingt dies im Post-Test bereits Studierenden im zweiten Quartil.

Etwas diffus sind die Ergebnisse für Items zum Superpositionsprinzip:

- *Item 8* betrachtet das Mach-Zehnder Interferometer ohne den zweiten Strahlteiler. Es kann im Pre-Test nur von Studierenden im vierten Quartil beantwortet werden. Im Post-Test korrespondiert es hingegen mit dem zweiten Quartil. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass sich durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment eine Vorstellung zur Superposition im Kontext Interferenz entwickelt hat. D. h. die Lernenden identifizieren die Superposition als notwendige Voraussetzung für Interferenz.
- *Item 11* und *Item 12* korrespondieren sowohl im Pre- als auch im Post-Test mit dem zweiten Quartil. Beide Items thematisieren die Interpretation des Superpositionszustandes, der durch den ersten Strahlteiler im Mach-Zehnder Interferometer präpariert wird. Konkret fragen sie, ob dieser Superpositionszustand als *das Photon nimmt beide Pfade zugleich* interpretiert werden kann? Im Pre-Test konnten zwar die Studierenden im zweiten Quartil diese Items mit einer Wahrscheinlichkeit größer / gleich 50% korrekt beantworten, Items zur Quanteninterferenz konnten jedoch nur mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit korrekt beantwortet werden. Möglicherweise wurde diese Interpretation bereits in der Schule diskutiert und nur von den Studierenden erinnert.

## 15. Auswertung des Fragebogen

**Tab. 15.2.: Inhaltliche Beschreibung der Fähigkeitsquartile**

Quartile	Inhalt der Items	Beispielitem
<b>Pre-Test</b>		
1	Schulwissen über Quantenphysik (z. B. Beobachtungen im Doppelspaltexperiment)	<i>Item 2: Führt man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen durch, so ...</i>
2	Klassische Interferenz und Photonen	<i>VW 6: Wodurch wird im Michelson Interferometer ein Wechsel von Hell nach Dunkel im Interferenzmuster erreicht?</i>
3	Interpretation des Verhaltens einzelner Quantenobjekte / Quanteninterferenz	<i>Item 24: Bewerte folgende Aussage: „Die Interferenz einzelner Photonen kann klassisch nicht erklärt werden.“</i>
4	Quanteninterferenz und Knallertest	<i>Item 22: Ist es möglich mit einzelnen Photonen Interferenz zu beobachten?</i>
<b>Post-Test</b>		
1	Schulwissen über Quantenphysik und klassische Wellen	<i>Item 3: Beurteile folgende Aussage: „Wenn man beim Doppelspaltversuch auch mit einzelnen Photonen ein Interferenzmuster erhält, so muss sich das Photon aufgeteilt haben.“</i>
2	Interpretation des Verhaltens einzelner Quantenobjekte / Quanteninterferenz (Superposition)	<i>Item 12: Betrachte folgenden Fall: Ein Einzelphoton befinde sich im Mach-Zehnder Interferometer, aus dem der zweite Strahlteiler ausgebaut wurde. Detektor D1 und D2 haben noch kein Photon registriert. Markiere für jede Aussage, ob sie richtig oder falsch ist.</i>
3	Superposition im Allgemeinen	<i>Item 7: Markiere für jede Aussage, ob sie richtig oder falsch ist: Die Geschwindigkeit eines Elektrons wird durch die Messung festgelegt (Verkürzte Darstellung des Items)</i>
4	Knallertest	<i>Item 16: Allein durch den Einbau der Bombe wird die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Detektor D1 und D2 ein Photon registrieren verändert. Erkläre, wie es dazu kommt.</i>

- Die Items *Item 7*, *Item 16* und *Item 21*, die das Superpositionsprinzip im Allgemeinen thematisieren, können im Pre- und Post-Test nur von Studierenden im dritten und vierten Quartil potenziell korrekt beantwortet werden.

## 15.4. Schlussfolgerung

Die Analysen zeigen, dass eine Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment im Mittel zu einer Zunahme der Personenfähigkeit führt und im Besonderen die Entwicklung eines quantenphysikalischen Reasoning für die Erklärung von Quanteninterferenz zu fördern scheint.

Mit Blick auf das Superpositionsprinzip scheint die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment nur ein Verständnis des Superpositionsprinzips im Kontext Interferenz / Interferometer zu fördern. Ein Wissen über das Prinzip im Allgemeinen scheint hingegen sehr herausfordernd zu sein und kann nur bei den Studierenden im dritten und vierten Quartil festgestellt werden. Die Mehrheit der Studierenden kann somit die Superposition als Notwendigkeit für die Interferenz beschreiben, jedoch nicht, dass Superposition nicht zwangsläufig zur Interferenz führt (Superposition als allgemeines Grundprinzip).

## 15.5. Zusammenfassung

Zur Bewertung der Personenfähigkeit in Pre- und Post-Test wurden zwei eigenständige Rasch Modelle gerechnet und die Gleichheit der Itemschwierigkeit mit Hilfe eines zweiseitigen t-Tests überprüft. Für die Auswertung mussten das *Item 4* und 14 Personen (17.5% der Stichprobe) wegen nicht-Modellkonformität ausgeschlossen werden. Die Analyse ergab folgende Ergebnisse:

- Die mittlere Personenfähigkeit der Studierenden hat von Pre zu Post höchst-signifikant zugenommen.
- Die Studierenden in den unteren beiden Leistungsquartilen konnten von Pre zu Post mehr Items potenziell korrekt beantworten.

- Inhaltlich zeigt sich,
  - dass die Studierenden durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment ein quantenphysikalisches Reasoning für die Erklärung von Interferenz entwickelten.
  - dass die Studierenden mehrheitlich ein Verständnis vom Superpositionsprinzip im Kontext Interferenz entwickelten.
  - dass nur die Studierenden im dritten und vierten Quartil ein Verständnis vom Superpositionsprinzip im Allgemeinen entwickelten.

# 16. Auswertung der Interviews

## 16.1. Methode

### 16.1.1. Aufbereitung der Daten

Zur Auswertung der Interviews wurden die Audiographien zunächst transkribiert und dann die Antworten auf die Interviewfragen paraphrasiert, um die mehrzeiligen Antworten der Studierenden (inkl. Nachfrage der Interviewenden) auf den wesentlichen Inhalt zu reduzieren. Exemplarisch wird diese Paraphrasierung am Beispiel eines Interviewausschnitts von CNH11H23 dargestellt. Inhalt des Ausschnittes ist die Aufgabe: *Erklären Sie, was Sie unter einem Photon verstehen.*

S: Eh, ich stelle mir unter einem Photon ein **winziges Teilchen** vor, das in Form von einem oder bzw. ein **Lichtquantum**, also eine, **ein Teilchen, das eine Energieportion mit sich trägt** und diese eben mit sich befördert oder bzw. auch **Licht als elektromagnetische Welle, das eben auch Teilcheneigenschaften aufweist**.

I: Ah ok, jetzt haben Sie, genau, jetzt haben Sie drei verschiedene Punkte erwähnt, auf die ich gerne mal eingehen würde. Sie hatten gesagt, dass es was mit nem Teilchen zu tun hat, ne?

S: Ja.

I: Was bedeutet das denn für Sie?

S: Ehm das hätte ich mit dem vorherigen, was ich gesagt hab, mit der **Energieportion**, also mit diesem, das **Licht als Teilchen**, als Lichtquantum dargestellt werden kann, dass es eben als Teilchen seine Energie abgeben kann, zum Beispiel auf, in Form, wie bei dem photoelektrischen Effekt, wo eben das Lichtteilchen, eben in Form eines Teilchens, an eine Metallplatte **seine Energie abgibt** und eben Elektronen raus löst.

I: Ah ok und dann hatten Sie, genau das als zweiten Punkt das mit dem Lichtquantum und als dritter Punkt was mit ner elektromagnetischen Welle. Was ehm, wie würden Sie das denn nochmal weiter spezifizieren?

S: Ehm, das eben **Licht als elektromagnetische Welle, Welleneigenschaften ebenfalls aufweisen kann**, dass es zum Beispiel an Oberflächen oder an einem Gitter gebeugt werden kann oder auch durch Medien gebrochen wird.

I: Ok, ehm, das heißt wir haben, wenn Sie das jetzt so erzählen, Wellen- und Teilcheneigenschaften zugleich?

S: Eh, ja, das würd ich sagen.

I: Würden Sie da nochmal näher drauf eingehen?

S: Ehm, da meinen Sie jetzt eben diesen **Wellen-Teilchen Dualismus von Licht**, dass eben beides zugleich sein kann?

I: Ich, ich meine gar nichts, ich versuche herauszufinden, was Sie denken (lacht).

S: (lacht) ich denke, dass es eben **diesen Dualismus gibt, das Licht auch beiden die Eigenschaften hat sowohl Wellen-, als auch Teilcheneigenschaften.**

I: Und das auch gleichzeitig?

S: Eh, ja.

Bereits hervorgehoben wurden relevante Aussagen über das Photon:

- winziges Teilchen / Teilchen was Energieportion mit sich trägt und abgibt
- Lichtquantum / Energieportion
- Licht als elektromagnetische Welle / Welleneigenschaft
- Welle-Teilchen Dualismus von Licht / sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften

Mit Hilfe dieser Schlagworte lässt sich der Interviewausschnitt paraphrasieren:

*Photonen sind Lichtteilchen, die Energie (Energiequantum) mitbefördern und diese abgeben können. Sie sind aber auch gleichzeitig elektromagnetische Wellen und haben Welleneigenschaften.*

Analog wurden alle Interviewtranskripte nach diesem Vorgehen paraphrasiert, sodass abschließend pro Person drei Paraphrasen für jeden Testzeitpunkt vorlagen.

### 16.1.2. Entwicklung des Kategoriensystems

Wie bereits in Tab. 12.1 vorgestellt, wurden die Oberkategorien *klassisch*, *dualistisch* und *quasi-quantenphysikalisch* deduktiv abgeleitet. Um diese Oberkategorien zu konkretisieren, wurden für jeden Aufgabenteil induktiv Unterkategorien aus den Interviewparaphrasen abgeleitet. Dazu wurden zunächst die Paraphrasen aus den Pre-Interviews

inhaltlich gruppiert und die Inhalte dieser Gruppe zusammengefasst. In Tab. 16.1 wird dies exemplarisch für ein dualistisches Reasoning (evozierte Teilcheneigenschaft) in der Erklärung des Strahlteilerexperiments dargestellt (Darstellung auf drei Paraphrasen beschränkt). Für die Erklärung des Strahlteilerexperiments sowie der Interferenz lassen

**Tab. 16.1.:** Beispiel einer inhaltlichen Gruppierung von Paraphrasen zur Erklärung des Strahlteilerexperiments.

Paraphrase	Zusammenfassung
Da der Aufbau den Ort des Photons bestimmt, zeigt sich hier die Teilcheneigenschaft. Dies spricht ebenfalls für die Unteilbarkeit.	Das Photon zeigt sich als Teilchen / der Versuchsaufbau legt die Teilcheneigenschaft fest.
Die Einzelphotonen werden entweder komplett reflektiert oder transmittiert und nicht geteilt, da sich das Photon in diesem Fall als Teilchen zeigt und als solches nur komplett transmittiert oder reflektiert wird.	
Das Photon wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% reflektiert oder transmittiert. Ähnlich wie Bälle die einzeln abgefeuert werden. In diesem Versuch zeigt das Photon seinen Teilchencharakter, weil es durch den Versuch festgelegt ist.	

sich mehrere inhaltliche Kategorien finden, die der Oberkategorie *Quasi-Quantenphysikalisch* zugeordnet werden können. In Tab. 16.2 sind die Kategorien vollständig für Strahlteilerexperiment dargestellt.

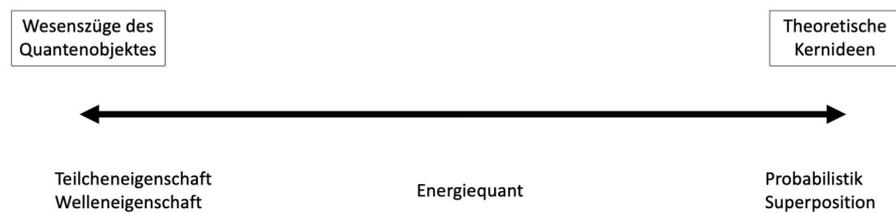
*Tab. 16.2.: Inhaltliche Kategorien für das Strahlteilerexperiment.*

<b>Klassisch</b>	<b>Dualistisch</b>	<b>Quasi-Quantenphysikalisch</b>			
<b>Teilchen</b>	<b>Evoziertes Teilchen</b>	<b>Quantenobjekt</b>	<b>Energiequant</b>	<b>Probabilistik</b>	
Photonen können nicht geteilt werden, weil sie Teilchen sind	Experiment evoziert Teilchensein	Demonstration einer Eigenschaft des Quantenobjekts	Photonen sind unteilbare Energiequanten	<i>Unbestimmtheit</i> Ortsunbestimmtheit als Grund für Probabilistik	<i>Superposition</i> Superposition als Grund für Probabilistik

Insgesamt geben die induktiv abgeleiteten Unterkategorien einen detaillierteren Einblick in das für die Erklärung verwendete Reasoning und zeigen zwei Auffälligkeiten:

1. Für das Strahlteilerexperiment lassen sich ein klassisches, ein dualistisches sowie ein quasi-quantenphysikalisches Teilchen-basiertes Reasoning finden. Ähnliches gilt für ein Wellen-basiertes Reasoning im Kontext Michelson Interferometer. Allerdings wurde ein klassisches Reasoning von keinem Studierenden verwendet.
2. Das quasi-quantenphysikalische Reasoning lässt sich in drei Formen finden, die sich hinsichtlich ihrer Ontologie unterscheiden (Abb. 16.1). Das Reasoning mit ei-

### Ontologie



### Unterkategorien

*Abb. 16.1.: Ontologien des quasi-quantenphysikalischen Reasoning.*

ner Teilcheneigenschaft bzw. einer Welleneigenschaft rekurriert auf Wesenszüge des Quantenobjektes Photon. Im Gegensatz dazu rekurriert das probabilistische Reasoning auf eine Kernidee der Quantentheorie. Beide Ontologien verbindend hingegen ist die Reasoningform *Energiequant*, da es sowohl einen Wesenszug des Quantenobjektes (Photonen sind Energiequanten) als auch eine Kernidee der Theorie (Quantisierung der Energie) verwendet.

Antworten, die nicht begründet sind oder offensichtlich keiner der Kategorien zugeordnet werden können, werden unter der Kategorie *Sonstiges* subsumiert. Eine Zusammenfassung der Kategorien ist Tab. 16.3 zu entnehmen, wobei die Kategorie *Sonstiges* hier nicht aufgeführt ist.

**Tab. 16.3.:** Zusammengefasstes Kategoriensystem. Die Kategorie Sonstiges ist der Übersichtlichkeit halber nicht enthalten.

	<b>Klassisch</b>	<b>Dualistisch</b>	<b>Quasi-Quantenphysikalisch</b>			
<b>Photon</b>	<b>Teilchen:</b> Verantwortet Teilcheneigenschaft von Licht	<b>Welle-Teilchen-Hybrid:</b> Experiment determiniert Sein	<b>Quantenobjekt:</b> Weder Welle noch Teilchen, aber bestimmte Eigenschaften von beidem			
<b>Strahlteiler</b>	<b>Teilchen:</b> Photonen können nicht geteilt werden, weil sie Teilchen sind	<b>Evoziertes Teilchen:</b> Experiment evoziert Teilchensein	<b>Quantenobjekt:</b> Demonstration einer Eigenschaft des Quantenobjekts	<b>Probabilistik:</b>		<b>Energiequant:</b> Photonen sind unteilbare Energiequanten
				Auf Grund der <b>Ortsunbestimmtheit:</b> Ortsunbestimmtheit als Grund für Probabilistik	<b>Superposition:</b> Superpositionszustand als Grund für Probabilistik	
<b>Interferometer</b>		<b>Evozierte Welle:</b> Experiment evoziert das Wellesein	<b>Quantenobjekt:</b> Demonstration einer Eigenschaft des Quantenobjektes	<b>Probabilistik</b>		
				<b>Interferenz von Wahrscheinlichkeiten</b>	<b>Superposition:</b> Superposition von Wahrscheinlichkeitsamplituden führt zur Interferenz	

Das so erstellte Kategoriensystem erlaubt eine globale Betrachtung des Reasonings in Form der Oberkategorien klassisch, dualistisch und quasi-quantenphysikalisch sowie eine inhaltliche Analyse des Reasoning mit Hilfe der induktiv gebildeten Unterkategorien.

### 16.1.3. Auswerteverfahren

Zur Auswertung wurden die Paraphrasen zunächst vom Autor dieser Arbeit kodiert, dann in einem zweiten Schritt von einer weiteren Person vollständig doppelkodiert und daraus abschließend die Interraterreliabilität bestimmt (siehe unten). Zur Auswertung der Interviews wurden dann die Häufigkeiten der verwendeten Reasoningformen zu den Zeitpunkten Pre und Post bestimmt. Anschließend wurde Folgendes betrachtet:

- **Wechsel des Reasoning von Pre zu Post:** Je Aufgabe wird der Wechsel des Reasoning in den Oberkategorien betrachtet. Zusätzlich wird im Kontext Strahlteilerexperiment ein Teilchen-basiertes Reasoning und im Kontext Michelson Interferometer ein Wellen-basiertes Reasoning betrachtet, um zu untersuchen, inwieweit dieses durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment an Attraktivität gewinnt oder verliert.
- **Kohärenz des Reasoning:** Dazu werden für jeden Interviewzeitpunkt die Oberkategorien je Aufgabe betrachtet. Die Betrachtung der Reasoningform über die drei Aufgaben zu einem Interviewzeitpunkt wird im Weiteren *Reasoningmuster* genannt. Der Übersichtlichkeit halber werden nur Studierende dargestellt, deren Reasoning maximal einmal der Kategorie *Sonstiges* zugeordnet wurde, da die mehrfache Nutzung einer sonstigen Reasoningform von Pre zu Post abgenommen hat.

### 16.1.4. Interraterreliabilität

Zur Beurteilung der Reliabilität wurde *Cohens Kappa* als Maß für die Interraterreliabilität bestimmt (siehe Bortz und Schuster (2010) für die Berechnung). Die in Tab. 16.4 dargestellten Werte für  $\kappa$  zeigen eine breite Streuung von 0.311 bis 0.858 ( $M(\kappa) = 0.6$ ,  $SD(\kappa) = 0.2$ ) über die einzelnen Interviewteile bzw. die Interviewzeitpunkte.

**Tab. 16.4.:** Übersicht der  $\kappa$ -Werte.

Interviewteil	Pre	Post
Photon	0.427	0.858
Strahlteiler	0.543	0.802
Interferometer	0.311	0.659

In der Interpretation des  $\kappa$ -Wertes bedeutet dies, dass die Übereinstimmung der beiden Kodierungen zwischen einer mittelmäßigen bis nahezu perfekten Übereinstimmung streuen (Landis und Koch, 1977). Dabei ist auffällig, dass die niedrigsten  $\kappa$ -Werte für die Pre-Interviews zu finden sind.

Um die Ursache für derartige Streuungen zu ergründen, wurden die Abweichungen zwischen den beiden Kodierenden diskutiert. Dabei wurde eine grundsätzliche Abweichungen in der Interpretation der Paraphrasen identifiziert: Die Paraphrasen wurden vom zweiten Kodierenden zumeist oberflächlich, d. h. auf Grund von Signalwörtern interpretiert. So wurden z. B. Paraphrasen, welche den Wortlaut „*das Photon ist ein Teilchen*“ enthalten grundsätzlich der Kategorie *Klassisch* zugeordnet. Dies geschah unabhängig davon, ob im weiteren Verlauf der Paraphrase beispielsweise über dualistische Eigenschaften von Photonen gesprochen wurde. Auf Grund dieser oberflächlichen Interpretation der Paraphrasen lassen sich nahezu alle Unterschiede erklären, sodass abschließend eine Übereinstimmung von 100% zwischen den Kodierungen erhalten wurde.

### 16.1.5. Darstellung der Ergebnisse

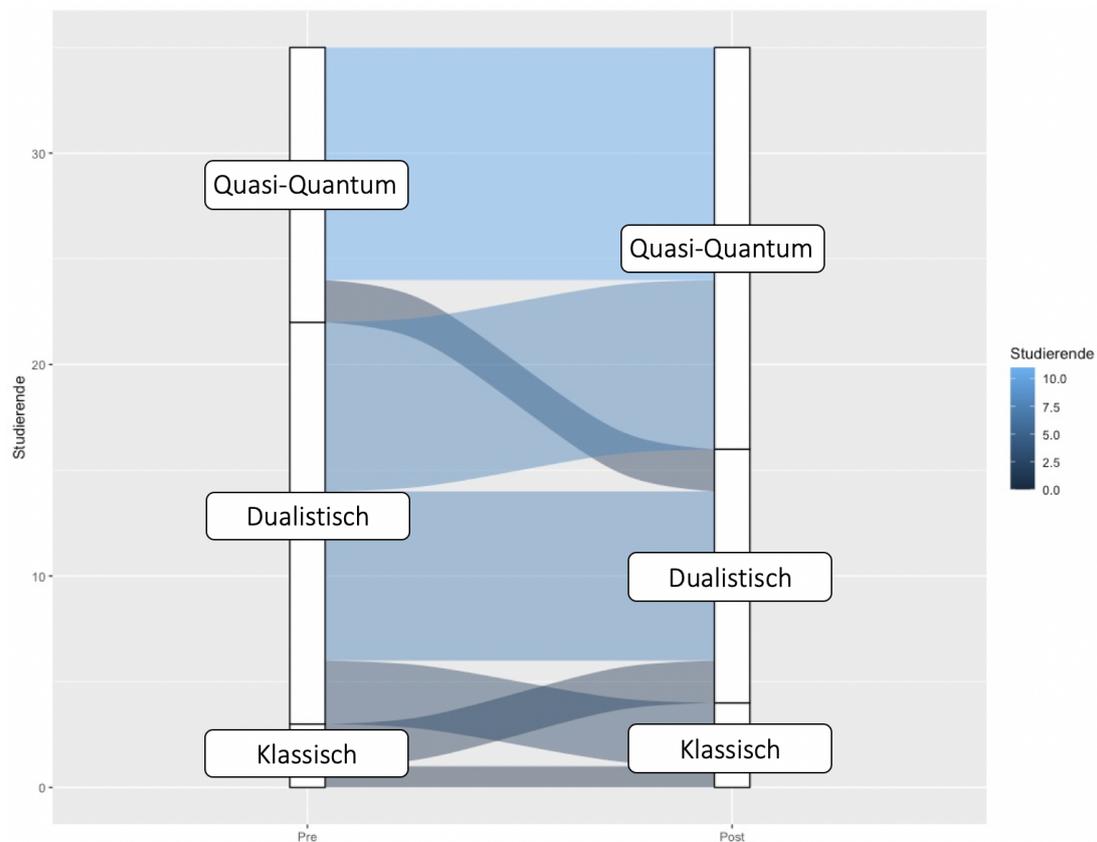
Um sowohl den Anteil der Kategorien an der Gesamtheit als auch den Wechsel im Reasoning darstellen zu können, werden Alluvial Diagramme verwendet. Sie stellen eine spezifische Form eines Flussdiagramms dar und sind wie folgt zu lesen (Rosvall und Bergstrom, 2010):

- Die Abszisse markiert die beiden (Zeit-) Punkte zwischen welchen ein Fluss betrachtet werden soll.
- Die vertikalen Blöcke (Strata) repräsentieren den Anteil der jeweiligen Kategorie in der Stichprobe. Ihre vertikale Ausdehnung skaliert mit diesem Anteil. Im Fall dieser Arbeit mit der Anzahl der Studierenden.
- Die Verbindungen zwischen den Strata, die Alluvials, visualisieren den Fluss zwischen den Strata. Ihre Farbe und Breite skaliert mit der Anzahl der Studierenden, die von einer Kategorie zur anderen wechseln.

## 16.2. Ergebnis

Im Folgenden werden für jede Aufgabe die Veränderung im Reasoning betrachtet. Am Ende jedes Unterkapitels werden exemplarisch Paraphrasen der entsprechenden Ober- und Unterkategorien tabellarisch aufgeführt.

### 16.2.1. Charakterisierung des Photons



**Abb. 16.2.:** Alluvial Diagramm zu Aufgabe 1: Photoncharakterisierung.

Abb. 16.2 fasst die Photoncharakterisierungen der Studierenden zusammen. In Summe werden jedoch nur 35 Studierende betrachtet, da eine Person im Pre-Interview keiner Kategorie zugeordnet werden konnte, sodass sie für den Vergleich ausgeschlossen wurde.

### Pre-Interviews

Zum Pre-Zeitpunkt charakterisierte die Mehrheit der Studierenden (53%) das Photon als dualistisches Objekt.

Die Mindertheit (8%) charakterisierte das Photon als klassisches Teilchen.

Jedoch charakterisierten auch bereits 13 Studierende (36%) das Photon quasi-quantenphysikalisch. Weiterhin zeigte sich in den Interviews, dass die Studierenden die Begriffe *Teilchen* und *Energieportion* teilweise synonym verwendeten bzw. die Teilcheneigenschaft mit der Energiequantisierung gleichsetzten.

### Post-Interviews

Zum Post Zeitpunkt zeigt sich eine Abnahme dualistischer Photonencharakterisierungen (−7 Studierende) und eine Zunahme von quasi-quantenphysikalischen Photonencharakterisierungen (+6 Studierende).

Die detailliertere Analyse der Wechsel zeigt:

- Ausschließlich Studierende, die im Pre-Interview eine dualistische Photonencharakterisierung vorbrachten (10 Studierende, ca. 29%), wechselten zu einer quasi-quantenphysikalischen Photonencharakterisierung.
- Wenige Studierende (zwei bzw. drei) entwickelten ihre klassische Charakterisierung des Photons als Teilchen zu einer dualistischen weiter bzw. wechselten von einer dualistischen zu einer klassischen Charakterisierung.
- Acht Studierende (ca. 23%) sowie 11 Studierende (ca. 31%) behielten ihre dualistischen bzw. quasi-quantenphysikalische Charakterisierung bei.

## Beispielparaphrasen

*Tab. 16.5.: Exemplarische Paraphrasen zur Illustration der Charakterisierungen.*

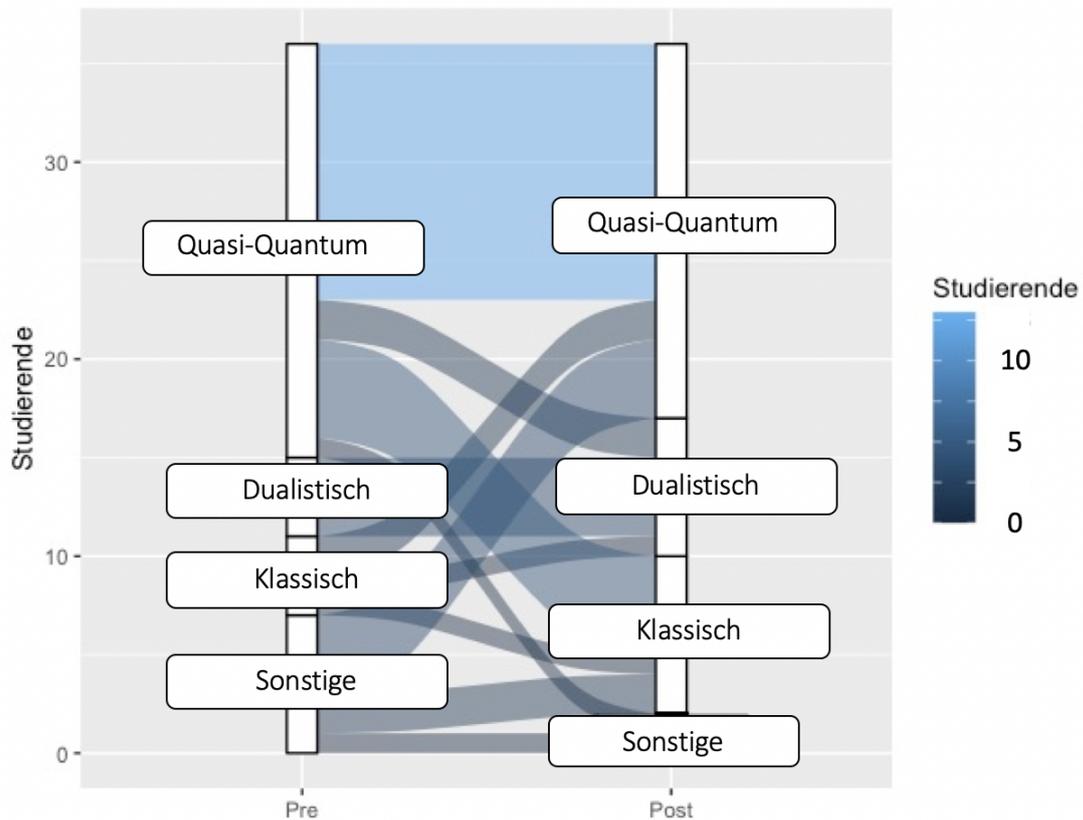
<b>Kategorie</b>	<b>Paraphrase</b>
<b>Klassisch</b>	<i>FST24L09: „Licht besteht aus Photonen. Das sind Energieportionen, die als Teilchen aufgefasst werden. Die Summe von Photonen zeigt allerdings Welleneigenschaften. Je nachdem, was ich mir im Experiment ansehe, sehe ich die Eigenschaften der Welle oder des Teilchens.“</i>
<b>Dualistisch</b>	<i>BAJ11B24: „Ein Teilchen, das Welleneigenschaften besitzt, d.h. es zeigt Interferenz, wenn man den Weg nicht beobachtet. Und Teilcheneigenschaften (einzelne Klicks), wenn man den Weg beobachtet. Dies ist widersprüchlich.“</i>
<b>Quasi-Quantum</b>	<i>JNA10B10: „Photonen sind Quantenobjekte, die Wellen- und Teilcheneigenschaften zeigen. Sie sind dabei weder Welle noch Teilchen.“</i>

## Schlussfolgerungen

Die Auseinandersetzung mit dem Experiment scheint grundsätzlich eine Weiterentwicklung der Photonencharakterisierung anzuregen. Diese Schlussfolgerung wird durch folgende Wahrnehmung gestützt:

- Weiterentwicklung der Photonencharakterisierung um jeweils eine Stufe. Z. B. von einer klassischen zu einer dualistischen Photonencharakterisierung.
- Mehr als die Hälfte der Photonencharakterisierung im Post-Interview ist quasi-quantenphysikalisch.
- Abnahme der Attraktivität dualistischer Photonencharakterisierungen.

### 16.2.2. Strahlteilerexperiment



**Abb. 16.3.:** Verteilung der Oberkategorien zur Erklärung des Strahlteilerexperimentes. Die Grenze der Kategorie Sonstiges zum Post-Zeitpunkt ist fett gedruckt (obere Kante Beschriftung).

#### Pre-Interview

Mit Blick auf die Pre-Interviews (Abb. 16.3, links) zeigt sich:

- Ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning wurde von der Mehrheit der Studierenden verwendet (21 Studierende / ca. 58%). Davon rekurrerten acht Studierende auf die Teilcheneigenschaft eines Quantenobjektes und neun Studierende auf die Probabilistik der Quantenphysik.

- Jeweils vier Studierende verwendeten ein klassisches bzw. ein dualistisches Reasoning.

Damit lässt sich sagen, dass zum Pre-Zeitpunkt, ca. die Hälfte Studierenden (16) ein Reasoning favorisierte, das auf Teilchen bzw. Eigenschaft von Teilchen rekurriert.

### Post-Interviews

Die Post-Interviews zeigen, ...

- ... dass ein klassisches Reasoning für sieben Studierende attraktiver geworden ist. Davon nutzten fünf im Pre-Interview ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning, wobei drei von ihnen auf die Teilcheneigenschaft des Photons rekurrierten.
- ... dass ein dualistisches Reasoning für drei Studierende attraktiver geworden ist.
- ... dass die Studierenden, die im Pre-Interview bereits ein dualistisches Reasoning verwendeten, dieses im Post-Interview beibehielten.

Insgesamt zeigt sich in den Post-Interviews, dass ein klassisches bzw. ein dualistisches Reasoning für die Studierenden attraktiver geworden ist, da nun 21 Studierende (58%) dieses verwenden.

Beispielparaphrasen

Tab. 16.6.: Exemplarische Paraphrasen zur Illustration der Kategorien.

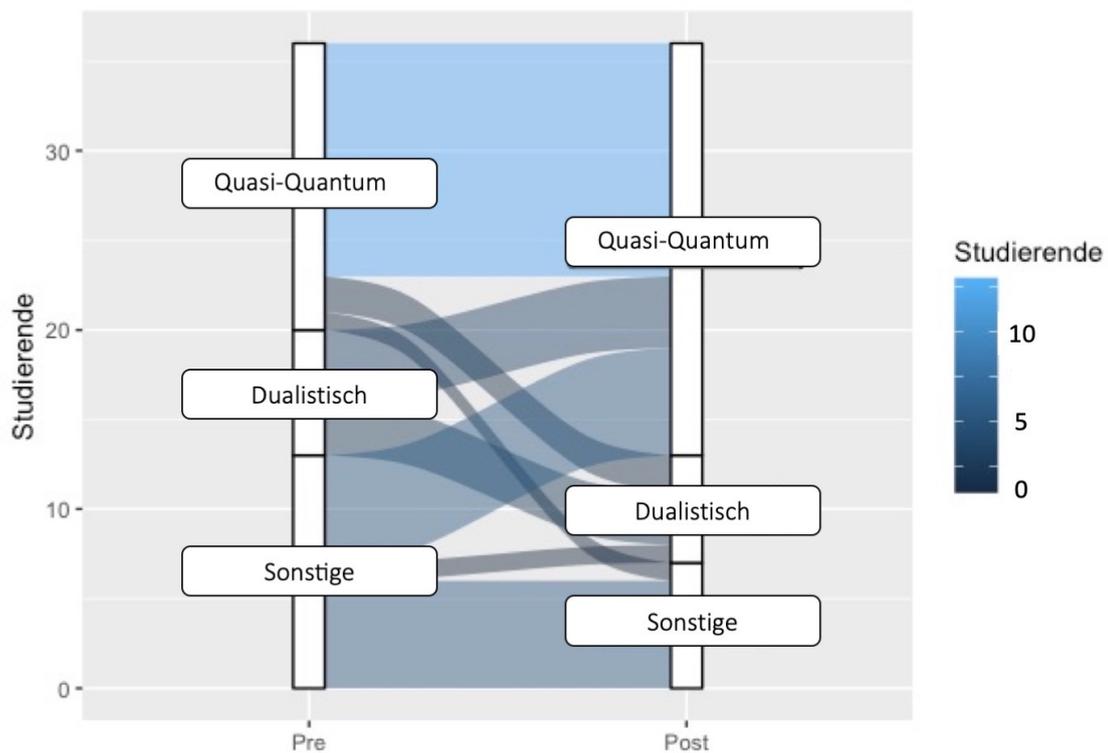
Kategorie	Paraphrase
<b>Klassisch</b>	ACT12A278: „Photonen gehen mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 50% entweder zum reflektierten oder transmittierten Detektor und mit einer geringen Wahrscheinlichkeit zu beiden. Dies kann man sich wie Kugeln vorstellen, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% abprallen und stellt somit eine Teilcheneigenschaft dar.“
<b>Dualistisch</b>	JNA10B10: „Photonen werden mit etwa der gleichen Wahrscheinlichkeit reflektiert und transmittiert, aber niemals beides zugleich. Da mit den Detektoren festgestellt werden kann, welchen Weg das Photon nimmt, verhält es sich wie ein Teilchen.“
<b>Quasi-Quantum</b>	<b>Teilcheneigenschaft:</b> DAU13A14: „Photonen werden mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50% reflektiert oder transmittiert, aber niemals geteilt. Dies geschieht auf Grund des Teilchencharakters des Photons.“
	<b>Energiequant</b> OST03H11: „Die Photonen werden reflektiert oder transmittiert, da sie unteilbare Energieportionen sind. Wellen- oder Teilchencharakter werden in diesem Experiment nicht deutlich.“
	<b>Probabilistik:</b> <u>Ortsunbestimmtheit:</u> MAV30G19: „Der Weg des Photons ist bis zur Detektion unbekannt, jedoch findet die Detektion willkürlich mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% je Ausgang statt.“ <u>Superposition:</u> JAA08B18: „Einzelne Photonen werden mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50% reflektiert oder transmittiert, aber niemals geteilt. Dies sieht aus, wie eine scheinbare Teilcheneigenschaft. Aber, es können lediglich Wahrscheinlichkeitsamplituden formuliert werden. Erst bei der Detektion wird festgelegt ob reflektiert oder transmittiert.“

Schlussfolgerungen

Die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment scheint im Kontext des Strahlteilerexperiments ein vornehmlich klassisches bzw. dualistisches, auf Teilchen basierendes Reasoning zu stabilisieren bzw. für dieses ein Attraktor zu sein. Dies stützt sich auf den Rückgang eines quasi-quantenphysikalischen Reasoning von Pre zu Post bei

einer gleichzeitigen Zunahme von dualistischem und im Besonderen eines klassischen Reasoning.

### 16.2.3. Michelson Interferometer



*Abb. 16.4.: Betrachtung des Reasoning bei der Erklärung der Interferenz.*

#### Auffälligkeiten

In Abb. 16.4 zeigt sich, dass ein klassisches Reasoning von keiner Person verwendet wurde. Zudem zeigt die hohe Ausprägung der Kategorie *Sonstiges*: 13 Personen im Pre-Interview und sieben Personen im Post-Interview haben die phasenabhängige Zählrate nicht als Interferenz interpretiert. Diese Personen interpretierten die Zählrate stattdessen als phasensensible Reflexivität des Strahlteilers oder eine Welleneigenschaft des Photons, die keine Interferenz ist.

### **Pre-Interviews**

In den Pre-Interviews nutzte nahezu die Hälfte der Studierenden (17) ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning für die Erklärung der Interferenz. Dabei rekurrten sieben Studierende auf die Welleneigenschaft des Quantenobjektes und sechs Studierende nutzten die Interferenz von Wahrscheinlichkeit auf Grund der Ortsunbestimmtheit.

Sieben Studierenden nutzten für die Erklärung ein dualistisches Reasoning. Insgesamt lässt sich sagen, dass 39% der Studierenden ein Reasoning verwendeten, dass auf Wellen bzw. Eigenschaften von Wellen rekuriert.

### **Post-Interviews**

In den Post-Interviews hat die Zahl der Studierenden, die ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning verwenden zugenommen (23 Studierende / ca. 64%). Mit Blick auf die Unterkategorien zeigt sich, dass 19 Studierende (53% der Stichprobe) ein probabilistisches Reasoning verwendeten. Die Mehrheit der Subgruppe (14 Studierende) favorisierte die Superposition von Wahrscheinlichkeitsamplituden für die Erklärung. Inhaltlich zeigt sich jedoch, dass die Studierenden nur vereinzelt den Begriff der Superposition konkret verwendeten.

### **Beispielparaphrasen**

**Tab. 16.7.:** Exemplarische Paraphrasen zur Illustration der Kategorien am Michelson Interferometer.

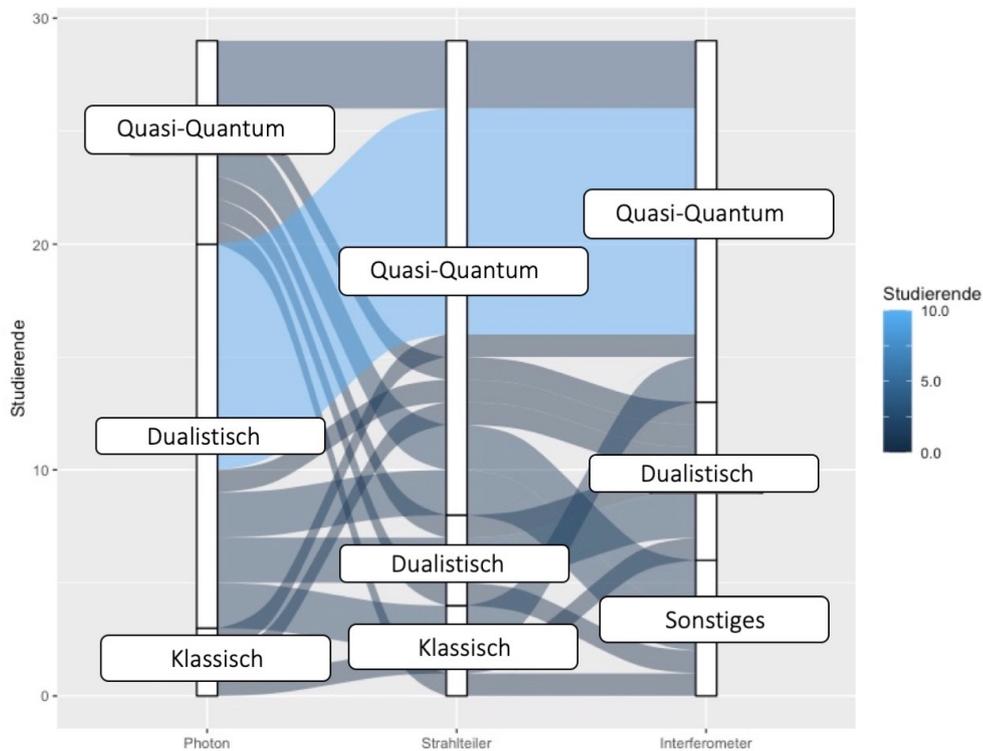
<b>Kategorie</b>	<b>Paraphrase</b>
<b>Dualistisch</b>	<p>JUJ12H30: „Das Photon zeigt sich in diesem Versuch als Welle, d. h., dass das Photon auf den Strahlteiler trifft, geteilt wird und nach der Reflexion am Strahlteiler wieder überlagert wird. Als Folge der Überlagerung wird konstruktive und destruktive Interferenz gemessen. Es lässt sich sagen, dass das Photon mit sich selbst interferiert, da in diesem Experiment alles Welleneigenschaften hat.“</p>
<b>Quasi-Quantenphysikalisch</b>	<p><b>Welleneigenschaft:</b>            BAJ11B24: „Im Experiment sind konstruktive und destruktive Interferenz auf Grund der Welleneigenschaft des Photons zu beobachten. Durch die Bewegung des Spiegels wird ein Gangunterschied erzeugt. Die Teilcheneigenschaft hingegen würde zu einer konstanten Zählrate führen.“</p> <p><b>Probabilistik:</b>  <u>Ortsunbestimmtheit:</u> ENN13D05: „In dem Versuch ist ein Interferenzmuster (die Abhängigkeit der Clicks von der Verschiebung) zu beobachten, da die Verschiebung des Spiegels einen Gangunterschied in den Wahrscheinlichkeitswellen erzeugt. Diese sind anders als Wasserwellen abstrakter und so etwas wie eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, also eine Wahrscheinlichkeit, die als Welle dargestellt werden kann. In diesem Versuch sieht man, dass das Photon kein genau lokalisiertes Teilchen ist, dem man einen Ort zuordnen kann, sondern nur einen Ort unter einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Die Interferenz ist die Welleneigenschaft des Photons.“</p> <p><u>Superposition:</u> KCJ30H49: „Im Diagramm ist ein Interferenzmuster der Clicks sichtbar. Das Photon besitzt eine Wahrscheinlichkeitsamplitude, welche sich ähnlich einer Welle verhält. Der Strahlteiler halbiert diese und sie werden durch die Spiegel wieder auf den Strahlteiler zurückgespiegelt. Dies allein erzeugt schon einen Phasenunterschied. Durch die Verschiebung des Spiegels kann dieser Unterschied noch verstärkt werden. Somit ist eine Interferenz der Wahrscheinlichkeit zu beobachten. Dieser Versuch zeigt, dass es eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und nicht Welle/Teilchen sein muss, da die Versuche sonst nicht miteinander erklärbar wären.“</p>

### Schlussfolgerungen

Die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment scheint im Kontext des Michelson Interferometers die Entwicklung eines quantenphysikalischen Reasoning für die Erklärung der Interferenz zu unterstützen, da zum Post-Zeitpunkt rund 64% der Studierende ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning nutzen. Die Mehrheit ca. 53% aller Studierenden verwendet ein probabilistisches Reasoning. 39% der Studierenden rekurren auf die Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden.

## 16.2.4. Reasoningmuster

### Pre-Interviews



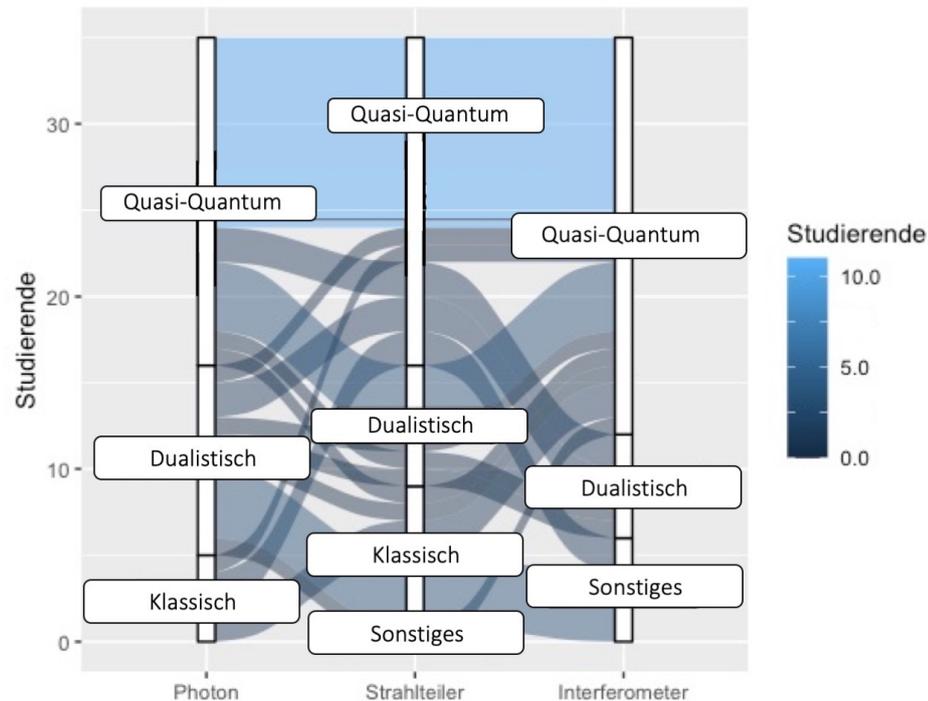
**Abb. 16.5.:** Reasoningmuster in den Pre-Interviews.

Abb. 16.5 zeigt die Reasoningmuster im Pre-Interview für 29 Studierende (siehe Kap. 16.1.3). Folgendes lässt sich feststellen:

- Ein durchgehend klassisches Reasoning wurde von keinem Studierenden verwendet.
- Ein durchgehend dualistisches bzw. ein durchgehend quasi-quantenphysikalisches Reasoning wurde nur von einer Minderheit der Studierenden genutzt (2 bzw. 3 Studierende).
- Rund 1/3 der Studierenden charakterisierte das Photon dualistisch und nutzte für

die Erklärung des Strahlteilerexperiments sowie der Interferenz im Michelson Interferometer ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning.

### Post-Interviews



**Abb. 16.6.:** Reasoningmuster in den Post-Interviews.

Abb. 16.6 zeigt die Muster in den Post-Interviews, für 35 Studierende (s. o.). Folgendes lässt sich feststellen:

- Die Zahl der Studierenden, die ausschließlich ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning nutzten, hat zugenommen (11 Studierende).
- Ein ausschließlich dualistisches Reasoning lässt sich nur noch bei einer Person finden.
- Insgesamt lassen sich wenige eindeutige Reasoningmuster finden. Vielmehr lassen sich verschiedene Mischformen aus klassischem, dualistischen und quasi-quantenphysikalischem Reasoning identifizieren.

## Schlussfolgerungen

Die Betrachtung der individuellen Reasoningmuster bestätigt, was sich bereits in der Betrachtung der einzelnen Interviewteile andeutete: Ein kohärentes Reasoning für alle drei Interviewteile lässt sich im Post-Test nur bei einem Drittel der Stichprobe finden (11 Quasi-Quantenphysikalisch, 1 Dualistisch). Häufig lassen sich Erklärungen mit einem an den Kontext gebundenen Reasoning finden. Aus physikalischer Sicht sind diese Erklärungen durchaus widersprüchlich.

## 16.3. Zusammenfassung

Die Auswertung der Interviews konnte folgende Erkenntnisse liefern:

- **Photon:** Die Zahl dualistischer Photonencharakterisierungen hat von Pre zu Post abgenommen. Die Zahl der quasi-quantenphysikalischen Photonencharakterisierungen hat zugenommen.
- **Strahlteilerexperiment:** Das Teilerperiment scheint ein Stabilisator bzw. Attraktor für ein klassisches bzw. dualistisches Reasoning zu sein. Studierende, die bereits im Pre-Interview ein dualistisches Reasoning verwendeten, behielten dieses bei. Zudem hat der Anteil an dualistischem und klassischem Reasoning zugenommen.
- **Michelson Interferometer:** Die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment scheint die Entwicklung eines quasi-quantenphysikalischen Reasoning mit PSI zu unterstützen. Der Anteil quasi-quantenphysikalischen Reasoning hat von Pre zu Post zugenommen. Die Mehrheit dieser Subgruppe nutzte ein Reasoning, das auf die Superposition von Wahrscheinlichkeitsamplituden rekurriert. Der Begriff Superposition wurde kaum explizit genannt.
- **Reasoningmuster:** Nur ein Drittel der Studierenden entwickelte ein kohärentes Reasoning und verwenden dieselbe Reasoningform für die Erklärung des kompletten Schlüsselexperiments. Die Mehrheit entwickelte ein kontextspezifisches Reasoning, welches sich aus physikalischer Sicht widersprechen kann.

# 17. Gesamtergebnis und Diskussion

Dieses Kapitel widmet sich der Beantwortung der in Kap. 9.1 formulierten Forschungsfragen

1. Inwieweit führt die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment zu einer Veränderung des Konzeptverständnisses von PSI?
2. Inwieweit führt die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment zu einer Veränderung des verwendeten Reasoning bei der Erklärung von gleichzeitiger Unteilbarkeit und Interferenzfähigkeit?
3. Inwieweit gelingt Lernenden der Transfer auf physikalisch vergleichbare Phänomene?

## 17.1. Forschungsfrage 1 - Konzeptverständnis von PSI

*Hypothese: Lernende besitzen auf Grund des vorangegangenen Physik- und Mathematikunterrichts bereits über ein Wissen über Wahrscheinlichkeit und Interferenz. Dieses Wissen wird durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment graduell und inkohärent weiterentwickelt. Ein Wissen über Superposition existiert nicht und wird in Ansätzen durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment entwickelt.*

Die Auswertung des Fragebogens zeigt ein signifikantes Anwachsen der mittleren Personenfähigkeit von Pre zu Post und damit im Mittel ein signifikantes Anwachsen des

Konzeptverständnisses. Die detaillierte Analyse durch Vergleich der Items mit den Fähigkeitsquartilen der Studierenden zeigt, dass vor allen Dingen die Studierenden im ersten und zweiten Fähigkeitsquartil im Post-Test potenziell mehr Items korrekt beantworten konnten als im Pre-Test. Zudem konnten die Studierenden im zweiten Fähigkeitsquartil die Interferenz einzelner Quantenobjekte korrekt erklären, was im Pre-Test nur den Studierenden im dritten bzw. im vierten Fähigkeitsquartil gelang. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass primär ein Konzeptverständnis der Interferenz entwickelt wurde.

Die Auswertung der Interviews unterstützt diese Ergebnisse: Mit Blick auf die Photoncharakterisierung zeigt sich, dass die Zahl dualistischer Photoncharakterisierungen abgenommen hat, während die Zahl quasi-quantenphysikalischer Photoncharakterisierungen zugenommen hat. Weiterhin zeigt sich für den Kontext Michelson Interferometer, dass im Post-Interview 64% der Studierenden ein quasi-quantenphysikalisches Reasoning verwendeten. Davon rekurrten 14 Studierende in ihrer Erklärung auf die Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden. Der Begriff Superposition wurde hingegen kaum explizit verwendet.

Für das Strahlteilerexperiment zeigt sich jedoch ein anderes Bild: Ein klassisches bzw. dualistisches Reasoning haben an Attraktivität gewonnen. Besonders das dualistische Reasoning wurde durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment stabilisiert.

Somit ist es nur in Ansätzen gelungen, dualistische Alternativkonzepte herauszufordern und zu quasi-quantenphysikalischen Konzepten weiterzuentwickeln. Dies zeigt sich insbesondere im Kontext des Strahlteilerexperiments: Der Begriff der Wahrscheinlichkeit wurde zumeist nur im Sinne einer Klickwahrscheinlichkeit der Detektoren aufgefasst. Ein Bezug zum Zustand oder ein Rückgriff auf den Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude bzw. auf die Superposition von Zuständen / Wahrscheinlichkeitsamplituden ließ sich nur vereinzelt feststellen.

Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus der Auswertung des Fragebogens: *Item 16* zum Knallertest und damit zur Superposition ist das schwerste Item. Es kann nur von den Studierenden im vierten Quartil mit einer Wahrscheinlichkeit größer/gleich 50% korrekt beantwortet werden.

Die Auseinandersetzung mit dem Experiment scheint zwar die Entwicklung eines Konzeptverständnisses für das Prinzip Interferenz und bedingt für das Prinzip Probabilistik

hervorgerufen zu haben. Das Prinzip der Superposition wurde hingegen nur im Kontext Interferenz verwendet. Daher haben die Studierenden kein eigenständiges Konzeptverständnis vom Superpositionsprinzip entwickelt. Die Hypothese, dass die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment eine Weiterentwicklung des Konzeptverständnisses evoziert, kann auf Grundlage dieser Ergebnisse somit nicht verworfen werden.

## 17.2. Forschungsfrage 2 - Veränderung im Reasoning

*Hypothese: Der Konzeptwechselforschung folgend werden durch die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment die bestehenden Konzepte um quantenphysikalische Konzepte erweitert. Ein widerspruchsfreies quantenphysikalisches Reasoning wird nicht erwartet.*

Rund 53% der Studierende in den Post-Interviews verwenden ein probabilistisches Reasoning, um die Interferenz im Michelson-Interferometer zu erklären. Die Betrachtung der Unterkategorien zeigt, dass die Erklärung der Interferenz durch Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden gegenüber einer vereinfachten Erklärung als Wahrscheinlichkeitsinterferenz in Folge einer Ortsunbestimmtheit am Strahlteiler von der Mehrheit der Subgruppe favorisiert wird. Gleichzeitig zeigt sich, dass ein Wellenbasiertes Reasoning (dualistisch und quasi-quantenphysikalisch) abgenommen hat.

Dieses Ergebnis lässt sich auch in der Auswertung des Fragebogens finden: Die Interferenz einzelner Quantenobjekte kann im Post-Test bereits von Studierenden im zweiten Quartil erklärt werden. Im Pre-Test gelang dies nur Studierenden in den oberen beiden Quartilen.

Somit scheint es zumindest im Kontext des Michelson Interferometers gelungen zu sein dualistisches Reasoning zu einem quasi-quantenphysikalischen Reasoning weiterzuentwickeln. In der Lernumgebung wurde die Interferenz mittels Zeigerformalismus visualisiert und somit das wenig konkrete Konzept einer Welleneigenschaft expliziert. Möglicherweise könnte diese Visualisierung auch die Entwicklung mentaler Bilder und damit die Konzeptentwicklung unterstützt haben (Vosniadou et al., 2008).

Mit Blick auf das Strahlteilerexperiment zeigt sich jedoch auch, dass die Zahl der Stu-

dierenden, die ein klassisches oder dualistisches Reasoning favorisierten, von Pre zu Post zugenommen hat. Ein probabilistisches Reasoning nahm hingegen von Pre zu Post ab. Die Zahl der Studierenden, die das Ergebnis auf die Eigenschaft Energiequant zurückführten, blieb gleich. Ein klassisches bzw. ein dualistisches, Teilchen-basiertes Reasoning hat somit für die Studierenden an Attraktivität gewonnen. Weiterhin zeigt sich, dass Studierende, welche im Pre-Interview ein dualistisches Reasoning verwendeten, dieses auch im Post-Interview nutzten. Damit zeigt sich einerseits die hohe Attraktivität dualistischer Konzepte und andererseits die hohe Resilienz der Konzepte gegenüber fachlich adäquaten Konzepten (Lautesse et al., 2015; Müller, 2003).

Die Präferenz eines Teilchen-basierten Reasoning macht nochmals deutlich, dass die Studierenden das Superpositionsprinzip nur im Kontext der Interferenz anwenden. Die Auswertung des Fragebogens unterstützt dieses Ergebnis: Zwar lassen sich mit *Item 8*, *Item 11* und *Item 12* Items zur Interpretation des Superpositionsprinzips im Kontext des Mach-Zehnder Interferometers finden, die an der Grenze zwischen dem zweiten und dritten Fähigkeitsquartil liegen (*Item 12* liegt bereits im dritten Quartil), jedoch liegt *Item 16*, welches die konkrete Anwendung des Superpositionsprinzips am Beispiel der wechselwirkungsfreien Messung thematisiert, im vierten Fähigkeitsquartil.

Die Ergebnisse sprechen dafür, dass im Kontext des Strahlteilerexperiments ein Teilchen-basiertes Reasoning den Studierenden anschaulicher erscheinen könnte als das abstrakte Reasoning mit Wahrscheinlichkeitsamplituden. Ein Teilchen-basiertes Reasoning kann zudem mit bereits bestehenden mentalen Bildern eines klassischen Teilchenkonzeptes in Verbindung gebracht werden, sodass ein Reasoning mit realen Entitäten erhalten bleiben kann.

Im Kontrast dazu steht das Konzept der Wahrscheinlichkeitsamplitude. Als Element des mathematischen, nicht-lokalen und indeterministischen Formalismus der Quantentheorie sind Wahrscheinlichkeitsamplituden keine realen Entitäten. Sie sind daher nicht anschlussfähig an bestehende Konzepte des Physikunterrichts oder des Alltags. Auch ein direkter Anschluss an das Wahrscheinlichkeitskonzept des Mathematikunterrichts ist nur bedingt möglich, da die Wahrscheinlichkeitsamplitude zusätzlich noch eine komplexe Phaseninformation trägt.

Der Blick auf die Reasoningmuster zeigt zwar eine Zunahme von *quasi-quantenphysikalischen* Reasoningmustern von Pre nach Post, aber auch eine Vielzahl von Mischungen: Z. B. ein *dualistisches* Reasoning für das Strahlteilerexperiment, aber ein *qua-*

*si-quantenphysikalisches* Reasoning zur Erklärung der Interferenz sowie eine *quasi-quantenphysikalische* Photoncharakterisierung. Ein ausschließlich *dualistisches* Reasoning konnte nur bei einer Minderheit der Studierenden gefunden werden (zwei in Pre, einer in Post).

Die Ergebnisse legen somit den Schluss nahe, dass nur eine Minderheit der Studierenden das Schlüsselphänomen (Interferenz bei gleichzeitiger Unteilbarkeit) als ein Phänomen wahrzunehmen schienen. Vielmehr scheinen sie das Strahlteilerexperiment und das Interferometer als zwei unterschiedliche Kontexte wahrgenommen zu haben, die eine kontextspezifische Erklärung besitzen. Diese ist zumeist dualistisch bzw. klassisch im Falle des Strahlteilerexperiments und zumeist quasi-quantenphysikalisch im Fall der Interferenz. Die Ursache für diese Trennung des Schlüsselphänomens ist vermutlich in der Struktur der Lernumgebung zu sehen: Zunächst wurde am Strahlteilerexperiment eine Analogie zum Galton-Brett aufgestellt, die im nachfolgenden Gedankenexperiment sogar bestätigt wurde und erst im Kontext Interferometer als unzutreffend gekennzeichnet wurde. Im Kontext Strahlteilerexperiment erwies sich die Analogie und die daraus abgeleitete Erklärung jedoch als fruchtbar. Gleiches gilt für die auf der Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden basierenden Erklärung der Interferenz, sodass sich zwei verschiedene an den Kontext gebundene und in diesen jeweils fruchtbare Erklärungsansätze entwickeln konnten, die einander aus physikalischer Sicht widersprechen. Daher lässt sich bestätigen, dass die Mehrheit der Studierenden kein kohärentes, quasi-quantenphysikalisches Reasoning entwickelte, sondern abhängig vom Kontext ein quasi-quantenphysikalisches, dualistisches oder klassisches Reasoning nutzte. Somit haben sich einzelne Erklärungsfragmente entwickelt (vgl. KiP). Die Hypothese kann daher nicht falsifiziert werden, weil im Kontext des Michelson Interferometers im Post-Interview bei 14 Studierenden ein auf PSI basierendes Reasoning gefunden wurde. Zudem lässt sich die Inkohärenz des verwendeten Reasoning in den Reasoningmustern wiederfinden. Die Ergebnisse widersprechen somit nicht den beschriebenen Konzeptwechseltheorien, die eine solche Inkohärenz der Erklärungen als Teil der Konzeptentwicklung benennen.

### 17.3. Forschungsfrage 3 - Transfer der Erklärung

*Hypothese: Lernende verwenden für die Erklärung des Schlüsselexperiments ein sich an PSI orientierendes Reasoning. Für andere physikalisch vergleichbare Kontexte wird jedoch das zum Pre-Zeitpunkt vorliegende Reasoning verwendet.*

Der Transfer der Erklärung basierend auf PSI wurde ausschließlich im Fragebogen mittels Items zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen und Photonen, zum Mach-Zehnder Interferometer sowie zur Elektronenbeugung untersucht. Diese Items betrachten vornehmlich das Phänomen der Interferenz. Es zeigt sich, dass die Items von Pre zu Post von mehr Studierenden potenziell korrekt beantwortet werden können. Zudem zeigt sich, dass *Item 8*, welches ein Mach-Zehnder Interferometer ohne zweiten Strahlteiler und damit ein komplexerer Aufbau des Strahlteilerexperiments betrachtet, im Post-Test ebenfalls im zweiten Fähigkeitsquartil liegt.

Somit lässt sich sagen, dass den Studierenden der Transfer der Erklärung zu gelingen scheint und ein Festhalten an pre-instruktionalem Reasoning weniger wahrscheinlich zu sein scheint. Allerdings kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass die Studierenden eine eigenständige Erklärung für die Phänomene formulieren können, weil möglicherweise bereits die Formulierung *Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden* ausreichend erschien, um die korrekte Antwortmöglichkeit auszuwählen und somit als Marker für die korrekte Antwort fungierte. Daher erscheint es fraglich, inwieweit die Studierenden, das von ihnen präferierte Prinzip der Interferenz durch Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden wirklich auf die jeweiligen Kontexte anwenden können. Dennoch muss auf Grundlage der oben beschriebenen Ergebnisse die Hypothese abgelehnt werden.

### 17.4. Zusammenfassung

- Die Auswertung des Fragebogens sowie der Interviews legen nahe, dass die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment die Entwicklung eines Konzeptverständnisses für das Quantenobjekt Photon sowie das Prinzip der Interferenz fördert. Für das Prinzip der Probabilistik gilt dies nur bedingt. Ein Konzeptverständnis des Superpositionsprinzips wurde jedoch nicht bzw. nur rudimentär für

den Kontext der Interferenz entwickelt.

- Besonders in den Interviews zeigt sich, dass die Studierenden ihre Photonencharakterisierung sowie das Reasoning für die Erklärung der Interferenz weiterentwickelten. Für die Erklärung des Strahlteilerexperiments zeigt sich jedoch das Gegenteil: Studierende behielten ihr dualistisches Reasoning bei. Insgesamt hat die Attraktivität von klassischem und dualistischem Reasoning zum Post-Zeitpunkt zugenommen. Als Grund wird die hohe Anschaulichkeit des Teilchenbildes sowie das Festhalten an den klassisch-physikalischen Prinzipien lokale Realität und Determinismus angesehen.
- Die Auswertung der Reasoningmuster zeigt zwar eine Zunahme des quasi-quantenphysikalischen Musters von Pre zu Post, aber auch, dass insgesamt Mischformen aus klassischem, dualistischem, quasi-quantenphysikalischem sowie sonstigem Reasoning vorliegen. Es zeigt sich, dass die Studierenden zumeist an den Kontext gebundene Reasoningformen entwickelten, die untereinander wenig kohärent sind. Dies steht im Einklang mit dem *Framework Theory Ansatz* sowie mit dem Ansatz *Knowledge in Pieces*.
- Im Kontext der Interferenz zeigt sich, dass die Studierenden im Post-Test Items zur Interferenz in anderen Kontexten (z. B. Elektronenbeugung) ebenfalls mit einer hohen Wahrscheinlichkeit korrekt beantworten konnten. Damit scheint ein Transfer von quantenphysikalischem Reasoning zumindest in Grundzügen möglich.

# 18. Limitationen

Obwohl die Studie fruchtbare Erkenntnisse über die Wirkung des Schlüsselexperimentes auf Lernende generieren konnte, unterliegt sie einer Reihe an Limitationen.

## 18.1. Studiendesign

Wie bereits in Kapitel 10.1.2 ausgeführt, stellt das Studiendesign eine erhebliche Limitation der Studie dar. Auf Grund der fehlenden Vergleichsgruppe ist es nicht möglich Kausalerklärungen für die beobachteten Effekte zu formulieren. Das bedeutet, dass das Anwachsen des Konzeptverständnisses von PSI der Studierenden sowie die Veränderungen im Reasoning nicht eindeutig auf die Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment zurückgeführt werden können. Ebenso sind Retesteffekte durch die zweimalige Beantwortung des Fragebogens nicht auszuschließen.

Dennoch zeigen die beiden zueinander komplementären Erhebungsmethoden (Fragebogen und Interview) sich unterstützende Ergebnisse, sodass eine Zunahme der Personenfähigkeit ausschließlich durch Retesteffekte unwahrscheinlich erscheint. Zudem waren die Interviews durch die Aufgabenstellungen offen gehalten, sodass ein Retesteffekt ebenfalls unwahrscheinlich erscheint.

## 18.2. Stichprobe

Obwohl mit dem PSI-Reasoning ein Ansatz für die Sekundarstufe II vorgeschlagen wurde, wurden in dieser Studie Physikstudierende im zweiten Semester betrachtet. Somit können die Erkenntnisse nicht auf Lernende der gymnasialen Oberstufe übertragen werden. Die Ergebnisse der Hauptstudie zeigen, dass die Lernumgebung bereits für die betrachtete Stichprobe noch nicht optimal war, da beispielsweise die Galton-Brett Ana-

logie ein Teilchenkonzept zu fördern scheint oder auch der Zeigerformalismus nur mit Erklärungshilfen verstanden wurde. Es wird angenommen, dass Lernende der Sekundarstufe II mindestens dieselben Schwierigkeiten haben werden.

Dennoch konnten durch die Studie wertvolle Hinweise gesammelt werden, um die Lernumgebung zu überarbeiten und didaktisch weiter aufzubereiten. Beispielsweise sollte der Zeigerformalismus besser eingeführt werden und das Theoriematerial noch weiter reduziert werden.

### 18.3. Evaluation des Erklärungsansatzes

Inwieweit sich der Erklärungsansatz des PSI-Reasoning für Lernende eignet, kann mittels dieser Studie nur bedingt evaluiert werden, da lediglich die Motivation des Ansatzes durch das Schlüsselexperiment betrachtet wurde. Um den Ansatz insgesamt bewerten zu können, müsste eine zeitlich längere Intervention mit mehreren Lerngelegenheiten, welche die Anwendung von PSI-Reasoning in verschiedenen Kontexten behandelt, betrachtet werden. Und auch hier wäre nicht die Möglichkeit gegeben, die Wirkung der Intervention eindeutig dem Erkläransatz mit PSI oder einzelnen Versatzstücken wie beispielsweise Experimenten oder Simulationen zuzuschreiben, sodass grundsätzlich die Kombination aus Erkläransatz und Lernumgebung betrachtet werden muss.

Dennoch konnten mit der Studie Hinweise darauf gesammelt werden, dass der Ansatz potenziell geeignet ist und vor allen Dingen im Kontext des Michelson Interferometers von den Studierenden übernommen wurde. Um das Superpositionsprinzip zu motivieren und dieses zugunsten eines Teilchen-basierten Reasoning zu verwenden, bedarf es jedoch einer weiteren Überarbeitung der Lernumgebung bzw. einer Veränderung der Struktur der Lernumgebung oder eine Verlängerung der Auseinandersetzung mit dem Experiment. So könnte beispielsweise der Einstieg nicht über Strahlteiler, sondern über das Interferometer gestaltet werden.

## 18.4. Wirkung des Experiments auf Lernende im Moment der Auseinandersetzung

Ziel der Studie war es, Hinweise über die Wirkung des Schlüsselexperiments auf die Lernenden zu bekommen. Dennoch kann über die Wirkung des Experiments im Moment der direkten Auseinandersetzung nichts gesagt werden. So ist beispielsweise nicht bekannt, ob die Studierenden einen Widerspruch zwischen der Unteilbarkeit und der Interferenz der Einzelphotonen erkannten. Die Durchführung einer Laborstudie hätte sicherlich Hinweise darüber sammeln können. Letztlich zeigt die Arbeit von Chinn und Brewer (1998) jedoch, dass das Erkennen eines Widerspruchs zwischen experimentellen Daten und bestehenden Konzepten bei Lernenden nicht zwangsläufig eine Konzeptveränderung zur Folge hat. Sie stellt lediglich eine der möglichen Reaktionen der Lernenden auf den Widerspruch dar. Ebenso ist ein Festhalten an den bestehenden Konzepten möglich, da der Widerspruch zwar erkannt, aber als irrelevant abgetan wird.

Die Ergebnisse der durchgeführten Studie deuten jedoch darauf hin, dass die Auseinandersetzung mit dem Experiment eine Konzeptveränderung anzuregen scheint. Zudem zeigen die Ergebnisse der Interviews, dass die Studierenden im Fall des Strahlteilerexperiments auch an bestehenden Konzepten (Dualismus) festhalten. Dennoch könnte eine zukünftige Laborstudie zu einem detaillierten Erkenntnisgewinn führen und Hinweise darüber liefern, welche kognitiven Prozesse im Fall der konkreten Auseinandersetzung ablaufen. Mit Hilfe dieser Hinweise wäre es dann beispielsweise möglich, die bisher sehr eng gehaltene Lernumgebung zu öffnen und gleichzeitig entsprechende Unterstützungsmaßnahmen (z. B. Differenzierung durch verschiedene Lernpfade) einzubauen.

## 18.5. Vorgehen zur Auswertung des Fragebogens

Obgleich im Prozess der Validierung des Fragebogens bereits einzelne Items ausgeschlossen wurden, musste im Rahmen der Hauptstudie das Item *VW 4* auf Grund des Item-Misfit ausgeschlossen werden. Zudem mussten zusätzlich 14 Personen (17.5%) auf Grund des Misfits aus der betrachteten Stichprobe ausgeschlossen werden. Dies deutet darauf hin, dass keine optimale Passung zwischen Stichprobe und Fragebogen vorlag. Als Ursache dafür kann eventuell die Diversität der Personenfähigkeit innerhalb

der Poststichprobe angesehen werden. Mit Blick auf die Person-Outfit Statistiken (Abb. 29.1 - 29.3) zeigt sich, dass hauptsächlich das Verhalten der Studierenden im Post-Test nicht korrekt vom Rasch-Modell beschrieben werden kann. In der Wrightmap des Post-Tests (Abb. 15.1) sind zudem zwei Peaks in der Personen-Fähigkeit erkennbar: Der erste, kleinere Peak liegt ungefähr an der Grenze zum zweiten Fähigkeitesquartil. Der zweite, größere Peak liegt in der Mitte des dritten Fähigkeitesquartils. Im Vergleich dazu zeigt sich im Pre-Test eine solche Gruppenbildung nicht. Die Gruppenbildung bei einer vergleichsweise kleinen Stichprobe erschwert die Schätzung des Modells. Um eine bessere Rasch-Modellierung zu erhalten, müssten mehr Studierende im mittleren Fähigkeitsbereich in der Stichprobe repräsentiert sein (Planinic et al., 2019).

Obwohl das Auswerteverfahren auf Grund dieser fehlenden Passung zwischen Modell und der realen Stichprobe kritisch zu betrachten ist, führen die beiden zueinander komplementären Erhebungsmethoden (Fragebogen und Interview) zu sich unterstützenden Ergebnissen. Mit 36 Studierenden (45% der Gesamtstichprobe) wurde zudem ein vergleichsweise große Subgruppe interviewt (z. B. Müller (2003) 2 von 5 Kursen, Bitzenbauer (2020) 14% oder Greinert (2020) 11% der Gesamtstichprobe).

## 19. Fazit und Ausblick

Das Ziel der naturwissenschaftlichen Grundbildung verfolgend wurde mit dem PSI-Reasoning ein Ansatz vorgeschlagen, der es Lernenden ermöglichen soll, eigenständig Erklärungen für Phänomene mit Quantenobjekten zu formulieren, ohne den mathematischen Formalismus der Quantenphysik beherrschen zu müssen und ohne auf semi-klassische Analogien zurückgreifen zu müssen. Dazu wurde zunächst der Unterschied zwischen der nicht-lokalen, indeterministischen Quantenphysik und der lokalen, deterministischen klassischen Physik herausgestellt, ehe dann die Spezifika quantenphysikalischer Erklärungen identifiziert wurden. Deren Herzstück ist die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Zustandsfunktion, also die Betrachtung einer Entität, die keine Entsprechung in der messbaren Realität besitzt.

Mittels PSI-Reasoning werden drei quantenphysikalische Grundprinzipien in den Blick genommen, welche die Zustandsfunktion und ihre zeitliche Veränderung sowie deren Interpretation in den Fokus nehmen:

- Auch wenn die Zustandsfunktion ausschließlich eine Entität des quantentheoretischen Formalismus ist, schafft die Bildung des Betragsquadrates, welches als Wahrscheinlichkeitsdichte für das Eintreten eines Messereignisses (das Klicken eines Detektors) interpretiert wird, eine Verbindung zur realen, vermessbaren Welt (Probabilistische Interpretation).
- Formal enthält die Zustandsfunktion alle Informationen über ein System und damit auch über alle möglichen Messergebnisse (Schrödinger, 1935b). Daher kann der Gesamtzustand des Systems als Superposition aller mit den Messergebnissen (Eigenwerte) kompatiblen Unterzuständen (Eigenzustände) geschrieben werden.
- Wird die Kohärenz der Superposition der Unterzustände nicht durch Detektion zerstört, sondern bleibt bis zur Detektion erhalten (z. B. im Michelson Interferometer), so entspricht die Detektionswahrscheinlichkeit dem Betragsquadrat über

den Gesamtzustand. Damit entsteht eine Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit von der Phasendifferenz der Untertzustände. Dies wird als **Interferenz** interpretiert.

Mit diesen drei Grundprinzipien ist es einerseits möglich, die Natur quantenphysikalischer Erklärungen in den Unterricht zu transportieren und andererseits möglich klassische und semiklassische Erklärungsansätze zu vermeiden.

Hauptziel dieser Arbeit war die Analyse eines Schlüsselexperiments, welches Lernende dazu motiviert ihr bisheriges klassisches oder semiklassisches Reasoning und damit klassische bzw. semiklassischen Erklärungen abzulegen und ein quantenphysikalisches Reasoning zu entwickeln. In einer theoretischen Betrachtung wurde die Kombination aus einem Strahlteilerexperiment mit einem Michelson Interferometer als geeignetes Experiment identifiziert, da es mit dem Phänomen Interferenz bei zeitgleicher Unteilbarkeit scheinbare Teilchen- und Welleneigenschaften in einem Experiment zeigt. Das gezeigte Phänomen kann mittels klassischem oder semiklassischem Reasoning nicht widerspruchsfrei erklärt werden. Erst ein quantenphysikalisches Reasoning ermöglicht dies (Müller, 2003; Scholz et al., 2020). Inwieweit dieses Experiment jedoch tatsächlich eine Schlüsselwirkung besitzt, war unbekannt.

Um diese Schlüsselwirkung zu evaluieren, wurden zunächst geeignete Erhebungsinstrumente entwickelt: Ein Rasch-skaliertes Mixed-Format Test zur Untersuchung des Konzeptverständnisses der Lernenden von PSI und ein Interviewleitfaden, der die Erklärung des Strahlteilerexperiments und der Interferenz im Michelson Interferometer in den Blick nimmt. In einem zweiten Schritt wurde eine Lernumgebung entwickelt, die eine Auseinandersetzung mit dem Schlüsselexperiment ermöglicht und PSI-Reasoning als Erklärungsansatz einführt.

Eine anschließende Studie mit 80 Physikstudierenden (2. Semester) im Eingruppen-Pre-Post-Design wurde durchgeführt, um die Schlüsselwirkung des Experiments zu evaluieren. 36 Studierende nahmen zusätzlich an den Interviews teil. Die Auswertung der Erhebungsinstrumente zeigte, dass die Auseinandersetzung mit dem Experiment grundsätzlich eine Entwicklung im Konzeptverständnis und im Reasoning hervorzurufen scheint, da...

... die mittlere Personenfähigkeit von Pre- zu Post-Test zugenommen hat.

... Studierende im zweiten Fähigkeitsquartil oder höher die Items zur Interferenz im

Post-Test mit höherer Wahrscheinlichkeit korrekt beantworten konnten.

... die Studierenden ihre Photoncharakterisierungen von klassischen zu dualistischen bzw. von dualistischen zu quasi-quantenphysikalischen Charakterisierung weiterentwickelten.

... 53% der Studierenden im Post-Interview die Interferenz im Michelson Interferometer auf eine Interferenz von Wahrscheinlichkeiten zurückführten. Die Mehrheit dieser Gruppe präferierte eine Erklärung, bei welcher die Interferenz auf die Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsamplituden zurückgeführt wird.

... die Zahl der Studierenden, die ein komplett quasi-quantenphysikalisches Reasoningmuster verwendeten, zugenommen hat.

Jedoch zeigt sich auch, dass ...

... ein Teil der Studierenden ihre Photoncharakterisierung zurückentwickelte, d. h. von quasi-quantenphysikalischen zu dualistischen bzw. von dualistischen zu klassischen Charakterisierungen.

... im Kontext des Strahlteilerexperiments ein klassisches sowie ein dualistisches Reasoning an Attraktivität gewonnen hat.

... ein dualistisches Reasoning von einem Teil der Studierenden beibehalten wurde und damit die Hartnäckigkeit dualistischer Alternativkonzepte demonstriert (Müller (2003) oder Lutesse et al. (2015)).

Auf Grundlage dieser Ergebnisse lässt sich sagen, dass das betrachtete Kombinationsexperiment aus Strahlteilerexperiment und Michelson Interferometer grundsätzlich ein geeignetes Schlüsselexperiment für das Lernen von Quantenphysik ist und das eigenständige Formulieren von Erklärungen basierend auf PSI-Reasoning anregt.

Dennoch bleiben Fragen bezüglich des Experiments offen, denen sich in weiteren Studien angenommen werden muss:

- Welche kognitiven Prozesse regt die Auseinandersetzung mit dem Experiment bei Lernenden an?

Dieser Frage könnte beispielsweise im Rahmen einer Laborstudie nachgegangen

werden. Die so erhaltenen Ergebnisse könnten dann in den theoretischen Rahmen von *Knowledge in Pieces* eingeordnet werden, um einen Einblick in die Entwicklung des quantenphysikalischen Sense of Mechanism zu erlangen.

- Inwieweit beeinflusst die Struktur der Lernumgebung das Reasoning der Studierenden?

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die gewählte Struktur der Lernumgebung die Entwicklung kontextgebundener Erklärungen begünstigt haben könnte. Möglicherweise würde ein Umdrehen des Lernweges (erst Interferenz und dann Unteilbarkeit) dazu führen, dass die Lernenden das Schlüsselphänomen nicht als zwei Einzelphänomene, sondern als geschlossenes Phänomen wahrnehmen und daher eine widerspruchsfreie Erklärung entwickeln. Um Erkenntnisse über einen Einfluss der Lernumgebung gewinnen zu können, könnten verschiedene Lernumgebungen gegeneinander getestet werden.

- Inwieweit kann das Experiment als Schlüsselexperiment für Unterricht über Quantenphysik in der Sekundarstufe II eingesetzt werden?

Durch Aufbereitung der Lernumgebung z. B. durch zusätzliche Hilfestellungen, weitere Möglichkeiten der Differenzierung oder eine ausgedehntere Theoriephase zu PSI kann die Lernumgebung für die Sekundarstufe II angepasst werden. Ebenso müssten für diesen Einsatz die verwendeten Erhebungsinstrumente nochmals hinsichtlich ihrer Validität geprüft werden, um dann die Wirkung des Experiments auf das Reasoning der Lernende zu untersuchen.

- Inwieweit unterscheidet sich die Schlüsselwirkung des betrachteten Kombinationsexperiments von der Wirkung anderer in Kap. 7 diskutierter Experimente?

Mittels Vergleichsstudie (analog zur Analyse des Einflusses verschiedener Lernumgebung) könnten Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile der einzelnen Experimente, die in dieser Arbeit ausschließlich theoretisch behandelt wurden, empirisch fundiert werden.

Bezüglich des Ansatzes PSI-Reasoning konnten mit Hilfe dieser Arbeit nur erste Hinweise über die Wirkung auf das Reasoning der Lernenden gesammelt werden. Daher erscheinen auch dazu weitere Studien nötig, die sich beispielsweise folgenden Fragestellungen widmen:

- Inwieweit kann durch die konsequente Verwendung von PSI-Reasoning in einem Lehrgang eine eigenständige Verwendung dieser Reasoningwerkzeuge bei Lernenden für die Erklärungen verschiedener Phänomene erreicht werden?

Um diese Frage beantworten zu können, müsste zunächst ein kompletter Lehrgang entwickelt werden und einzelnen zusätzlichen Versatzstücke hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Reasoning der Lernende geprüft werden. Dazu könnten zum Beispiel analog zu Bitzenbauer (2020) oder Burde (2018) Teaching Experiments genutzt werden, ehe dann eine summative Evaluation des Lehrgangs vorgenommen werden könnte.

- Inwieweit ist PSI-Reasoning für die Lernenden anschlussfähig an die Quantenphysikausbildung der Hochschule?

Um dieser Frage nachzugehen, müssten Lernende im Rahmen einer Längsschnittstudie vom Zeitpunkt des Physikunterrichts bis zur Quantenphysikausbildung begleitet werden.

Es wird somit deutlich, dass ausgehend von dieser Arbeit weitere Forschungsvorhaben notwendig erscheinen, um einerseits einen noch detaillierteren Einblick in die Schlüsselwirkung des Kombinationsexperiments zu bekommen und andererseits um den vorgeschlagenen PSI-Reasoning Ansatz detaillierter zu bewerten.

Teil IV.  
Verzeichnisse

## 20. Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufbau einer naturwissenschaftlichen Erklärung nach McNeill und Krajcik (2008). . . . .	7
2.2. Ein- und Ausgänge des optischen 50/50 Strahlteilers. . . . .	15
2.3. Schematische Darstellung des Michelson Interferometers. . . . .	17
7.1. Schlüsselexperiment nach Scholz et al. (2020) . . . . .	54
11.1. Beispielitem zum Mach-Zehnder QuILT von Singh (2008). . . . .	69
11.2. Beispielitem von Bitzenbauer (2020). . . . .	70
11.3. Beispielitem von Di Uccio et al. (2019). . . . .	70
11.4. Qualitative und quantitative Analyse zur Evaluation des IUA. . . . .	73
11.5. Beispielitem Item 9 . . . . .	77
11.6. Zusätzliche statistische Verfahren zur Identifikation von potenziell nicht-modellkonformen Items. . . . .	78
11.7. Item 11 zum Superpositionsprinzip. . . . .	80
11.8. Item 17 zur Erklärung der Interferenz von Einzelphotonen. . . . .	81
11.9. Kodierung der Audiotranskripte . . . . .	83
11.10. Wright-Map der Feldstudie . . . . .	87
11.11. Personfit-Outfit MNSQ . . . . .	89
11.12. Ergebnisse der Parallelanalyse und Screeplot. In Dreiecken: Eigenwerte des Datensatzes. Rot-gestrichelt: Simulierte Daten . . . . .	90
11.13. Item 5 als Beispiel Item für den zweiten Faktor . . . . .	92
12.1. Schema der Aufgaben im Interviewleitfaden. . . . .	100
12.2. Materialien zu Aufgabe 2 und 3. . . . .	101
13.1. Realer Aufbau des Schlüsselexperiments. In blau: Schematische Nachzeichnung der Lichtwege. . . . .	106

13.2. Darstellung der Wahrscheinlichkeitsamplitude als Zeiger. . . . .	112
13.3. Schematische Darstellung des Michelson Interferometers. . . . .	112
13.4. Berechnung der Bestandteile der Wahrscheinlichkeitsamplitude für das Klicken des Detektors in Ausgang 2. . . . .	113
13.5. Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Klicken des Detektors in Ausgang 2. . . . .	114
13.6. Lernpfad durch das Schlüsselexperiment und Zuordnung der Teilziele (TZ) vor der Pilotierung. . . . .	117
13.7. Gedankenexperiment. . . . .	118
13.8. Lernpfad durch das Schlüsselexperiment für die Hauptuntersuchung . .	124
13.9. Beispiel einer Testfrage zur Auswertung. . . . .	126
14.1. Design der Datenerhebung . . . . .	129
15.1. Wright-Map für den Pre- und Post-Test. In schwarz eingezeichnet: Quar- tile der Personenfähigkeit. . . . .	134
16.1. Ontologien des quasi-quantenphysikalischen Reasoning. . . . .	144
16.2. Alluvial Diagramm zu Aufgabe 1: Photoncharakterisierung. . . . .	148
16.3. Verteilung der Oberkategorien zur Erklärung des Strahlteilerexperimen- tes. Die Grenze der Kategorie <i>Sonstiges</i> zum Post-Zeitpunkt ist fett ge- druckt (obere Kante Beschriftung). . . . .	151
16.4. Betrachtung des Reasoning bei der Erklärung der Interferenz. . . . .	154
16.5. Reasoningmuster in den Pre-Interviews. . . . .	158
16.6. Reasoningmuster in den Post-Interviews. . . . .	159
23.1. Personfit-Outfit MNSQ final . . . . .	197
24.1. Finale Wright-Map nach dem Itemausschluss. . . . .	198
29.1. Personoutfit MNSQ ohne Bereinigung . . . . .	244
29.2. Personoutfit MNSQ nach der 1. Bereinigung . . . . .	247
29.3. Personoutfit MNSQ nach der 2. Bereinigung . . . . .	250

## 21. Tabellenverzeichnis

11.1. Kategoriensystem nach Groth (2016). . . . .	75
11.2. Abweichend beantwortete Items. Grün: Korrekte Antwort . . . . .	84
11.3. Items mit Misfit und ihr Verhalten in den qualitativen Studien . . . . .	88
11.4. Faktorladungen der Items oberhalb des Grenzwertes von 0.3. . . . .	91
11.5. Schwierigkeiten und IN- und OUTFIT-Werte der Items, die auf keinen Faktor laden. . . . .	93
11.6. AIC- und BIC-Wert für ein 1D- und 2D-Rasch-Modell . . . . .	94
12.1. Deduktive Kategorien zur Auswertung der Interviews. . . . .	104
13.1. Rechenregeln für den $q(\varphi)$ -Faktor nach Scholz et al. (2020) . . . . .	115
15.1. Quartilsgrenzen der Personenfähigkeiten in Pre und Post. . . . .	135
15.2. Inhaltliche Beschreibung der Fähigkeitsquartile . . . . .	137
16.1. Beispiel einer inhaltlichen Gruppierung von Paraphrasen zur Erklärung des Strahlteilerexperiments. . . . .	142
16.2. Inhaltliche Kategorien für das Strahlteilerexperiment. . . . .	143
16.3. Zusammengefasstes Kategoriensystem. Die Kategorie <i>Sonstiges</i> ist der Übersichtlichkeit halber nicht enthalten. . . . .	145
16.4. Übersicht der $\kappa$ -Werte. . . . .	147
16.5. Exemplarische Paraphrasen zur Illustration der Charakterisierungen. . .	150
16.6. Exemplarische Paraphrasen zur Illustration der Kategorien. . . . .	153
16.7. Exemplarische Paraphrasen zur Illustration der Kategorien am Michel- son Interferometer. . . . .	156
23.1. Fitstatistiken der Items der Felderprobung . . . . .	195

24.1. Faktorladungen nach Itemausschluss. . . . .	199
29.1. MNSQ-Infit und Outfit der Items in Pre und Post . . . . .	242
29.2. MNSQ-Infit und Outfit der Items in Pre und Post . . . . .	245
29.3. MNSQ-Infit und Outfit der Items in Pre und Post . . . . .	248

## 22. Literatur

- Ayene, M., Kriek, J., & Dantie, B. (2011). Wave-Particle Duality and Uncertainty Principle: Phenomenographic Categories of Description of Tertiary Physics Students' Depictions. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 7(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.020113>
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. (2016). *Multivariate Analysemethoden: Eine Anwendungsorientierte Einführung* (14., überarbeitete und aktualisierte Auflage). Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46076-4>
- Barke, H.-D., Harsch, G., Marohn, A., & Krees, S. (2015). *Chemiedidaktik Kompakt: Lernprozesse in Theorie Und Praxis* (Second). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43396-6>
- Beck, G. (1927). Zur Theorie Des Photoeffekts. *Zeitschrift für Physik*, 41(6-7), 443–452. <https://doi.org/10.1007/BF01400206>
- Becker-Carus, C., & Wendt, M. (2016). *Allgemeine Psychologie: Eine Einführung*. Springer  
Backup Publisher: Springer-Verlag GmbH.
- Becquerel, H. (1896). Sur Diverses Propriétés Des Rayons Uraniques. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, (123), 1086–1088.
- Bell, T. (2007). 4: Entdeckendes Und Forschendes Lernen. In Silke Mikelskis-Seifert & Thorid Rabe (Hrsg.), *Physik-Methodik. Handbuch Für Die Sekundarstufe I Und II*. Cornelsen Verlag.
- Belzer, H. J., Frenzel, E., Kellner, R., Kiehne, Neunzig, M., Piechocki, A., Proll, B., Radtke, R., Ritzmann, U., Siebert, A., & Tschiedel, V. (2019). Richtlinien Zur Sicherheit Im Unterricht.
- Berger, R., Kulgemeyer, C., & Lensing, P. (2019). Ein Multiple-Choice-Test Zum Konzeptuellen Verständnis Der Kraftwirkung Auf Ladungsträger in Statischen Elek-

- trischen Und Magnetischen Feldern. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 7. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00099-2>
- Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2009). Making Sense of Argumentation and Explanation. *Science Education*, 93(1), 26–55. <https://doi.org/10.1002/sce.20286>
- Bitzenbauer, P. (2020). *Quantenoptik an Schulen: Studie Im Mixed-Methods Design Zur Evaluation Des Erlanger Unterrichtskonzepts Zur Quantenoptik: Dissertation* (Bd. 303). Logos-Verl.  
Backup Publisher: Logos Verlag Berlin and Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Bohr, N. (1983). Diskussion Mit Einstein Über Erkenntnistheoretische Probleme in Der Atomphysik. In P. A. Schilpp (Hrsg.), *Albert Einstein Als Philosoph Und Naturforscher* (S. 84–119). Vieweg+Teubner Verlag.
- Bond, T. G., & Fox, C. M. (2012). *Applying the Rasch Model: Fundamental Measurement in the Human Sciences* (2nd ed.). Routledge  
Backup Publisher: ebrary, Inc.
- Boone, W. J., Staver, J. R., & Yale, M. S. (2014). *Rasch Analysis in the Human Sciences*. Springer.
- Bortz, J., & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler: mit ... 163 Tabellen* (7., vollst. überarb. und erw. Aufl). Springer.
- Bronner, P. (2010). *Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons*. Logos Berlin.
- Bruns, K. G., & Rode, M. (Hrsg.). (2019). *Impulse Physik - Oberstufe* (First). Ernst Klett.
- Bunge, M. (1968). Analogy in Quantum Theory: From Insight to Nonsense. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 18(4), 265–286.
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Logos Verlag Berlin.
- Camilleri, K. (2009). Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation. *Perspectives on Science*, 17(1), 26–57. <https://doi.org/10.1162/posc.2009.17.1.26>
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1998). An Empirical Test of a Taxonomy of Responses to Anomalous Data in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(6), 623–654.
- Clayden, J., Greeves, N., & Warren, S. (2012). *Organische Chemie*. Springer Spektrum.

- DeBoer, G. E. (2000). Scientific Literacy: Another Look at Its Historical and Contemporary Meanings and Its Relationship to Science Education Reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), 582–601.
- Di Uccio, U. S., Colantonio, A., Galano, S., Marzoli, I., Trani, F., & Testa, I. (2019). Design and Validation of a Two-Tier Questionnaire on Basic Aspects in Quantum Mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010137>
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105–225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- diSessa, A. A. (2008). A Bird's-Eye View of the Pieces vs. Coherence Controversy (From the Pieces Side of the Fence). In S. Vosniadou (Hrsg.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (S. 35–60). Routledge.
- diSessa, A. A. (2014). A History of Conceptual Change Research. In R. K. Sawyer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (S. 88–108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.007>
- diSessa, A. A. (2017). Conceptual Change in a Microcosm: Comparative Learning Analysis of a Learning Event. *Human Development*, 60(1), 1–37. <https://doi.org/10.1159/000469693>
- diSessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What Changes in Conceptual Change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155–1191. <https://doi.org/10.1080/0950069980201002>
- Döring, N., & Bortz, J. (Hrsg.). (2016). *Forschungsmethoden Und Evaluation in Den Sozial- Und Humanwissenschaften* (Fifth). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual Change: A Powerful Framework for Improving Science Teaching and Learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671–688. <https://doi.org/10.1080/09500690305016>
- Dür, W., & Heusler, S. (2012). Was Man Vom Einzelnen Qubit Über Quantenphysik Lernen Kann. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(11), 1–16.
- Einstein, A. (1948). Quantenmechanik Und Wirklichkeit. *Dialectica*, 2(3-4), 320–324. <https://doi.org/10.1111/j.1746-8361.1948.tb00704.x>

- Elitzur, A. C., & Vaidman, L. (1993). Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements. *Foundations of Physics*, 23(7), 987–997. <https://doi.org/10.1007/BF00736012>
- Falconer, I. (1987). Corpuscles, Electrons and Cathode Rays: J. J. Thomson and the 'Discovery of the Electron'. *The British Journal for the History of Science*, 20(3), 241–276.
- Feynman, R. P. (1990). *QED - Die Seltsame Theorie Des Lichts Und Der Materie* (3. Aufl.). Piper.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M., & Wessel, H. (2007). *Quantenmechanik: Mit 22 Tabellen* (5., verb. Aufl., definitive Ed., Bd. / von Richard P. Feynman, Robert B. Leighton und Matthew Sands ; Bd. 3). Oldenbourg.
- Franz, T., & Müller, R. (2016). Quantenphysik: Trends Und Herausforderung. *Plus Lucis*, (02), 19–22.
- Friebe, C. (2018). Messproblem, Minimal- Und Kollapsinterpretation. In C. Friebe, M. Kuhlmann, H. Lyre, P. M. Näger, O. Passon & M. Stöckler (Hrsg.), *Philosophie Der Quantenphysik* (S. 41–74). Springer Spektrum.
- Fun, X., & Sun, S. (2013). Item Response Theory. In T. Teo (Hrsg.), *Handbook of Quantitative Methods for Educational Research* (S. 45–67). Sense.
- Gisin, N. (2014). *Der unbegreifliche Zufall: Nichtlokalität, Teleportation und weitere Seltsamkeiten der Quantenphysik*. Springer Berlin Heidelberg Springer e-books Imprint: Springer Spektrum.
- Goldhaber, S., Pollock, S., Dubson, M., Beale, P., Perkins, K., Sabella, M., Henderson, C., & Singh, C. (2009). Transforming Upper-Division Quantum Mechanics: Learning Goals and Assessment, 145–148. <https://doi.org/10.1063/1.3266699>
- Grangier, P., Roger, G., & Aspect, A. (1986). Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. *Europhysics Letters (EPL)*, 1(4), 173–179. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/1/4/004>
- Greca, I. M., & Freire, O. (2014). Teaching Introductory Quantum Physics and Chemistry: Caveats from the History of Science and Science Teaching to the Training of Modern Chemists. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 15(3), 286–296. <https://doi.org/10.1039/C4RP00006D>

- Greinert, L. (2020). *Energieentwertung Erfassbar Machen : Konzeption Und Evaluation Eines Curriculumorientierten Lehrgangs Mit Fokus Auf Energietransfer Und Visualisierung Mittels Infrarotkamera*. Hannover : Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover. <https://doi.org/10.15488/10071>
- Gross, R., & Marx, A. (2014). *Festkörperphysik* (2., aktualisierte Auflage). DE GRUYTER.
- Groth, V. (2016). *Analyse von Schülerinterviews Zur Kognitiven Validierung von Multiple-Choice-Aufgaben Sowie Zur Identifizierung von Schülervorstellungen Zu Der Bewegung von Ladungsträgern in Elektrischen Und Magnetischen Feldern* (Unveröffentl. Masterarbeit). Universität Osnabrück. Osnabrück.
- Heisenberg, W. (1973). Development of Concepts in History of Quantum Theory. In J. Mehra (Hrsg.), *The Physicist's Conception of Nature* (S. 264–275). Springer Netherlands.
- Heisenberg, W. (1979). *Quantentheorie Und Philosophie: Vorlesungen u. Aufsätze* (J. Busche, Hrsg.). Reclam.
- Hempel, K. G., & Oppenheim, P. (1948). Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science*, 15(2), 135–175.
- Hopf, M., & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen Zu Fortgeschrittenen Themen Der Schulphysik. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen Und Physikunterricht* (S. 225–242). Springer Berlin Heidelberg.
- Höttecke, D., & Rieß, F. (2015). Naturwissenschaftliches Experimentieren Im Lichte Der Jüngerer Wissenschaftsforschung – Auf Der Suche Nach Einem Authentischen Experimentbegriff Der Fachdidaktik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21(1), 127–139. <https://doi.org/10.1007/s40573-015-0030-z>
- Hoyningen-Huene, P. (1989). *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-07954-5>
- Johansson, A., Andersson, S., Salminen-Karlsson, M., & Elmgren, M. (2018). “Shut up and Calculate”: The Available Discursive Positions in Quantum Physics Courses. *Cultural Studies of Science Education*, 13(1), 205–226. <https://doi.org/10.1007/s11422-016-9742-8>

- Jönsson, C. (1961). Elektroneninterferenzen an Mehreren Künstlich Hergestellten Feinspalten. *Zeitschrift für Physik*, 161(4), 454–474. <https://doi.org/10.1007/BF01342460>
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An Instructional Model for a Radical Conceptual Change towards Quantum Mechanics Concepts. *Science Education*, 87(2), 257–280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>
- Kane, M. T. (2013). Validating the Interpretations and Uses of Test Scores. *Journal of Educational Measurement*, 50(1), 1–73. <https://doi.org/10.1111/jedm.12000>
- KMK (Hrsg.). (2004). *Einheitliche Prüfungsanforderungen in Der Abiturprüfung Physik*.
- KMK. (2005). *Bildungsstandards Im Fach Physik Für Den Mittleren Schulabschluss*. Wolters Kluwer GmbH.
- KMK. (2020). *Bildungsstandards Im Fach Physik Für Die Allgemeine Hochschulreife*. Wolters Kluwer GmbH.
- Kohnle, A., Baily, C., Campbell, A., Korolkova, N., & Paetkau, M. J. (2015). Enhancing Student Learning of Two-Level Quantum Systems with Interactive Simulations. *American Journal of Physics*, 83(6), 560–566. <https://doi.org/10.1119/1.4913786>
- Konferenz der Fachbereiche Physik (Hrsg.). (2010). *Zur Konzeption von Bachelor- Und Master Studiengängen in Der Physik: Handreichung Der Konferenz Der Fachbereiche Physik (KFP)*.
- Koopman, L., Brouwer, N., Heck, A., & Buma, W. J. (2008). Remedial Mathematics for Quantum Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 85(9), 1233. <https://doi.org/10.1021/ed085p1233>
- Kral, A., Schorn, B., & Heinke, H. (2019). Lernzuwachs Beim Einstieg in Die Quantenphysik Mit Realexperimenten. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung Als Grundlage Für Berufliche Und Gesellschaftliche Teilhabe*. (S. 480–483).
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & van Joolingen, W. R. (2017). Insights into Teaching Quantum Mechanics in Secondary and Lower Undergraduate Education. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 33. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>

- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & van Joolingen, W. R. (2018). Key Topics for Quantum Mechanics at Secondary Schools: A Delphi Study into Expert Opinions. *International Journal of Science Education*, 41(3), 349–366. <https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1550273>
- Küblbeck, J., & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge Der Quantenphysik: Modelle, Bilder Und Experimente* (Bd. 60). Aulis-Verl. Deubner.
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (3., überarbeitete Aufl.). Beltz.
- Kulgemeyer, C., & Tomczyszyn, E. (2015). Physik Erklären – Messung Der Erklärbarkeit Angehender Physiklehrkräfte in Einer Simulierten Unterrichtssituation. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21(1), 111–126. <https://doi.org/10.1007/s40573-015-0029-5>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Laumann, D., Wichtrup, P., & Friege, G. (2019). Zwei Schlüssel Zur Physik: Reale Experimente Und Digitale Medien Als Schlüssel Zu Physikalischen Inhalten. *Unterricht Physik*, (171/172), 4–9.
- Lautesse, P., Vila Valls, A., Ferlin, F., Héraud, J.-L., & Chabot, H. (2015). Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France. *Science & Education*, 24(7-8), 937–955. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9755-9>
- Limón, M. (2001). On the Cognitive Conflict as an Instructional Strategy for Conceptual Change: A Critical Appraisal. *Learning and Instruction*, 11(4-5), 357–380. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(00)00037-2)
- Linacre, J. M. (1994). Sample Size and Item Calibration Stability.
- Loudon, R. (2010). *The Quantum Theory of Light* (3. ed., reprinted.). Oxford Univ. Press.
- Mair, P., Hatzinger, R., Maier, M. J., Rusch, T., & Debelack, R. (2020). Package 'eRm'.
- Mandel, L. (1959). Fluctuations of Photon Beams: The Distribution of the Photo-Electrons. *Proceedings of the Physical Society*, 74(3), 233–243. <https://doi.org/10.1088/0370-1328/74/3/301>
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2010). Design and Validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. *Physical Review Special Topics -*

- Physics Education Research*, 6(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020121>
- McNeill, K. L., & Krajcik, J. (2008). Inquiry and Scientific Explanations: Helping Students Use Evidence and Reasoning. In J. Luft, R. Bell & J. Gess-Newsome (Hrsg.), *Science as Inquiry in the Secondary Setting* (S. 121–134). National Science Teachers Association Press.
- Meinhardt, C., Rabe, T., & Krey, O. (2018). Formulierung Eines Evidenzbasierten Validitätsarguments Am Beispiel Der Erfassung Physikdidaktischer Selbstwirksamkeitserwartungen Mit Einem Neu Entwickelten Instrument. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 131–150. <https://doi.org/10.1007/s40573-018-0079-6>
- Mešić, V., Neumann, K., Aviani, I., Hasović, E., Boone, W. J., Erceg, N., Grubelnik, V., Sušac, A., Glamočić, D. S., Karuza, M., Vidak, A., Alihodžić, A., & Repnik, R. (2019). Measuring Students' Conceptual Understanding of Wave Optics: A Rasch Modeling Approach. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 1–20. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010115>
- Michellini, M., Ragazzon, R., Santi, L., & Stefanel, A. (2000). Proposal for Quantum Physics in Secondary School. *Physics Education*, 35(6), 406–410. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/305>
- Mohan, A. K. (2020). Philosophical Standpoints of Textbooks in Quantum Mechanics. *Science & Education*, 29(3), 549–569. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00128-4>
- Moosbrugger, H., & Schermelleh-Engel, K. (2008). Exploratorische (EFA) Und Konfirmatorische Faktorenanalyse (CFA). In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie Und Fragebogenkonstruktion* (S. 325–343). Springer Berlin Heidelberg.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in Der Schule* (Bd. 26). Logos-Verl.
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Include Interpretation in Introductory Quantum Mechanics Courses. *American Journal of Physics*, 70(9), 887. <https://doi.org/10.1119/1.1492808>
- Neumann, I., Neumann, K., & Nehm, R. (2011). Evaluating Instrument Quality in Science Education: Rasch-Based Analyses of a Nature of Science Test. *Inter-*

- national Journal of Science Education*, 33(10), 1373–1405. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.511297>
- Neumann, K. (2014). Rasch-Analyse Naturwissenschaftsbezogener Leistungstests. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in Der Naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 355–370). Springer Berlin Heidelberg.
- Niebert, K., & Gropengießer, H. (2014). Leitfadengestützte Interviews. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in Der Naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–132). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0>
- Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.). (2017). *Kerncurriculum Für Das Gymnasium – Gymnasiale Oberstufe Die Gesamtschule – Gymnasiale Oberstufe Das Berufliche Gymnasium Das Abendgymnasium Das Kolleg - Physik*.
- OECD (Hrsg.). (2007). *PISA 2006: Science Competencies for Tomorrow's World* (Bd. 1). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264040014-en>
- OECD (Hrsg.). (2017). *PISA 2015 Assessment and Analytical Framework: Science, Reading, Mathematics, Financial Literacy and Collaborative Problem Solving*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264281820-en>
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific Argument and Explanation: A Necessary Distinction? *Science Education*, 95(4), 627–638. <https://doi.org/10.1002/sce.20438>
- Pade, J. (2012a). *Quantenmechanik Zu Fuß 1: Grundlagen*. Springer.
- Pade, J. (2012b). *Quantenmechanik Zu Fuß 2: Anwendungen Und Erweiterungen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25314-0>
- Passante, G., Emigh, P. J., & Shaffer, P. S. (2015). Student Ability to Distinguish between Superposition States and Mixed States in Quantum Mechanics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020135>
- Passon, O. (2022). The Quasi-History of Early Quantum Theory. *Physics*, 4(3), 880–891. <https://doi.org/10.3390/physics4030057>
- Passon, O., & Grebe-Ellis, J. (2015). Moment Mal: Was Ist Eigentlich Ein Photon? *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 64(8), 46–48.

- Passon, O., Zügge, T., & Grebe-Ellis, J. (Hrsg.). (2020). *Kohärenz Im Unterricht Der Elementarteilchenphysik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61607-9>
- Pedaste, M., Maeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen Siswa A.N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of Inquiry-based-learning: Definitions and the Inquiry Circle. *Educational Research Review*, 14, 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003>
- Planinic, M., Boone, W. J., Susac, A., & Ivanjek, L. (2019). Rasch Analysis in Physics Education Research: Why Measurement Matters. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), 23. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020111>
- Pöge, A. (2008). Persönliche Codes 'Reloaded'. *Methoden, Daten, Analysen*, 2(1), 59–70.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66(2), 211–227. <https://doi.org/10.1002/sci.3730660207>
- Pospiech, G. (2021). *Quantencomputer & Co: Grundideen Und Zentrale Begriffe Der Quanteninformation Verständlich Erklärt* (1. Auflage 2021). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH and Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30445-4>
- QUTEGA (Hrsg.). (2017). Konzeptpapier Der Nationalen Initiative Zur Förderung Der Quantentechnologie von Grundlagen Bis Anwendungen (QUTEGA).
- Revelle, W. (2020). Package 'Psych'.
- Rode, M. (2017a). Das Zeigermodell Im Unterricht Über Quantenphysik Nutzen. *Naturwissenschaft im Unterricht Physik*, 28(162), 27–29.
- Rode, M. (2017b). Überprüfung Der Unteilbarkeit von Photonen Durch Koinzidenzmessung. *Naturwissenschaft im Unterricht Physik*, (162).
- Rode, M. (2022). Beugung an Zweidimensionalen Gittern Als Modell Für Die Elektronenbeugung. *MNU-Journal*, 22(4), 309–313.
- Röntgen, W. C. (1898). Ueber Eine Neue Art von Strahlen. *Annalen der Physik*, 300(1), 1–11. <https://doi.org/10.1002/andp.18983000102>

- Rosvall, M., & Bergstrom, C. T. (2010). Mapping Change in Large Networks (F. Rappallo, Hrsg.). *PLoS ONE*, 5(1), e8694. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008694>
- Scholz, R., Wessnigk, S., & Weber, K. A. (2020). A Classical to Quantum Transition via Key Experiments. *European Journal of Physics*. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab8e52>
- Schöne, M., & Pospiech, G. (2015). Die Verbesserung Der Lehramtsausbildung in Der Quantenphysik. In Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.), *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG Frühjahrstagung*.
- Schreier, M. (2014). Varianten Qualitativer Inhaltsanalyse: Ein Wegweiser Im Dickicht Der Begrifflichkeiten [59 Absätze]. *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, 15(1).
- Schrödinger, E. (1935a). Die Gegenwärtige Situation in Der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23(48), 807–812. <https://doi.org/10.1007/BF01491891>
- Schrödinger, E. (1935b). Die Gegenwärtige Situation in Der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23(49), 823–828. <https://doi.org/10.1007/BF01491987>
- Singh, C. (2008). Interactive Learning Tutorials on Quantum Mechanics. *American Journal of Physics*, 76(4), 400–405. <https://doi.org/10.1119/1.2837812>
- Singh, C., & Marshman, E. (2015). Review of Student Difficulties in Upper-Level Quantum Mechanics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020117>
- Sober, E. (2009). Parsimony Arguments in Science and Philosophy—A Test Case for Naturalism P. *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*, 83(2), 117–155.
- Stadermann, H. K. E., van den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of Secondary School Quantum Physics Curricula of 15 Different Countries: Different Perspectives on a Challenging Topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 0101301–01013025. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>
- VDI Technologiezentrum (Hrsg.). (2017). Förderung Der Quantentechnologie: Ein Positionspapier Der Deutschen Industrie.

- von Aufschnaiter, C. (2014). Laborstudien Zur Untersuchung von Lernprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in Der Naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 81–94). Springer Berlin Heidelberg.
- Vosniadou, S. (Hrsg.). (2008). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. Routledge.
- Vosniadou, S., & Skopeliti, I. (2014). Conceptual Change from the Framework Theory Side of the Fence. *Science & Education*, 23(7), 1427–1445. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9640-3>
- Vosniadou, S., Vamvakoussi, X., & Skopeliti, I. (2008). The Framwork Theory Approach to the Progress of Conceptual Change. In S. Vosniadou (Hrsg.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (S. 3–34). Routledge.
- Watzmann, M., Weber, K.-A., Wessnigk, S., & Scholz, R. (2022). Key Experiment and Quantum Reasoning. *Physics*, (Teaching and Learning Quantum Physics). <https://doi.org/10.3390/physics4040078>
- Weber, K.-A. (2018). *Quantenoptik in Der Lehrerfortbildung: Ein Bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept Zum Quantenobjekt Photon Mit Realexperimenten: Dissertation* (Bd. Band 269). Logos-Verl.
- Winkelmann, M. (2020). *Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen*. Logos Verlag.
- Wittmann, M. C., Morgan, J. T., & Feeley, R. E. (2006). Laboratory-Tutorial Activities for Teaching Probability. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 2(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.020104>
- Wuttiprom, S., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Chitaree, R., & Soankwan, C. (2009). Development and Use of a Conceptual Survey in Introductory Quantum Physics. *International Journal of Science Education*, 31(5), 631–654. <https://doi.org/10.1080/09500690701747226>
- Zeh, H. D. (2012). *Physik Ohne Realität: Tiefsinn Oder Wahnsinn?* Springer Berlin Heidelberg.
- Zeilinger, A. (2000). Quantenexperimente Zwischen Photon Und Fulleren. *Physik in unserer Zeit*, 31(5), 199–202. [https://doi.org/10.1002/1521-3943\(200009\)31:5%3C199::AID-PIUZ199%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1521-3943(200009)31:5%3C199::AID-PIUZ199%3E3.0.CO;2-U)

Teil V.  
Anhang

## 23. Infit und Outfit MNSQ Felderprobung des Fragebogens

### 23.1. Itemfit-Statistik

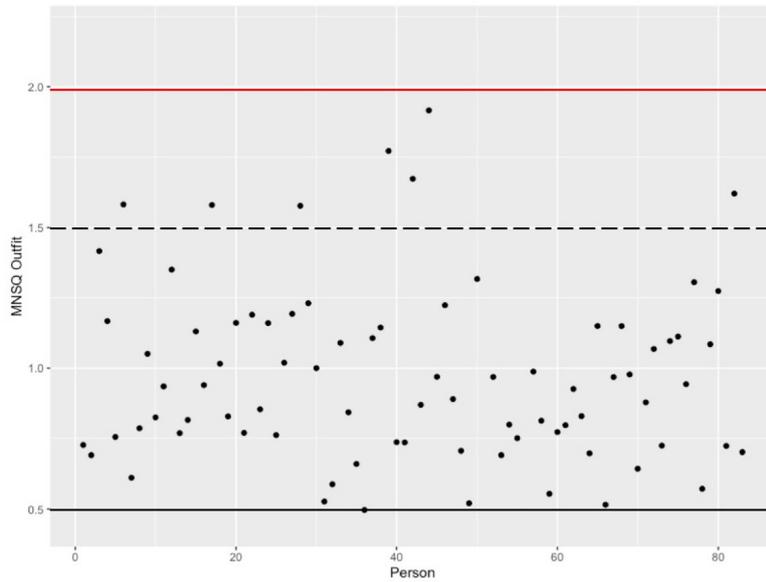
*Tab. 23.1.: Fitstatistiken. Links: Ursprüngliche Fitstatistik. Mitte: Nach dem Ausschluss von VW2. Rechts: Final*

Item	Ursprüngliche Werte		Nach Ausschluss VW2 und VW 5		Finale Werte	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ
Item 1	0.678	0.867	0.652	0.870	0.630	0.833
Item 2	0.756	0.922	0.850	1.001	0.829	1.002
Item 3	0.816	0.901	0.802	0.843	0.838	0.937
Item 4	0.865	0.926	0.901	0.957	0.917	0.977
Item 5	0.797	0.879	0.799	0.957	0.778	0.898
Item 6	0.809	0.822	0.826	0.849	0.861	0.852
Item 7	0.861	0.900	0.883	0.932	0.972	0.987
Item 8	1.461	1.187	1.591	1.247		
Item 9	1.064	1.056	1.092	1.089		
Item 10	1.091	1.092	1.143	1.122		
Item 11	1.020	1.003	1.080	1.049	1.102	1.074
Item 12	0.819	0.845	0.873	0.884	0.831	0.873
Item 13	0.755	0.776	0.811	0.798	0.780	0.803
Item 14	1.266	1.198	1.313	1.236		
Item 15	1.060	0.931	1.064	0.953	1.080	0.976

23. Infit und Outfit MNSQ Felderprobung des Fragebogens

Item	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ
Item 16	0.786	0.892	0.826	0.939	0.828	0.957
Item 17	1.048	0.935	1.079	0.920	1.293	0.998
Item 18	0.745	0.782	0.686	0.747	0.776	0.800
Item 19	0.929	1.033	1.019	1.098	1.017	1.133
Item 20	0.881	0.931	0.922	0.961	0.956	0.963
Item 21	0.793	0.834	0.820	0.863	0.907	0.919
Item 22	0.979	0.903	0.989	0.908		
Item 23	1.083	1.101	1.152	1.140		
Item 24	1.041	1.017	1.086	1.059	1.149	1.085
Item 25	0.927	0.934	0.982	0.945	0.980	0.962
Item 26	1.090	1.106	1.120	1.147	1.280	1.253
Item 27	0.951	0.953	0.983	0.964	1.147	1.025
VW 1	0.958	0.954	1.039	0.964	1.270	1.025
VW 2	1.792	1.430				
VW 3	1.233	1.166	1.318	1.205	1.553	1.282
VW 4	0.635	0.807	0.649	0.816	0.683	0.796
VW 5	1.525	1.205				
VW 6	0.950	0.989	0.992	1.018	1.068	1.073

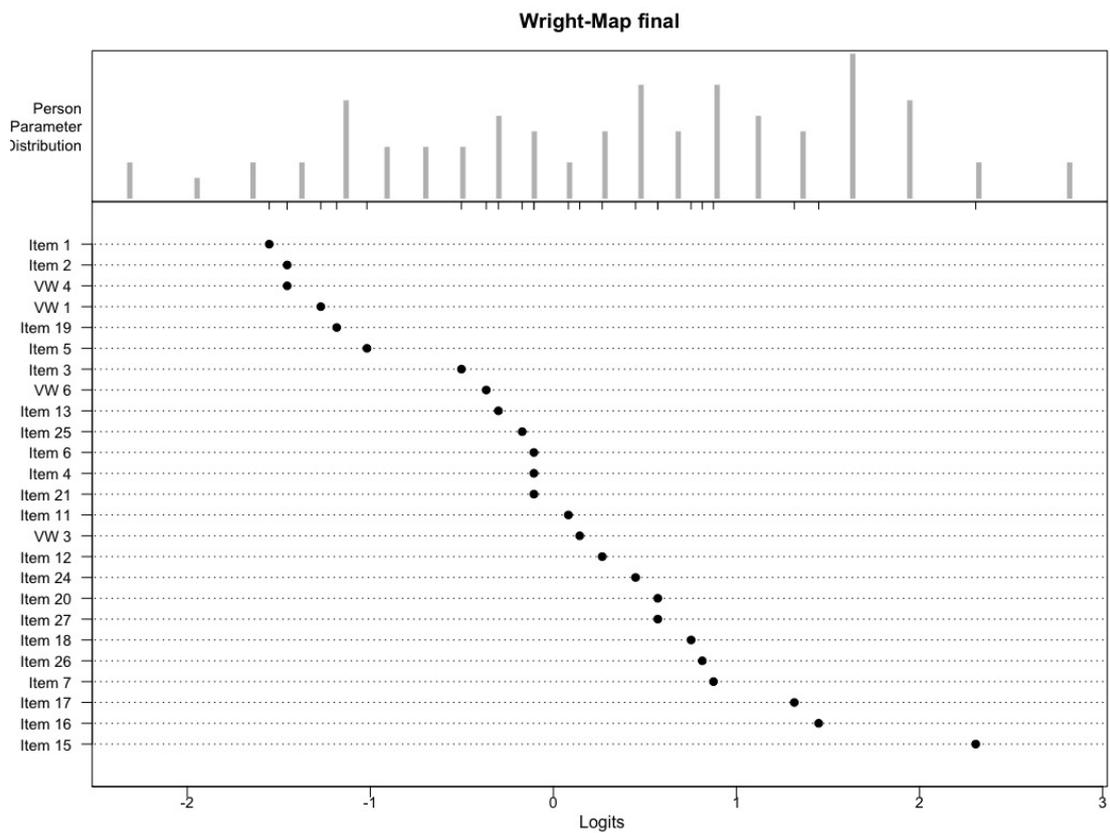
## 23.2. Abschließende Personfit-Statistik



**Abb. 23.1.:** Finale Person-Outfit MNSQ Werte und Grenzwerte. 0.5 (Schwarz) - 1.5 (gestrichelt) Produktiv für die Messung. <2 (Rot) Abwertung der Messung.

# 24. Zusätzliche Berechnungen Validierung

## 24.1. Wright-Map



*Abb. 24.1.: Finale Wright-Map nach dem Itemausschluss.*

## 24.2. Explorative Faktorenanalyse

**Tab. 24.1.:** Faktorladungen der Items oberhalb des Grenzwertes von 0.3, nach Itemausschluss.

Item	Faktor 1	Faktor 2
Item 1	0.454	
Item 2	0.409	
Item 3	0.398	
Item 4	0.390	
Item 5	0.432	
Item 6	0.533	
Item 7	0.393	
Item 8		
Item 11	0.381	
Item 12	0.612	
Item 13	0.614	
Item 16	0.380	
Item 17		0.718
Item 18	0.301	0.687
Item 19	0.361	
Item 20	0.554	
Item 21	0.479	
Item 22		0.649
Item 24	0.312	
Item 25	0.343	0.354
Item 26		0.468
Item 27		0.541
VW 1	0.392	
VW 3		
VW 4	0.555	
VW 6	0.417	

# 25. Fragebogen

## Item 1

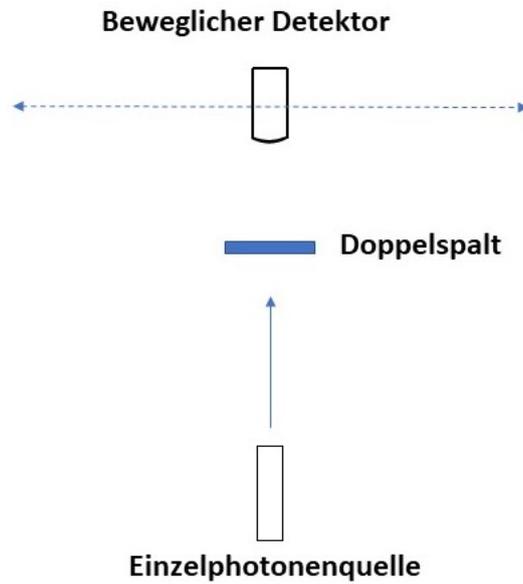
Ein Elektron eines Atoms befinde sich im Energiezustand  $E_2 > E_1$  und gehe in den Zustand  $E_1$  über. Dabei wird Licht ausgesendet. Je größer die Energiedifferenz  $\Delta E = E_2 - E_1$  ist, desto...

- ... kleiner ist die Wellenlänge des ausgesendeten Lichts\*.
- ... mehr Licht wird ausgesendet.
- ... größer ist die Wellenlänge des ausgesendeten Lichts.

## Item 2

Führt man das Doppelspaltexperiment (siehe Abbildung) mit einzelnen Photonen durch, so ...

1. ... erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit Maxima und Minima, aussehend wie das Interferenzmuster von Wellen\*.
2. ... erhält man zwei klar definierte Detektionsorte auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.
3. ... erhält man zwei klar definierte Detektionsorte und ein Maximum nullter Ordnung auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.

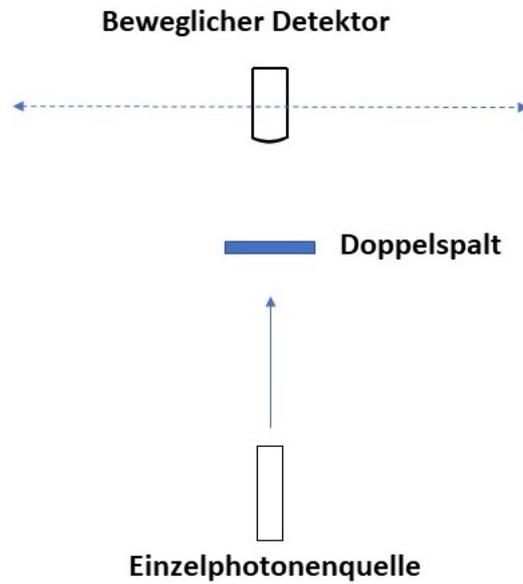


### Item 3

Beurteile die nachfolgende Aussage:

*Wenn man beim Doppelspaltversuch (siehe Abbildung) auch mit einzelnen Photonen ein Interferenzmuster erhält, so muss sich das Photon aufgeteilt haben.*

1. Falsch, denn man erhält mit einzelnen Photonen keine Interferenzerscheinung.
2. Falsch, denn die Vorstellung des Photons als lokalisiertes Teilchen ist ungültig\*.
3. Wahr, denn z.B. Laserlicht wird am Doppelspalt auch in zwei Elementarwellen aufgeteilt.



#### Item 4

Photonen sind ...

1. ... unteilbare Energieportionen, weder Welle noch Teilchen\*.
2. ... kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
3. ... Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, welche für die Interferenz verantwortlich ist.

## Item 5

Ist die nachfolgende Aussage richtig oder falsch?

*Die Unschärfe des Ortes eines Elektrons ist vergleichbar mit dem klassischen Messfehler.*

1. Richtig. Im Gegensatz zur klassischen Physik gibt es in der Quantenphysik nur wenige, zuverlässige Messapparaturen, um den Ort eines Elektrons zu bestimmen.
2. Falsch. Die Messung des Ortes des Elektrons legt diesen erst fest. Die Unkenntnis des Ortes vor der Messung ist kein klassischer Messfehler\*.
3. Richtig. Sowohl in der klassischen Physik, als auch in der Quantenphysik gibt es Messunsicherheiten, die mit dem Messprozess zusammenhängen.

## Item 6

Ein Elektron zeigt Wellencharakter, da...

1. ... das Elektron Interferenzmuster erzeugen kann\*.
2. ... das Elektron wellenartig einem sinusförmig Weg folgt.
3. ... das Elektron eine verschmierte Ladungswolke ist, die sich mit der Geschwindigkeit elektromagnetischer Strahlung bewegt.

### Item 7

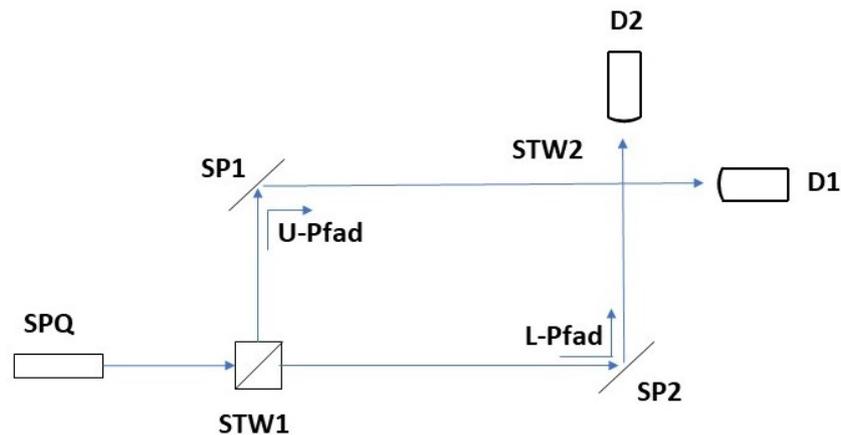
Markiere für jede der nachfolgenden Aussagen, ob sie richtig (R) oder falsch (F) ist.

1. Wenn wir für das Elektron eine bestimmte Geschwindigkeit messen, dann hatte es diese bereits vor der Messung. (F)
2. Da die kinetische Energie von der Geschwindigkeit abhängt ( $E \sim v^2$ ), verbietet der Energieerhaltungssatz, dass die Messung die Geschwindigkeit verändert.(F)
3. Wenn wir für das Elektron eine bestimmte Geschwindigkeit messen, dann legt erst die Messung die Geschwindigkeit fest.(R)

## Item 11

Der Aufbau des unten gezeigten Mach-Zehnder Interferometers ist wie folgt:

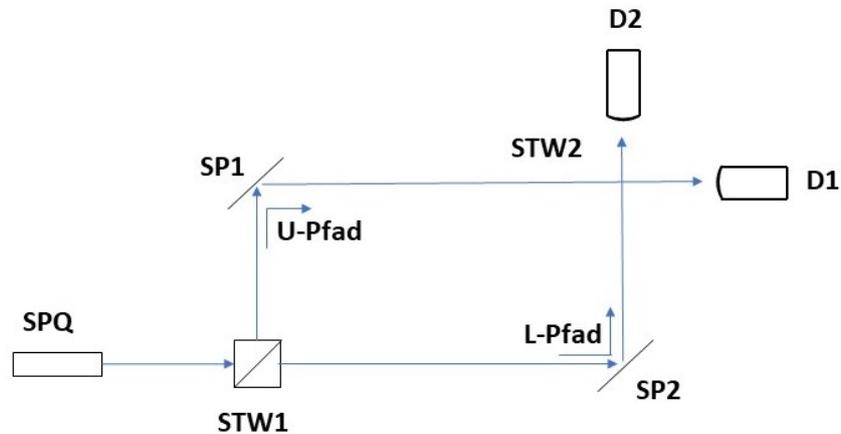
- Das Interferometer ist perfekt justiert, sodass bei klassischem Licht destruktive Interferenz auf dem Ausgang D2 liegt und konstruktive Interferenz auf dem Ausgang D1.
- Die Einzelphotonenquelle sendet einen Strahl von Photonen aus. Es befindet sich immer nur **ein Photon** im Aufbau.
- Die Detektoren sind ideale Detektoren (100 % Ansprechvermögen).
- Der zweite Strahlteiler wurde ausgebaut.



Ein einzelnes Photon wird von der Quelle ausgesendet. Ist es möglich, dass ein Photon zugleich den U-Pfad und den L-Pfad nimmt, nachdem es den ersten Strahlteiler STW1 passiert hat?

1. Ja. Ein einzelnes Photon kann den U-Pfad und den L-Pfad zugleich nehmen.\*
2. Nein. Ein einzelnes Photon, kann nur einen der beiden Pfade (U oder L) nehmen.
3. Nein. Ein einzelnes Photon, nimmt den U-Pfad, wenn es unpolarisiert ist und den L-Pfad, wenn es polarisiert ist.

## Item 12

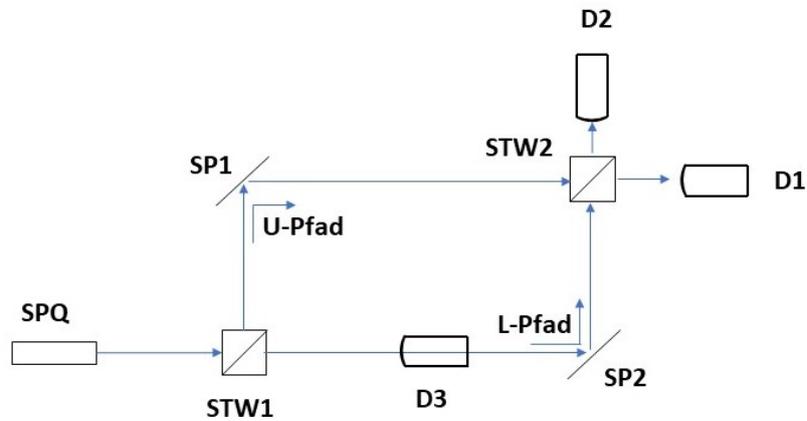


Betrachte folgenden Fall: Ein Einzelphoton befindet sich im Mach-Zehnder Interferometer aus dem Strahlteiler STW2 ausgebaut wurde (siehe oben). Detektor D1 und D2 haben noch kein Photon registriert.

Markiere für jede der folgenden Aussage ob sie richtig (R) oder falsch (F) ist.

1. Es wird sich entweder entlang des U-Pfades oder des L-Pfades bewegen, aber nicht entlang beider Pfade zugleich.
2. Es muss entweder den U-Pfad oder den L-Pfad nehmen, aber die Wahrscheinlichkeit ist höher, dass es den L-Pfad nimmt.
3. Der Pfad ist nicht festgelegt, das bedeutet es befindet sich in einem überlagertem Zustand aus U-Pfad und L-Pfad.\*

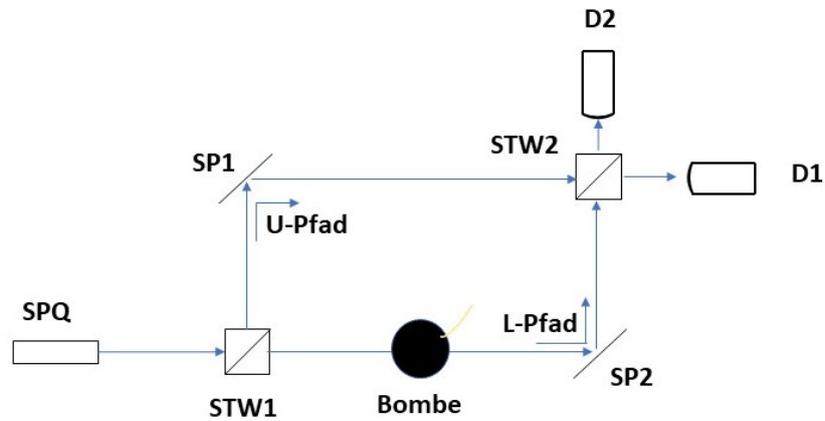
Item 13



Detektor D3 wird im L-Pfad eingebaut (Abb. oben) und die Einzelphotonenquelle wird eingeschaltet. Wie verändert sich das Interferenzmuster im Vergleich zum nicht-eingebauten Detektor?

1. Die Interferenz bleibt unverändert.
2. Die Interferenz verschwindet.\*
3. Die Interferenz wird besser detektierbar.
4. Die Interferenz wird schlechter detektierbar.

**Item 15**



Betrachte folgende Situation, in der eine photosensible Bombe in den L-Pfad gelegt wurde (siehe Abb.). Wenn die Bombe ein Photon registriert, explodiert sie. Der restliche Aufbau des Mach-Zehnder Interferometers bleibt unverändert. Ohne Bombe liegt auf D1 konstruktive Interferenz und auf D2 destruktive Interferenz.

Stell dir vor der Aufbau ist verdeckt und du weißt nicht, ob die Bombe eingebaut ist oder nicht. Gibt es prinzipiell eine Möglichkeit experimentell zu prüfen, ob die Bombe eingebaut ist, ohne dass der Aufbau zerstört wird?

Begründe deine Antwort physikalisch.

---

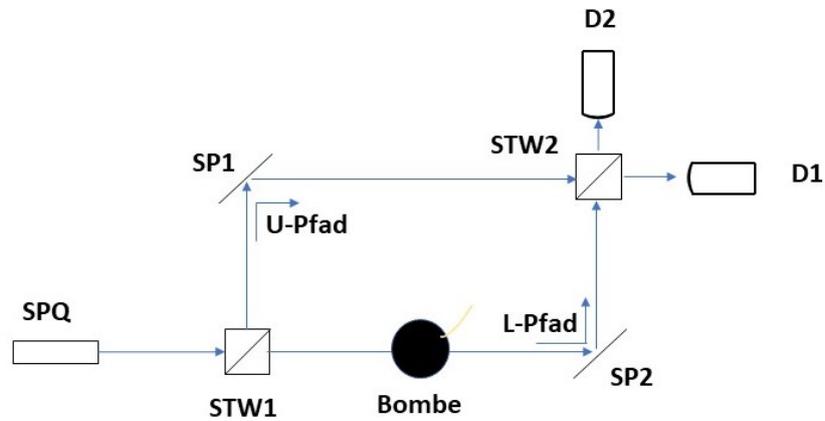


---



---

Item 16



Betrachte folgende Situation, in der eine photosensible Bombe in den L-Pfad gelegt wurde (siehe Abb.). Wenn die Bombe ein Photon registriert, explodiert sie. Der restliche Aufbau des Mach-Zehnder Interferometers bleibt unverändert. Ohne Bombe liegt auf D1 konstruktive Interferenz und auf D2 destruktive Interferenz. Allein durch den Einbau der Bombe wird die Wahrscheinlichkeit dafür verändert, dass Detektor D1 und D2 ein Photon registrieren, verändert.

Erkläre wieso es dazu kommt.

---



---



---

## Item 17

Bewerte die nachfolgende Aussage:

*Photonen müssen Wellen sein, da auch ein einzelnes Photon Interferenz erzeugt.*

- Die Aussage ist falsch. Photonen sind sowohl Wellen als auch Teilchen zugleich. Erst das Experiment entscheidet, ob das Photon eine Welle oder ein Teilchen ist.
- Die Aussage ist falsch. Photonen sind weder Wellen noch Teilchen. Die Interferenz im Michelson Interferometer wird durch die Überlagerung der Wahrscheinlichkeitsamplituden erzeugt.\*
- Die Aussage ist falsch. Die Photonen sind winzige Teilchen, die von der Lichtwelle umhüllt sind und sich mit ihr mitbewegen. Im Interferometer sieht man die Interferenz nur, weil die umhüllenden Wellen interferieren.

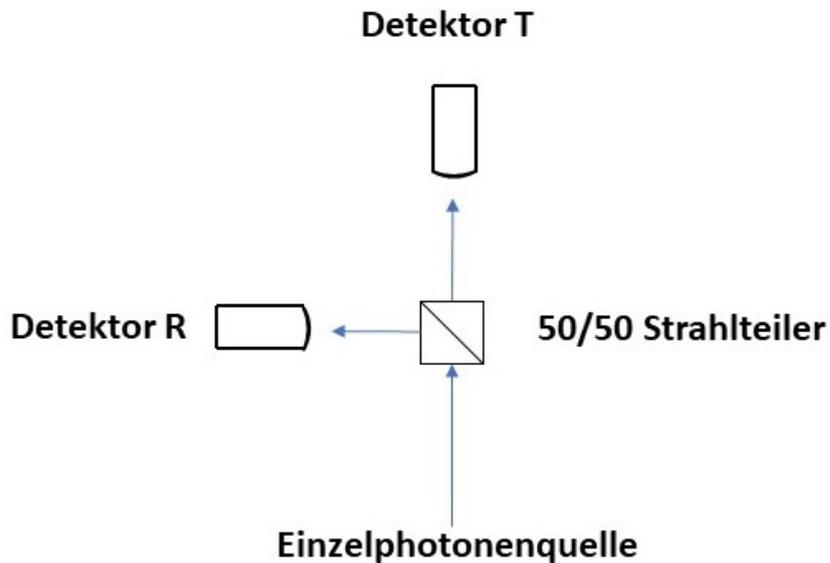
## Item 18

Ist die nachfolgende Aussage richtig oder falsch?

*Photonen müssen Teilchen sein, da sie am Strahlteiler entweder reflektiert oder transmittiert werden.*

- Die Aussage ist richtig. Die Photonen sind winzige Teilchen, die von der Lichtwelle umhüllt sind und sich mit ihr mitbewegen. Der Strahlteiler verteilt diese Teilchen dann gleichmäßig.
- Die Aussage ist falsch. Photonen sind sowohl Wellen als auch Teilchen zugleich. Erst das Experiment entscheidet, ob das Photon eine Welle oder ein Teilchen ist.
- Die Aussage ist falsch. Photonen sind weder Wellen noch Teilchen. Der Strahlteiler reflektiert und transmittiert das Photon quasi zugleich. Bis es gemessen wird, ist der Ort des Photons unbestimmt.\*

**Item 19**



Im folgenden soll der oben gezeigte Aufbau betrachtet werden:

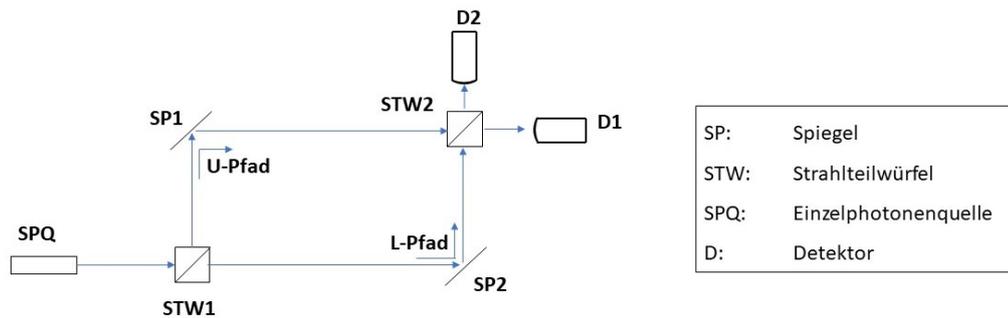
Zwei einzelne Photonen werden nacheinander auf einen 50/50 Strahlteiler geschickt.

An den beiden Ausgängen befindet sich jeweils ein Detektor.

Welche Beobachtungen wirst du im Versuch machen?

1. Jeweils einer der Detektoren registriert ein Photon. Wir können nur für das zweite Photon genau vorhersagen welcher Detektor das Photon registriert.
2. Beide Detektoren registrieren zweimal ein Photon.
3. Immer nur einer der Detektoren registriert ein Photon. Wir können lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen darüber treffen, welcher Detektor das Photon registriert.\*

Item 20



Ein einzelnes Photon befindet sich im in der Abbildung gezeigten Mach-Zehnder Interferometer. können wir dem Photon einen Ort zuordnen?

1. Nein. Das Photon ist delokalisiert. Erst bei der Absorption im Detektor wird der Ort bestimmt und das Photon vernichtet.\*
2. Nein. Photonen sind delokalisiert. Somit können wir den Ort nie exakt angeben sondern nur einen kleinen Ortsbereich.
3. Ja. Allerdings mit bisherigen Messapparaturen nur sehr ungenau. Aber irgendwo im Mach-Zehnder Interferometer muss es sein.

**Item 21**

Kennst du das Superpositionsprinzip?

1. Ja
2. Nein

Erkläre, was du darunter verstehst.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

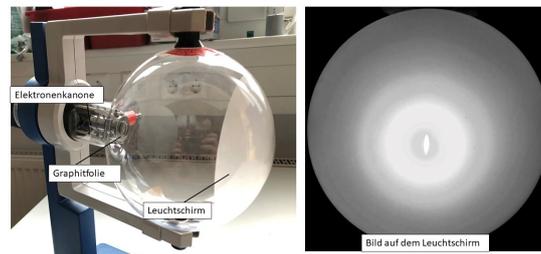
## Item 24

Bewerte folgende Aussage:

*Die Interferenzfähigkeit eines einzelnen Photons kann klassisch nicht erklärt werden.*

1. Die Aussage ist richtig, da das Photon z.B. am Strahlteiler unteilbar ist und doch zur Interferenz gebracht werden kann.\*
2. Die Aussage ist richtig, da das Photon als quantenmechanisches Objekt nicht das elektrische Feld der Lichtwellen repräsentieren kann.
3. Die Aussage ist falsch, da das Photon je nach Experiment als klassisches Teilchen oder klassische Welle beschrieben werden kann.

## Item 25



Beim Experiment mit der Elektronenbeugungsröhre (Abb. oben links) erhält man ein Ringmuster auf dem Leuchtschirm (Abb. oben rechts). Wie lassen sich diese Ringe erklären?

1. Die Elektronen werden an den Atomen im Graphit-Kristall gestreut. Die Wahrscheinlichkeitsamplituden der Austrittsmöglichkeiten interferieren und das erzeugt das Ringmuster.\*
2. Die Elektronen regen im Graphit-Kristall die Kohlenstoffatome zum Leuchten an. Die von den Atomen ausgesendeten Lichtwellen interferieren und das erzeugt das Ringmuster.
3. Die Elektronen strahlen beim Durchfliegen des Graphit-Kristalls Licht aus. Diese im Kristall ausgesendeten Lichtwellen interferieren und das erzeugt das Ringmuster.

## Item 26

Bewerte die folgende Aussage:

*In der Quantenphysik wird Licht als Teilchen angesehen.*

1. Die Aussage ist richtig. Experimente, wie das Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen oder der Photoeffekt demonstrieren das Teilchenverhalten des Lichts.
2. Die Aussage ist falsch. Experimente wie der Doppelspaltversuch mit Einzelphotonen oder Interferometerversuche, demonstrieren weiterhin das Wellenverhalten des Lichts.
3. Die Aussage ist falsch. Experimente wie das Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen oder Interferometerversuche können weder durch Wellen noch Teilchen zusammenhängend erklärt werden.\*

## Item 27

Bewerte die nachfolgende Aussage:

**Elektronen sind Wellen, da sie am Doppelspalt interferieren.**

1. Die Aussage ist falsch, denn die Wahrscheinlichkeitsamplituden interferieren im Doppelspaltexperiment.\*
2. Die Aussage ist richtig, denn Elektronen sind Teilchen, die in bestimmten Versuchen Welleneigenschaften haben.
3. Die Aussage ist falsch, denn Elektronen sind Teilchen, die nicht interferieren können.

## VW1

Unter Interferenz von Wellen versteht man...

... im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei elektromagnetischen Wellen.

... im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei Wellen.\*

... im Allgemeinen die Überlagerung von genau zwei Wellen.

### VW3

Warum kann Licht als Welle beschrieben werden?

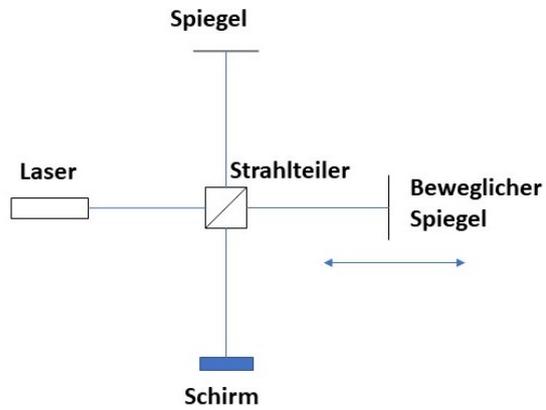
1. Licht kann als Welle beschrieben werden, da Licht zum Beispiel am Doppelspalt oder dem Gitter zur Interferenz gebracht werden kann.\*
2. Licht kann als Welle beschrieben werden, da die Intensität entlang der Ausbreitungsrichtung in winzigen Abständen messbar stärker und schwächer wird.
3. Licht kann als Welle beschrieben werden, da man beim Doppelspaltversuch mit Einzelphotonen ein Interferenzmuster erhält, woraus man die Wellenlänge bestimmen kann.

## VW4

Ein 50 / 50 Strahlteiler wird mit Laserlicht beleuchtet. Was ist zu beobachten und welche Größe wird, bzw. welche Größen werden halbiert?

1. Das Licht wird sowohl transmittiert, als auch reflektiert. Die Wellenlänge des Lichts wird dabei halbiert.
2. Das Licht wird sowohl transmittiert, als auch reflektiert. Die Intensität des Lichts wird dabei halbiert.\*
3. Das Licht wird sowohl transmittiert, als auch reflektiert. Die Lichtwelle wird dabei in der Länge halbiert.

VW6



Wodurch wird im Michelson Interferometer (siehe oben) ein Wechsel von Hell nach Dunkel im Interferenzmuster erreicht?

---

---

---

## Interviewleitfaden

**Vorab:** Zur Verknüpfung der Interviews bitte ich Sie mir Ihren Code zu nennen dafür gelten die folgenden Regeln

1. Der erste Buchstabe des Vornamens Ihres Vaters (oder einer Person, die für Sie Ihrem Vater nahe kommt).
2. Der erste Buchstabe des Namens Ihrer Mutter (oder einer Person, die für Sie Ihrer Mutter nahe kommt)
3. Den ersten Buchstaben Ihres Vornamens
4. Der Tag Ihres Geburtstages
5. Den ersten Buchstaben Ihres Geburtsortes
6. Ihre Hausnummer.

Beispiel:

**Rudolf, Heike, Moritz, 18.05, Bückeberg, 11**

CODE: RHM18B11

**Frage 1 : Photon Definition**

In dem heutigen Interview soll es um das Photon und seine Eigenschaften gehen.

**Aufgabe:** Erkläre, was du dir unter einem Photon vorstellst

**Material:** Photon Definition 1-3

Nachfragemöglichkeit 1 – Person bietet eine Definition an

Aufforderung bestimmte Aspekte der Definition zu beschreiben

- ➔ Wichtig: Was bedeutet für dich Wellen- oder Teilchencharakter
- ➔ Was bedeutet Welleneigenschaften oder Teilcheneigenschaften
- ➔ Welle oder Teilchen zugleich?

Nachfragemöglichkeit 2- Person bietet keine Definition an

Ich habe drei verschiedene Definitionen mitgebracht. Welcher von diesen würdest du dich anschließen? Begründe deine Auswahl

1. Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion welche als Welle und Teilchen gleichzeitig existiert. Es zeigt sich abhängig vom Experiment als Welle oder Teilchen.
2. Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion elektromagnetischer Strahlung. Dabei ist es weder Teilchen noch Welle, besitzt jedoch Eigenschaften von beidem
3. Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion, welche sich in Form eines Lichtteilchens mit der Lichtwelle mitbewegt. Je nach Experiment zeigen sich die Teilcheneigenschaften des Photons oder die Welleneigenschaften der umhüllenden Lichtwelle.

- ➔ Abwägungen hinterfragen

**Frage 2 – Photonen am optischen Strahlteiler**

Auf dem Bild siehst du links die Skizze eines Versuches, bei dem Einzelphotonen nacheinander auf einen optischen 50/50 Strahlteiler auftreffen. Rechts siehst du wie die beiden Detektoren klicken.

**Aufgabe:** Beschreibe zunächst einmal die Ergebnisse

**Material:** Bild vom Aufbau und den Ergebnissen

Nachfragemöglichkeit – Sicherstellen, dass Material verstanden wurde

Du siehst, das Klicken der beiden Detektoren im Verlauf der Zeit als rote Punkte dargestellt. Beschreibe den Verlauf und erläutere, was du aus dem Ergebnis schließen kannst.

Darunter sind relative Häufigkeiten der Detektor-Clicks aufgetragen. Erkläre, was diese relativen Häufigkeiten aussagen und wie diese Verteilungen mit dem Verlauf der Clicks zusammenhängen.

In dem Diagramm siehst du noch die relative Häufigkeit für **R klickt mit T** eingetragen. Was bedeutet dies für das Photon am optischen Strahlteiler?

**Aufgabe:** Erkläre die Versuchsergebnisse

**Material:** Bild vom Aufbau und den Ergebnissen und Erklärung 1-3

Nachfragemöglichkeit 1 – Person bietet eine Erklärung an

- ➔ Was bedeutet für dich Teilchencharakter, -verhalten
- ➔ In dem Diagramm zu den rel. Häufigkeiten ist auch das Ereignis *R klickt zusammen mit T*, die relative Häufigkeit ist 0. Erkläre, was das für das Verhalten des Photons am opt. Strahlteiler bedeutet.
- ➔ Erläutere, inwiefern dieses Versuchsergebnis zu deiner Beschreibung des Photons passt

Nachfragemöglichkeit 2 – Person bietet keine Erklärung an

Anbieten von Erklärungen. Ich habe drei verschiedene Erklärungen mitgebracht. Welcher von diesen würdest du dich anschließen? Begründe deine Auswahl

1. Die Photonen am optischen Strahlteiler werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder reflektiert oder transmittiert, da sich in diesem Experiment das Photon als Teilchen zeigt.
2. Die Photonen am optischen Strahlteiler werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder reflektiert oder transmittiert, da die Lichtwelle aus kleinen Teilchen, den Photonen besteht

3. Die Photonen am optischen Strahlteiler werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder reflektiert oder transmittiert, da Photonen unteilbare Energieportionen sind.

- Inwiefern zeigt sich deine Wahl in den Versuchsergebnissen?
- Falls 1. Ausgewählt: Was verstehst du unter der Aussage das Photon zeigt sich als Teilchen?
- Inwiefern passt deine Auswahl zu deiner Beschreibung des Photons?

**Frage 3 – Photonen im Michelson Interferometer**

Auf dem Bild siehst du ein weiteres Experiment, bei welchem wieder Einzelphotonen auf den optischen Strahlteiler treffen, nun aber stehen an den Ausgängen des optischen Strahlteilers Spiegel. Der Spiegel an einem der Ausgänge kann verschoben werden. Das danebenstehende Diagramm zeigt die Clicks des Detektors in Abhängigkeit von der Verschiebung des Spiegels.

**Aufgabe:** Beschreibe, das nebenstehende Diagramm

**Material:** Bild vom Aufbau und den Ergebnissen

Nachfragemöglichkeit – Sicherstellen, dass Material verstanden wurde

- Welchen Einfluss hat die Verschiebung des Spiegels auf die Clicks?
- Stelle dir vor, der Spiegel hätte keinen Einfluss auf die Clicks des Detektors, beschreibe, wie das Diagramm dann aussehen würde.

**Aufgabe:** Erkläre dieses Ergebnis

**Material:** Bild vom Aufbau und den Ergebnissen und Erklärung 1-3

Nachfragemöglichkeit 1 – Person bietet eine Erklärung an

- Was bedeutet für dich Wellencharakter, -verhalten?
- Beim vorherigen Versuch hast du ... über die Teilung des Photons gesagt. Inwiefern passt dies zu dem jetzigen Experiment?
- Erläutere inwiefern deine Beschreibung des Photons zu deiner Erklärung passt?

Nachfragemöglichkeit 2 – Person bietet keine Erklärung an

Anbieten von Erklärungen. Ich habe drei verschiedene Erklärungen mitgebracht. Welcher von diesen würdest du dich anschließen? Begründe deine Auswahl

1. Die Zahl der Clicks verändert sich mit der Verschiebung des Spiegels, da das Photon sich in diesem Experiment als Welle zeigt.
2. Die Zahl der Clicks verändert sich mit der Verschiebung des Spiegels, da die umhüllende Lichtwelle interferiert.
3. Die Zahl der Clicks verändert sich mit der Verschiebung des Spiegels, da die beiden Möglichkeiten *Reflektiert* und *Transmittiert* interferieren.

- Was verstehst du unter der Aussage, das Photon zeigt sich als Welle?
- Beim vorherigen Versuch hast du ... über die Teilung des Photons gesagt. Inwiefern passt dies zu dem jetzigen Experiment?
- Wie passt deine Auswahl zu deiner vorherigen Auswahl? Erläutere, inwiefern deine Auswahl zu deiner Beschreibung vom Photon passt.

## Regeln zur Erstellung des Codes

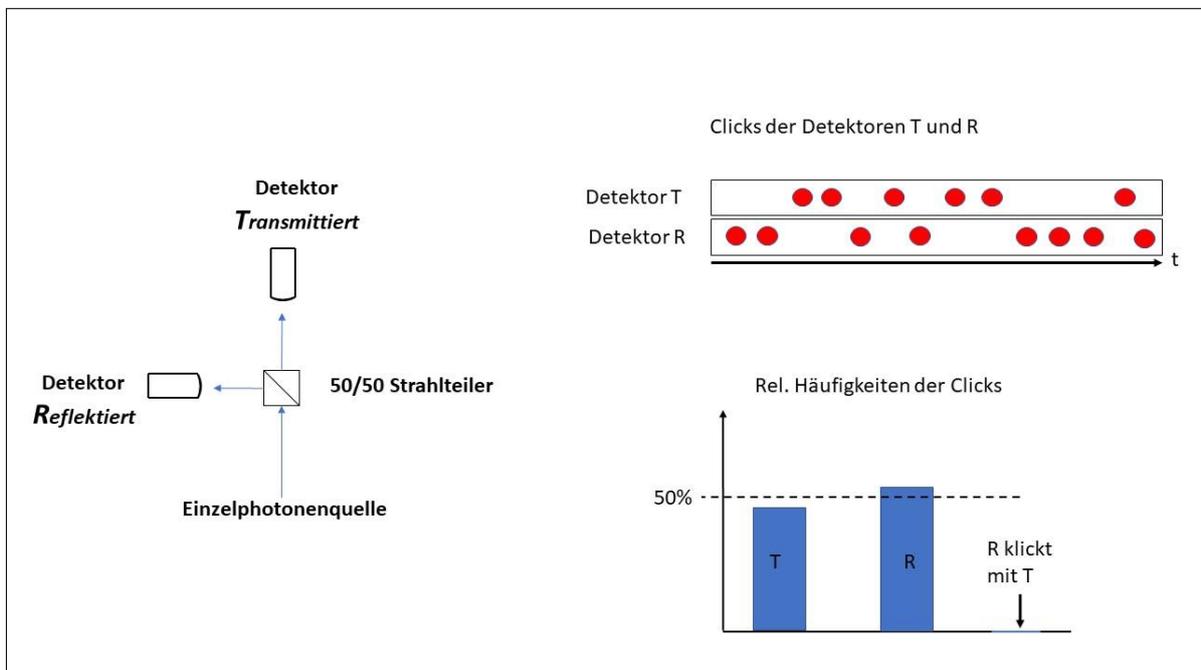
1. Der erste Buchstabe des Vornamens Ihres Vaters (oder einer Person, die für Sie Ihrem Vater nahe kommt).
2. Der erste Buchstabe des Namens Ihrer Mutter (oder einer Person, die für Sie Ihrer Mutter nahe kommt)
3. Den ersten Buchstaben Ihres Vornamens
4. Der Tag Ihres Geburtstages
5. Den ersten Buchstaben Ihres Geburtsortes
6. Ihre Hausnummer.

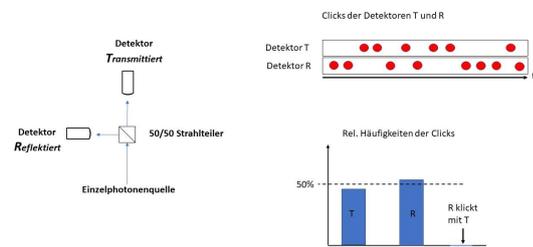
Beispiel:

**Rudolf, Heike, Moritz, 18.05, Bückeberg, 11**

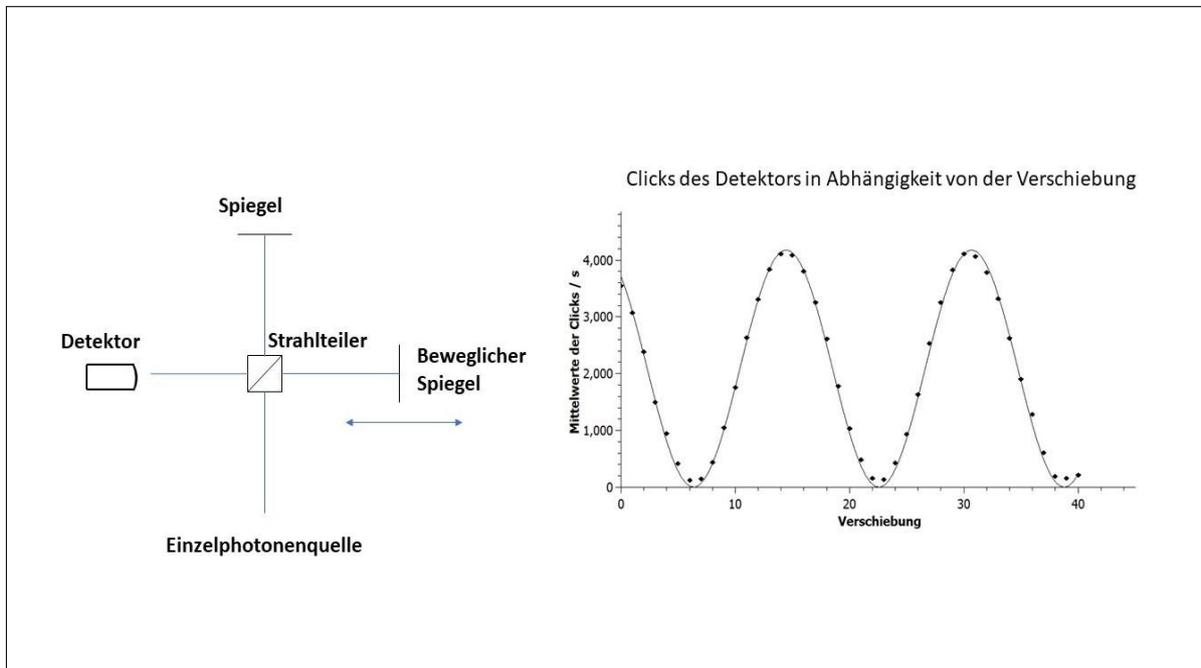
CODE: RHM18B11

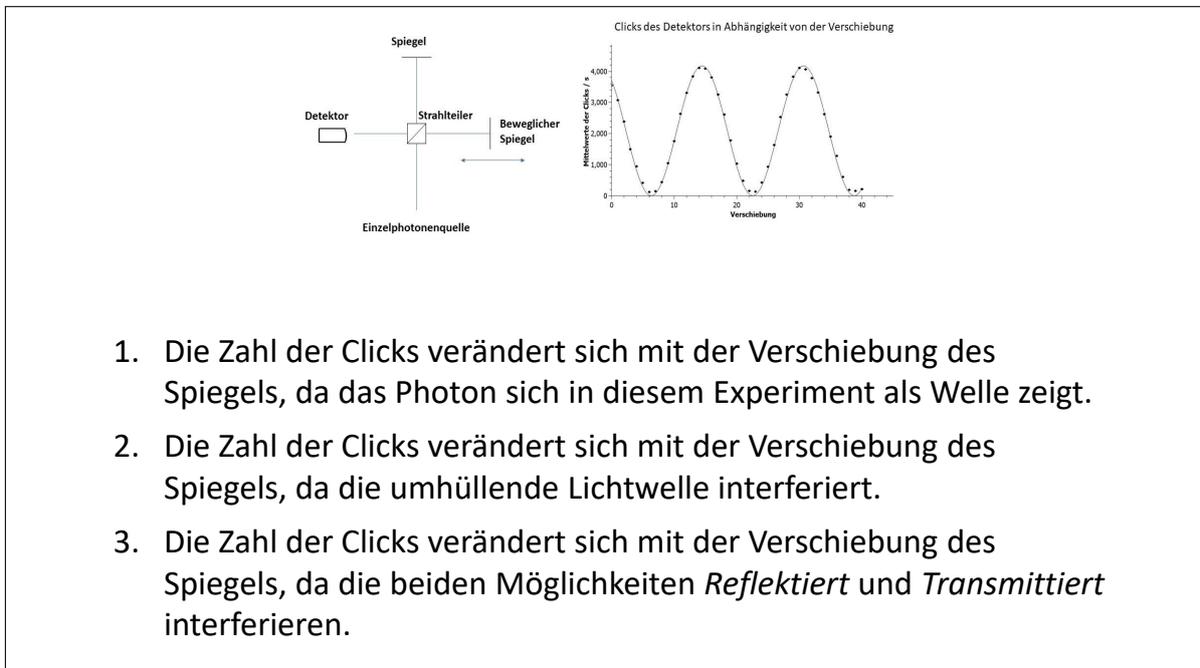
1. Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion welche als Welle und Teilchen gleichzeitig existiert. Es zeigt sich abhängig vom Experiment als Welle oder Teilchen.
2. Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion elektromagnetischer Strahlung. Dabei ist es weder Teilchen noch Welle, besitzt jedoch Eigenschaften von beidem
3. Ein Photon ist eine unteilbare Energieportion, welche sich in Form eines Lichtteilchens mit der Lichtwelle mitbewegt. Je nach Experiment zeigen sich die Teilcheneigenschaften des Photons oder die Welleneigenschaften der umhüllenden Lichtwelle.





1. Die Photonen am optischen Strahlteiler werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder reflektiert oder transmittiert, da dieses Experiment den Teilchencharakter des Photons zeigt.
2. Die Photonen am optischen Strahlteiler werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder reflektiert oder transmittiert, da die Lichtwelle aus kleinen Teilchen, den Photonen besteht
3. Die Photonen am optischen Strahlteiler werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder reflektiert oder transmittiert, da Photonen unteilbare Energieportionen sind.





### Wahrscheinlichkeit / Zufälligkeit

#### Rückblick

**Strahlteiler Experiment** Grundsätzlich ist es unmöglich vorherzusagen, welcher Detektor klickt. Wiederholt man eine Messung oft, ist es jedoch möglich, die relative Häufigkeit für das jeweilige Ereignis (Detektor B klickt oder Detektor C klickt) zu berechnen. Dies ist typisch für die Messung in der Quantenphysik. Die quantentheoretische Verallgemeinerung lautet:

Die Quantenphysik erlaubt nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Eintreten von Ereignissen.

**Analogie zum GALTON-Brett** Eine zu dieser Beobachtung passende Hypothese ist, dass sich Photonen am optischen Strahlteiler ähnlich wie die Kugeln in einem GALTON-Brett verhalten. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit  $p(R)$  klickt ein Detektor am R-Ausgang (Reflexion) und mit der Gegenwahrscheinlichkeit  $p(T)=1-p(R)$  am T-Ausgang (Transmission).

Mit Hilfe eines zweiten Strahlteilers und *einem* Spiegel konnten Sie diese Hypothese verifizieren. Stehen jedoch an *beiden* Ausgängen des Strahlteilers Spiegel, klickt der Detektor nicht mit der berechneten Wahrscheinlichkeit: die GALTON-Brett Analogie ist falsch.

Für die Erklärung betrachten wir die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses – wie bspw. das Klicken des Detektors R – und den Photonenzustand, der alle Möglichkeiten für das betrachtete Photon umfasst.

In der Quantenphysik ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses verknüpft mit der Zustandsfunktion  $\Phi$ , die auch als Wahrscheinlichkeitsamplitude bezeichnet wird. Hierbei handelt es sich um eine komplexwertige Funktion, die eine Phaseninformation trägt:  $\Phi = |\Phi|e^{i\varphi}$ . Für jedes Ereignis kann eine eigene Zustandsfunktion/Wahrscheinlichkeitsamplitude bestimmt werden.

Für die hier betrachteten Experimente hat RICHARD FEYNMAN ein geniales Erklärungsmodell vorgeschlagen:

*Sie werden Ihre ganze Kraft zusammennehmen müssen - nicht, weil es schwierig zu verstehen ist, sondern weil es absolut lächerlich ist: Wir werden nämlich nichts weiter machen als kleine Pfeile auf ein Blatt Papier zeichnen - weiter nichts!* (Feynman, 1988; S.35)

Die Wahrscheinlichkeitsamplituden werden durch Zeiger repräsentiert, deren Länge gerade die Wurzel aus der Wahrscheinlichkeit ist.

Die nebenstehende Abbildung zeigt einen Zeiger der Länge 1 in der Ausgangsstellung. Analog zum Ziffernblatt einer Uhr kann man auch von der 03:00 Stellung sprechen. Die zeitliche Entwicklung des Photonenzustandes kann als Rotation des Zeigers um seinen Fußpunkt gedacht werden: Der Zeiger rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  gegen den Uhrzeigersinn, während das Photon **gedanklich** einen

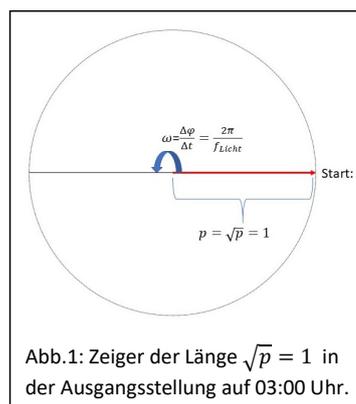


Abb.1: Zeiger der Länge  $\sqrt{p} = 1$  in der Ausgangsstellung auf 03:00 Uhr.

möglichen Lichtpfad durchläuft. Diese Lichtpfade sind **keine echten Wege**, auf denen sich Objekte bewegen, sondern sie repräsentieren gedankliche Möglichkeiten, wie sich der Zustand von A nach B entwickeln könnte, sodass im Grunde genommen unendlich viele solcher Zeiger gezeichnet werden müssten.

Für unsere Experimente reichen allerdings einige wenige Zeiger, was am Beispiel des optischen Strahlteilers dargestellt wird. Folgende Zeichnungen finden Sie unter [Simulation Strahlteiler](#).

Aus dem Experiment ist bekannt, dass das Photon zwei Möglichkeiten der Entwicklung hat: Vom Eingang des Strahlteilers zum Ausgang *Reflektiert* oder zum Ausgang *Transmittiert*. Daher wird für jede der beiden Möglichkeiten ein Zeiger gezeichnet (Abb.2), wobei die Länge gerade der Wurzel der Wahrscheinlichkeit entspricht, also  $\sqrt{p} = \sqrt{0,5}$  für 50/50 Strahlteiler.

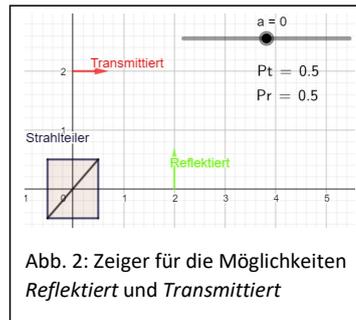


Abb. 2: Zeiger für die Möglichkeiten *Reflektiert* und *Transmittiert*

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei der Reflexion am Strahlteiler, ein Phasensprung von  $\frac{\pi}{2}$  erfolgt, sodass der Zeiger für *Reflektiert* auf 12:00 steht.

Um nun die Wahrscheinlichkeit eines Photonenzustandes zu bestimmen, wird das Betragsquadrat über den Zeiger bestimmt (Abb.3). In der Simulation sehen Sie das Ergebnis in den Textfeldern  $P_t$  und  $P_r$ .

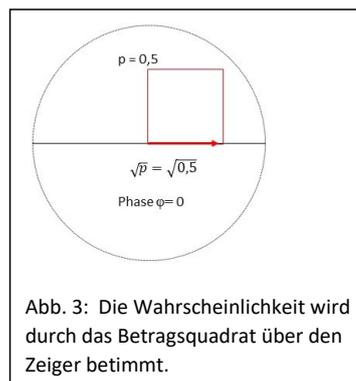


Abb. 3: Die Wahrscheinlichkeit wird durch das Betragsquadrat über den Zeiger bestimmt.

Damit lässt sich das Grundprinzip der Wahrscheinlichkeit wie folgt definieren:

**Wahrscheinlichkeit**

Die Quantenphysik erlaubt nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Eintreten von Ereignissen. Die Wahrscheinlichkeit  $P$  ist durch das Betragsquadrat einer komplexen Wahrscheinlichkeitsfunktion  $\Phi$ , der sogenannten Wahrscheinlichkeitsamplitude, beschrieben. Diese enthält neben der Wahrscheinlichkeitsinformation  $\sqrt{p}$  auch eine Phaseninformation  $\varphi$ .

$$P = |\Phi|^2 = \Phi \cdot \Phi^*$$

### Superposition

Wie Sie an der Simulation zum Strahlteiler sehen, hat die Phaseninformation der Wahrscheinlichkeitsamplituden zunächst keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit zur Detektion. Die Bildung des Betragsquadrates liefert die klassisch erwarteten Wahrscheinlichkeiten.

Anders sieht es aus, wenn an beiden Ausgängen des optischen Strahlteilers Spiegel stehen. Aber wieso?

Dazu wird noch einmal die Situation am Strahlteiler genauer betrachtet.

Die Einzelphotonen werden von der Quelle auf den optischen Strahlteiler ausgesendet. Eine Messung direkt vor dem Strahlteiler würde mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 ein Photon detektieren. Das entspricht einem Zeiger (einem Photonenzustand  $\Phi_e$ ) der Länge 1 auf 03:00 Stellung.

Der Strahlteiler erzeugt nun daraus für die beiden Ausgänge R und T einen Photonenzustand (eine Ausgangswahrscheinlichkeitsamplitude)  $\Phi_R$  und  $\Phi_T$ .

Also, entsprechend der Wahrscheinlichkeit für die Detektion in den Ausgängen ( $p(T)=p(R)=0.5$ ) für jeden Ausgang einen Zeiger mit bekannter Länge  $|\Phi_R| = \sqrt{0.5}$ ;  $|\Phi_T| = \sqrt{0.5}$ ; und Phasenwinkel  $\varphi_R = \pi/2$  und  $\varphi_T = 0$  (Abb. 4).

Solange keiner der Detektoren klickt, ist es absolut unmöglich zu bestimmen, welche der Möglichkeiten (Reflektiert oder Transmittiert) realisiert wird. Es existieren **beide** Möglichkeiten. Eine eindeutige Festlegung auf eine der Möglichkeiten geschieht erst bei der Detektion. Eine solche Überlagerung zweier Zustände wird als **Superposition** der Zustände bezeichnet. Allerdings wird das Photon bei der Detektion vernichtet und weitere Experimente mit ihm sind nicht möglich.

Mit dieser Superposition ist eine grundlegende Unsicherheit verbunden: Man weiß grundsätzlich nicht, welcher Zustand der Überlagerung zur Wirkung kommt, also welcher Detektor an einem Ausgang klickt. Dieses Unsicherheitsprinzip ist ein fundamentales Grundprinzip der Quantenphysik, weit mehr als eine bloße Messunsicherheit in der klassischen Physik.

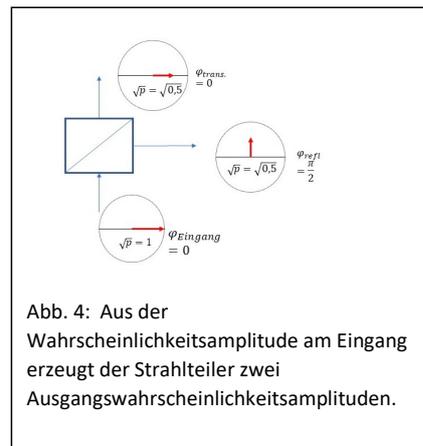


Abb. 4: Aus der Wahrscheinlichkeitsamplitude am Eingang erzeugt der Strahlteiler zwei Ausgangswahrscheinlichkeitsamplituden.

### Superposition

Erlaubt ein Experiment mehrere gedankliche Möglichkeiten (z.B. Detektor R klickt oder Detektor T klickt) in die sich ein Photonenzustand entwickeln kann, so bildet die Superposition dieser Möglichkeiten (sogenannte Unterzustände) den Gesamtzustand. Die Superposition ist eine Überlagerung aller Möglichkeiten die alle zugleich existieren. Dabei ist lediglich die Wahrscheinlichkeit der Realisation einer Möglichkeit bei der Detektion festgelegt (wie bspw. die Wahrscheinlichkeit für das Klicken des Detektors T). Für jede Möglichkeit existiert eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsamplitude.

**Relevanz der Phasenfaktoren**

Stehen nun an den Ausgängen des Strahlteiler keine Detektoren, sondern Spiegel, lässt sich die Superposition der Ausgangszustände / Ausgangsmöglichkeiten zerstörungsfrei auf *einen* Detektor D lenken (Abb. 5). Dabei meint zerstörungsfrei, dass durch die Messung im Detektor keiner der Ausgangszustände / Ausgangsmöglichkeiten hinter dem Strahlteiler (T oder R) realisiert wird.

Folgende Lichtpfade von der Quelle zum Detektor D sind möglich:

Reflektiert: Reflexion am Strahlteiler und am Spiegel, danach Transmission auf den Detektor

Transmittiert: Transmission am Strahlteiler, dann Reflexion am Spiegel sowie vom Strahlteiler auf dem Detektor.

Der Gesamtzustand dieser Superposition lässt sich durch Addition der Zeiger (der Wahrscheinlichkeitsamplituden) bestimmen (wie bei Vektoren, Abb. 6). Dieser so entstehende Summenzeiger stellt nun die Wahrscheinlichkeitsamplitude der Superposition dar: Seine Länge ist die Wurzel aus der Wahrscheinlichkeit für das Klicken des Detektors. In der Simulation [Superposition](#) ist das Phänomen dargestellt.

Die Länge des Summenzeigers hängt von der Phasenwinkeldifferenz zwischen den beiden Zeigern (Unterzustände) ab (Abb.6). Da die Unterzustände an den Spiegeln beide den gleichen Phasensprung erhalten, wird dieser vernachlässigt.

Verschieben Sie den Regler und beobachten Sie den resultierenden Zeiger. Beobachten Sie auch die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{Superposition}}$ . Notieren Sie Ihre Beobachtungen und interpretieren diese.

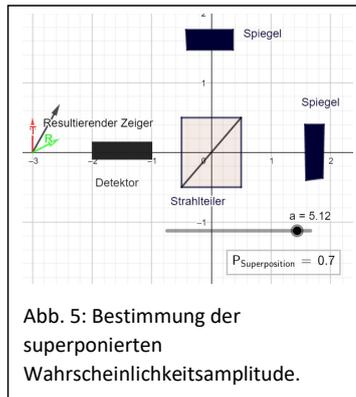


Abb. 5: Bestimmung der superponierten Wahrscheinlichkeitsamplitude.



Abb. 6: Bestimmung der superponierten Wahrscheinlichkeitsamplitude.

**Interferenz**

Ist der Zustand eines Quantenobjektes (die Wahrscheinlichkeitsamplitude  $\Phi$ ) eine Superposition von Möglichkeiten (Unterzuständen)  $\Phi_{Ges} = \Phi_R + \Phi_T$  und werden die beiden Möglichkeiten (Unterzustände) nicht getrennt in den Ausgängen T und R detektiert, sondern gemeinsam im Detektor D, werden Phasenunterschiede zwischen den Möglichkeiten relevant. Denn dann hängt die Klick-Wahrscheinlichkeit von der Differenz  $\Delta\varphi$  der Phasenwinkel  $\varphi$  der Möglichkeiten (Unterzustände) ab. Für die Klick-Wahrscheinlichkeit gilt

$$P(\text{Klick}) = \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

Anmerkung zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit

In der Quantentheorie wird ein physikalischer Zustand durch einen Vektor dargestellt. Um diese Quantenvektoren von allen anderen Vektoren dieser Welt zu unterscheiden, hat Paul Dirac besondere Klammern eingeführt:  $|\Psi\rangle$ .

Bornsche Regel: Die Detektionswahrscheinlichkeit  $P_D$  ist das Betragsquadrat des Skalarprodukts des detektierten Zustandsvektors mit dem Vektor des Gesamtzustands  $P_D = |\langle\Psi_D|\Psi\rangle|^2$ . Warum das so ist, kann die Physik nicht beantworten.

Um die quantentheoretische Vektorrechnung etwas zu veranschaulichen, wird nochmal die Situation am optischen Strahlteiler betrachtet:

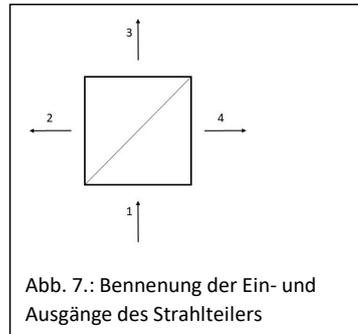


Abb. 7.: Benennung der Ein- und Ausgänge des Strahlteilers

Stellt man hinter die Ausgänge (3 und 4) des Strahlteilers Spiegel und einen Detektor D an den Ausgang 2, führt dies zur gemeinsamen Messung von Unterzustand 3 ( $|\Psi\rangle_3$ ) und Unterzustand 4 ( $|\Psi\rangle_4$ ). Der Zustand auf dem Detektor kann als Vektor

$$|\Psi\rangle_2 = (\sqrt{p_t \cdot p_r} \cdot f(\varphi_3) + \sqrt{p_r \cdot p_t} \cdot f(\varphi_4))|2\rangle = \sqrt{p_r \cdot p_t} \cdot (f(\varphi_3) + f(\varphi_4))|2\rangle$$

geschrieben werden. Dabei sind die Vorfaktoren  $\sqrt{p_r \cdot p_t}$  die bekannten Zeigelängen und  $f(\varphi)$  die Zeigerstellung. Die Vorfaktoren sind also eine mathematische Beschreibung des Zeigers. Die Anwendung der Bornschen Regel, die Berechnung des Betragsquadrates des Skalarproduktes des detektierten Zustandsvektors ( $|2\rangle$ ) mit dem Gesamtzustandsvektor ( $|\Psi\rangle_2$ ) führt zu

$$\begin{aligned} P(\text{Klick}) &= |\langle 2|\Psi\rangle_2|^2 = \left| \sqrt{p_r \cdot p_t} \cdot (f(\varphi_3) + f(\varphi_4)) \cdot \underbrace{\langle 2|2\rangle}_{=1} \right|^2 = p_r \cdot p_t |f(\varphi_3) + f(\varphi_4)|^2 \\ &= 2 p_r \cdot p_t (1 + \cos(\varphi_4 - \varphi_3)) = 2 p_r \cdot p_t (1 + \cos(\Delta\varphi)) = 4 p_r \cdot p_t \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{aligned}$$

Wobei ausgenutzt wird, dass das Skalarprodukt des Vektors  $|2\rangle$  mit sich selbst gerade 1 ergibt. Der eingeführte Cos-Term berücksichtigt die Phasenwinkeldifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen den beiden Unterzuständen. Wird ein 50/50 Strahlteiler benutzt, ist  $p_r = p_t = 0.5$  und die Wahrscheinlichkeit der Detektion ist

$$P(\text{Klick}) = 4 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

der bekannte Interferenzterm.

## 29. MNSQ-Fit Statistiken

### Auswertung des Fragebogens

#### 29.1. MNSQ-Fitstatistik für Pre- und Post-Test

##### 29.1.1. Itemfit

*Tab. 29.1.: MNSQ-Fitstatistiken der Items in Pre und Post.*

Item	Pre-Test		Post-Test	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ
Item 1	0.530	0.776	0.592	0.905
Item 2	1.072	1.074	1.173	0.968
Item 3	0.839	0.900	0.885	1.043
Item 4	0.755	0.841	0.764	0.896
Item 5	0.767	0.819	0.714	0.861
Item 6	1.279	1.044	1.542	1.177
Item 7	0.974	1.021	1.233	1.161
Item 8	1.303	1.096	1.748	1.614
Item 11	1.001	0.980	0.937	1.008
Item 12	1.193	1.018	1.077	0.976
Item 13	0.823	0.873	0.670	0.799
Item 16	0.779	0.991	0.576	0.781
Item 17	0.733	0.810	0.568	0.660
Item 18	0.837	0.868	0.587	0.728
Item 19	1.092	1.039	0.851	0.873
Item 20	0.884	0.931	0.909	0.945

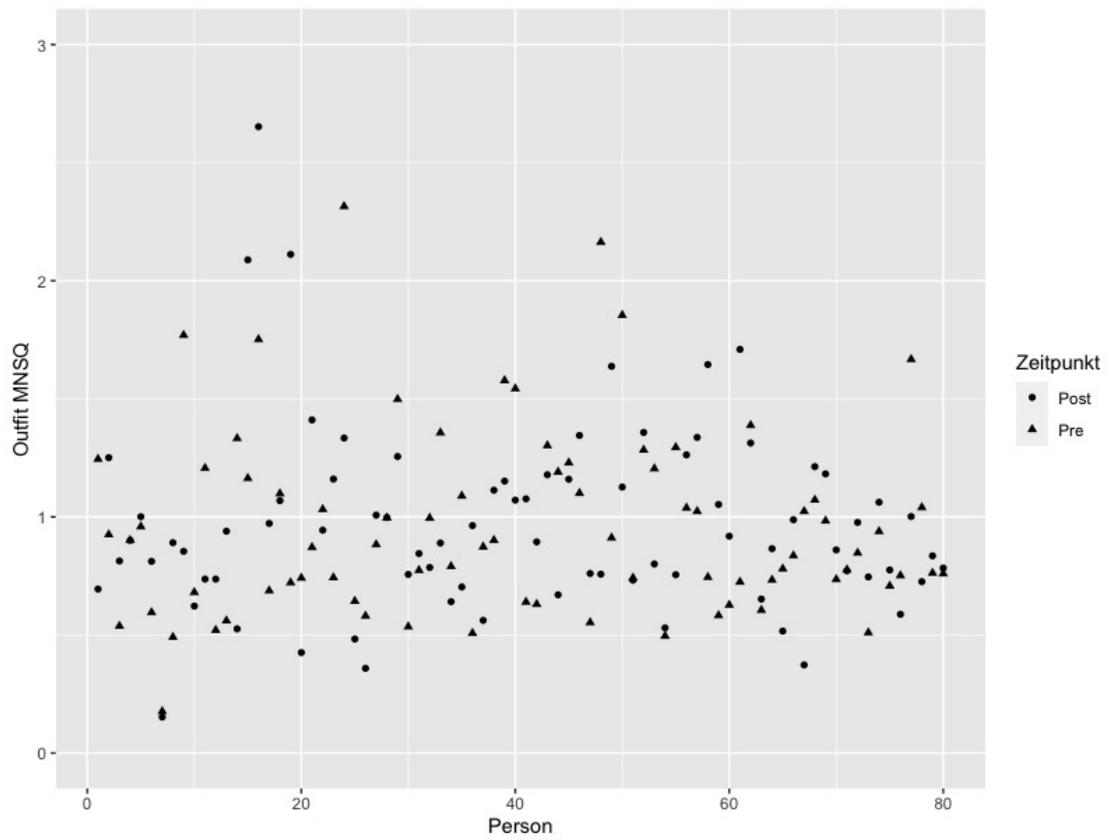
---

29. MNSQ-Fit Statistiken Auswertung des Fragebogens

---

Item	Pre-Test		Post-Test	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ
Item 21	0.859	0.933	0.877	0.878
Item 22	0.931	0.889	0.845	0.880
Item 24	1.617	1.430	1.587	1.248
Item 25	0.866	0.923	1.501	1.131
Item 26	0.996	1.036	0.943	0.936
Item 27	1.065	0.987	0.647	0.748
VW1	0.722	0.979	1.305	1.194
VW3	1.324	1.198	1.356	1.256
VW4	0.635	0.800	0.364	0.720
VW6	1.095	1.044	0.879	1.009

### 29.1.2. Person Outfit



*Abb. 29.1.: Personoutfit MNSQ ohne Bereinigung*

## 29.2. MNSQ-Fitstatistik für Pre- und Post-Test nach erster Bereinigung

### 29.2.1. Itemfit

*Tab. 29.2.: MNSQ-Fitstatistiken der Items in Pre und Post nach Ausschluss von VW4 und 12 Personen.*

Item	Pre-Test		Post-Test	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ
Item 1	0.533	0.744	0.664	0.932
Item 2	1.110	1.031	0.519	0.857
Item 3	0.866	0.879	0.794	0.986
Item 4	0.802	0.860	0.812	0.901
Item 5	0.846	0.857	0.781	0.883
Item 6	1.026	0.995	1.596	1.131
Item 7	0.973	1.012	1.000	1.031
Item 8	1.198	1.053	1.714	1.627
Item 11	1.061	0.992	1.008	1.045
Item 12	1.322	1.058	1.180	1.044
Item 13	0.784	0.853	0.714	0.813
Item 16	0.687	0.842	0.481	0.686
Item 17	0.774	0.824	0.612	0.693
Item 18	0.869	0.881	0.625	0.728
Item 19	1.228	1.049	0.952	0.892
Item 20	0.771	0.864	0.885	0.902
Item 21	0.901	1.047	0.850	0.837
Item 22	1.008	0.959	0.885	0.903
Item 24	1.662	1.464	1.749	1.306
Item 25	0.828	0.889	1.658	1.179
Item 26	0.908	0.955	0.950	0.904
Item 27	1.083	1.014	0.691	0.748
VW1	0.623	0.923	.124	1.076

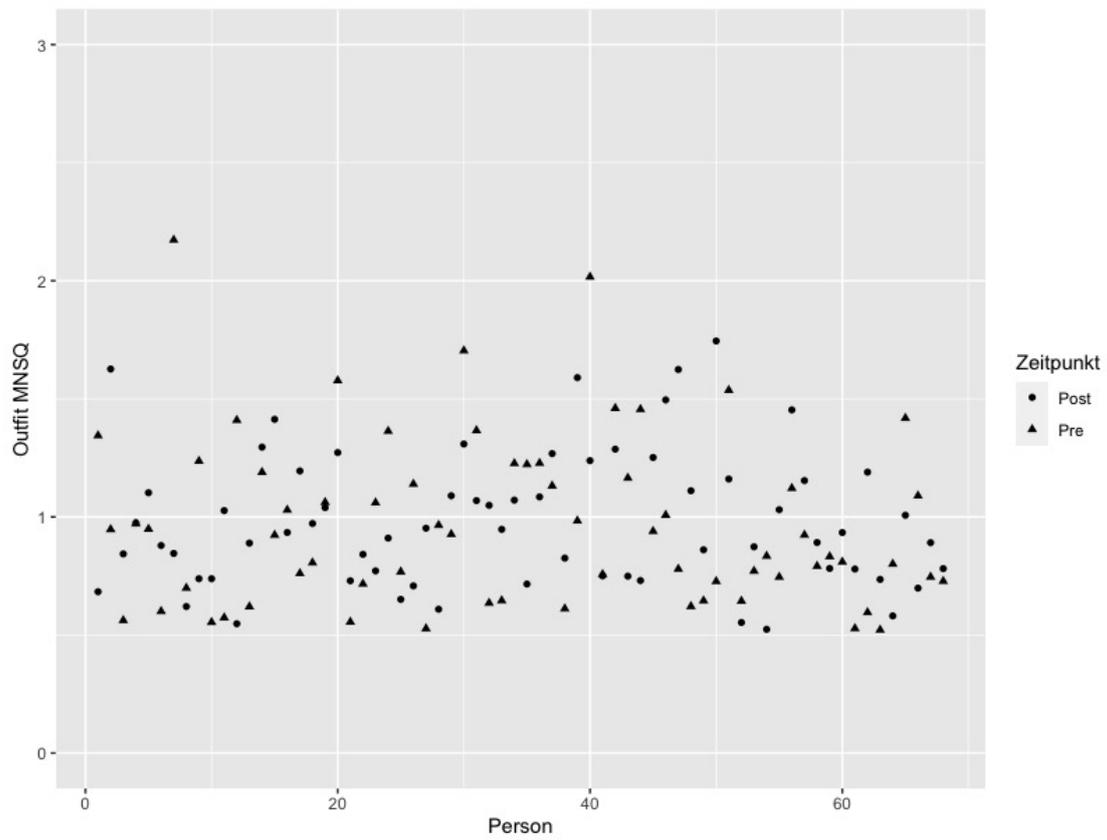
---

29. MNSQ-Fit Statistiken Auswertung des Fragebogens

---

Item	Pre-Test		Post-Test	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ
VW3	1.303	1.184	1.369	1.205
VW6	1.015	1.047	0.909	1.000

### 29.2.2. Person Outfit



*Abb. 29.2.: Personoutfit MNSQ nach der 1. Bereinigung*

## 29.3. MNSQ-Fitstatistik für Pre- und Post-Test nach zweiter Bereinigung

### 29.3.1. Itemfit

*Tab. 29.3.: MNSQ-Fitstatistiken der Items in Pre und Post nach Ausschluss von zwei weiteren Personen.*

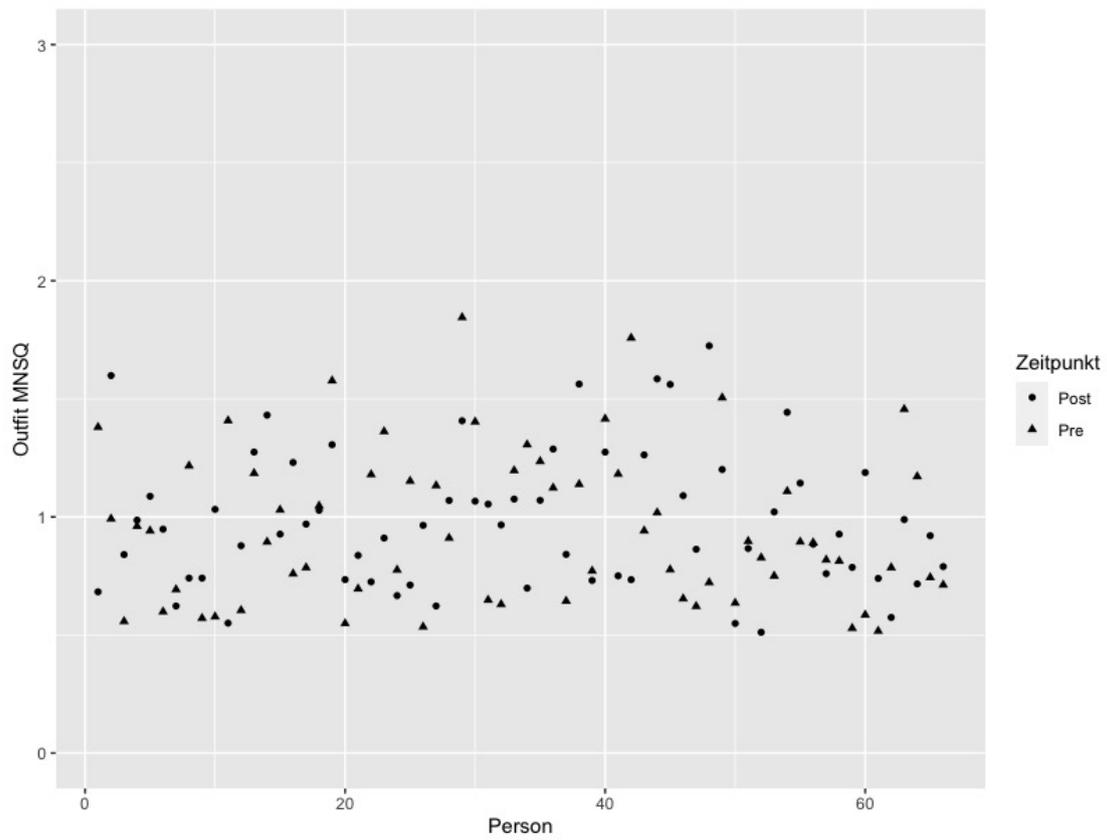
Item	Pre-Test		Post-Test	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ
Item 1	0.538	0.746	0.673	0.939
Item 2	1.126	1.043	0.526	0.861
Item 3	0.872	0.886	0.802	0.996
Item 4	0.810	0.869	0.817	0.899
Item 5	0.856	0.863	0.789	0.891
Item 6	1.056	0.993	1.534	1.088
Item 7	0.995	1.036	1.016	1.051
Item 8	1.248	1.077	1.710	1.623
Item 11	1.077	0.999	1.020	1.062
Item 12	1.405	1.079	1.173	1.049
Item 13	0.794	0.867	0.715	0.814
Item 16	0.387	0.737	0.482	0.689
Item 17	0.767	0.819	0.612	0.693
Item 18	0.853	0.872	0.621	0.724
Item 19	1.011	1.002	0.965	0.899
Item 20	0.761	0.861	0.894	0.911
Item 21	0.766	1.004	0.840	0.810
Item 22	1.010	0.967	0.896	0.917
Item 24	1.668	1.476	1.753	1.285
Item 25	0.791	0.855	1.662	1.196
Item 26	0.892	0.940	0.967	0.911
Item 27	1.111	1.037	0.690	0.747
VW1	0.630	0.929	1.139	1.085

29. MNSQ-Fit Statistiken Auswertung des Fragebogens

---

Item	Pre-Test		Post-Test	
	Outfit MNSQ	Infit MNSQ	Outfit MNSQ	Infit MNSQ
VW3	1.304	1.176	1.383	1.222
VW6	1.035	1.060	0.839	0.948

### 29.3.2. Person Outfit



*Abb. 29.3.: Personoutfit MNSQ nach der 2. Bereinigung*

# 30. Kategoriensystem

## 30.1. Photon

Oberkategorie	Unterkategorie	Beschreibung	Beispiel
Klassisch		Vornehmliche Beschreibung als klassisches Teilchen	<i>Photonen sind Lichtteilchen, also Energiepakete aus elektromagnetischer Strahlung.</i>
Dualistisch		Hybrid aus Welle und Teilchen mit Kontextsensitivität des Seins	<i>Ein Photon ist ein Lichtbestandteil, das sowohl Welle als auch Teilchen ist und je nach Experiment kommen Wellen- oder Teilchenergebnisse heraus.</i>
Quasi-Quantenphysikalisch	Weder Welle noch Teilchen, aber bestimmte Eigenschaften von beidem		<i>Ein Photon ist ein Objekt, das Wellen- und Teilcheneigenschaften besitzt, aber weder Welle noch Teilchen ist.</i>
Sonstiges		Keine Zuordnung zu obigen Kategorien möglich	<i>Photonen sind positive Teilchen die als Lichtstrom fungieren.</i>

## 30.2. Strahlteilerexperiment

Oberkategorie	Unterkategorie	Beschreibung	Beispiel
Klassisch		Photonen können nicht geteilt werden, da sie Teilchen sind	<i>Das einzelne Photon teilt sich in dem Versuch nicht auf, weil es Teilchen sind und diese sind nur an einem festen Ort.</i>
Dualistisch		Experiment evoziert das Teilchensein	<i>Dadurch, dass wir messen, welchen Weg das Photon genommen hat, zeigt es Teilchenverhalten. Auswahl von Eins oder Drei, weil Licht in Energieportionen übermittelt wird.</i>
Quasi-Quantenphysikalisch	Quantenobjekt	Demonstration einer Eigenschaft eines Quantenobjektes	<i>Auf Grund des Teilchencharakters kann das Photon nicht, wie eine Welle halbiert werden, sodass nur entweder oder Ergebnisse möglich sind.</i>
	Energiequant	Photonen sind unteilbare Energiequanten	<i>Die Photonen sind unteilbare Energieportionen, für die nach dem Strahlteiler lediglich Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben werden können. Erst die Messung schafft ein sicheres Ergebnis.</i>
	Probabilistik / Ortsunbestimmtheit	Die Ortsunbestimmtheit ist der Grund für die Probabilistik	<i>Der Weg des Photons ist bis zur Detektion unbekannt, jedoch findet die Detektion willkürlich mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% je Ausgang statt.</i>
	Probabilistik / Superposition	Der Superpositionszustand als Grund für die Probabilistik	<i>Photonen werden mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50% reflektiert oder transmittiert. Bis ein Photon detektiert wird, ist dessen Pfad nicht festgelegt und wird durch eine Wahrscheinlichkeitsamplitude bestimmt. Wird es detektiert zerfällt die Wahrscheinlichkeitsüberlagerung.</i>
Sonstiges		Keine Zuordnung zu obiger Kategorie möglich / unbegründete Auswahl	<i>Keine wirkliche Erklärung, Interviewer stößt direkt auf Teilchencharakter. Aber: Entscheidet sich für Antwort 1, weil die Photonen sich hier als unteilbare Energieportionen, Teilchen zeigen.</i>

### 30.3. Michelson Interferometer

Oberkategorie	Unterkategorie	Beschreibung	Beispiel
Klassisch			
Dualistisch		Experiment evoziert das Wellesein	<i>Im Experiment zeigen sich Maxima und Minima in der Intensität, auf Grund von Interferenz. Auf Grund der Superposition von Teilchen und Welle, können unteilbare Teilchen sich als Welle in diesem Experiment zeigen, da sie die klassische Welleneigenschaft der Interferenz zeigen.</i>
Quasi-Quantenphysikalisch	Quantenobjekt	Demonstration einer Eigenschaft eines Quantenobjektes	<i>Im Experiment sind konstruktive und destruktive Interferenz, auf Grund der Welleneigenschaft des Photons, zu beobachten. Durch die Bewegung des Spiegels wird ein Gangunterschied erzeugt. Die Teilcheneigenschaft hingegen würde zu einer konstanten Zählrate führen.</i>
	Probabilistik / Interferenz von Wahrscheinlichkeiten	Da der Ort des Photons nicht bestimmt wird, kommt es zur Interferenz der Wahrscheinlichkeiten.	<i>Im Experiment beobachten wir konstruktive und destruktive Interferenz, da das Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% reflektiert oder transmittiert wird und dann auf den Strahlteiler zurück reflektiert wird. Daher ist es nicht möglich zu sagen, ob da Photon reflektiert oder transmittiert wurde und die Wahrscheinlichkeiten interferieren. Dieser Versuch zeigt einen Wellencharakter.</i>
	Probabilistik / Superposition	Superposition von Wahrscheinlichkeitsamplituden führt zu Interferenz	<i>Im Versuch werden die Wahrscheinlichkeitsamplituden für die zwei möglichen Wege eines Photons zum Detektor zur Interferenz gebracht. Durch Verschiebung des Spiegels sind die Wege unterschiedlich lang und eine Verschiebung verändert das Interferenzphänomen, sodass konstruktive und destruktive Interferenz der Wahrscheinlichkeiten zu beobachten ist. Daher wird dem Photon ein Wellencharakter zugeschrieben.</i>

# 31. Lebenslauf

## Beruflicher Werdegang

07/2022 - heute	Leitung des Schülerlabor foeXlab
09/2018 - 06/2022	wissenschaftlicher Mitarbeiter Institut für Didaktik der Mathematik u. Physik - AG Physikdidaktik (Gruppe Weßnigk)
02/2018 - 08/2018	Studentische Hilfskraft Institut f. Physikalische und Elektrochemie - AK Prof. Becker
08/2016 - 08/2018	Studentische Hilfskraft Schülerlabor foeXlab
02/2014 - 02/2018	Lehrkraft Studienkreis Bückeberg

## Ausbildung

2019 - heute	Leibniz Universität Hannover <i>Promotionsstudent Fakultät für Mathematik und Physik</i>
2016 - 2018	Leibniz Universität Hannover <i>Master Lehramt an Gymnasien Physik / Chemie</i> <i>Masterarbeit 2018: Forschendes Lernen im Schülerlabor foeXlab</i>
2012 - 2016	Leibniz Universität Hannover <i>Fächerübergreifender Bachelor Physik / Chemie</i> <i>Bachelorarbeit 2016: Licht zählen in der Optik. Statistische Optik mit dem Mach-Zehnder Interferometer</i>
2004 - 2012	Gymnasium Adolfinum Bückeberg <i>Abitur 2012</i>
2000 - 2004	Grundschule am Harrl Bückeberg

## 32. Danksagung

Um mich der Blamage zu entziehen, jemanden vergessen zu haben, möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dies gilt sowohl den Teilnehmenden bei Diskussionen auf Tagungen, Kolloquien oder auf dem Institutsflur als auch allen Teilnehmenden an dieser Studie. Ebenso gilt der Dank Gina Kleinsteinberg, Johanna Lohmann, Simon Haase, Malte Below und Jan Steinmann, die mich bei den Interviews und der Umsetzung der Studie unterstützt haben. Dennoch möchte ich mich bei einigen Personen mit den nachfolgenden Worten besonders bedanken.

Zunächst einmal möchte ich mich bei den Gutachtern dieser Arbeit dafür bedanken, dass sie nicht nur zum reibungslosen Ablauf des Promotionsverfahrens beigetragen haben, sondern auch im Vorfeld den Weg zu dieser Arbeit geebnet haben. Sei es durch Lehrveranstaltungen in der Chemiedidaktik sowie der Vorlesung zur Atom- und Molekülphysik, die mein Interesse an der Naturwissenschaftsdidaktik bzw. der Quantenphysik befeuert haben oder auch durch kritische Nachfragen auf Tagungen, die eine neue Perspektive eröffneten. Dafür ein herzlicher Dank.

Weiterhin möchte ich Tatjana Stürmer-Steinmann für die gehörige Portion Humor danken, mit der wir uns durch die universitären Widrigkeiten, so bescheuert sie gewesen sein mögen, schmunzeln konnten. Neben dieser motivationalen Unterstützung möchte ich dir für die kritischen, aber fruchtbaren Anmerkungen zu meinem Projekt sowie schlussendlich auch der Rechtschreibkorrektur dieser Arbeit danken.

Ein weiterer Dank gilt Kim Weber, der mir nicht nur bei technischen Fragen zum Experiment mit Rat und Tat zur Seite stand, sondern auch in grundlegenden Fragen zur Didaktik der Quantenphysik den ein oder anderen Denkanstoß gegeben hat. Ebenso danke ich dir dafür, dass du es überhaupt ermöglicht hast, die Studie im Physikpraktikum durchzuführen.

Ein großer und kaum beschreibbarer Dank gilt Susanne Weßnig und Rüdiger Scholz, die dieses Projekt von den ersten, schnell wieder verworfenen Ideen bis hin zu dieser

Dissertation unermüdlich betreut haben. In unzähligen Diskussionen persönlich und zuletzt via Zoom habt ihr jeden Stein meines gedanklichen Pfades umgedreht, geschliffen oder manchmal auch aussortiert und neue hinzugefügt. Dafür möchte ich euch danken. Ein letzter Dank gilt meiner Familie, die mich vom Beginn des Studiums bis zur Abgabe dieser Arbeit auf vielfältige Weise unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt dabei meinem Mann Justus, der mir nicht nur eine motivationale Stütze war, sondern auch alles ohne Widerstand mitgetragen hat.

Abschließend möchte ich mich beim Sonderforschungsbereich 1227 Designed Quantum States of Matter (DQ-mat) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit bedanken.

## 33. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich

1. die Regeln der geltenden Promotionsordnung kenne und eingehalten habe und mit einer Prüfung nach den Bestimmungen der Promotionsordnung einverstanden bin.
2. die Dissertation selbst verfasst habe, keine Textabschnitte von Dritten oder eigener Prüfungsarbeiten ohne Kennzeichnung übernommen und alle benutzten Hilfsmittel und Quellen in der Arbeit angegeben habe.
3. Dritten weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Vermittlungstätigkeiten oder für die inhaltliche Ausarbeitung der Dissertation erbracht habe.
4. die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine andere Prüfung eingereicht habe.
5. keine andere Abhandlung als Dissertation anderswo eingereicht habe.
6. damit einverstanden bin, dass die Dissertation einer Überprüfung der Einhaltung allgemein geltender wissenschaftlicher Standards unterzogen wird.

Unterschrift \_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_