

**Akzeptanzbefragung von Lernenden
zur
Ensemble- und Kopenhagener Deutung
eines Strahlteilerexperiments
mit Einzelphotonen**

Masterarbeit

im
Studiengang
„Master of Education“
im Fach Physik

an der Fakultät für Physik und Astronomie
der Ruhr-Universität Bochum

von
Josefin Metje

aus
Marl

Bochum 2024

Kurzzusammenfassung

Greca und Freire (2014) betonen, dass nur wenige bildungswissenschaftliche Arbeiten die Vielfalt quantenphysikalischer Interpretationen berücksichtigen. Dabei stellen diese einen wesentlichen Aspekt für das Verständnis dar. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft zeigt sich eine breite Zustimmung zur Kopenhagener Deutung (Schlosshauer et al., 2013). Allerdings sind Einstellungen von Lernenden zu diesem Thema weitgehend unbekannt. Aus diesem Anlass wurde der Einfluss der Deutung eines quantenmechanischen Schlüsselexperiments (Strahlteiler) mit Einzelphotonen jeweils unter Verwendung der Kopenhagener und Ensemble-Interpretation auf die Akzeptanz in der Sekundarstufe II untersucht. Dies erfolgte durch leitfadensbasierte Einzelinterviews im Rahmen einer Akzeptanzbefragung mit insgesamt 10 Schülerinnen und Schülern. Von den Lernenden wurde die Kopenhagener Deutung als plausibel eingestuft und verwendet, während die Akzeptanz der Ensemble-Deutung geringer ausfiel. Die Ergebnisse geben Hinweise darauf, dass die Quantenmechanik mit der Kopenhagener Deutung schülerorientierter unterrichtet werden könnte als mit der Ensemble-Variante.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung und Hintergrund.....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehen.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Theoretischer Hintergrund.....	4
2.1	Probleme von Lernenden in der Quantenphysik.....	4
2.2	Rolle von Deutungen beim Lernen und Lehren der Quantenmechanik.....	7
2.3	Sachanalyse zu Deutungen in der Quantenmechanik.....	10
2.3.1	Ensemble-Interpretation.....	10
2.3.2	Kopenhagener Deutung.....	12
2.3.3	Gegenüberstellung der Deutungen.....	15
2.4	Animismus bei der Vermittlung naturwissenschaftlicher Sachverhalte.....	16
2.5	Experimentelle Zugänge mit Einzelphotonen zur Quantenphysik.....	17
2.5.1	Einzelphotonenexperimente in der Hochschullehre.....	17
2.5.2	Einzelphotonenexperimente im schulischen Kontext.....	18
3	Forschungsfragen.....	20
4	Forschungsdesign.....	21
4.1	Physikalische Grundlagen.....	21
4.1.1	Quantenkoffer.....	22
4.1.2	Stahlteilerexperiment mit Einzelphotonen.....	25
4.1.3	Polarisation von Licht und Polarisationszustände von Photonen.....	25
4.2	Gestaltung und Präsentation des Informationsangebotes.....	28
4.3	Eingrenzung des Akzeptanzbegriffs.....	35
4.4	Zur Akzeptanzbefragung.....	37
4.5	Beschreibung der Stichprobe und Organisation der Befragung.....	39

4.6	Transkription	40
4.7	Gütekriterien der Erhebung	40
5	Auswertung	42
5.1	Qualitative Inhaltsanalyse	42
5.2	Kodierleitfäden.....	44
5.2.1	Kodierleitfaden zur Befragung der Plausibilität	44
5.2.2	Kodierleitfaden zur Paraphrasierung und Anwendung.....	46
6	Ergebnisse	48
6.1	Befragung der (Einstellungs-) Akzeptanz	48
6.2	Aussagen über ein Photon und Verwendung der Kopenhagener Deutung	49
6.3	Statistische Aussagen und Verwendung der Ensemble-Deutung	51
6.4	Schülervorstellungen	53
6.5	Akzeptanzvergleich der Gruppen.....	55
7	Diskussion.....	56
7.1	Ergebnisdiskussion.....	56
7.2	Limitationen der Erhebung.....	60
7.3	Anpassungsempfehlungen für das Informationsangebot	61
8	Zusammenfassung und Fazit.....	64
9	Ausblick	65
10	Literaturverzeichnis	66
11	Anhang	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Ansicht des Quantenkoffers und der Experimentkomponenten	22
Abbildung 2	Schematische Darstellung zur Erzeugung von Photonenpaaren	24
Abbildung 3	Schematischer Versuchsaufbau des Strahlteilerexperiments.....	25
Abbildung 4	Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen und Polarisationsfiltern.....	26
Abbildung 5	Prozessdiagramm des Informationsangebotes der Erhebung	29
Abbildung 6	Prozessmodell der Kategorienbildung	43
Abbildung 7	Zuordnungshäufigkeiten für die Kategorien „ein Photon“ und „Kopenhagener Deutung“	49
Abbildung 8	Zuordnungshäufigkeiten für die Kategorien „Statistische Aussagen“ und „Ensemble-Deutung“	51
Abbildung 9	Zuordnungshäufigkeiten für verschiedene Schülervorstellungen	53
Abbildung 10 (Anhang)	Polarisationsfilter mit vertikaler Polarisationsachse	96
Abbildung 11 (Anhang)	Polarisationsfilter mit horizontaler Polarisationsachse	97
Abbildung 12 (Anhang)	Kombination aus zwei Polarisationsfiltern mit vertikaler Polarisationsachse	97
Abbildung 13 (Anhang)	Kombination aus zwei Polarisationsfiltern mit jeweils einer vertikalen und einer horizontalen Polarisationsachse	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Gegenüberstellung der Kopenhagener Deutung und Ensemble-Interpretation.....	15
Tabelle 2	Benutzertypen im Modell der Verhaltens- und Einstellungsakzeptanz	35
Tabelle 3	Inhalte der Akzeptanzbefragung	38
Tabelle 4	Beschreibung der Stichprobe und Aufteilung der Probanden.....	39
Tabelle 5	Klassifizierte Benutzertypen der Ensemble- und Kopenhagener Gruppe.....	55
Tabelle 6 (Anhang)	Übersicht über die Repräsentationsformen	91
Tabelle 7 (Anhang)	Einführung in den Deutungskontext und den Zustandsbegriff	93
Tabelle 8 (Anhang)	Beschreibung der Begriffe der relativen Häufigkeit und Ableiten von Wahrscheinlichkeiten nach Ensemble- und Kopenhagener Deutung	94
Tabelle 9 (Anhang)	Deutung der Koinzidenzmessung von Einzelphotonen mit Strahlteiler zur Illustration der Unteilbarkeit von Photonen	95

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Hintergrund

Quantum mechanics is the most useful and powerful theory physicists have ever devised. Yet today, nearly 90 years after its formulation, disagreement about the meaning of the theory is stronger than ever. New interpretations appear every year. None ever disappear. Probability theory is considerably older than quantum mechanics and has also been plagued from the beginning by questions about its meaning. And quantum mechanics is inherently and famously probabilistic. (Mermin, 2012, S. 8)

Wie im Zitat von Mermin (2012) angedeutet, besteht in der Quantenmechanik sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus philosophischer Perspektive ein Deutungsproblem. Es existiert zwar eine genaue mathematische Beschreibung der Quantenphysik, für gleiche experimentelle Ergebnisse gibt es aber unterschiedliche Deutungen der Beschreibungen. So werden in diesem Zusammenhang kontroverse Diskussionen über die physikalische Interpretation des quantenmechanischen Formalismus geführt. Insbesondere gibt es Debatten darüber, ob die Beschreibungen dieser Theorie ontologisch oder epistemisch zu verstehen sind.

Trotz dieser Debatte berücksichtigen nur wenige bildungswissenschaftliche Arbeiten die Vielfalt quantenphysikalischer Auslegungen explizit (Greca & Freire, 2014, S. 197). Stattdessen liegt der Fokus im Lehrkontext häufig auf den mathematischen Aspekten der Theorie. Während Studien sich mit den Lernschwierigkeiten oder der Entwicklung von Unterrichtsmaterialien zur Verbesserung des Verständnisses beschäftigen, wurde die Einbeziehung von Deutungen bisher eher vernachlässigt (Baily & Finkelstein, 2015, S. 1). In der wissenschaftlichen Gemeinschaft zeigt sich tendenziell eine Zustimmung zur Kopenhagener Deutung (Schlosshauer et al., 2013, S. 255). Diese führt jedoch zu scheinbar paradoxen Aussagen. Schrödinger entwickelte beispielsweise ein Gedankenexperiment, das später unter dem Namen „Schrödingers Katze“ bekannt wurde, um die Absurdität dieser Interpretation zu verdeutlichen (Baumann & Sexl, 1984, S. 27). Mit der Ensemble-Deutung könnten diese Paradoxien vermieden werden und sie wird bereits in Lehrkonzepten eingesetzt (Bitzenbauer, 2021, S. 7). Die Einstellungen von Lernenden zu diesem Thema sind hingegen weitgehend unbekannt. Dabei werden Deutungen, definiert als der „Versuch, den tieferen Sinn, die Bedeutung von etwas zu erfassen“ (Dudenredaktion, o. D.), häufig für die Interpretation von Experimenten herangezogen.

Solche quantenphysikalischen Messungen werden als essenzielle Elemente in der Bildungspraxis zur Vermittlung quantenmechanischer Konzepte angesehen (Merzel et al., 2024, S. 11). Und gerade die Attribution von Bedeutung stellt für Lernende der Quantenmechanik eine Herausforderung dar, da die Phänomene hier weniger intuitiv sind als jene in der klassischen Physik und experimentelle Ergebnisse scheinbar im Widerspruch zu alltäglichen Erfahrungen stehen (Boucheé et al., 2021, S. 188). Diese Probleme hängen auch mit dem im obigen Zitat aufgeführten probabilistischen Charakter zusammen. Verschiedene Deutungen könnten zu unterschiedlichen Lernschwierigkeiten führen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Folglich sollte Interpretationen ein höheres Maß an Aufmerksamkeit zukommen und insbesondere die Perspektive der Lernenden diesbezüglich weiter erforscht werden, um Hinweise für eine schülerorientierte Ausrichtung des Quantenphysikunterrichts zu erhalten. In diesem Zusammenhang soll die Akzeptanz von Schülerinnen und Schülern gegenüber verschiedenen quantenmechanischen Deutungen untersucht werden. In Lehrkontexten sind die Kopenhagener und Ensemble-Theorie häufig implizit anzutreffen, weshalb der Fokus auf diesen liegt.

Vor dem Hintergrund des dargestellten Erkenntnisinteresses wird in dieser Arbeit eine empirische Untersuchung konzipiert, durchgeführt und ausgewertet. Als Methode wird die Akzeptanzbefragung eingesetzt, um zu ermitteln, inwieweit die Deutungen nachvollzogen und als plausibel empfunden werden. Diese Befragung wird mit Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II (Sek. II) durchgeführt. Da das Konstrukt der Akzeptanz sowohl in Zustimmung als auch im Verhalten zum Ausdruck kommen kann, soll neben den auftretenden Schülervorstellungen auch untersucht werden, inwiefern Lernende die Theorien in Anwendungskontexten nutzen. Als solcher Anwendungskontext dient ein quantenmechanisches Experiment mit einem Quantenkoffer (Qutools, o. D.). Die Schüleraussagen werden anschließend mithilfe Methoden der qualitativen Inhaltsanalyse untersucht.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um eine fundierte Grundlage für die Ausgestaltung der Untersuchung zu schaffen, wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Forschung betrachtet. Dabei wird die Notwendigkeit didaktischer Forschungsarbeiten zu den Perspektiven der Lernenden unterstrichen, insbesondere angesichts der bestehenden Herausforderungen beim Lehren und Lernen der Quantenmechanik. Das Kapitel widmet sich ebenfalls der Rolle unterschiedlicher Deutungen im Lehr- und Lernprozess und beleuchtet bereits durchgeführte Studien in diesem Bereich. Weil die Akzeptanz der Ensemble- und Kopenhagener Deutung untersucht wird, erfolgen eine Sachanalyse sowie ein vergleichender Überblick. Auf dieser Analyse aufbauend werden spezifische Formulierungen entwickelt, die für die Darstellung des als Anwendungskontext dienenden Quantenexperiments relevant sind. Aufgrund der Hypothese, dass die Präferenz für eine bestimmte Deutung mit dem Gebrauch von Animismen zusammenhängt, wird deren Einsatz bei der Vermittlung naturwissenschaftlicher Inhalte thematisiert. Weil die Messergebnisse eines Einzelphotonenexperiments als Grundlage für die Interpretation dieser Untersuchung dienen, werden die experimentellen Zugänge zur Quantenphysik unter Verwendung von Einzelphotonen und deren Anwendung sowohl in der Hochschul- als auch in der Schulpraxis behandelt. Damit wird zum einen die Notwendigkeit des Einzelphotonenexperiments im Kontext dieser Studie klar herausgestellt und zum anderen werden im Sinne der didaktischen Rekonstruktion die relevanten Aspekte für die didaktische Aufbereitung berücksichtigt. In Kapitel 4 werden das Forschungsdesign sowie die methodischen Ansätze erläutert. Hierbei werden die physikalischen Grundlagen der verwendeten Experimente einschließlich des Quantenkoffers und des Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen dargelegt und deren Präsentation für Lernende beschrieben. Zudem wird der Begriff der Akzeptanz weiter eingegrenzt, um anschließend die Methode der Akzeptanzbefragung im Detail zu beschreiben. Auch die Gestaltung der Studie, einschließlich der Datenerhebung und Stichprobenwahl, wird dargelegt. Kapitel 5 behandelt die angewandten Auswertungsmethoden, darunter die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015), und erläutert die Kodierleitfäden für die Analyse der Akzeptanz. Neben den mit der Auswertung gewonnenen Ergebnissen wird in Kapitel 6 auch ein Vergleich der Akzeptanz präsentiert. Abschließend erfolgen in Kapitel 7 die Diskussion der Ergebnisse und die Beantwortung der in Kapitel 3 aufgestellten Forschungsfragen. In Kapitel 8 wird nach der Zusammenfassung ein Fazit zu den Ergebnissen gezogen, woraufhin in Kapitel 9 ein Ausblick auf potenzielle zukünftige Forschungsansätze folgt, die sich aus dieser Studie ableiten lassen.

2 Theoretischer Hintergrund

Um die Untersuchung zu motivieren und zu planen, wird in diesem Kapitel vorab die Ausgangssituation analysiert und eine theoretische Rahmung geschaffen. Zunächst werden die Herausforderungen beim Lehren und Lernen der Quantenphysik betrachtet, da diese einerseits die Notwendigkeit weiterer fachdidaktischer Forschung in diesem Bereich unterstreichen und andererseits konkrete Anhaltspunkte für weiterführende Untersuchungen liefern (siehe 2.1). Einen möglichen Anhaltspunkt bietet dabei der Deutungsaspekt, weshalb in 2.2 der Fokus auf dem aktuellen Forschungsstand zu quantenphysikalischen Deutungen in der Lehre liegt. Die Kopenhagener und die Ensemble-Deutung sind zwei gängige Interpretationen, deren Akzeptanz durch Schülerinnen und Schüler einen Untersuchungsschwerpunkt für diese Arbeit darstellt. Daher folgt in 2.3 die Sachanalyse der Deutungen. Des Weiteren wird die Rolle des Animismus bei der Vermittlung naturwissenschaftlicher Sachverhalte erläutert (siehe 2.4), zumal dieser möglicherweise Einfluss auf die Akzeptanz von quantenphysikalischen Deutungen haben könnte. Darüber hinaus werden in Abschnitt 2.5 bildungswissenschaftliche Untersuchungen zu experimentellen Zugängen zur Quantenphysik diskutiert, weil ein solcher Zugang der Untersuchung dient. Diesbezüglich wird ein Überblick über zwei bestehende Unterrichtskonzepte mit experimentellen Zugängen zur Quantenphysik gegeben, um Anforderungen für die Gestaltung der Studie zu differenzieren.

2.1 Probleme von Lernenden in der Quantenphysik

Da eine Untersuchung im Bereich der Grundlagenforschung zur Perspektive von Lernenden angestrebt wird, soll in diesem Abschnitt eine allgemeine Betrachtung von Problemen vorgenommen werden, die Lernende in diversen Kontexten wie der Schule und der Universität in Bezug auf die Quantenphysik haben.

Schülerinnen und Schüler zeigen beim Lernen der Quantenmechanik konzeptuelle Schwierigkeiten, welche unter anderem auf der kontraintuitiven „Natur“ quantenphysikalischer Sachverhalte basieren (Boucheé et al., 2021, S. 188). So gestaltet sich die Zuordnung von Bedeutung als schwierig, da die Phänomene der Quantenmechanik weniger intuitiv verständlich sind als jene der klassischen Physik und experimentelle Befunde oft im Widerspruch zu alltäglichen Erfahrungen stehen (Boucheé et al., 2021, S. 188).

Im schulischen Kontext werden die Lernenden zunächst mit den grundlegenden Konzepten der klassischen Physik vertraut gemacht, die Aspekte wie Determinismus und Kausalität umfassen. Das Bewusstsein für die Existenz wesentlicher Unterschiede zwischen klassischer Physik und Quantenphysik scheint dabei bereits vor der schulischen Einführung in das neue Themengebiet vorhanden zu sein. Unabhängig vom Bildungskontext, also schulisch oder universitär, treten trotzdem Inkonvenienzen bei Anwendungen wie beispielsweise dem Tunneleffekt auf, die auf klassisch mechanischem Denken beruhen (Özcan et al., 2009, S.177). Laut Abhang (2005, S. 63) besteht ein wesentliches Problem darin, die neuen Konzepte der Quantenmechanik, zum Beispiel die der Wahrscheinlichkeit, zu begreifen, da diese im teilweisen Widerspruch zur klassischen Physik stehen. So zeigt sich bei einer Metaanalyse durch Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017, S. 1), dass Schwierigkeiten bestehen, die Quantenphysik mit der physikalischen Realität in Verbindung zu bringen.

Die persönliche Relevanz der Thematik wird außerdem als gering eingeschätzt, wodurch ebenfalls keine Verknüpfungen zum alltäglichen Leben hergestellt werden (Moraga-Calderón et al., 2020, S. 44). Die Verwendung mehrdeutiger, unachtsamer Sprache in der Quantenmechanik, welche einige Termini der klassischen Mechanik beinhaltet, potenziert die genannten Lernschwierigkeiten (Singh & Marshman, 2015, S. 16). Des Weiteren gestaltet sich die Vorstellung quantenmechanischer Prozesse grundsätzlich problematisch, da keine zuverlässigen mentalen Visualisierungen möglich sind, oder wie Davies (1995, S. 24) es ausdrückt: „*Particles of light are known as photons [...]. It is impossible to visualize a wave-particle, so don't try*“.

Im Kontrast zu dieser Empfehlung stehend, stellen sich Schülerinnen und Schüler Photonen häufig als kugelförmigen Ball mit definiertem Ort und Trajektorie vor (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017, S. 3). Beschreiben sie die Quantenwelt hingegen durch Wechselwirkungen, zeigen sie ein Bewusstsein für die Unmöglichkeit der Zuschreibung einer Gestalt im klassischen Sinne (Bitzenbauer & Meyn, 2021, S. 45). An dieser Stelle sei anzumerken, dass Lernende mehr als ein mentales Modell für die Deutung von lichtspezifischen Phänomenen besitzen, die genannte Vorstellung also nicht durchweg herangezogen wird, sondern kontextabhängig ist (Didiș et al., 2014, S. 22). Ein mentales Modell ist nach Greca und Moreira (2001) eine interne Darstellung, die als strukturelles Analogon von Prozessen fungiert. Selbst Lernende, die bereits in der Schule Quantenmechanik behandelt haben, beantworteten bei Tests mit 20 Fragen zu grundlegenden Konzepten im Durchschnitt nur 7,7 richtig (Stadermann & Goedhart, 2020, S. 1004).

Dies interpretieren die Autoren als ein Anzeichen für Probleme im Verständnis (Stadermann & Goedhart, 2020, S. 1009). Ein potenzieller Grund liegt in der häufig gewählten historischen Herangehensweise, bei der es den Schülerinnen und Schülern nicht immer gelingt, die Ereignisse nahtlos mit dem zu erlernenden Inhalt zu verknüpfen (Abhang, 2005, S. 63). Es sei angemerkt, dass die geschichtlichen Zugänge zur Quantenmechanik im schulischen Unterricht oft von Fehlern durchzogen sind und eine allzu simplifizierte Darstellung bieten (Kragh, 1992).

Auch phänomenologische Herangehensweisen führen nicht zwangsläufig zum Ablegen klassischer Denkweisen. So ergab eine Untersuchung durch Waitzmann (2023), wie nach Vorstellung des in dieser Arbeit verwendeten Schlüsselexperiments (Unteilbarkeit von Photonen) „die Attraktivität von klassischem und dualistischem *Reasoning* [...] zugenommen“ hat, während die wünschenswerten „quasi-quantenphysikalischen“ Erklärungsmuster der Lernenden abgenommen haben (Waitzmann, 2023, S. 167). *Reasoning* bezeichnet hierbei die Argumentationsstruktur der Probanden, die anhand eines Kategoriensystems kodiert wurde. Demnach wäre die Aussage, Photonen verhielten sich wie Teilchen, sind aber keine, ein „quasi-quantenphysikalisches“ Erklärungsmuster (Waitzmann, 2023, S. 145). In Kombination mit anderen Experimenten verbesserten sich die Fähigkeiten im quantenphysikalischen *Reasoning*, weshalb trotzdem für die grundsätzliche Schlüsselwirkung des Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen plädiert wird (Waitzmann et al., 2022).

Bitzenbauer und Meyn (2021) konnten aus Interviews mit Schülerinnen und Schülern, die vorab nach dem Erlangener Unterrichtskonzept (siehe 2.5.2) unterrichtet wurden, verschiedene Sichtweisen über die Quantenphysik herausarbeiten. So hat die Mehrheit der Interviewten demnach ein bereits elaboriertes Konzept, nach dem Effekte und Aspekte der Quantenmechanik nicht in der klassischen Physik existieren. Interviewte mit dieser Sichtweise betonen die Unvergleichbarkeit der Quantenobjekte mit Objekten aus der klassischen Physik und dass visuelle Illustrationen herangezogen werden können, aber nicht mit der Wirklichkeit verwechselt werden dürfen (Bitzenbauer & Meyn, 2021, S. 47). Eine weitere nach Bitzenbauer und Meyn (2021, S. 48) kategorisierte und weniger elaboriertere Sichtweise ist, dass die Quantenwelt die klassische Welt nur auf kleineren Skalen darstellt, demnach sind Quantenobjekte kleinste Partikel, die zu klein sind, um sie zu sehen. Die elaborierte Perspektive wurde häufiger von Mädchen vertreten, während männliche Befragte eher die weniger elaborierte Sichtweise aufwiesen (Bitzenbauer & Meyn, 2021, S. 48).

Im universitären Kontext treten ebenfalls Probleme auf. So zeigten Physiklehramtsstudierende die Vorstellung, dass Photonen sich wie sinusförmige Wellen bewegen. Dabei wird die Gestaltung von Abbildungen in Lehrbüchern als Einflussfaktor angenommen (Özcan, 2015, S. 11). Insgesamt lässt sich auch bei Studierenden wiederholt eine realistische Vorstellung finden, obwohl eine quantenmechanische Perspektive erforderlich wäre (Baily & Finkelstein, 2009). Es weisen also viele Studien auf Lernschwierigkeiten in der Quantenphysik hin. Im nächsten Abschnitt soll in diesem Zusammenhang die Rolle von Deutungen fokussiert werden, da jene einen Ansatzpunkt für die Prävention und den Umgang mit einigen der genannten Probleme geben könnten.

2.2 Rolle von Deutungen beim Lernen und Lehren der Quantenmechanik

In dem vorangegangenen Abschnitt wird ersichtlich, inwiefern Lernende trotz des Unterrichts in Quantenmechanik oft eine deterministische Perspektive beibehalten. Koopman et al. (2005) vermuten, dass eine gezielte Auseinandersetzung mit verschiedenen Interpretationen hierbei einen positiven Effekt auf das Verständnis haben könnte. Sie betonen insbesondere die Relevanz der Untersuchung der folgenden Forschungsfrage: „*What impact does the use of the Statistical Interpretation of quantum mechanics have on the understanding [...]*“ (Koopman et al., 2005, S. 4). Die Auseinandersetzung mit der Akzeptanz verschiedener quantenmechanischer Deutungen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wird, leistet daher einen notwendigen Beitrag zum aktuellen Forschungsdiskurs.

Nun gilt es, die Rolle, die quantenmechanische Interpretationen im schulischen Kontext spielen, hinsichtlich des Materials und der Einstellung zu analysieren. So werden für die Beschreibung von Quantenobjekten in Schulbüchern Metaphern und visuelle Analogien eingesetzt (Brookes & Etkina, 2007). Dabei werden spezifische Interpretationen eher implizit verwendet (Greca & Freire, 2014). Soweit die materielle Komponente behandelt wurde, sollen nun die bisher bekannten Einstellungen zu dieser Thematik betrachtet werden. Durch Bøe et al. (2018) befragte Oberstufenschülerinnen und Schüler schätzen die Relevanz von Geschichte und Philosophie der Wissenschaft nicht hoch ein. Hier spiegelt sich die häufig anzutreffende Einstellung wider, ein „guter Physikschrüler“ sei hauptsächlich durch seine Rechenfähigkeiten ausgemacht (Johansson et al., 2016).

Auch im Quantenphysikunterricht stellen Interpretationen häufig einen versteckten Aspekt im folgenden Sinne dar:

- (a) Deutungen werden oft oberflächlich behandelt, auf eine Weise, die für die Zielgruppe nicht von Bedeutung ist.
 - (b) Die Lernenden entwickeln ihre eigenen Ideen über quantenmechanische Phänomene, insbesondere wenn Lehrende diese nicht behandeln.
 - (c) Schüler-Interpretationen neigen dazu, intuitiv klassisch in Kontexten zu sein, in denen der Unterricht diesbezüglich weniger explizit ist.
- (Baily & Finkelstein, 2015, S. 1)

Um solchen Einstellungen zu entgegnen, sollten im Unterricht verwendete Interpretationen durch die Lehrkraft verdeutlicht werden (Greca & Freire, 2014). Eine Untersuchung durch Greca und Freire (2014, S. 201) von 32 bildungswissenschaftlichen fachdidaktischen Veröffentlichungen zur Quantenphysik, die zwischen 2000 und 2011 veröffentlicht wurden, zeigt beispielsweise, dass nur 10 die Möglichkeit für verschiedene Interpretationen benennen. Wenn sowohl in fachdidaktischer Forschung als auch in Schulbuchliteratur verschiedene mögliche Interpretationen kaum benannt und vorgestellt werden, erweist sich dies nicht als fördernd für die Entwicklung des Bewusstseins von Schülerinnen und Schüler für eben solche. In der universitären Bildung wurde dem Thema bisher ebenfalls nur begrenzt Aufmerksamkeit zuteil. So wurden in der Hochschullehre Quantenphysikkurse beobachtet, die potenziell eher eine instrumentelle und elitäre Physikkultur reproduzieren, bei der die Möglichkeiten „ein Physiker zu sein und Physik zu machen“ begrenzt sind (Johansson et al., 2016, S. 222). Die Autoren der Studie mutmaßen dabei eine Verknüpfung der Diskurse und eingesetzten Methoden des Unterrichtes mit Entwicklungen des Kalten Krieges (Johansson et al., 2016, S. 222). Mit diesem ergab sich eine Art von Unterrichtskultur nach dem Motto „Halt die Klappe und Rechne“, bei der Fragen, die sich mit phänomenologischen Methoden auseinandersetzten, tendenziell in den Hintergrund gerieten (Kaiser, 2014). Gemeinsame Schnittpunkte liegen demnach bei der pädagogischen Betonung effizienter, wiederholbarer und damit trainierbarer Berechnungstechniken (Johansson et al., 2016, S. 222). Insgesamt lässt sich also feststellen, dass die aktuelle didaktische Praxis in der Hochschullehre der Quantenphysik eine bestimmte Art von Physikkultur fördert, die möglicherweise kritisches und kreatives Denken einschränkt. Diese Beobachtung unterstreicht die Bedeutung der vorliegenden Studie, die mögliche Ansätze aufgreift, wie die Lehre der Quantenmechanik lernförderlicher gestaltet werden könnte.

Aktuell erachten immer noch viele Lehrkräfte und Wissenschaftler in verschiedenen Ländern die philosophischen Aspekte der Quantenphysik als vergleichsweise unbedeutend, wenn es um die Lehre dieses Fachgebiets geht (Merzel et al., 2024, S. 18). Trotzdem ändert sich diese Kultur allmählich und es werden neue Studien, wie die vorliegende, initiiert, da sich die Relevanz und die potenzielle Förderung des Lernens durch Berücksichtigung philosophischer Perspektiven abzeichnen. In diesem Zusammenhang steht auch die Forderung, dass Quantenphysikunterricht Raum für mehr Ansätze (zum Beispiel durch das Berücksichtigen von Interpretationen) geben sollte, da die Quantenphysik sowohl als Inspiration als auch als Qualifikation eine zentrale Rolle spielt (Johansson et al., 2016, S. 224).

Eine Erhebung durch Baily und Finkelstein (2015, S. 11) verdeutlichte die Möglichkeit, Lernende in die Quantenmechanik einzuführen und ein Bewusstsein für fundamentale Unterschiede zur klassischen Mechanik zu schaffen, indem sowohl philosophische Ansichten und Fragen als auch die Vorstellungen der Lernenden dazu diskutiert werden. Außerdem zeigte sich: Unterschiedliche Lehransätze in Bezug auf die Interpretation haben unterschiedliche, messbare Auswirkungen auf das Denken der Lernenden, und die Vorstellungen werden am stärksten beeinflusst, wenn die Lehrperson explizit auf die Vorstellungen und Interpretationen eingeht (Baily & Finkelstein, 2015).

Diese Ergebnisse stellen einen interessanten Ausgangspunkt für eine Untersuchung dar, in der herausgearbeitet werden kann, welche Deutungen Lernende hier als besonders plausibel empfinden könnten. In dieser Arbeit wird explizit die Akzeptanz zwei häufig anzutreffender Deutungen untersucht, weshalb folgend eine Sachanalyse durchgeführt wird.

2.3 Sachanalyse zu Deutungen in der Quantenmechanik

Wie in den vorherigen Abschnitten bereits angedeutet, ist der mathematische Formalismus der Quantenmechanik nicht intuitiv und dementsprechend mit abstrakten Interpretationen verbunden. Die Notwendigkeit kommt ebenfalls bei Messprozeduren zutage, bei denen eine Korrelation zwischen einer zu messenden dynamischen Variable eines Objektes und dem makroskopischen Indikator, welcher direkt beobachtet werden kann, hergestellt werden muss (Ballentine, 1998, S. 232). In den folgenden Abschnitten sollen deshalb die Ensemble- und die Kopenhagener Deutung beleuchtet werden. In der wissenschaftlichen *Community* findet die Kopenhagener Deutung einen hohen Zuspruch, während die Ensemble-Interpretation weniger Zustimmung erhält (Schlosshauer, Kofler & Zeilinger, 2013, S. 225). Dabei weisen experimentelle Sprechweisen viele Ähnlichkeiten zur Ensemble-Interpretation auf (Wiesner & Müller, 1996, S. 9).

Beide Deutungen wurden durch Born beeinflusst, der dem Betragsquadrat der Wellenfunktion eine konkrete Wahrscheinlichkeit bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte zugeordnet hat (Bartelmann et al., 2018, S. 94). Da in dieser Arbeit Photonen als quantenmechanische Objekte betrachtet werden, ist zu berücksichtigen, dass sie keine Wellenfunktion besitzen, nicht durch die Schrödingergleichung beschrieben werden können und es im Übrigen keinen Ortsoperator für Photonen gibt (Kuhn & Strnad, 1995, S. 150).

2.3.1 Ensemble-Interpretation

Eine eindeutige Zuschreibung auf ursprüngliche Verfasser der Ensemble-Interpretation bleibt unklar, obwohl bereits in frühen Diskursen Schrödinger und Einstein in diese Richtung argumentierten. Sie gilt als statistische Deutung des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik. In diesem Kontext beschreibt der Zustandsvektor eine große Anzahl gleichartig präparierter Systeme, liefert aber keine vollständige Beschreibung eines einzelnen Systems (Ballentine, 1998). Bei diesen kann es sich um ein Photon handeln, wobei das sogenannte Ensemble die konzeptionelle (unendliche) Menge von Photonen umfasst, die gleich präpariert wurden (Ballentine, 1970, S. 361). Die Präparation ist eine experimentelle Anordnung, durch die der gewünschte Anfangszustand eines quantenmechanischen Systems vor der eigentlichen Messung wiederholt erzeugt werden kann (Wiesner & Müller, 1996, S. 3).

Den Wahrscheinlichkeiten für die Ensembles wird unter der Annahme, dass die Quantenmechanik eine vollständige Theorie ist, eine ontologische Bedeutung zugeschrieben, da diese als relative Häufigkeiten interpretiert werden (Friebe, 2018, S. 49). Eine relative Häufigkeit gibt prinzipiell den Anteil der Elemente einer Menge wieder, bei denen eine spezifische Merkmalsausprägung vorliegt. So wird beispielsweise ein Experiment viele Male wiederholt und anhand der Messergebnisse die relative Häufigkeit erfasst (Wiesner & Müller, 1996, S. 4). Grundsätzlich macht die Quantenmechanik nach dieser Deutung keine Vorhersagen über das Ergebnis einer einzelnen Messung, da sich die Wahrscheinlichkeitsaussagen nur auf wiederholte Messungen an einem Ensemble von identisch präparierten Systemen beziehen (Wiesner & Müller, 1996, S. 4). Die Ensemble-Interpretation bietet keine Erklärung für die Entstehung von Messergebnissen. Wenn diese Deutung der Quantenmechanik als fundamentale Theorie angenommen wird, ermöglicht sie keine Aussagen über individuelle Systeme, weil es dann ausschließlich Ensembles gibt und keine einzelnen Systeme (Friebe, 2018, S. 50). Diese Auffassung teilt auch Einstein (1936):

Der am Einzelsysteme sich abspielende Vorgang bleibt freilich bei solcher Betrachtungsweise völlig unaufgeklärt; letzterer ist eben durch die statistische Betrachtungsweise aus der Darstellung völlig eliminiert (Einstein, 1936, S. 142).

Ballentine (1970) führt Gegensätze zu der im folgenden Abschnitt beleuchteten Kopenhagener Deutung auf: So wird dem Beobachter hier keine bedeutende Rolle zugeschrieben.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Betrachtung eines Quantenobjektes vor dem Beobachtungsakt, so wird nach der statistischen Deutung davon ausgegangen, dass sich ein Quantenobjekt immer an einer bestimmten Position im Raum befindet, wobei jede Position in einem Ensemble ähnlich vorbereiteter Experimente realisiert wird, während das Quantenobjekt nach der Kopenhagener Interpretation bis zur Beobachtung über alle Regionen, in denen die Wellenfunktion ungleich null ist, potentiell vorhanden ist (Ballentine, 1970, S. 361).

2.3.2 Kopenhagener Deutung

Die später als Kopenhagener Deutung bekannte Interpretation des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik wurde ursprünglich von Bohr und Heisenberg in Kopenhagen konzipiert und über viele Jahrzehnte hinweg weiterentwickelt. Im Hinblick auf die Formulierungen der Kopenhagener Deutung ist darüber hinaus festzustellen, dass Diskrepanzen bezüglich eines wirklich einheitlichen Standpunktes bestehen (Faye, 2019). Es wird beispielsweise durch Gomatam (2007, S. 4) erörtert, inwiefern Bohrs eigene Auslegung der Komplementarität grundlegende Merkmale aufweist, welche mit der (Heisenberg-)Lehrbuch-Kopenhagener Interpretation nicht in Übereinstimmung stehen und zwischen beiden lediglich oberflächliche Ähnlichkeiten erkennbar sind.

Trotzdem sollen die Ausführungen durch Bohr und Heisenberg eine Orientierung geben, um eine Deutungsformulierung vorzunehmen. Die Interpretation basiert auf dem eben genannten Prinzip der Komplementarität. Die Charakteristik einer komplementären Theorie ist nach Eidemüller (2017) folgend definiert:

Eine Theorie besitzt komplementäre Züge, wenn sie mindestens zwei sich gegenseitig ausschließende Konzepte für den gleichen von der Theorie betrachteten Gegenstandsbereich beinhaltet; Wobei jedes einzelne dieser Konzepte nicht ausreicht, um eine erschöpfende Beschreibung der betrachteten Phänomene zu liefern und deren Anwendung zu logischen Widersprüchen führt. Jedoch werden sämtliche dieser Konzepte benötigt, um den Gegenstandsbereich in all seinen Gesichtspunkten hinreichend zu beschreiben.

(Eidemüller, 2017, S. 37)

Bohr (1928, S. 245) bezeichnet die Forderung nach Kausalität und die Raum-Zeit-Darstellung als komplementäre und einander ausschließende Züge. So wird die raumzeitliche Ausbreitung des Lichtes durch die Lichttheorie dargestellt, indem beispielsweise Interferenzerscheinungen durch die wellentheoretische Superposition beschrieben werden, während die Wechselwirkung von Strahlung und Materie anhand der Erhaltungssätze die Beschreibung durch Lichtquanten erfordert (Bohr, 1928, S. 246). Wir sehen also zwei sich gegenseitig ausschließende Konzepte: die raumzeitliche Beschreibung des Lichtes durch das wellentheoretische Superpositionsprinzip und „die Aufrechterhaltung der Kausalitätsforderung bei einzelnen, durch das Wirkungsquantum gekennzeichneten Lichtprozessen“ (Bohr, 1928, S. 246).

Eine natürliche Verallgemeinerung der klassischen Beschreibung wird erst durch die Berücksichtigung beider komplementärer Ansichten ermöglicht. Insofern Eigenschaften der Quantenobjekte nur durch die Wechselwirkung mit anderen Systemen der Definition und Beobachtung zugänglich sind, stellen die Beschreibungen lediglich Abstraktionen bzw. epistemische Zugänge dar (Bohr, 1928, S. 246). Im Zusammenhang mit diesem Wechselwirkungskonzept erfordert die Betrachtung von Quantenphänomenen nach Heisenberg eine ganzheitliche Perspektive, die alle Apparate und Messgeräte einschließt (Heisenberg, 1956, S. 304). In der Analyse von Experimenten ist es entscheidend, den entsprechenden Aufbau in die Beschreibung einzubeziehen, da dieser ein wechselwirkendes System mit dem Quantenobjekt darstellt. Ein Messvorgang erzeugt eine Observable. Dabei kann keine Vorhersage gemacht werden, welcher Weg durch ein Quantenobjekt genommen wird. Dieses fundamentale Konzept der Quantenmechanik wird als Indeterminismus bezeichnet und steht im Kontrast zum aus der klassischen Physik bekannten Determinismus:

Dieser [Determinismus] kann so aufgefasst werden, dass die exakte Kenntnis der Gegenwart es erlaubt, die zukünftige Entwicklung vorherzusagen. In der klassischen Physik ist der Zustand eines Systems dann vollständig gegeben, wenn Orte und Impulse all seiner Teile gegeben sind. Aus diesen Informationen lässt sich die Zukunft des Systems genau vorhersagen, ebenso wie sich die Vergangenheit rekonstruieren lässt. (Eidemüller, 2017, S. 56)

Heisenberg (1927, S. 172) stellt in seiner Veröffentlichung zur Unschärferelation fest, dass das eben beschriebene deterministische Kausalgesetz in der Quantenmechanik ungültig ist. Eine weitere durch die Unschärferelation bedingte Abgrenzung zur klassischen Physik besteht in der Ununterscheidbarkeit von Quantenobjekten, demnach diese sich zwar in Klassen einteilen lassen, aber beispielweise innerhalb der Klasse „Photon“ keine eindeutige Identitätszuweisung einzelner Photonen mehr möglich ist (Eidemüller, 2017, S. 57). Damit kann auch keine exakte Vorhersage über die Eigenschaft einer Observablen wie zum Beispiel den Ort gemacht werden. Der Zustand des Quantenobjekts wird erst durch die Messung bekannt (Weizsäcker, 1941, S. 490). Dabei findet der „Übergang vom Möglichen“ die Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse „zum Faktischen“, die tatsächlichen Messergebnisse während des „Beobachtungsaktes“ statt (Heisenberg, 1956, S. 298-299). Es lässt sich also eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Messgrößen angeben.

Zusammenfassend geht die Ortsmessung eines Quantenobjektes mit der endlichen Änderung der dynamischen Variablen einher sowie mit einer Abwendung von der kausalen Beschreibung seines dynamischen Verhaltens, während das Wissen über den Impuls mit Unwissen in der raumzeitlichen Propagation einhergeht. Diese komplementären Merkmale der Quantenmechanik sind als Indiz für die Separation von ontologischem Objekt und Messung zu deuten (Bohr, 1928, S. 250).

Auch die Realitätszuweisung gestaltet sich gemäß der Kopenhagener Interpretation in anderer Weise als in der klassischen Mechanik. So sind ausschließlich die Messergebnisse real, während die Wellenfunktion rein epistemischer Natur ist. Die Deutung fungiert eher als ein Zugang zur Natur, der durch die inhärenten Grenzen des Beobachters begrenzt ist (Heisenberg, 1956). Durch Heisenberg (1956) wird die Quantentheorie zwar als weitgehend objektiv betrachtet, jedoch wird der Beschreibung dieser Theorie ein gewisses Maß an Subjektivität zugeschrieben, da sie nicht ohne klassische Begriffe auskommt. Da der (aus der klassischen Physik) bekannten Sprache für die Interpretation der Quantenmechanik eine bedeutende Rolle attribuiert wird, soll die Auslegung dieser nach Heisenberg folgend genauer aufgeführt werden:

Man kann feststellen, dass die aus der klassischen Physik und aus der natürlichen Sprache entlehnten Begriffe „Teilchen“ und „Welle“ beide verwendet werden, wenn es sich um die Beschreibung atomarer Phänomene handelt, und zwar werden beide Begriffe gebraucht, gleichgültig ob es sich um Gebilde mit Ruhmasse (z. B. Elektronen, [...]) oder ohne Ruhmasse (Photonen, [...]) handelt. Der Physiker von heute empfindet also die quantentheoretische Beschreibung dieser Gebilde nicht als dualistisch. Er hat sich daran gewöhnt, dass bei der Übertragung dieser einheitlichen Beschreibung in die natürliche Sprache verschiedene komplementäre Bilder auftreten können. [...] Die von Born und Biem vertretene und angewandte Sprache [...] ist eine gewachsene Sprache, die man nicht ohne Not ändern sollte und die gerade durch ihren Reichtum an Bildern ein Gefühl für die Zusammenhänge auch dort vermittelt, wo die exakte mathematische Analyse zunächst sehr kompliziert wäre. (Heisenberg et al., 1969, S. 113)

Demzufolge können quantenmechanische Messergebnisse je nach Kontext raumzeitlich, weltheoretisch oder durch quantisierte Wechselwirkung beschrieben werden.

2.3.3 Gegenüberstellung der Deutungen

Nachdem beide Deutungen ausführlich thematisiert wurden, werden sie in diesem Abschnitt gegenübergestellt. Hierzu dienen die bereits aufgeführten Aspekte als Grundlage für einen Vergleich, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1

Gegenüberstellung der Kopenhagener Deutung und Ensemble-Interpretation

Kriterien	Kopenhagener Deutung	Ensemble-Interpretation
Wahrscheinlichkeit	Die Wahrscheinlichkeit bezieht sich auf ein einzelnes Quantensystem.	Anhand wiederholter Messungen mit gleich präparierten Ensembles von Quantensystemen werden relative Häufigkeiten erfasst. Die Wahrscheinlichkeit bezieht sich nur auf das Ensemble.
Vorhersage	Die Quantenmechanik ist objektiv indeterministisch, also zufällig. Das Verhalten des Einzelsystems ist nicht vorhersehbar oder wiederholbar.	Die Häufigkeitsverteilung aller messbaren Größen wird durch die Präparation determiniert.
Messung	Zum Zeitpunkt der Messung wechselwirkt das Objekt mit dem der Messapparat, sodass das Mögliche in Etwas Faktisches übergeht.	Die Messung ist unabhängig von der Präparation. Es wird eine Vielzahl von Messungen herangezogen.
Beobachter	Der Beobachter spielt eine bedeutende Rolle.	Die Berücksichtigung des Beobachters ist nicht notwendig.
Objekt	Es wird ein Einzelsystem betrachtet. Das Quantenobjekt ist bis zur Beobachtung über alle Regionen, in denen die Wellenfunktion ungleich Null ist, potenziell vorhanden.	Es werden ausschließlich identisch präparierte Ensembles behandelt. Für ein Einzelsystem werden keine Aussagen getroffen.
Ontologie	Nur die Ergebnisse von Messungen sind real. Quantenzustände vor der Messung sind objektiv, aber nicht real. Es können Aussagen über das Einzelsystem gemacht werden. Der Formalismus ist epistemisch zu verstehen und nicht ontologisch.	Es gibt keine realen Beschreibungen für das Einzelsystem. Die statistischen Aussagen der Gesamtheit werden im Sinne der relativen Häufigkeiten als real betrachtet.

Anmerkung. Die Informationen basieren auf den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2

2.4 Animismus bei der Vermittlung naturwissenschaftlicher Sachverhalte

Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, variieren die Interpretationen in Bezug auf die Frage, ob eine Aussage auf ein Einzelsystem bezogen werden kann. Trifft dies wie bei der Kopenhagener Deutung zu, so könnte damit eine animistische Perspektive einhergehen. Daher wird an dieser Stelle die Rolle des Animismus bei der Vermittlung naturwissenschaftlicher Konzepte erörtert.

Gemäß Püttschneider und Lück (2004, S. 167) kann unter dem Begriff des Animismus „eine Beseelung der unbelebten Natur mittels Analogie- und Metaphernbildung“ verstanden werden. Dabei werden „vertraute Eigenschaften der belebten Natur auf Phänomene der unbelebten Natur [übertragen], sei es, dass die Phänomene beseelt werden, ein Bewusstsein erhalten oder dass ein körperlicher Bezug hergestellt wird“ (Püttschneider & Lück, 2004, S. 167). Lernende schätzen animistische Erklärungen eines naturwissenschaftlichen Themas positiver ein als naturwissenschaftlich-objektive Vermittlungen, wobei der modellhafte Charakter der animistischen Zugänge von diesen identifiziert wird (Püttschneider & Lück, 2004, S. 173). Eine ähnliche, ebenfalls geläufige Denkweise stellen Anthropomorphismen dar, demnach eine „Übertragung von menschlichen Eigenschaften und Denkweisen auf die Natur“ stattfindet (Hammann & Asshoff, 2014, S. 32). Auch Anthropomorphismen enthielten in Studien mit Schülerinnen und Schülern weitgehend Zuspruch (Hammann & Asshoff, 2014). In seinen Untersuchungen zur didaktischen Rekonstruktion argumentiert Kattmann (2005), dass anthropomorphisierende Sprache unvermeidbar ist und eine explizite Auseinandersetzung damit einen förderlichen Ansatzpunkt für das Lernen darstellen kann. Schülerinnen und Schüler der Sek. II neigen dazu, Photonen als kleine, leuchtende Kugeln oder Partikel zu konzeptualisieren (Mashhadi & Woolnough, 1999, S. 515). Ähnlich zum Konzept des Animismus könnten Schülerinnen und Schüler in dieser Vorstellung eine Art von Eigenleben erkennen, das ihnen ein vereinfachtes mentales Modell und ein besseres Verständnis ermöglicht. Es sollte aber in jedem Fall nach den oben aufgeführten Punkten explizit auf den nicht ontologischen Charakter der Beschreibung hingewiesen werden. Aussagen wie „ein Photon wandert“ oder „es wählt einen Weg“ können als Anthropomorphismen kategorisiert werden, da hier typisch menschliches Verhalten für die sprachliche Beschreibung der Phänomene zur Verwendung kommt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Animismen und Anthropomorphismen aufgrund ihrer Ähnlichkeiten nicht weiter differenziert und unter dem Begriff Animismus zusammengefasst.

2.5 Experimentelle Zugänge mit Einzelphotonen zur Quantenphysik

Quantenphysikalische Experimente repräsentieren eine zusätzliche Methode zur Minderung der in Abschnitt 2.1 dargestellten Herausforderungen im Verständnis der Quantenmechanik. Ferner eröffnen die Ergebnisse solcher Experimente Interpretationsspielräume, die es ermöglichen, in dieser Arbeit verschiedene Deutungen experimenteller Resultate vorzunehmen und deren Akzeptanz zu evaluieren. Nachstehend erfolgt deshalb eine Auseinandersetzung mit der Bedeutung von Einzelphotonenexperimenten im Kontext der Lehr-Lern-Forschung. Diesbezüglich werden neben der Begutachtung des Einsatzes in der Hochschullehre auch Unterrichtskonzepte betrachtet, da diese bereits evaluierte experimentelle Zugänge darstellen und somit eine Orientierung für die Planung der Studie bieten.

2.5.1 Einzelphotonenexperimente in der Hochschullehre

Unter diversen Berufsgruppen wie Schul- und Hochschullehrkräften sowie Wissenschaftlern herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass die Vermittlung von Konzepten wie Verschränkung und Quantenmessungen ein essenzielles Element in der Bildungspraxis darstellen sollte (Merzel et al., 2024, S. 11). Es bestehen jedoch noch zahlreiche ungeklärte Fragen darüber, wie solche Experimente in der Lehre genutzt werden können, um einen konkreten, nicht ausschließlich mathematischen Zugang zu diesem Bereich zu entwickeln. Eine Kategorie solcher Quantenmessungen wird durch Einzelphotonenexperimente realisiert.

Eine empirische Studie durch Borish und Lewandowski (2023) untersuchte deren Verwendung in der Hochschullehre bzw. was es für Lehrende und Studierende bedeutet, Quanteneffekte in Experimenten zu sehen, und wie diese Experimente zur Erreichung von Lernzielen beitragen. Dazu wurden halbstrukturierte Interviews mit 14 Lehrenden und 14 Studierenden durchgeführt und mittels thematischer Codierungsanalyse ausgewertet (Borish & Lewandowski, 2023, S. 4). Dabei zeigt sich mitunter ein positiver Einfluss auf das Erreichen von Lernzielen wie dem Herstellen einer Mathematik-Experiment-Verbindung und dem Gewinn einer Intuition bezüglich der Quantenmechanik (Borish & Lewandowski, 2023). Obendrein wird der Einsatz von Einzelphotonenexperimenten durch Lernende als motivierend und interessensfördernd bewertet (Borish & Lewandowski, 2023, S. 12).

In quantitativer Hinsicht lässt sich ein positiver Effekt auf die Leistung durch die Einbindung von Einzelphotonenexperimenten feststellen: Studierende, die neben einem herkömmlichen Quantenmechanik-Kurs freiwillige Laborexperimente mit Einzelphotonen durchführten, erzielten signifikant bessere Ergebnisse in der Abschlussklausur als jene Kursteilnehmer, welche die Laborexperimente hingegen nicht absolvierten (Galvez, 2010, S. 518). Die vorliegenden Forschungsergebnisse legen nahe, dass der Einsatz von Photonexperimenten einen positiven Effekt auf das Lernen haben kann. Daher wird dafür plädiert, genauer zu untersuchen, welche Konzepte auf welche Art am lernförderlichsten präsentiert werden können (Borish & Lewandowski, 2023, S. 16). Im folgenden Abschnitt soll nun die Evaluation der Anwendung im schulischen Kontext betrachtet werden.

2.5.2 Einzelphotonenexperimente im schulischen Kontext

Für den Einsatz von quantenphysikalischen Experimenten im schulischen Kontext werden das Erlanger Unterrichts-konzept sowie ein an der Ruhr-Universität entwickelter phänomenologischer Zugang betrachtet und die verwendete Deutung genannt.

Das Erlanger Unterrichts-konzept zur Quantenoptik wurde für den Einsatz an der gymnasialen Oberstufe entwickelt und behandelt indes quantenoptische Experimente. Über vier Lehreinheiten werden Aspekte wie die Detektion nichtklassischer Lichtphänomene, die Präparation von Einzelphotonenzuständen sowie die Unteilbarkeit von Photonen mittels Strahlteiler und die Interferenz einzelner Photonen anhand des Michelson-Interferometers eingehend behandelt (Bitzenbauer, 2020, S. 40). Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den grundlegenden Prinzipien der Quantenphysik, um semiklassische und mechanistische Erklärungsansätze zu vermeiden. Diese Prinzipien werden zwar nicht unmittelbar von den durchgeführten Experimenten abgeleitet, jedoch spielen sie eine zentrale Rolle in der didaktischen Vermittlung (Bitzenbauer, 2020). Nach Bitzenbauer (2020) ist dieses Lehrkonzept geeignet, ein solides Verständnis der Quantenphysik zu fördern und den Schülerinnen und Schülern eine reflektierte Auseinandersetzung mit mechanistischen Denkweisen zu ermöglichen. Im Erlanger Unterrichts-konzept wird vermieden, über die Position von Photonen zwischen Quelle und Detektor zu sprechen. Der Ansatz basiert insgesamt auf der Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik, da angenommen wird, dass dadurch eine klare und verständliche Möglichkeit geboten wird, über Quantenphysik zu sprechen (Bitzenbauer, 2021, S. 7).

An der Ruhr-Universität Bochum wurde im Rahmen einer Masterarbeit durch Cleve (2023) ebenfalls ein Lehrgang entwickelt. Dieser bringt die Wesenszüge der Quantenphysik nach Küblbeck und Müller (2003) mit Einzelphotonenexperimenten in Verbindung. Dazu wurden sowohl qualitative Beschreibungen als auch mathematische Modellierungen der Experimente in den Lehrgang integriert. Eine Evaluation des Lehrgangs mittels Akzeptanzbefragung weist auf die Akzeptanz der grundlegenden Kernideen durch Sek.-II- Schülerinnen und Schüler hin (Cleve, 2023). Dem Lehrgang liegt die Kopenhagener Deutung zugrunde. Begründet wurde der Einsatz damit, dass es sich um die „am weitesten verbreitete Interpretation handelt und mit dieser nicht grundsätzlich Lernhindernisse einhergehen“ (Cleve, 2023, S. 33).

Außerdem wurde angenommen, die statistische Deutung erweise sich „aus Sicht der Schülerinnen und Schüler als weniger tragfähig“ und festige bei diesen „inadäquate Vorstellungen“ (Cleve, 2023, S. 34).

Insgesamt lässt sich bei beiden Unterrichtskonzepten ein Mehrwert durch die Integration von quantenphysikalischen Experimenten feststellen, weil abstrakte Konzepte greifbarer gemacht werden. Die Auswahl der angewandten Deutungen beruht jedoch in beiden Fällen auf Annahmen. Daher wäre es von wissenschaftlichem Interesse zu untersuchen, inwieweit die gewählten Deutungen die Akzeptanz der Schülerinnen und Schüler beeinflussen und ob möglicherweise tatsächlich deutungsabhängige Schwierigkeiten bei den Lernenden erkennbar sind.

3 Forschungsfragen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde deutlich, inwiefern der Einsatz quantenphysikalischer Realexperimente sowohl im universitären als auch im schulischen Kontext eine positive Wirkung auf den Lernprozess haben kann (siehe 2.5). Angesichts der Tatsache, dass der indeterministische Charakter quantenphysikalischer Konzepte für Lernende potenziell herausfordernd ist (siehe 2.1), kommt dem lernförderlichen Effekt von Realexperimenten somit eine besondere Bedeutung zu. Damit einhergehend ist die Ausarbeitung und Evaluation der Vorstellung und Vermittlung solcher Realexperimente relevant. Es wurden zwar bereits Lehrkonzepte entwickelt, jedoch beschränkt sich die Evaluation meist nicht auf einzelne Experimente, sondern umfasst eine Vielzahl von Lehrinhalten und Experimenten, die nach dem Prinzip des *Design-Based Research* evaluiert wurden. *Design-Based Research* bezeichnet hier die theoriegeleitete Entwicklung und anschließende Erprobung einer Intervention, die für den Einsatz in realen Unterrichtskontexten konzipiert ist. Wie zuvor beschrieben, basieren diese Gestaltungen zumindest im Deutungskontext auf Annahmen (siehe 2.5.2). Folglich erscheint es geboten, einen retrospektiven Schritt zu unternehmen und zu untersuchen, wie quantenphysikalische Realexperimente im Einzelnen für Lernende noch plausibler gestaltet werden können. Da bereits ein messbarer Einfluss auf das Denken der Lernenden durch die Verwendung verschiedener Lehransätze in Bezug auf quantenphysikalische Deutungen nachgewiesen wurde, es ansonsten jedoch noch wenig Studien zu diesem Thema in der Grundlagenforschung gibt (siehe 2.2), eröffnet sich ein Forschungsfeld im Zusammenhang mit der Interpretation von Experimenten. Für eine derartige Untersuchung sollte die Kopenhagener Deutung berücksichtigt werden, da sie in der wissenschaftlichen Gemeinschaft die am weitesten verbreitete und akzeptierteste Interpretation darstellt. Spiegelt sich diese Akzeptanz auch bei Schülerinnen und Schülern wider, oder bevorzugen sie eine andere Deutung? Welche Deutungen werden in neuen Experimentierkontexten verwendet? In diesem Zusammenhang kann die Ensemble-Deutung als Vergleich herangezogen werden, da sie sich, wie in Kapitel 2.3 herausgearbeitet, fundamental von der Kopenhagener Deutung unterscheidet und für manche Unterrichtskonzepte bevorzugt wurde (siehe 2.5.2). Damit ergeben sich für diese Studie folgende Forschungsfragen:

1. Forschungsfrage: Akzeptanzvergleich der Kopenhagener bzw. Ensemble-Deutung

Inwiefern akzeptieren Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II die Deutung eines Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen nach der Kopenhagener Deutung bzw. der Ensemble-Variante, und worin bestehen Unterschiede in der Akzeptanz?

2. Forschungsfrage: Verwendung der Deutung

Inwiefern verwenden Schülerinnen und Schüler in experimentellen Kontexten die Ensemble- und die Kopenhagener Deutung?

3. Forschungsfrage: Schülervorstellungen

Welche Schülervorstellungen treten auf und manifestieren sich diese unter Verwendung beider Deutungen?

4 Forschungsdesign

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Akzeptanzbefragung geplant und durchgeführt, deren Gestaltung in diesem Kapitel erläutert wird. Die Untersuchung setzt Quantenexperimente ein, weshalb vorab die physikalischen Grundlagen diesbezüglich dargelegt werden, um ein grundlegendes Verständnis für die nachfolgende Datenerhebung zu schaffen. Hier wird ebenfalls erläutert, wie den Probanden die relevanten Inhalte im Rahmen der Befragung präsentiert werden. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird die Methodik der Akzeptanzbefragung beschrieben, einschließlich einer Definition des spezifischen Akzeptanzbegriffs, der in dieser Untersuchung verwendet wird. Nach der Skizzierung der Inhalte, des Ablaufs und der Methodik der Befragung wird abschließend die ausgewählte Stichprobe für die Befragung vorgestellt.

4.1 Physikalische Grundlagen

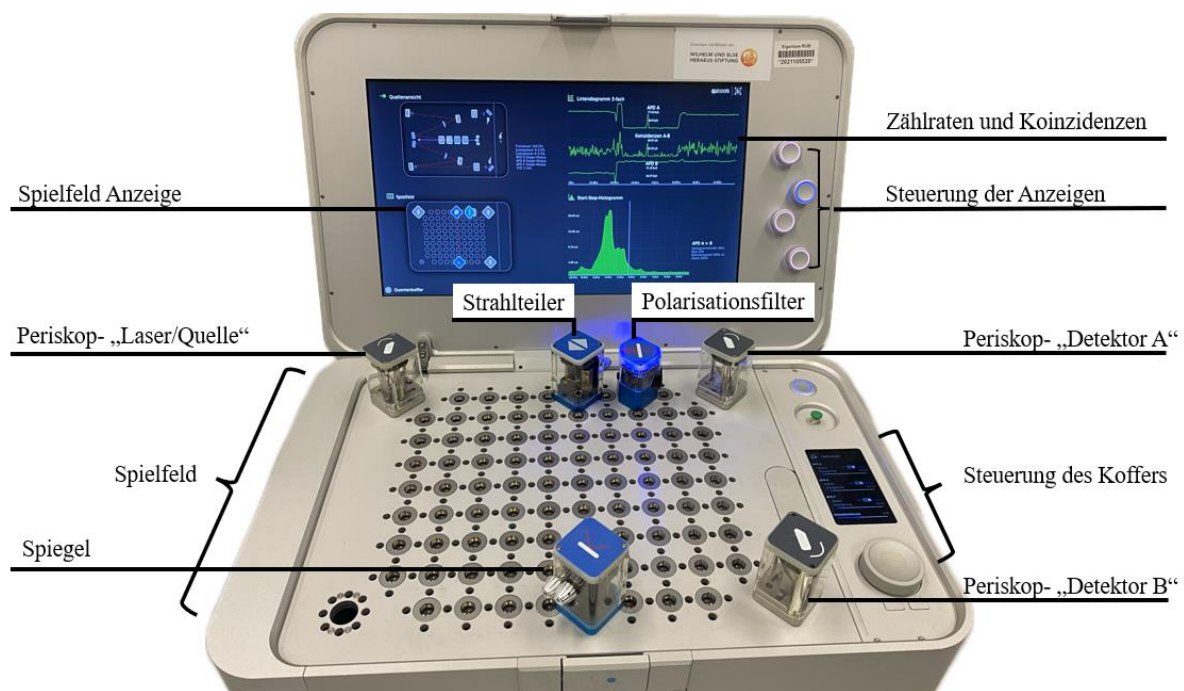
Zur Untersuchung der Akzeptanz unterschiedlicher Interpretationen in der Quantenphysik bietet sich ein phänomenologischer Ansatz an, da dieser es ermöglicht, die Deutung der Beobachtungen in den Mittelpunkt zu stellen. Ein Experiment mit Einzelphotonen am Strahlteiler erscheint in diesem Zusammenhang besonders geeignet, da es die Unteilbarkeit von Photonen anschaulich demonstriert. Das Einzelphotonenexperiment kann mit einem Quantenkoffer der Firma *qutools* realisiert werden. Nachfolgend werden die experimentellen Bauteile und Methoden erläutert, um die Grundlagen des im Rahmen der Erhebung durchgeführten Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen zu beleuchten. Überdies wird auch angegeben, inwiefern eine didaktische Reduktion zwecks Elementarisierung vorgenommen wird (Kircher & Girwidz, 2020b, S. 161).

4.1.1 Quantenkoffer

Der Quantenkoffer ist ein tragbares und benutzerfreundliches Quantenphotonik-Labor (Qtools, o.D.) und eignet sich für die Akzeptanzbefragung hinsichtlich der Deutung eines Quantenexperiments. In Abbildung 1 ist der Quantenkoffer mit für die Erhebung relevanten Bausteinen, die nachfolgend genauer erläutert werden, dargestellt.

Abbildung 1

Ansicht des Quantenkoffers und der Experimentkomponenten



Im Inneren des Quantenkoffers sind eine Justierlaserquelle und eine Einzelphotonenquelle integriert. Das im Koffer erzeugte Licht wird über ein Periskop nach oben und über das Spielfeld reflektiert. Daher wird dieses Periskop in Abbildung 1 vereinfacht als „Laser“ bzw. „Quelle“ bezeichnet. Hinter den Versuchsaufbauten wird das Licht durch zwei weitere Periskope wieder in das Innere des Koffers zu jeweils einem Detektor reflektiert. Aus diesem Grund sind die Periskope in Abbildung 1 als „Detektor A“ und „Detektor B“ dargestellt. Die Detektoren können in zwei Modi messen. So wird im sogenannten Cw-Modus die Lichtintensität detektiert und angezeigt. Die Zählraten beschreiben die detektierten Photonen pro Sekunde. Mit dem Quantenkoffer können ca. 200.000 Photonen pro Sekunde emittiert und detektiert werden.

Auf das Spielfeld werden je nach Experiment verschiedene Bauteile gesteckt. Ein grundlegendes Bauteil ist ein Strahlteiler, bei dem es sich um einen halbdurchlässigen Spiegel handelt. Dieser teilt einen unter 45° auftreffenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen. Dabei wird das Licht zu 50 % durchgelassen und zu 50 % reflektiert. Mit dem 45° -Spiegel kann ein Lichtstrahl beispielsweise auf eines der Periskope gelenkt werden.

Für das Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen ist hauptsächlich der Aufbau auf dem Spielfeld von Bedeutung, während grundlegende Prozesse wie die Erzeugung und Detektion von Einzelphotonen innerhalb des Koffers stattfinden.

Reduktion: Im Rahmen der Akzeptanzbefragung werden die Periskope nicht benannt, sondern direkt als Laser bzw. Quelle und Detektoren eingeführt, um die Anzahl der Fachbegriffe zu reduzieren und damit sichtbare Komponenten zu fokussieren. Die Periskope, welche zu den Detektoren reflektieren, werden außerdem mit den Buchstaben A und B beschriftet.

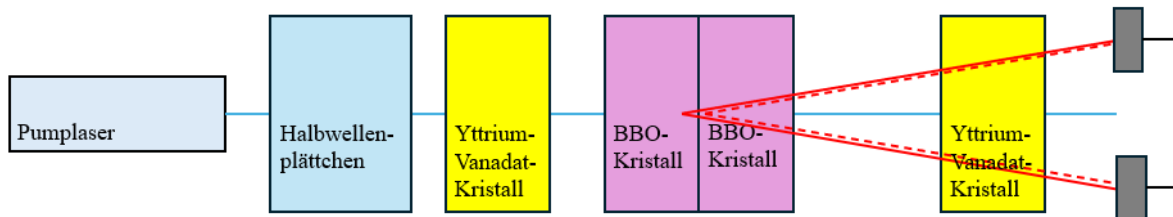
Erzeugung von Einzelphotonen und Detektion

Als sogenannter Pumplaser wird ein UV-Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 405 nm verwendet. Dieser wird auf einen nichtlinearen Beta-Barium-Borat-Oxyd-Kristall (BBO-Kristall) fokussiert. Es wird ein außerordentlicher Anteil des Pumplaserstrahls gebrochen und vom ordentlichen Anteil getrennt. Dies liegt am doppelbrechenden Charakter des nichtlinearen BBO-Kristalls, der dazu führt, dass Lichtwellen in zwei orthogonal zueinander polarisierte Komponenten aufgespalten werden: eine ordentliche Welle und eine außerordentliche Welle (Ogriseg, 2016, S. 9). Durch spontane parametrische Fluoreszenz können dabei unter den Bedingungen der Energie- und Impulserhaltung Photonenpaare mit einer Wellenlänge von jeweils 810 nm erzeugt werden (Bronner, 2010, S. 31 –32). Die Umwandlungsrate bei diesem Prozess beträgt ca. 1 Photon pro 100 Milliarden Pump-Photonen (Qtools, o. D.). Wenn ein weiterer BBO-Kristall mit einem Winkel von 90° um die Ausbreitungsrichtung des Pumpstrahls gedreht und am ersten Kristall befestigt wird, wie in diesem Versuchsaufbau, interagiert der erste Kristall mit vertikal polarisiertem Licht und der zweite Kristall mit horizontal polarisiertem Licht. Der erste BBO erzeugt aus vertikal polarisiertem Photon zwei horizontal polarisierte Photonen, während der zweite BBO aus horizontal polarisiertem Photon zwei vertikale Photonen generiert (Ogriseg, 2016). Dadurch entsteht eine Superposition an Polarisationszuständen.

Vor und hinter dem BBO-Kristall sind Yttrium-Vanadat-Kristalle (YVO) positioniert, die darauf abzielen, die longitudinale Phasenänderung auszugleichen, die im BBO-Kristall entsteht und sich im Kristallpaar akkumuliert, also die Laufzeitunterschiede zu kompensieren (Ogriseg, 2016, S. 21). Der beschriebene Aufbau der Photonenquelle ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2

Schematische Darstellung zur Erzeugung von Photonenpaaren



Das Funktionsprinzip der im Experiment verwendeten *Avalanche*-Photodioden (ADP) basiert auf dem photoelektrischen Effekt und dient der Erfassung von Photonen (Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, 2020). *Avalanche* bedeutet hier übersetzt Lawine, da ein lawinenartiger Effekt das Signal verstärkt und die Messung von Einzelphotonen pro Sekunde im sogenannten Geiger-Modus ermöglicht.

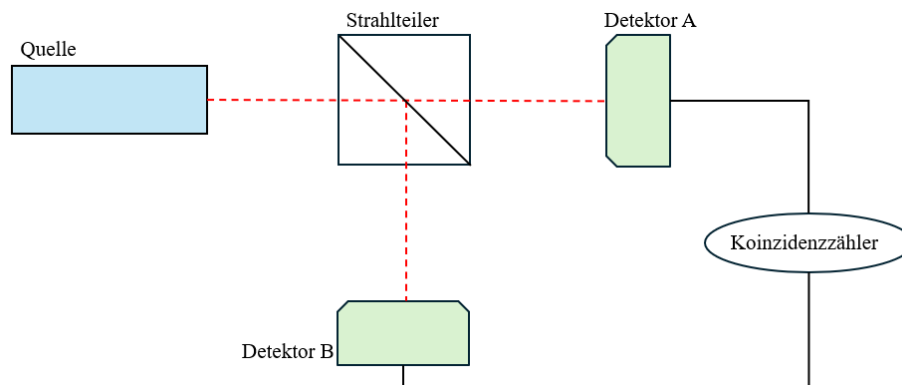
Reduktion: Die Prozesse im Inneren des Koffers werden im Rahmen der Akzeptanzbefragung nicht beleuchtet. Es wird ausschließlich darauf hingewiesen, dass der Koffer neben einem Laser auch einzelne gleich präparierte Photonen erzeugen kann und die Quelle umgestellt wird. Der Messprozess wird ebenfalls nicht ausführlich erläutert, da dieser nicht fokussiert wird. Auch der Name der Detektoren wird nicht benannt, um die Anzahl der Fachbegriffe zu reduzieren. Es wird ausschließlich zwischen Messung der Lichtintensität und Zählrate unterschieden.

4.1.2 Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen

Der Strahlteiler als optisches Bauelement teilt einen Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen. Wenn beispielsweise eine Glasscheibe unter einem 45° Winkel in den Strahlengang gebracht wird, wird das Licht unter einem Winkel von 90° reflektiert, während ein anderer Teil die Scheibe durchdringt (Transmission), wie im obigen Abschnitt bereits aufgeführt. Treffen Einzelphotonen auf den Strahlteiler, werden diese entweder transmittiert oder reflektiert. Um dieses Phänomen zu untersuchen, wird hinter einer Photonenquelle ein Strahlteiler platziert und der transmittierte und der reflektierte Teil detektiert, wie in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3

Schematischer Versuchsaufbau des Strahlteilerexperimentes



Da „Detektor B“ nicht direkt hinter den Strahlteiler aufgebaut werden kann, wird ein Spiegel eingesetzt, um auf das Periskop zu lenken, wie in Abbildung 1 ersichtlich. Der Quantenkoffer ermöglicht nicht nur die Darstellung der Zählraten, sondern auch von Koinzidenzen. Diese beziehen sich auf das gleichzeitige Messen von Ereignissen in den Detektoren A und B innerhalb eines Koinzidenzintervalls. Bei dem Strahlteilerexperiment treten beinahe keine Koinzidenzen auf, was darauf schließen lässt, dass Photonen am Strahlteiler nicht geteilt werden.

4.1.3 Polarisation von Licht und Polarisationszustände von Photonen

Da der Einsatz von Polarisationsfiltern eine Erweiterung darstellt und diese für die Anwendungsphase der Befragung relevant ist, werden hier die physikalischen Grundlagen der Polarisation erläutert. Zunächst werden die Polarisations-eigenschaften von Licht betrachtet, um anschließend Vergleiche mit den Polarisationszuständen von Photonen vorzunehmen.

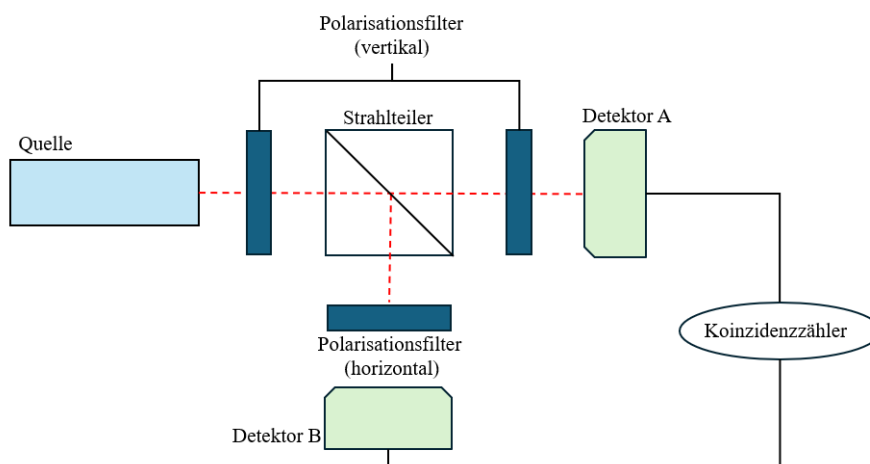
Diese Reihenfolge entspricht auch dem Zugang, den die Schülerinnen und Schüler erhalten. Natürliches Licht ist im Allgemeinen nicht linear polarisiert. Eine bestimmte Polarisationsrichtung kann entstehen, wenn Licht auf Materie trifft und mit Molekülen oder Atomen interagiert. Licht kann als eine transversale elektromagnetische Welle betrachtet werden, wobei bei linear polarisiertem Licht die Orientierung des elektrischen Feldes in einer Ebene konstant bleibt, also der elektrische Feldvektor entlang einer festen, auf der Ausbreitungsrichtung senkrecht stehenden Geraden eine hin- und hergehende Bewegung beschreibt, womit sich Betrag und Vorzeichen des elektrischen Feldes zeitlich verändern (Hecht, 2023, S. 643). Im Gegensatz zu Licht, dessen Polarisation als Schwingungsrichtung des elektromagnetischen Feldes beschrieben werden kann, wird die Polarisation von Photonen in Form von Zuständen beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit der Transmission von Photonen an einem Polarisationsfilter verhält sich analog zum Anteil des klassischen Lichts, das durch einen Polarisationsfilter hindurchgeht (Cleve, 2023, S. 10). Als Formel kann demnach das Gesetz von Malus herangezogen werden, welches für Lichtintensitäten folgende Form hat:

$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$$

Demnach beschreibt $I(0)$ die maximale Bestrahlungsstärke und $I(\theta)$ die Intensität des linear polarisierten Lichtes, nachdem natürliches Licht auf einen Linearpolarisator trifft, dessen Achse um einen Winkel θ gegen die Senkrechte zur Ausbreitungsrichtung geneigt ist (Hecht, 2023, S. 643). In der Anwendungsphase der Akzeptanzbefragung werden ein vertikal eingestellter Polarisationsfilter vor den Strahlteiler und jeweils ein vertikaler Polarisationsfilter vor Detektor A und ein horizontal eingestellter Filter vor Detektor B gestellt, wie in Abbildung 4 gezeigt:

Abbildung 4

Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen und Polarisationsfiltern



Die Polarisationszustände der Photonen vor dem ersten Filter sind unbestimmt. Werden Photonen an dem ersten vertikalen Polarisationsfilter, also mit dem Winkel $\alpha=90^\circ$ transmittiert, weisen die Photonen Polarisationszustände mit $|\alpha\rangle$ auf. Für die Transmission von Photonen an einem Polarisationsfilter mit dem Winkel β kann folgende Wahrscheinlichkeitsaussage analog zu dem oben genannten Gesetz von Malus getroffen werden (Bonner, 2010, S. 122):

$$P_{\text{Transmittiert}} = \cos^2(\beta - \alpha)$$

Damit ergibt sich für den in Abbildung 4 gezeigten Aufbau eine Wahrscheinlichkeit von fast 0 %, dass Photonen in Detektor B gemessen werden, da der Polarisationswinkel $\beta=90^\circ$ beträgt. Für die Kombination aus zwei vertikalen Polarisationsfiltern ist die Zählrate in Detektor A entsprechend gleichbleibend zu erwarten (unter Berücksichtigung der 50 % des Strahlteilers).

Reduktion: Da Polarisationsfilter im Kontext der Akzeptanzbefragung erst während der Anwendungsphase zum Einsatz kommen, wird der Begriff der Polarisation zunächst nur im Hinblick auf Licht erläutert. Über die Polarisationszustände von Photonen wird lediglich angegeben, dass diese im Experiment unbestimmt sind. Dies soll gewährleisten, dass die Probanden ihre Ausdrucksweise möglichst frei wählen können, ohne durch vorgegebene Sprechweisen beeinflusst zu werden.

4.2 Gestaltung und Präsentation des Informationsangebotes

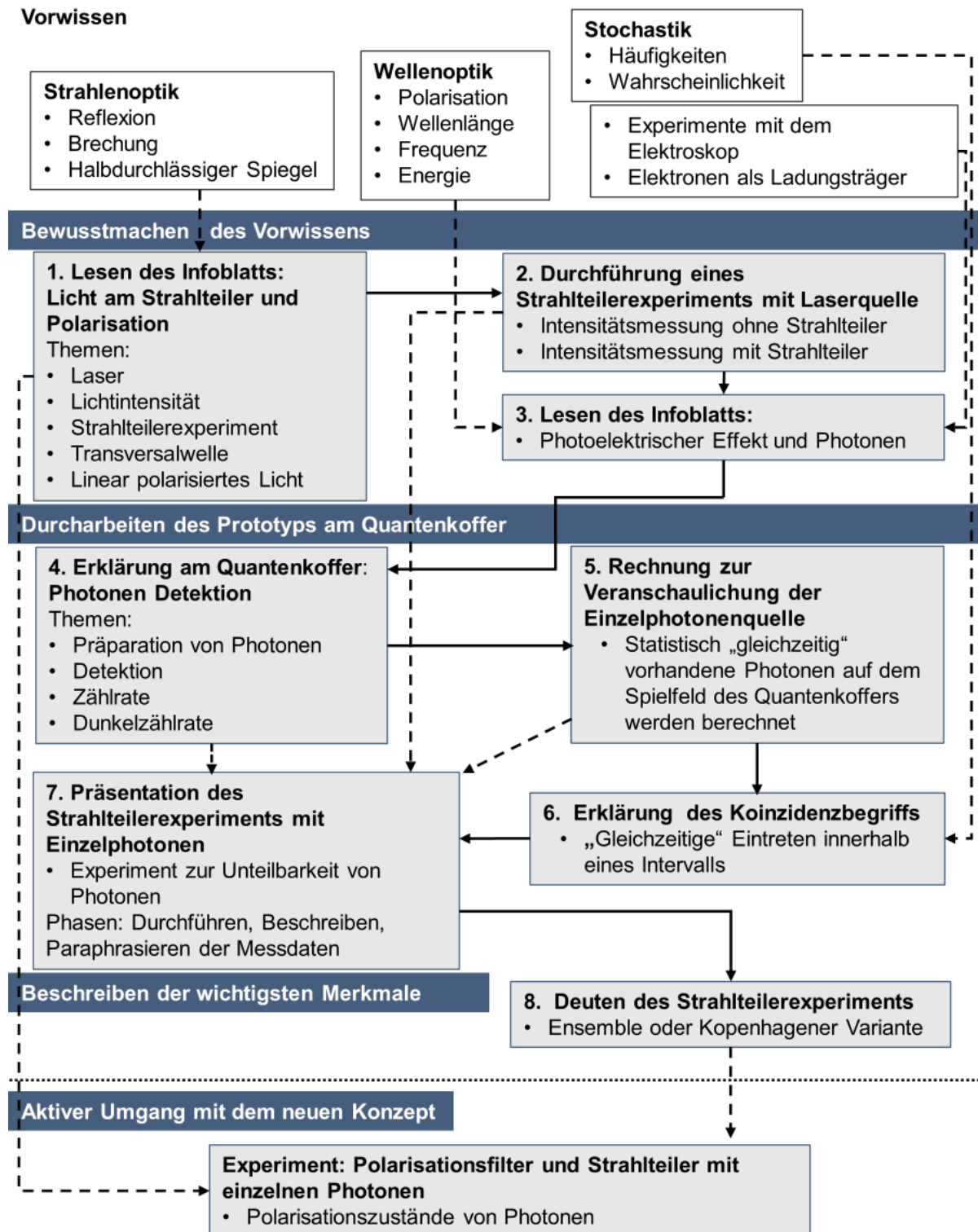
Da diese Arbeit die Akzeptanz unterschiedlicher quantenphysikalischer Deutungen von Einzelphotonenexperimenten bei Schülerinnen und Schülern untersucht, ist es erforderlich, diese Deutungen in ein adäquates Informationsangebot zu integrieren. Nachdem im vorangegangenen Kapitel die physikalischen Grundlagen der Experimente erläutert und bereits Reduktionen vorgenommen wurden, wird in diesem Abschnitt die didaktische Gestaltung dargelegt.

Um einen Überblick über die elementaren Inhalte zu erhalten, wird die Prozessstruktur des Informationsangebotes auf Seite 29 in Form eines Prozessdiagramms präsentiert. Dabei werden in Anlehnung an Kircher und Girwidz (2020a, S. 112 –114) Darstellungselemente eines Sachstrukturdiagramms berücksichtigt, auch wenn es sich nicht um ein solches handelt. Neben dem zeitlichen Verlauf und den inhaltlichen Verknüpfungen wird auch ein Einblick in das relevante Vorwissen gewährt, an das angeknüpft wird. Inhaltliche Elemente, wie Begriffe und Anwendungskontexte, werden durch Blöcke gemäß Müller und Duit (2004) charakterisiert. Die Verbindungen zwischen den thematischen Blöcken werden durch Pfeile dargestellt: Einfache Pfeile und Zahlen symbolisieren die zeitliche Abfolge, während gestrichelte Pfeile zusätzliche inhaltliche Voraussetzungen anzeigen. Das Vorwissen ist in weißen Kästen hinterlegt und umfasst Inhalte, die bereits in der Sekundarstufe I oder zumindest zu Beginn der Sekundarstufe II behandelt wurden. Unterhalb dessen sind die spezifischen Inhalte der Lerneinheit aufgeführt, wobei deren Reihenfolge durch eine Nummerierung kenntlich gemacht wird. Außerdem sind die Phasen nach dem Basismodell „Konzeptbilden“ nach Oser und Baeriswyl (2001) in Blau hinterlegt. Um das vorhandene Vorwissen zu explizieren und sicherzustellen, dass alle Teilnehmenden auf dem gleichen Stand sind, werden manche Inhalte zu Beginn des Informationsangebotes erneut behandelt.

Letztlich bereiten die Inhalte die Durchführung und Interpretation des Experiments zur Unteilbarkeit von Photonen vor. Die untere gestrichelte Linie in Abbildung 5 trennt die inhaltlichen Komponenten des Angebotes vom Anwendungskontext, der erst nach dem eigentlichen Informationsangebot thematisiert wird und ein Experiment zur Polarisation einzelner Photonen umfasst.

Abbildung 5

Prozessdiagramm des Informationsangebotes der Erhebung



Anmerkung. Die weiß hinterlegten Felder stehen für das Vorwissen und die Schritte 1 bis 8 stellen Inhalte des Informationsangebotes dar. Das Experiment mit Polarisationsfiltern (unter gestrichelter Linie) wird im Anwendungskontext eingesetzt. Schwarze Pfeile: Zeitliche Abfolge und Voraussetzung; gestrichelte Pfeile: Inhaltliche Voraussetzung; Blaue Felder: 4 von 5 Phasen des Basismodells „Konzeptbilden“ nach Oser und Baeriswyl (2001).

Nachdem die Struktur der Inhalte erörtert wurde, sollen nun weitere Ebenen berücksichtigt werden. Auf der Ebene der Sichtstruktur kann die Akzeptanzbefragung, welche in Form eines interviewähnlichen Einzelgesprächs zwischen der Interviewleitung und den Probanden gestaltet ist, als soziale Interaktionsform beschrieben werden. Diese Struktur weist Parallelen zur Lehrer-Schüler-Interaktion auf, da die Interviewleitung teilweise die Rolle eines Wissensvermittlers und Moderators übernimmt, wie es für die Lehrrolle charakteristisch ist. Die Kommunikation verläuft bidirektional, wobei die Probanden aktiv teilnehmen, indem sie Fragen stellen sowie ihre Meinungen und Ideen offen einbringen. Medial wird das bereits in den vorherigen Kapiteln erläuterte Experiment eingesetzt. Prinzipiell basiert die Ausgestaltung des Lernangebotes auf selektierten Merkmalen guter Unterrichtsqualität, die einer Übersicht von Krabbe und Fischer (2020, S. 124–125) entnommen sind. Die ausgewählten Qualitätsmerkmale sind im Folgenden aufgelistet und deren Einsatz begründet.

1 Strukturiertheit:

Durch die Erstellung und Verwendung eines Leitfadens (siehe Anhang A) und der Orientierung am Basismodell „Konzeptbilden“ nach Oser und Baeriswyl (2001), wie später im Text noch erläutert, wird eine strukturierte Vorgehensweise gewährleistet.

2 Effektive Zeitnutzung:

Die einzelnen Phasen des Gesprächs sind durchgeplant und der zeitliche Umfang liegt bei ca. 50 bis 70 Minuten mit Vorwissensaktivierung.

3 Höflichkeit und gegenseitiger Respekt:

Bereits zum Einstieg wird den Teilnehmern der Dank ausgesprochen. Während der gesamten Erhebung wird auf einen höflichen und respektvollen Umgang geachtet.

4 Lernförderliches Unterrichtsklima:

Neben dem höflichen Umgang wird auch darauf hingewiesen, dass die Schülerinnen und Schüler nicht bewertet werden und es innerhalb dieses Interviews „kein Richtig oder Falsch“ gibt. Damit soll ein angstfreies und lernförderliches Klima erzielt werden.

5 Verantwortungsvoller Umgang mit Personen und Gegenständen:

Die Schülerinnen und Schüler werden darauf hingewiesen, dass es sich um ein Experiment handelt, wie es in modernen Forschungslaboren verwendet wird (Bitzenbauer, 2020, S. 295). Dadurch soll der verantwortungsvolle Umgang mit den Gegenständen betont werden. Beim Experimentieren wird ebenfalls ein vorsichtiger Umgang mit dem Material vorgelebt. Außerdem wird auf mögliche Gefahren durch Verwendung des Lasers hingewiesen.

6 Kognitiv aktivierende Unterrichtsführung und konstruktive Unterstützung:

Das Angebot fokussiert anspruchsvolle und zentrale Konzepte, mit denen sich die Lernenden während der Befragung vertieft beschäftigen müssen.

7 Ansichten und Antworten auf Fragen sollen begründet werden:

Da das Lernangebot in Form eines Gesprächs vermittelt wird, werden die Lernenden immer wieder aufgefordert, Fragen zu stellen. Des Weiteren werden im Rahmen des *Promptings* verschiedene Techniken verwendet. Hierzu zählen Aufrechterhaltungsfragen und Aufforderungen, die dazu dienen, die Erzählung fortzuführen, wie zum Beispiel: „Erzählen Sie ruhig noch etwas mehr darüber.“ Ebenso kommen Steuerungsaufforderungen zum Einsatz, wie z. B.: „Könnten Sie bitte zu [...] noch etwas detaillierter ausführen“ (Helfferich, 2011, S. 105). Diese Aufforderungen und Fragen sollen dazu anregen, eigene Deutungen und Interpretationen vorzunehmen und diese zu begründen.

8 Widersprüche in der Argumentation werden benannt und diskutiert:

Wenn während des Interviews Widersprüche auffallen, so benennt die Interviewleitung diese und bittet um eine Erläuterung.

Die Merkmale des Informationsangebotes sollen nun weiter auf der Ebene der Lehr-Lernprozesse beschrieben werden. Demnach werden die Gestaltung der inhaltsbezogenen Interaktionen und die Vorstrukturierung der Lernsituation mittels Interviewleitfaden vorgestellt. Im Zuge dessen werden die gewählten Repräsentationsformen aufgeführt und nach Geyer und Kuske-Janßen (2019) systematisiert, da der Grad der Abstraktionsebene einbezogen werden sollte, mit der Intention, die kognitive Belastung zu reduzieren. Außerdem wird die Betrachtung der Systematisierung nach Van Rooy und Chan (2017) um die Formen „gestisch-kinästhetisch“ und „material-operational“ ergänzt. Ein Überblick über die Kategorien und zugeordnete Beispiele aus dem Informationsangebot sind im Anhang C gezeigt. Wie im Prozessdiagramm dargestellt (siehe Abbildung 5), wird zu Beginn des Angebots das Vorwissen aktiviert. Dieser Schritt folgt dem Basismodell der „Konzeptbildung“, demzufolge die Lernenden bereits über Erfahrungswissen verfügen sollten, um neue Konzepte mit ihrer Erfahrung in Einklang zu bringen (Krabbe & Fischer, 2020, S. 145). Den Lernenden wird Informationsmaterial in Form von Arbeitsblättern (AB) bereitgestellt, die sich an häufig im Physikunterricht vorkommenden Elementen orientieren, wie etwa dem am Elektroskop demonstrierten Photoeffekt (siehe Anhang B, AB Strahlteiler und AB Photoeffekt). Zur Veranschaulichung der Energie des Photons werden mathematisch-algebraische Repräsentationen verwendet, da diese Formeln im Physikunterricht oft zum Einsatz kommen. Im gesamten Angebot ist die verwendete Sprache eher der Wissenschafts- bzw. Fachsprache zuzuordnen, wobei die Übergänge fließend sind.

Die Schülerinnen und Schüler sollen die auf den Arbeitsblättern dargestellten Informationen in eigenen Worten wiedergeben. Innerhalb der Vorwissensaktivierung wird das Experiment zudem mit einem Laser präsentiert. Dabei wird der Strahlengang sowohl als ikonisches Bild dargestellt als auch gestisch-kinästhetisch verdeutlicht, indem ein Zettel in den Strahlengang gehalten wird. Während der Aktivierung des Vorwissens besteht die Möglichkeit, Rückfragen zu klären. Zudem erhält der Interviewer Einblicke in die individuellen Voraussetzungen der Lernenden, sodass diese im weiteren Verlauf berücksichtigt werden können. Anschließend folgt gemäß dem Basismodell „Konzeptbilden“ das Durcharbeiten des Prototyps mit der Beschreibung der Photonenerzeugung und -detektion (siehe Abbildung 5). Dabei wird die verbale Darstellung durch das Zeigen auf den Quantenkoffer explizit ergänzt, wodurch eine material-operationale Dimension hinzugefügt wird. Diese Form der nonverbalen Sprache zeichnet sich durch eine geringe Abstraktion aus und dient dazu, kognitive Prozesse zu erleichtern. Die Funktionsweise der Detektoren wird vereinfacht dargestellt, um die kognitive Last möglichst gering zu halten. Damit ein neues Konzept erlernt werden kann, wie in 4.3 noch weiter aufgeführt, sollte mitunter die Bedingung erfüllt sein, dass dieses als plausibel erachtet wird (Posner et al., 1982). Um das tatsächliche Experimentieren mit Einzelphotonen zu verdeutlichen und somit die Plausibilität für die Schülerinnen und Schüler zu erhöhen, wird dies anhand einer Rechnung veranschaulicht. Diese zeigt, wie groß das Spielfeld sein müsste, damit sich darauf statistisch mindestens ein einzelnes Photon befindet. Wegen des hohen Abstraktionsniveaus der mathematischen und symbolischen Sprache wird der Formalismus nicht zusätzlich niedergeschrieben oder dargestellt. Die Ausführung der Rechnung mithilfe der mathematisch-numerisch repräsentierten Zählraten und des Taschenrechners unter verbalen Beschreibungen ist dementsprechend weniger abstrakt. Abschließend wird eine Verstehensabsicherung durchgeführt, um die Nachvollziehbarkeit der Berechnung durch die Teilnehmenden sicherzustellen. Während des Gesprächsverlaufs werden die Schülerinnen und Schüler durch gezielte Rückfragen und Aufforderungen dazu angeregt, eigene Formulierungen zu finden. Aus diesem Grund sollen sie auch die Zählraten verbalisieren (siehe Anhang A). Eine grundlegende Voraussetzung für das Verständnis des Experiments zur Unteilbarkeit von Photonen am Strahlteiler besteht in der Erfassung des Koinzidenzbegriffs. Es wird keine symbolische Darstellung der Koinzidenz, wie sie im Erlangerer Unterrichtskonzept nach Bitzenbauer (2020) eingesetzt wird, verwendet. Angesichts der Alltäglichkeit des Konzepts, dass Ereignisse innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens eintreten, wird eine verbale Erläuterung und die gestisch-kinästhetische Repräsentation durch Zeigen auf beide „Detektoren“ als hinreichend angenommen.

Nachdem alle relevanten Hintergründe und Fachbegriffe erläutert wurden, die als Voraussetzung für das Verständnis des eigentlichen Experiments gelten, wird nun das Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen behandelt. Diese Phase beginnt mit der Zielfragestellung: „Wir haben gesehen, dass sich Licht an einem Strahlteiler gleichmäßig aufteilt. Was beobachtet man dann für die Photonen bei einem Strahlteiler?“ Dadurch werden die bisherigen Schritte begründet und das weitere Vorgehen motiviert, was ebenfalls Transparenz schafft. Der Strahlteiler wird eingesetzt und die Zählraten am Koffer gemeinsam beschrieben, was einer material-operationalen Komponente und einer mathematisch-numerischen Repräsentation entspricht. An diesem Punkt wird ebenfalls eine Verstehensabsicherung vorgenommen, indem bei Bedarf der Begriff der Koinzidenz erneut erklärt wird. Die Paraphrasierung der Messdaten erfolgt durch das Bilden relativer Häufigkeiten.

Nach der Paraphrasierung der Messdaten beginnt die Interpretation. Die Phasen des Experiments sind somit klar voneinander abgegrenzt. Da die Akzeptanz zweier Deutungen untersucht werden soll, wird das Experiment unter Berücksichtigung dieser jeweils unterschiedlich interpretiert. Für eine Zielgruppe wird die Kopenhagener Deutung angewendet und für die andere Gruppe die Ensemble-Deutung. Entsprechende Tabellen zur genauen Gegenüberstellung finden sich im Anhang D. Für eine transparente Gestaltung werden die verwendeten Deutungen kenntlich gemacht (siehe Anhang D). Auch im Deutungskontext wird überwiegend Wissenschaftssprache bzw. Fachsprache verwendet, da ein hohes Maß an Fachterminologie vorliegt und die getroffenen Aussagen explizit sind. Hinsichtlich der Variablenkontrolle wurde auf eine möglichst einheitliche Formulierung geachtet, um eine klare Trennung bei deutungsspezifischen Formulierungen zu ermöglichen. Deutungsspezifische, variierte Ausdrucksweisen beruhen auf den in Kapitel 2.3 ausgearbeiteten Differenzierungen und sind durch Unterstreichung kenntlich gemacht. Da der Zustandsbegriff sprachlich für quantenphysikalische Kontexte von Bedeutung ist, wird dieser ebenfalls für die jeweilige Deutung eingeführt. Prinzipiell liegt der Unterschied darin, ob Aussagen über ein einzelnes Photon getroffen werden können. Nach der Ensemble-Deutung ist dies nicht zulässig, wohingegen es nach der Kopenhagener Deutung möglich ist. Aus den teilweise mathematisch-numerisch dargestellten Beobachtungen wird anschließend der Begriff der relativen Häufigkeit abgeleitet. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Deutungsdifferenzierungen werden damit Wahrscheinlichkeitsaussagen für zukünftige Messungen gemacht (siehe Tabelle 7, Anhang D). Damit findet ein Übergang zur Abstraktion der wichtigsten Konzeptmerkmale statt und folgt damit dem Basismodell des „Konzeptbildens“ (Krabbe & Fischer, 2020, S. 145).

Der Münzwurf ist ein gängiges Beispiel im Mathematikunterricht, um das Konzept der Wahrscheinlichkeit zu erklären (Krüger et al., 2015). Deshalb wird es hier herangezogen, um an das Erfahrungswissen der Lernenden anzuknüpfen und die Merkmale des Konzeptes zu abstrahieren. Durch den Münzwurf wird die verbal-linguistische fachsprachliche Repräsentation des Kontextes durch eine symbolische Objekt-Darstellung erweitert. In beiden Deutungsfällen wird von relativen Häufigkeiten gesprochen, die im Sinne der Variablenkontrolle ebenfalls mit Münzen beschrieben werden, jedoch durch den Wurf von 100 Münzen anstelle von einer Münze. Diese Analogie dient neben der Veranschaulichung auch der Verallgemeinerung, die dann für Photonen bzw. ein einzelnes Photon vorgenommen wird. Die Ausführung zu Wahrscheinlichkeitsaussagen greift einen Wesenszug der Quantenphysik nach Küblbeck und Müller (2003) auf, nachdem in der Quantenmechanik im Allgemeinen nur statistische Vorhersagen möglich sind. Darüber hinaus soll dem Missverständnis entgegengewirkt werden, in der Quantenmechanik sei eine einzelne Messung ausreichend, um aussagekräftige Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Generalisierung der Koinzidenzmessung auf die Unteilbarkeit von Photonen bzw. eines Photons erfolgt analog, indem aus den relativen Häufigkeiten der Koinzidenzen Wahrscheinlichkeitsaussagen abgeleitet werden (siehe Tabelle 8, Anhang D). Des Weiteren wird nach der Kopenhagener Deutung interpretiert, dass das Photon am Strahlteiler einen der beiden Zustände annimmt, ohne sich dabei selbst zu teilen. Im Gegensatz dazu beschreibt die Ensemble-Variante, dass die Photonen sich am Strahlteiler gleichmäßig aufteilen, ohne sich selbst zu teilen. Das Informationsangebot ist nun abgeschlossen, und wie im Prozessdiagramm gezeigt (siehe Abbildung 5), ist eine Anwendungsphase vorgesehen. Diese Phase entspricht gemäß dem Basismodell „Konzeptbilden“ der vierten Phase des Übens und Anwendens des neuen Konzeptes. In diesem Rahmen werden sowohl ein vertikal als auch ein horizontal ausgerichteter Polarisationsfilter vor die „Detektoren“ positioniert. Um den Aufbau und den Strahlengang besser nachvollziehen zu können, wird das Spielfeld auf dem Koffer als ikonisches Bild dargestellt, während die Zählraten vorerst ausgeblendet werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen Hypothesen bezüglich der zu erwartenden Zählraten aufstellen und die Ergebnisse interpretieren. Zur unterstützenden Veranschaulichung wird zusätzlich die Polarisation von Licht bildlich präsentiert (siehe Anhang E). Anschließend wird ein weiterer vertikaler Polarisationsfilter vor den Strahlteiler gestellt und die Befragung wird erneut durchgeführt. Dieser Aufbau ermöglicht den aktiven Umgang mit dem Konzept der Wahrscheinlichkeitsaussagen für zwei Zustände. In den folgenden Kapiteln wird erläutert, wie die Anwendungsphase zur Ermittlung der Akzeptanz beiträgt. Der Akzeptanzbegriff wird präzisiert, und die Methode sowie der Ablauf der Befragung werden näher beschrieben.

4.3 Eingrenzung des Akzeptanzbegriffs

Die gewählte Forschungsmethode sollte erlauben, zu analysieren, wie Schülerinnen und Schüler die Erläuterung des Experimentausgangs im Kontext der statistischen Ensemble- oder der Kopenhagener Deutung bewerten. Infolgedessen eignet sich die Methode der Akzeptanzbefragung, da sie es ermöglicht, zu eruieren, inwieweit die Probanden die physikalischen Konzepte nachvollziehen können und als plausibel empfinden, insbesondere wenn sie in einer zielgruppengerechten Form präsentiert werden (Wodzinski, 1996, S. 79). Vor Beschreibung der Methode soll der Akzeptanzbegriff definiert werden. Akzeptanz ist ein Schlüsselbegriff dieser Arbeit, da ebendiese in Bezug auf quantenmechanische Deutungen von Experimenten untersucht werden soll. Jedoch gibt es keine eindeutige Definition für dieses Konstrukt, weil es je nach Kontext vielfältig ausgelegt wird (Olbrecht, 2010, S. 18). Eine gebräuchliche Auslegung des Konstruktes trennt zwischen „Einstellungs- und Verhaltenskomponente“ (Müller-Böling & Müller, 1986, S. 25). Die Einstellungsakzeptanz kann ausschließlich durch direkte Befragung ermittelt werden, während die Verhaltensakzeptanz beobachtet werden kann, da sie sich im Nutzen des Akzeptanzobjektes manifestiert (Nistor, 2018, S. 2). Weil aus beobachtetem Verhalten nicht immer valide Akzeptanzaussagen zu treffen sind, sollte die Akzeptanzforschung von der Prämisse ausgehen, dass die Intensität und Häufigkeit der Nutzung eines Objekts auf akzeptierendes Verhalten hinweisen können (Olbrecht, 2010, S. 20). Die Verhaltensdimension der Akzeptanz geht also mit dem Nutzen über mehrere „Akzeptanzstufen“ des neuen Objektes einher, dabei würde „eine rein passive Nutzung [...] auf ein geringes Akzeptanzniveau hindeuten, wohingegen von einem hohen Nutzungsniveau gesprochen werden kann, wenn ein Anwender die Innovation vielfältig [...] anwendet“ (Olbrecht, 2010, S. 20). Um zu verstehen, wie die Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz zusammenstehen, soll das Modell nach Müller-Böling und Müller (1986) herangezogen werden. Wie in Tabelle 2 zu sehen, kann die Akzeptanz bzw. Ablehnung auf vier Arten kombiniert werden.

Tabelle 2

Benutzertypen im Modell der Verhaltens- und Einstellungsakzeptanz

		Verhaltensakzeptanz	
		ja	nein
Einstellungsakzeptanz	ja	(1) überzeugter Benutzer	(2) veränderter Benutzer
	nein	(3) gezwungener Benutzer	(4) überzeugter Nicht-Benutzer

Anmerkung. (Müller-Böling & Müller, 1986, S. 28)

Wenn die befragte Person ihre Zustimmung äußert und das Objekt benutzt, stimmen Verhaltens- und Einstellungsakzeptanz überein, was auf eine vollständige Akzeptanz hinweist (1). Wird zwar eine positive Einstellung ausgedrückt, aber ist es aus unbekanntem Gründen nicht möglich, das Objekt zu verwenden, so wird von einem verhinderten Nutzer gesprochen (2). Im Fall 3 wird trotz ausgedrückter Ablehnung das Akzeptanzobjekt verwendet, weshalb von einem gezwungenen Benutzer die Rede ist. Wenn weder auf der Einstellungsebene noch auf der Verhaltensebene eine Übereinstimmung festgestellt werden kann, erfolgt eine Zuordnung zur Kategorie des überzeugten Nicht-Benutzers (Müller-Böling & Müller, 1986, S. 28). Das geschilderte Modell wird in Kapitel 6.5 konkret für die Ergebnisdarstellung herangezogen. Zu den genannten Punkten soll der Akzeptanzbegriff hier in Anlehnung an die Formulierung nach Bitzenbauer (2020, S. 70) aufgefasst werden. Kriterien für die Akzeptanz sind demnach, wie plausibel ein neues Konzept erscheint. Gemäß Posner et al. (1982, S. 218) sind verschiedene Möglichkeiten für das Eintreten des Plausibilitätsempfindens gegeben:

- Übereinstimmung der Innovation mit
 - den eigenen grundlegenden Glaubenssätzen.
 - anderen Theorien oder bisherigem Wissen.
 - früheren Erfahrungen.
- Es ist möglich, Bilder für das Konzept zu entwickeln, die mit der eigenen Weltanschauung konform sind.
- Das Konzept ist für die Problemlösung dienlich. (Posner et al., 1982, S. 218)

Zusätzlich ist der motivationale Aspekt der Akzeptanz zu ergänzen, und zwar, ob die Person dem Lerngegenstand einen persönlichen Wert zuschreibt und ob es einen Vorteil für diese darstellt, wenn die neue Perspektive eingenommen wird (Hewson & Thorley, 1989, S. 542).

4.4 Zur Akzeptanzbefragung

Nachdem der Akzeptanzbegriff eingegrenzt worden ist, soll die Methode der Akzeptanzbefragung betrachtet werden. Diese ermöglicht, wie bereits beschrieben, zu eruieren, inwieweit die Probanden die physikalischen Konzepte nachvollziehen können und als plausibel empfinden. Außerdem eröffnet diese eine Evaluierung, inwiefern Schülerinnen und Schüler, die eine physikalische Konzeption als nicht plausibel betrachten, imstande sind, sich theoretisch darauf einzulassen (Wiesner, 1995, S. 133). Zusätzlich besteht durch offene Antwortformate die Möglichkeit, Einsicht in verschiedene Schülervorstellungen zu bekommen.

Die Akzeptanzbefragung zeichnet sich durch die Integration von *Mikroteaching* und interviewbasierten Erhebungsverfahren aus und eignet sich daher weniger für den Einsatz in großen Lerngruppen (Jung, 1992). Zu einer Untersuchung im regulären Unterricht bestehen laut Wodzinski (1996, S. 82) folgende Unterschiede:

- Es findet keine Kommunikation zwischen den Probanden statt.
- Die Inhalte sind stärker komprimiert.
- Die Befragung ermöglicht einen individuellen Umgang mit Schwierigkeiten der Lernenden.
- Die Methode ist motivations- und konzentrationsfördernder. (Wodzinski, 1996, S. 82)

Im Rahmen dieser Untersuchung werden als qualitative Datenerhebungstechnik individuelle 1:1-Interviews durchgeführt, die auf dem bereits vorgestellten Interviewleitfaden basieren (siehe Anhang A). Das Interview ist nach Blumör (1993) als aufeinander aufbauende Abfolge von Befragungsphasen konzipiert. Zunächst erfolgt die Präsentation des Informationsangebots, gefolgt von der Erhebung der Plausibilität aus der Perspektive der teilnehmenden Personen. Die Befragten werden dazu aufgefordert, die Erklärung anhand vordefinierter Kriterien der Plausibilität und Verständlichkeit zu beurteilen. Aufgrund der vielschichtigen Natur der Akzeptanz ist es dabei nicht ausreichend, sie lediglich durch die Frage zu erfassen, ob eine Vorstellung verständlich oder plausibel erscheint. Stattdessen wird es als zielführender erachtet, die Art und Weise zu untersuchen, inwiefern der Lernende die Vorstellung verständlich findet, oder aus welchen Gründen er sie für plausibel (oder unplausibel) hält (Thorley & Stofflett, 1996, S. 320).

Anschließend erfolgt die Paraphrasierung durch die Probanden, bei der sie die Informationen mit eigenen Worten wiedergeben. In einem weiteren Schritt sollen die präsentierten Inhalte auf konkrete Beispiele angewandt werden (Wodzinski, 1996). Der Leitfaden ermöglicht es dem Interviewenden, das Gespräch auf die Befragungsperson abzustimmen. Somit können auftretende neue Fragen integriert und auch Änderungen der Reihenfolge der zu behandelnden Themen innerhalb der Phasen flexibel vorgenommen werden (Döring, 2023, S. 361). Gleichzeitig dient der Interviewleitfaden dem Gütekriterium der Durchführungsobjektivität, um die Erhebung unabhängiger von der Person des Interviewenden zu gestalten. Eine grobe Strukturierung der Erhebung ist in Tabelle 3 gegeben, bei der die einzelnen Phasen der Akzeptanzbefragung berücksichtigt sind.

Tabelle 3

Inhalte der Akzeptanzbefragung

Phase	Inhalte, Formulierungen
Informationsangebot	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung und Deutung eines Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen am Quantenkoffer (siehe 4.2).
Befragung der Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> • „Wie fandest du die Beschreibung und Deutung des Strahlteilerexperimentes mit Einzelphotonen? • Was war für dich daran plausibel und einleuchtend? • War alles für dich verständlich, oder was war daran unverständlich? • Was war besonders hilfreich beim Verständnis oder verwirrend? • Findest du etwas merkwürdig oder überraschend am Experiment des Strahlteilers mit Einzelphotonen? • Inwiefern hast du das erwartet? • Kam dir etwas komisch vor? Wenn ja, was genau? • Bewerte die Deutung des Experiments zur Unteilbarkeit von Photonen/ eines Photons auf einer Skala von 1 bis 10 hinsichtlich der Plausibilität. (1 unplausibel, 10 sehr plausibel) und begründe deine Wertung.“
Paraphrasierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Experiment soll mit eigenen Worten beschrieben und gedeutet werden. <ul style="list-style-type: none"> - Eventuelle Stimuli zu: Koinzidenzbegriff, Strahlteiler, Photonen, relativen Häufigkeiten, Wahrscheinlichkeitsaussagen, Unteilbarkeit.
Anwendungsphase	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorhersage und Deutung der Ergebnisse mit Polarisationsfilter.

Die Fragen sind, wie in Tabelle 3 ersichtlich, weitgehend offen formuliert, um textgenerierende Antworten zu ermöglichen und das Gespräch aufrechtzuerhalten. Sie orientieren sich an der Messung des im vorherigen Kapitel beschriebenen Akzeptanz-Konstruktes. Nach Festlegung der Untersuchungsmethoden und des Materials liegt der Fokus nun auf der Organisation der Befragung sowie der Beschreibung der Stichprobe.

4.5 Beschreibung der Stichprobe und Organisation der Befragung

Um Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II für das Forschungsvorhaben zu rekrutieren, wurde dieses über verschiedene Kanäle beworben. Hierbei wurden unter anderem Flyer an Physiklehrkräfte adressiert (siehe Anhang F). Das Vorwissen aus der Sek. I wurde vorausgesetzt. Die entsprechenden Physiklehrkräfte haben die Voraussetzung geprüft, Räumlichkeiten für die Erhebung an den Schulen zur Verfügung gestellt, Einverständniserklärungen (siehe Anhang G) vorab ausgehändigt und Zeitslots für die Teilnehmenden organisiert. Die Lehrkräfte gaben an, leistungsheterogene Schülerinnen und Schüler beworben zu haben. Zudem wurden die Probanden für die Dauer der Erhebung von anderem Unterricht freigestellt, da diese während der Schulzeit stattfand. Obwohl keine Teilnahmevergütung angeboten wurde, kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sich nicht ausschließlich interessierte Schülerinnen und Schüler meldeten. Die verschiedenen Aussagen der Probanden, die von „alles ist besser als das Fach, das ich jetzt hätte“ über „Physik ist nicht so meins“ bis hin zu „Physik interessiert mich sehr und ich möchte es studieren“ reichten, unterstreichen zumindest das variable Interesse. Alle Probanden haben bereits im Unterricht Elektronen und Interferometer behandelt. Der Begriff der Polarisierung wurde nach Aussagen der Lehrkräfte bisher nur von dem Grundkurs behandelt. Auch der photoelektrische Effekt war bereits allen Schülerinnen und Schülern geläufig. In Tabelle 4 sind die jeweilige Stichprobengröße, Geschlecht und die Schulform der Schülerinnen und Schüler dargestellt. Dabei wurde das Informationsangebot jeweils 5 Probanden mit der Kopenhagener Deutung bzw. der Ensemble-Deutung dargelegt.

Tabelle 4

Beschreibung der Stichprobe und Aufteilung der Probanden

n	Jahrgangsstufe	Geschlecht	Schule	n	Deutung
5	Q1	m, w	Gymnasium I	2	Kopenhagener
		m	Gymnasium II	3	
5	Q1	m	Gymnasium I	2	Ensemble
		m	Gymnasium II	3	

An der Studie haben also insgesamt 10 Schülerinnen und Schüler (1 Mädchen und 9 Jungen) der Qualifikationsphase I (QI) teilgenommen. Diese setzten sich aus je einem Leistungskurs (N=6) und einem Grundkurs (N=4) an zwei verschiedenen Gymnasien in Nordrhein-Westfalen zusammen. Die Probanden waren zwischen 16 und 19 Jahren alt. Die Befragungen fanden in den jeweiligen Physikräumen der Schulen statt. Die Erhebung umfasste einen Termin pro Teilnehmer mit einer Dauer zwischen 50 und 70 Minuten.

4.6 Transkription

Die aufgezeichneten Akzeptanzbefragungen wurden anschließend mit der Software *Transkriptor* transkribiert. Für die Probanden wurden in den Transkripten fiktive Namen zugeordnet, die im weiteren Verlauf der Ergebnisauswertung und Darstellung herangezogen werden. Die erstellten Transkripte wurden daraufhin nochmal überarbeitet und formatiert, wobei der Fokus auf dem inhaltlichen Gehalt der Gespräche, einer guten Lesbarkeit und einer zügigen Umsetzung lag. Detaillierte Angaben zur Aussprache wurden ausgelassen. Die zugrunde liegenden Transkriptionshinweise (siehe Anhang H) orientieren sich an den Arbeiten von Burde (2018, S. 129) sowie Dresing und Pehl (2015, S. 21–22) und wurden spezifisch an die Analyseanforderungen angepasst. In diesem Rahmen wurde auf die Kennzeichnung besonders betonter Wörter sowie auf die Transkription emotionaler und nonverbaler Äußerungen, wie Lachen oder Seufzen, verzichtet. Die Audiodateien haben eine Gesamtdauer von ca. 395 Minuten, wobei ein Teil des Informationsangebotes bezüglich des Photonexperimentes Teil der Audios ist. Die Audiodateien und Transkripte sind über den im Anhang G angegebenen Pfad zugänglich.

4.7 Gütekriterien der Erhebung

Das Gütekriterium der Objektivität, insbesondere der Durchführungsobjektivität, wurde dadurch berücksichtigt, dass alle Akzeptanzbefragungen von derselben Person durchgeführt wurden, was eine einheitlichere Anwendung des Interviewleitfadens gewährleistete. Zudem wurde abwechselnd zwischen der Kopenhagener und der Ensemble-Deutung befragt, um mögliche Übungseffekte zu minimieren. Die Zuordnung eines Probanden zu einem der Designs erfolgte dabei randomisiert.

Die Verwendung eines standardisierten Interviewleitfadens sowie die ausschließliche Durchführung der Interviews in den Physikräumen sollten ähnliche Befragungsbedingungen fördern. Die Validität der Datenerhebung wird gemäß Niebert und Gropengießer (2014, S. 123) durch die sorgfältige Dokumentation der Verfahren, die aktive Beteiligung der Probanden, die umfassende Datendokumentation sowie den Einsatz von Triangulation gewährleistet. Triangulation bezeichnet hier, dass während der Interviews „an mehreren Stellen auf gleiche Aspekte rekurriert wird“ (Niebert & Gropengießer, 2014, S. 123). Im Kontext dieser Arbeit wurden die eingesetzten Methoden zur Datenerhebung und -aufbereitung, wie im folgenden Kapitel dargestellt, zur Datenanalyse detailliert und möglichst transparent dargestellt, etwa durch die Präsentation des Interviewleitfadens. Um eine möglichst angenehme Gesprächsatmosphäre zu schaffen, wurde darauf geachtet, den Probanden klarzumachen, dass es sich nicht um eine Leistungsbewertung handelt, um so die Authentizität und Offenheit ihrer Aussagen zu fördern. Die Transkripte und erhobenen Daten sind im Anhang dokumentiert und die einzelnen Schritte samt Auswertung festgehalten. Zur Erfüllung der Triangulationsanforderungen wurde im Interviewprozess wiederholt auf gleiche Aspekte eingegangen, indem beispielsweise nach dem Verständnis der Inhalte gefragt wurde, um Missverständnisse identifizieren und klären zu können. Das Gütekriterium der Reliabilität wird im Kontext der folgenden Auswertungsmethodik näher behandelt.

5 Auswertung

5.1 Qualitative Inhaltsanalyse

Für die Analyse der erhobenen Daten wurde sowohl die strukturierende als auch die zusammenfassende qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) herangezogen. Diese Methoden ermöglichen es, komplexe qualitative Daten systematisch zu kategorisieren und zu interpretieren. Im Unterschied zu herkömmlichen Ansätzen der Auswertung von Akzeptanzbefragungen (Bitzenbauer, 2020, S. 74; Cleve, 2023, S. 69), bei denen *Key Ideas* kodiert und die Aussagen während der Paraphrasierung entsprechend ihrer Übereinstimmung mit diesen *Key Ideas* zugeordnet werden, was eine Bewertung der Richtigkeit impliziert, wurde in dieser Untersuchung der Fokus nicht auf die Richtigkeit der Aussagen gelegt. Stattdessen stand im Vordergrund, inwieweit Deutungen akzeptiert wurden und welche Vorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern vorhanden sind. Die Entscheidung für diese Abweichung basiert auf der Zielsetzung, tiefere Einblicke in Einstellungen der Befragten zu gewinnen und die Verwendung der Deutungen zu erfassen. Zur Gewährleistung der Transparenz soll die Umsetzung der einzelnen Abschnitte des Analyseprozesses innerhalb dieser Studie unter Orientierung an Mayring (2015) erläutert werden.

Ausgangsmaterial und Analyseeinheiten

Das Ausgangsmaterial für die Analyse bestand aus den Transkripten, die reduziert und paraphrasiert wurden (siehe Anhang G). Dieser Schritt hatte das Ziel, „das Material so zu reduzieren, dass die wesentlichen Inhalte erhalten bleiben, durch Abstraktion einen überschaubaren Corpus zu schaffen, der immer noch Abbild des Grundmaterials ist“ (Mayring, 2015, S. 67). Zur Reduktion der Datenmenge und zur Konzentration auf die wesentlichen Inhalte wurden deshalb die Aussagen der Probanden für die anschließende Analyse auf eine sprachliche Ebene gebracht und teilweise zusammengefasst. Dabei wurde sorgfältig darauf geachtet, den ursprünglichen Bedeutungsgehalt der Aussagen unverändert zu lassen. Zusätzlich wurden irrelevante Äußerungen der Interviewer sowie Daten aus dem Informationsangebot entfernt, um die Aussagen der Probanden ab dem Zeitpunkt der anschließenden Befragung zur Akzeptanz, Paraphrasierung und Anwendung klarer hervorzuheben. Es wurden zehn Textdateien untersucht: fünf aus den Akzeptanzbefragungen, die nach der Ensemble-Deutung präsentiert wurden, und fünf weitere, die auf der Kopenhagener Deutung basierten. Ziel dieser Analyse war es, die Forschungsfragen zu beantworten, insbesondere hinsichtlich der Akzeptanz und Verwendung der Deutungen sowie der Schülervorstellungen.

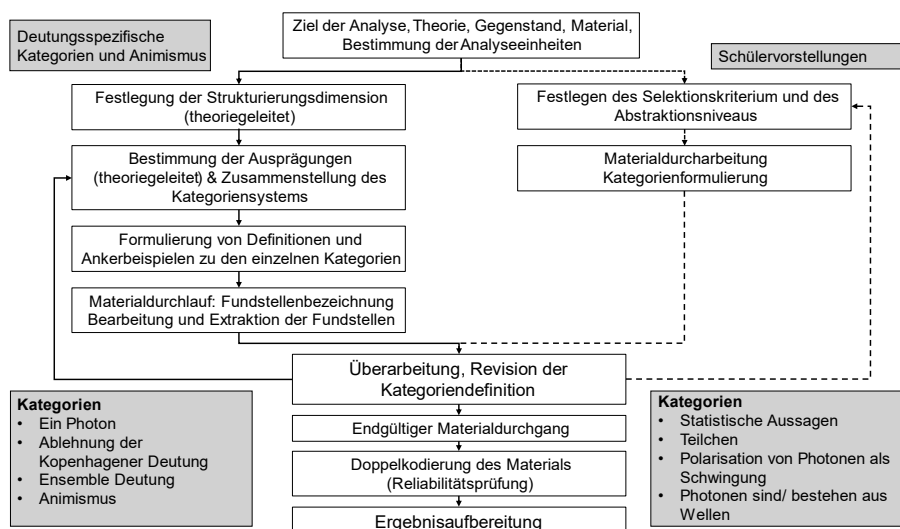
Nach Mayring (2015, S. 61) sind verschiedene Analyseeinheiten zur Präzision vor der Kategoriendefinition festzulegen. Die Kodiereinheit, also der kleinste zulässige Materialbestandteil, der einer Kategorie zugeordnet werden darf, war in dieser Studie ein Wort (Teilchen). Die Kontexteinheit, die den maximalen Textumfang beschreibt, der einer Kategorie zugeordnet werden kann, umfasste in diesem Fall einen gesamten Abschnitt des Interviews. Das Abstraktionsniveau wurde dahingehend festgelegt, dass Textstellen markiert wurden, bei denen Aussagen bezüglich der Plausibilität der Deutung, oder Äußerungen, die mögliche Schülervorstellungen über die Quantenmechanik repräsentieren, getroffen wurden.

Prozess der Kategorienbildung

Wie in Abbildung 6 auf der linken Seite dargestellt, wurden deutungsspezifische Kategorien, einschließlich der des Animismus, auf Grundlage der Literatur deduktiv entwickelt und an das Material herangetragen (siehe Kapitel 2.3 und 2.4). Dabei wurden gemäß Mayring (2015, S. 97) die Kategorien definiert und die zugehörigen Textbestandteile diesen Kategorien zugeordnet. Zudem wurden konkrete Textstellen als Ankerbeispiele angegeben. Bei auftretenden Abgrenzungsproblemen wurden Kodierregeln formuliert, um eine klare Zuordnung zu ermöglichen. In Abbildung 6 wird auf der rechten Seite das Vorgehen im Rahmen der zusammenfassenden qualitativen Inhaltsanalyse für die weiteren Schülervorstellungen schematisch dargestellt, bei dem die Kategorien im Zuge eines Verallgemeinerungsprozesses aus dem Material abgeleitet werden (Mayring, 2015, S. 85).

Abbildung 6

Prozessmodell der Kategorienbildung



Anmerkung. In Anlehnung an Mayring (2015). Links: deduktive Kategorienbildung für die Akzeptanzstufen, deutungsspezifische Kategorien und Animismen; rechts: induktive Kategorienformulierung für sonstige Schülervorstellungen und statistische Aussagen.

Zur Analyse der Daten wurde die Software *MAXQDA* verwendet. Die erzielten Ergebnisse wurden im Rahmen einer kommunikativen und kollegialen Validierung durch andere Forschende überprüft. Auf Grundlage dieses Austauschs erfolgte eine erneute Analyse des Materials, wobei die neu gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt wurden, um abschließend Kategoriendefinitionen und einen Kodierleitfaden zu entwickeln. Nach einem finalen Materialdurchlauf mit diesem Leitfaden erfolgte eine Zweikodierung durch eine unbeteiligte Person. Dieser wurden die Kodierleitfäden bereitgestellt und Einsicht in die vom Erstkodierer kodierten Stellen gegeben, jedoch ohne Informationen zu den zugeordneten Kategorien. Außerdem wurde die Kategorie „Uneindeutig“ ergänzt, falls der Zweitkodierer für Segmente keine Kategorie zuordnen konnte. Mit der Zweitcodierung wurde die Reliabilität bewertet, indem in *MAXQDA* eine *Intercoder*-Übereinstimmung vorgenommen und Cohens Kappa κ berechnet wurde, das als Beurteilungsmaß über die Übereinstimmung betrachtet werden kann. Bei κ von + 1,0 liegt eine vollständige Übereinstimmung vor. Werte größer als 0,6 gelten als akzeptiert bzw. als bedeutend und solche ab $\kappa \geq 0,8$ werden als beinahe perfekt angesehen (Landis & Koch, 1977, S. 165). Die *MAXQDA*-Dateien sind im Anhang G hinterlegt.

5.2 Kodierleitfäden

Im Rahmen der Auswertung wurden Kodierleitfäden entwickelt, die die Kategoriendefinition und Ankerbeispiele aus den Interviews beinhalten. An dieser Stelle wird zwischen den Phasen der Akzeptanzbefragung unterschieden. Da in einer ersten Phase nach dem Informationsangebot eine explizite Befragung hinsichtlich der Plausibilität stattfand, wird hier ein Kodierleitfaden zur Akzeptanz mit den verschiedenen Akzeptanzstufen aufgeführt. Diese Auslegung des Akzeptanzkonstrukts ist in Kapitel 4.3 genauer beschrieben. Anschließend werden deutungsspezifische Kategorien und solche zu Schülervorstellungen im Kontext der Paraphrasierung und Anwendung aufgeführt.

5.2.1 Kodierleitfaden zur Befragung der Plausibilität

Die Auswertung der Befragung hinsichtlich der Plausibilität erfolgte in Anlehnung an Bitzenbauer (2020, S. 72). Die Probanden konnten die Deutung auf einer Likert-Skala von 1 bis 10 bewerten, wobei 10 für „sehr plausibel“ steht. Weil der geringste Wert hier 7 betrug, wird diesem keine Akzeptanz zugeordnet. Die Antworten wurden auf einer 3-stufigen Skala kodiert und zwischen vollständiger, eingeschränkter und keiner Akzeptanz der Deutung unterschieden:

1. **Vollständige Akzeptanz:** Die Deutung wird ohne Einschränkung akzeptiert bzw. als plausibel erachtet und verstanden. Die Deutung wird bedingungslos auf der Skala zwischen 8 und 10 bewertet.
2. **Eingeschränkte Akzeptanz:** Es werden kleinere Aspekte an der Deutung kritisiert. Trotzdem wird diese grundsätzlich akzeptiert und/oder es werden Unsicherheiten über das Verstehen der Deutung geäußert.
3. **Keine Akzeptanz:** Es wird maßgebliche Kritik an der Deutung geäußert.

Ankerbeispiele für die Kodierung der Akzeptanz

1. Vollständige Akzeptanz

I: Wie fandest du die Beschreibung und die Deutung des Experiments?

P: Nachvollziehbar. Ich fand es halt leicht verständlich. Also ich bin jetzt auch kein Experte auf dem Gebiet, aber so wie es erklärt wurde, ja, fand ich es plausibel.

I: Okay, und was genau fandest du plausibel?

P: Alles. Ich finde, es ist einfach nicht zu komplex erklärt und ich konnte mich jetzt ein bisschen einfinden durch die Erklärung.

I: Und gab es irgendwas, was dir komisch vorkam oder unverständlich war?

P: Nein, ich fand es gut.

I: Auf einer Skala von eins bis 10, wie würdest du die Deutung des Experiments hinsichtlich der Plausibilität, also wie verständlich du es fandest, bewerten?

P: 9,5

2. Eingeschränkte Akzeptanz

I: Wie fandest du die Beschreibung und vor allen Dingen die Deutung des Experiments?

P: Ich glaube, dass da noch einiges zukommt. Bisher habe ich alles gut verstanden.

I: Und war für dich irgendwas unverständlich an der Deutung?

P: Manchmal Fachbegriffe da. Ich bin da wie gesagt einfach nicht ganz so gut drin. Aber ich glaube, den ganzen Zusammenhang habe ich schon gecheckt.

I: Auf einer Skala von eins bis 10, wie würdest du die Deutung des Experiments hinsichtlich der Plausibilität, also wie verständlich du es fandest, bewerten?

P: Also wenn das jetzt, was ich gerade versucht habe, zusammenzufassen, zumindest schon mal richtig lag, dann hätte ich das ja so 9 aus 10 verstanden. Aber ich weiß nicht, ob das alles war, weil vielleicht habe ich dann das eine oder andere doch nicht mitbekommen, was ich nicht verstanden habe. Und das werde ich ja dann wohl nicht wissen, weil ich es nicht verstanden habe.

3. Keine Akzeptanz

I: Wie fandest du die Beschreibung und die Deutung des Experiments?

P: Die Beschreibung fand ich gut und verständlich. Die Deutung wirkt auf mich sehr theoretisch. Also ich wüsste beispielsweise nicht, wo man das praktisch irgendwie anwenden sollte, das Wissen, was man daraus erlangt.

I: Auf einer Skala von eins bis 10, wie würdest du die Deutung des Experiments hinsichtlich der Plausibilität bewerten?

P: Ich glaube, ich würde circa eine 7 geben. Also ich würde sagen, es ist so weit verständlich daraus hervorgegangen, dass ich das quasi nicht zweiteilen kann, sondern dass es halt nur quasi reflektiert oder transmittiert wird. Aber für mich ist das jetzt nicht so als die Kernaussage daraus hervorgegangen.

5.2.2 Kodierleitfaden zur Paraphrasierung und Anwendung

Deutungsspezifische Kategorien

Da der wesentliche Unterschied zwischen Ensemble- und Kopenhagener Deutung darin besteht, ob eine Aussage über ein Photon getroffen wird, wird dies als Kategorie verwendet.

- **Ein Photon:** Es wird eine Aussage über ein einzelnes Photon getroffen.
Regel: Trifft ein Schüler Aussagen über ein Photon, so entspricht dies nicht der Verwendung der Ensemble-Deutung.

Da diese Kategorie sämtliche Aussagen über ein einzelnes Photon einbezieht, wird nochmal genauer die Zustimmung und Verwendung der Deutungen untersucht.

- **Kopenhagener Deutung:** Es werden Wahrscheinlichkeitsaussagen für den Zustand oder das Eintreten eines Ereignisses für ein einzelnes Photon gemacht.
- **Ablehnung der Kopenhagener Deutung:** Es wird geäußert, dass keine Aussagen über ein einzelnes Photon getroffen werden können.
- **Ensemble-Deutung:** Es wird geäußert, dass keine Aussagen über ein einzelnes Photon getroffen werden können und/oder es werden explizit Aussagen über eine Menge von Photonen getroffen.

Regel: Die Kategorie „Ablehnung der Kopenhagener Deutung“ entspricht auch der Zustimmung der Ensemble-Deutung. Damit werden solche Aussagen doppelt kodiert.

Eine weitere Kategorie, die betrachtet wird, ist die der statistischen Aussagen, um zu untersuchen, inwiefern in beiden Gruppen statistische Aussagen getätigt werden.

- **Statistische Aussagen:** Beschreibungen, die auf der Analyse quantitativer Daten basieren und Wahrscheinlichkeiten, Zusammenhänge oder Unterschiede ausdrücken.

Ankerbeispiele für die Kodierung von Deutungsaussagen

Kopenhagener Deutung

Paraphrasierung

P: Aber so können wir sagen, dass das Photon etwa 50 % zu A oder zu B geht. Und weil die Koinzidenz so wenig ist, kann es sich nicht teilen.

Anwendung

P Also die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelnes Photon bei einem der Empfänger landet, liegt bei 25 %, weil erstmal muss das Photon vom Spiegel durchgelassen werden. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist 50 %. Danach ist die weitere Wahrscheinlichkeit, ob es durch den Filter durchkommt, ebenfalls 50 %. Dann sind wir damit bei einer Wahrscheinlichkeit von 25 % gelandet.

Ablehnung der Kopenhagener Deutung = Ensemble-Deutung

Anwendung

I: Und welche Aussagen kannst du für ein einzelnes Photon treffen?

P: Wie gerade eigentlich. Gar keine.

Ensemble- Deutung

Anwendung

P: Sagen wir jetzt, dass von 100 Photonen oben 25 ankommen würden und unten nach wie vor 0. Und die restlichen 75 dann an den beiden Filtern hängenbleiben.

Schülervorstellungen

Mithilfe der Inhaltsanalyse wurden verschiedene Schülervorstellungen gefunden und entsprechend kodiert, um anschließend zu untersuchen, ob diese mit Verwendung einer Deutung auftreten:

- **Animismus:** Es erfolgt eine „Beseelung“ von Photonen mittels Analogie und Metaphernbildung oder es werden menschliche Eigenschaften und Denkweisen übertragen.
Ankerbeispiel: „Und daraus kann man dann ebendiese Deutung ableiten, dass die Photonen sich für einen Weg entscheiden.“
- **Teilchen:** Es wird der Begriff „Teilchen“ verwendet.
- **Polarisation von Photonen als Schwingungen:** Die Polarisation von Photonen wird als Schwingung beschrieben.
- **Photonen sind (bestehen aus Wellen):** Photonen werden mit Wellen gleichgesetzt oder als solche beschrieben.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Auswertungsergebnisse der Akzeptanzbefragung sowie der Inhaltsanalyse für die Paraphrasierung und die Anwendungsphase dargestellt. Dabei werden im Sinne der Reliabilitätsprüfung auch die Cohens Kappa der *Intercoder*-Übereinstimmungen für die einzelnen Kategorien angegeben. Für alle Kodierungen liegt Kappa bei $\kappa=0,86$. Obwohl auf einzelne Teilnehmer eingegangen wird, liegt der Fokus primär auf dem Vergleich zweier Gruppen: der Ensemble-Gruppe (EG), der die Deutung des Experiments mit der Ensemble-Deutung präsentiert wurde, und der Kopenhagener Gruppe (KG), der das Experiment mit der Kopenhagener Interpretation vermittelt wurde.

6.1 Befragung der (Einstellungs-) Akzeptanz

Bei der (Einstellungs-) Akzeptanzbefragung zeigte sich, dass alle fünf Probanden der Kopenhagener Gruppe die Deutung vollständig akzeptierten ($A=1$), während in der Ensemble-Gruppe nur drei von fünf Teilnehmern eine vollständige Akzeptanz bekundeten. Ein Teilnehmer der Kopenhagener Gruppe, Noah, äußerte eingeschränkte Akzeptanz und drückte beispielsweise seine Unsicherheit darüber aus, ob er die Deutung vollständig verstanden habe:

Oder war das jetzt mit Albert Einstein und Schrödinger und so? Da kannte ich mich oder kenne ich mich auch immer noch nicht sonderlich gut aus. Wir hatten das noch nicht in Physik. Wir machen jetzt noch ganz andere Sachen, aber wir kommen da langsam zu und danach werde ich das wahrscheinlich viel besser verstehen als jetzt gerade. (Noah, EG)

Außerdem äußerte Noah den Wunsch nach einem stärkeren Bezug zur Lebenswelt, da es ihm dadurch leichter fallen würde, die Inhalte zu verstehen. Auch Pepe aus der Ensemble-Gruppe, für den keine Akzeptanz kodiert wurde ($A=3$), beklagte diesen fehlenden Bezug. Außerdem drückte er aus, dass die „Kernaussage“ nicht aus der Deutung hervorgeht:

Die Deutung wirkt auf mich sehr theoretisch. Also ich wüsste beispielsweise nicht, wo man das praktisch irgendwie anwenden sollte, das Wissen, was man daraus erlangt. (Pepe, EG)

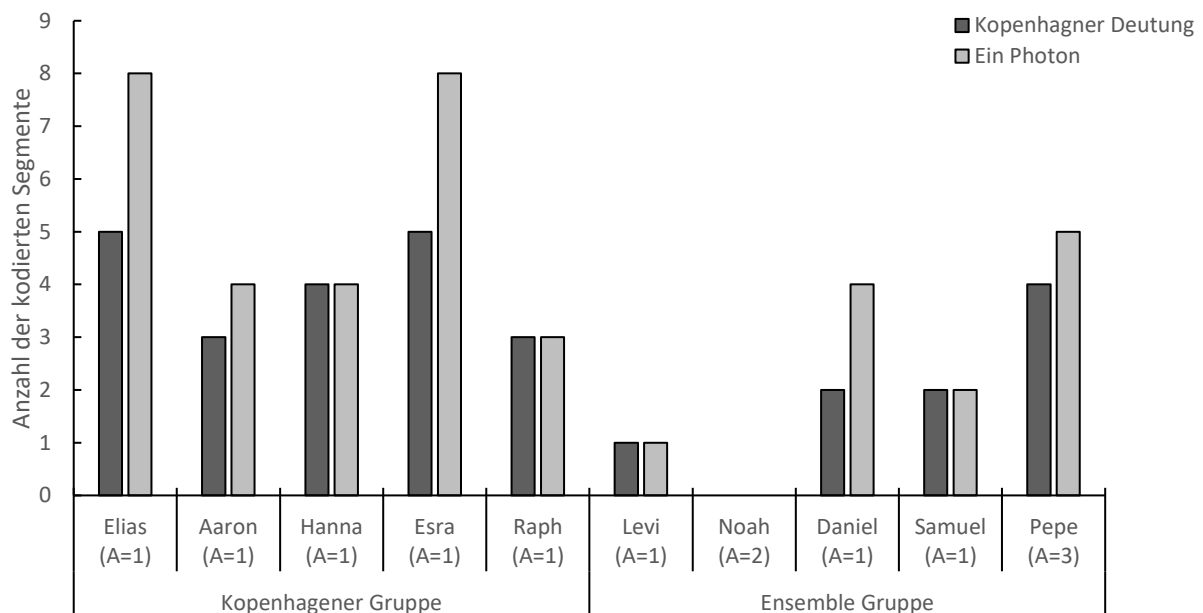
Damit liegt bei dieser Befragung für die Kopenhagener Gruppe eine höhere Akzeptanz ($\phi=1,0$) vor als bei der Ensemble-Gruppe ($\phi=1,6$). Das Cohens Kappa dieser Befragung liegt bei $\kappa=0,89$. Da neben der Befragung zur (Einstellungs-) Akzeptanz auch die Verwendung von Deutungsformulierungen Hinweise auf die (Verhaltens-) Akzeptanz geben kann, werden die Untersuchungsergebnisse für die Phasen, in denen die Schülerinnen und Schüler ein zuvor präsentiertes Strahlteilerexperiment in eigenen Worten beschreiben und in einem neuen Experimentierkontext Aussagen treffen sollten, in den nächsten Abschnitten dargelegt.

6.2 Aussagen über ein Photon und Verwendung der Kopenhagener Deutung

Weil nach der Ensemble-Deutung keine Aussagen über ein Photon getroffen werden, wurden die Schüleräußerungen neben der Kopenhagener Deutung auch auf ebensolche untersucht. Abbildung 7 zeigt die Anzahl der kodierten Segmente für jeden Probanden zu den Kategorien „ein Photon“ und „die Kopenhagener Deutung“, wobei die fünf linken Probanden der Kopenhagener Gruppe und die rechte Seite der Ensemble-Gruppe angehören.

Abbildung 7

Zuordnungshäufigkeiten für die Kategorien „ein Photon“ und „Kopenhagener Deutung“



Anmerkung. Anzahl der kodierten Segmente für die Kategorien „ein Photon“ und „Kopenhagener Deutung“ für die transkribierten und paraphrasierten Schüleräußerungen der zwei Versuchsgruppen während der Paraphrasierung eines Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen und der Anwendungsphase, bei der das Experiment mit Polarisationsfiltern erweitert wurde. Die Segmentlänge ist dabei verschieden. A: Akzeptanzstufe für die Deutung der Gruppe (A=1: vollständige, A=2: eingeschränkte, A=3 keine Akzeptanz) $\kappa=0,98$ (ein Photon), $\kappa=0,71$ (Kopenhagener Deutung).

Es zeigte sich, dass alle Teilnehmenden, mit Ausnahme von Noah (EG), Aussagen über ein Photon trafen, die teilweise der Kopenhagener Deutung entsprechen, wie folgende Äußerungen während der Paraphrasierung und Anwendung verdeutlichen:

Die relative Häufigkeit ist, dass das Photon zu 50 % transmittiert und oder zu 50 % reflektiert wird. Und das ist halt wie beim Münzwurf [...] (Esra, KG, Paraphrasierung)

Es [Das Photon] kann halt letzten Endes immer nur einen dieser beiden Zustände, heißt entweder transmittiert oder reflektiert haben, aber es kann halt praktisch nicht in beiden Detektoren gleichzeitig eintreffen. (Samuel, EG, Paraphrasierung)

Jedes einzelne Photon hat eine ungefähr 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, bestimmt polarisiert zu sein. Also in dem Fall horizontal-vertikal, weil sich die Wahrscheinlichkeit durch die Polarisationsfilter halbiert hat. Die Chance, dass es durch einen Filter geht, ist in diesem Fall 50/50. (Daniel, EG, Anwendung)

Beispiele aus der Anwendungsphase, die nicht der Kopenhagener Deutung, aber der Kategorie „ein Photon“ zugeordnet wurden, zeigen in beiden Gruppen gewisse Ähnlichkeiten:

Dass das Photon sowohl über horizontale als auch vertikale Wellen verfügt, aber dass dann halt durch den Filter eine der beiden Wellen weggenommen wird.

(Elias, KG, Anwendung)

Ich wäre dabeigeblichen, dass ein Photon circa zur Hälfte aus horizontaler und zur Hälfte aus vertikaler Welle besteht. (Pepe, EG, Anwendung)

Die Segmente sind verschieden lang. Die Betrachtung der Segmente spiegelt trotzdem ebenfalls wider, dass die Teilnehmenden der Kopenhagener Gruppe im größeren Umfang die Kopenhagener Deutung verwenden. Die *Intercoder*-Übereinstimmung für die Kategorie „ein Photon“ beträgt $\kappa=0,98$ und für die Kategorie „Kopenhagener Deutung“ $\kappa=0,71$. Die Kategorie „Eigene Deutung“ wurde durch beide Kodierer ausschließlich der Ensemble-Gruppe bei Levi und Daniel übereinstimmend zugeordnet. Dabei wird dem halbdurchlässigen Spiegel die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Zustandes übertragen:

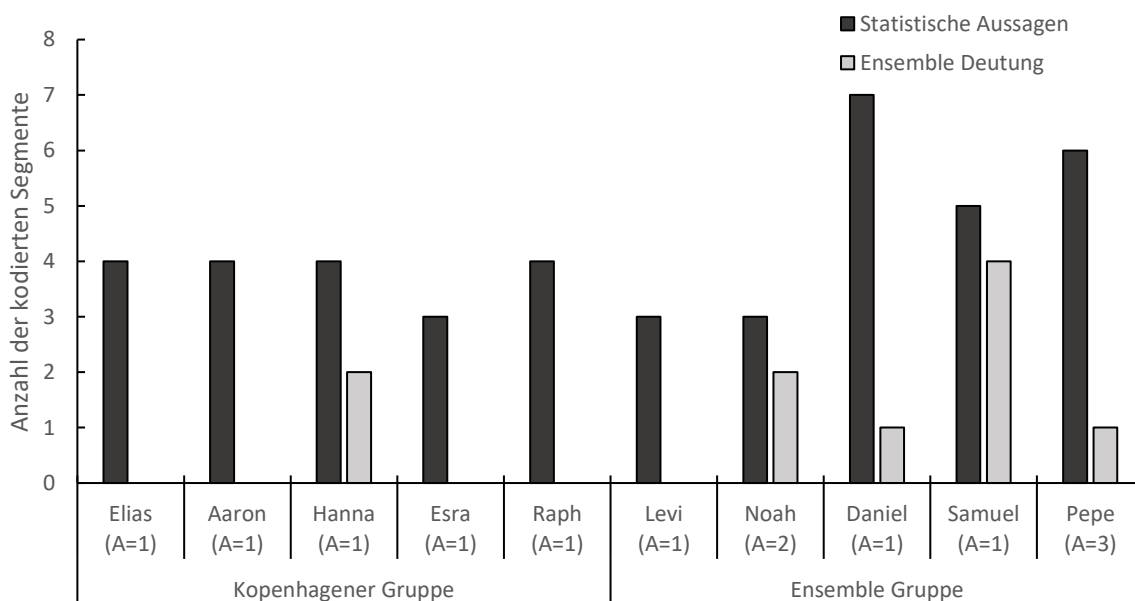
Also man hat im Prinzip einen Laser, der schießt ein Photon ab und das Photon trifft dann auf einen Spiegel und der Spiegel hat in dem Fall die Wahrscheinlichkeit, dass er in ungefähr 50 % der Fälle das Photon durchlässt. (Daniel, EG, Paraphrasierung)

6.3 Statistische Aussagen und Verwendung der Ensemble-Deutung

Neben der Anwendung der Kopenhagener Deutung wurden die Inhalte auch im Hinblick auf statistische Aussagen und die Ensemble-Deutung analysiert. Die Ensemble-Interpretation wurde kodiert, wenn geäußert wurde, dass keine Aussagen über ein einzelnes Photon getroffen werden konnten oder wenn explizit Aussagen über eine Gruppe von Photonen gemacht wurden. Da Letztere ebenfalls statistischen Charakter besitzen, erfolgte teilweise eine Doppelkodierung für beide Kategorien. Abbildung 8 zeigt die kodierten Segmente für jeden Probanden in den Kategorien „statistische Aussagen“ und „Ensemble-Deutung“, wobei die fünf linken Probanden der Kopenhagener Gruppe und die fünf rechten Probanden der Ensemble-Gruppe angehören.

Abbildung 8

Zuordnungshäufigkeiten für die Kategorien „Statistische Aussagen“ und „Ensemble-Deutung“



Anmerkung. Anzahl der kodierten Segmente für die Kategorien „Statistische Aussagen“ und „Ensemble-Deutung“ für die transkribierten und paraphrasierten Schüleräußerungen der zwei Versuchsgruppen während der Paraphrasierung eines Strahlteilerexperimentes mit Einzelphotonen und der Anwendungsphase, bei der das Experiment mit Polarisationsfiltern erweitert wurde. Doppelkodierungen für beide Kategorien: 2 x Hanna, 1 x Daniel, 2 x Samuel. Die Segmentlänge ist verschieden. A: Akzeptanzstufe für die Deutung der Gruppe (A=1: vollständige, A=2: eingeschränkte, A=3 keine Akzeptanz). $\kappa=0,90$ (statistische Aussagen), $\kappa=0,61$ (Ensemble-Deutung).

In beiden Gruppen werden statistische Aussagen getroffen. Folgend sind Beispiele für statistische Aussagen gegeben:

Wir haben vorher gemessen, dass insgesamt 190.000 Photonen pro Sekunde durch den Sender zum Empfänger kamen. Und weil das bei A jetzt im Moment ungefähr 87.000 sind und bei B auch in etwa 90.000 zeigt und das in etwa 50 % sind. Es sind etwas weniger, weil wir Verluste am halbdurchlässigen Spiegel und so weiter haben. (Raph, KG, Paraphrasierung)

Bei drei Teilnehmenden der Ensemble-Gruppe wurden durchschnittlich mehr statistische Aussagen kodiert, was mit der Doppelkodierung zusammenhängt. Eine solche ist anhand der nachstehenden Segmente illustriert:

Und da sind wir halt auch unter 0 % gestoßen. Das heißt, die Photonen werden sich niemals teilen, also können nicht transmittiert und reflektiert gleichzeitig werden, sondern wir haben herausgefunden, dass 50 % reflektiert und 50 % transmittiert werden.

(Hanna, KD, Paraphrasierung)

Wenn man jetzt auf die ganze Photonenmenge guckt, dann gehen 25 % der Photonen durch, weil ursprünglich waren es ja 100 %. Weil es einfach nur aufgeteilt wird, und dann haben wir noch mal durch die Filter 50 %. Also kommen nach dem Aufbau 0,25 zu dem Sensor A durch. (Daniel, EG, Anwendung)

Vier Kodierungen der Ensemble-Deutung wurden mit der Ablehnung der Kopenhagener Deutung doppelt kodiert ($\kappa=0,73$). Dies geschah einmal bei Pepe (EG) und dreimal bei Samuel (EG). Pepe (EG) verneinte in der Anwendungsphase, eine Aussage über ein Photon machen zu können, begründete dies jedoch damit, dass ihm der Begriff der Polarisierung nicht ausreichend bekannt sei. Samuel (EG) hingegen machte zunächst eine Aussage über ein Photon, äußerte dann jedoch Schwierigkeiten und verneinte fortan, in der Anwendungsphase Aussagen über ein einzelnes Photon treffen zu können:

Also ich würde dann schon davon ausgehen, dass dieses Photon halt aus beiden Polarisierungen besteht. Oder auch einzelne Photonen, die diese beiden Polarisierungen letzten Endes besitzen. Und das ist dann immer die Hälfte, weil die Photonen halt quasi dann an dem Filter geteilt werden [...]. Stimmt, da haben wir gerade gesagt, dass die Photonen nicht geteilt werden. Dann kann ich leider jetzt gar nichts dazu [über ein Photon] aussagen. (Samuel, EG, Anwendung)

Damit wurde die Kopenhagener Deutung bzw. die Möglichkeit, Aussagen über ein Photon zu treffen, ausschließlich in der Ensemble-Gruppe abgelehnt, und das nur im Zusammenhang mit Schwierigkeiten in der Anwendungsphase.

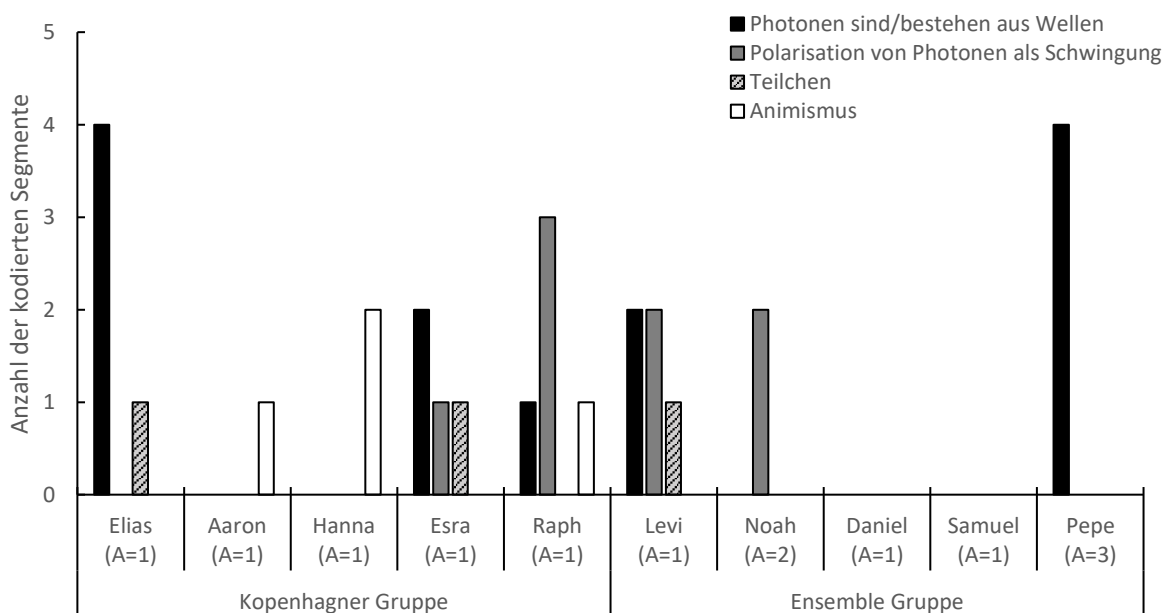
Eine reine Anwendung der Ensemble-Deutung, bei der keine Aussagen über ein einzelnes Photon, sondern nur über eine Menge von Photonen getroffen wurden, war lediglich bei einer Person mit eingeschränkter Akzeptanz zu beobachten (Noah, EG).

6.4 Schülervorstellungen

Ebenfalls wurde untersucht, welche Schülervorstellungen zu erkennen sind. Dabei wurden die Kategorien „Photonen sind bzw. bestehen aus Wellen“, „Polarisation von Photonen als Schwingungen“, Photonen als „Teilchen“ und „Animismus“ gefunden, wie in Abbildung 9 veranschaulicht.

Abbildung 9

Zuordnungshäufigkeiten für verschiedene Schülervorstellungen



Anmerkung. Anzahl der kodierten Segmente für die Kategorien der Schülervorstellungen für die transkribierten und paraphrasierten Schüleräußerungen der zwei Versuchsgruppen während der Paraphrasierung eines Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen und der Anwendungsphase, bei der das Experiment mit Polarisationsfiltern erweitert wurde. Die Segmentlänge ist dabei verschieden. A: Akzeptanzstufe für die Deutung der Gruppe (A=1: vollständige, A=2: eingeschränkte, A=3 keine Akzeptanz) $\kappa=0,72$ (Schülervorstellungen).

Die Beschreibung von Photonen als Wellen trat bei drei Schülerinnen und Schülern der Kopenhagener Gruppe und bei zweien der Ensemble-Gruppe in der Anwendungsphase im Zusammenhang mit dem Einsatz von Polarisationsfiltern auf. Dabei wurde vorab keine Formulierungshilfe für die Beschreibung der Polarisation von Photonen bereitgestellt, sondern nur die Formulierung bei Licht präsentiert. Neben der Beschreibung als Welle trat dabei auch der Fall auf, dass das Photon sich auf einer Welle bewegt.

Dass die Wahrscheinlichkeit bei ca. der Hälfte liegt, dass es [das Photon] sich auf einer horizontalen Welle bewegt oder zur anderen Hälfte auf einer vertikalen bewegt [...] (Pepe, EG, Anwendung)

Die Beschreibung der Polarisation von Photonen als Schwingung tauchte im gleichen Kontext auf. In beiden Fällen äußerten die Teilnehmer Unsicherheiten, ob die Formulierungen so richtig gewählt sind.

Ich weiß nicht, ob es falsch formuliert ist, aber dass sie nicht die Richtung ändern können, in die sie schwingen. Das heißt, wenn sie horizontal schwingen, dann verändert sich das nicht. (Raph, KG, Anwendung)

Der Teilchenbegriff wurde in beiden Gruppen selten benutzt. Elias (KG) entfiel das Wort „Photon“, weshalb er sich erkundigte, wie „das Teilchen“ heißt, während Esra (KG) ein Photon als „Lichtteil“ beschrieb. Levi (EG) äußerte sich in der Anwendungsphase dahingehend, dass er meine, Photonen können als „Wellen und Teilchen wirken“.

Im Ganzen lässt sich hier kein wesentlicher Unterschied im Vorkommen dieser Schülervorstellungen zwischen den beiden Gruppen erkennen. Allein die Kategorie „Animismus“ wurde ausschließlich in der Kopenhagener Gruppe eruiert. Die Probanden äußerten, dass eine Entscheidung getroffen wurde, wie durch Hannas Äußerung repräsentiert:

Außerdem fand ich schlüssig, dass man durch die Anzeige gesehen hat, dass es halt nicht möglich ist, dass sich das Photon teilt, sondern dass es sich so gesehen entscheiden muss, ob es transmittiert oder reflektiert wird. (Hanna, KG, Paraphrasierung)

6.5 Akzeptanzvergleich der Gruppen

Um ein umfassendes Verständnis der Akzeptanz der Deutungen zu erlangen, ist es erforderlich, sowohl die Einstellungsakzeptanz, die durch die Beurteilung der Plausibilität ermittelt wurde, als auch die Verhaltensakzeptanz, die sich durch deutungsspezifische Äußerungen manifestiert, gemeinsam zu betrachten. Hierzu wurden die Probanden der beiden Gruppen einem Nutzertyp, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, zugeordnet. Tabelle 5 zeigt diese Zuordnung, wobei die Probanden auf Grundlage der dargelegten Daten aus den vorherigen Abschnitten klassifiziert wurden.

Tabelle 5

Klassifizierte Benutzertypen der Ensemble- und Kopenhagener Gruppe

		Verhaltensakzeptanz	
		(Verwendung der präsentierten Deutung)	
		ja	nein
Einstellungsakzeptanz (Plausibilität)	ja A=1	überzeugter Benutzer 5 Kopenhagener 0 Ensemble (Elias, Aaron, Hanna, Esra, Raph)	verhinderter Benutzer 0 Kopenhagener 3 Ensemble (Levi, Daniel, Samuel)
	nein A=2-3	gezwungener Benutzer 0 Kopenhagener 1 Ensemble (Levi)	überzeugter Nicht-Benutzer 0 Kopenhagener 1 Ensemble (Pepe)

Anmerkung. In Anlehnung an Müller-Böling & Müller (1986, S. 28). A: Akzeptanzstufe für die Deutung der Gruppe (A=1: vollständige, A=2: eingeschränkte, A=3 keine Akzeptanz).

Alle Probanden der Gruppe, die das Einzelphotonen-Experiment unter Verwendung der Kopenhagener Deutung durchliefen, wurden als „überzeugte Benutzer“ eingestuft. Diese Klassifizierung basiert auf der Bewertung der Kopenhagener Deutung als plausibel (A=1) und deren Anwendung sowohl während der Paraphrasierung als auch in der Anwendungsphase. Kein Teilnehmer der Ensemble-Gruppe zeigte ein vergleichbares Verhalten. Drei Teilnehmer, die die Ensemble-Deutung als plausibel ansahen (A=1), wandten teilweise die Kopenhagener Deutung an und äußerten sich über ein Photon, das im Widerspruch zur Ensemble-Deutung steht. Daher erhielten sie die Einstufung „verhinderte Benutzer“. Zwei weitere Teilnehmer, die die Deutung entweder teilweise oder gar nicht akzeptierten (A=2-3), wiesen keine Einstellungsakzeptanz auf. Einer von ihnen tätigte keine Aussagen über ein Photon und verwendete die Ensemble-Deutung, weshalb er als „gezwungener Benutzer“ eingestuft wurde. Pepe lehnte die Ensemble-Deutung ab, machte Aussagen über ein Photon und nutzte die Kopenhagener Deutung, weshalb er als überzeugter Nichtbenutzer klassifiziert wurde.

7 Diskussion

7.1 Ergebnisdiskussion

Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Ergebnisse sollen nun im Hinblick auf die Fragestellungen diskutiert werden, um Hypothesen für weitere Forschungsvorhaben zu generieren. Da die Akzeptanz sich auch in der Verwendung der Deutung äußert, werden die erste und die zweite Forschungsfrage gemeinsam beantwortet.

Zu den Forschungsfragen:

- (1) *Inwiefern akzeptieren Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II die Deutung eines Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen nach der Ensemble- bzw. der Kopenhagener Variante, und worin bestehen Unterschiede in der Akzeptanz?*
- (2) *Inwiefern verwenden Schülerinnen und Schüler in experimentellen Kontexten die Kopenhagener und die Ensemble-Deutung?*

Akzeptanz und Verwendung der Kopenhagener Deutung

Die Ergebnisse der Forschung zeigten eine Akzeptanz der Kopenhagener Deutung sowohl in der Einstellung als auch im Verhalten der Schülerinnen und Schüler und weisen damit Ähnlichkeiten in der Zustimmung zu den bisher erforschten Einstellungen in der wissenschaftlichen Gemeinschaft auf, in der die Kopenhagener Deutung einen hohen Stellenwert hat (Schlosshauer, Kofler & Zeilinger, 2013, S. 225). Die Kopenhagener Deutung wurde in experimentellen Kontexten häufig durch die Schülerinnen und Schüler verwendet, auch wenn diesen das Experiment nicht unter Verwendung der Kopenhagener Deutung vorgestellt wurde.

Akzeptanz und Verwendung der Ensemble-Deutung

Die Ensemble-Deutung wurde teilweise akzeptiert, wobei eher eine Einstellungsakzeptanz als eine Verhaltensakzeptanz beobachtet wurde. Selbst bei Zustimmung zur Deutung erfolgte ihre praktische Anwendung weniger häufig. So wurde die Ensemble-Deutung in einem Fall abgelehnt und nicht angewandt. Insgesamt war die Akzeptanz der Ensemble-Deutung geringer, was sich ebenfalls in der geringeren Zustimmung in der wissenschaftlichen Gemeinschaft widerspiegelt (Schlosshauer, Kofler & Zeilinger, 2013, S. 225). Die Kritik konzentrierte sich insbesondere auf den fehlenden Lebensweltbezug sowie die eingeschränkte Nützlichkeit der aus dem Experiment abgeleiteten Interpretationen.

Ein weiterer bedeutsamer Aspekt, der in Betracht gezogen werden sollte, ist die Feststellung, dass Schülerinnen und Schüler, denen das Experiment im Rahmen der Ensemble-Deutung präsentiert wurde, teilweise eigene Interpretationen entwickelten. Diese entsprachen weder der Ensemble- noch der Kopenhagener Deutung. Obwohl die fachliche Korrektheit dieser Interpretationen nicht bewertet wurde, besteht hier die Eventualität für weniger fachlich korrekte Deutungsformulierungen. Vor diesem Hintergrund wäre eine vertiefende Untersuchung aufschlussreich, die, analog zum vorliegenden Studiendesign, auch den Lernzuwachs berücksichtigt.

Die Verneinung der Möglichkeit, Aussagen über ein Photon zu treffen – wie es der Ensemble-Deutung entspricht –, wurde insbesondere dann verwendet, wenn Schwierigkeiten auftraten und die Lernenden mit einem kognitiven Konflikt konfrontiert waren, den sie auf diese Weise zu vermeiden suchten. Ein kognitiver Konflikt kann jedoch einen positiven Einfluss auf den Lernprozess ausüben. Es besteht daher die Vermutung, dass die Schülerinnen und Schüler, die die Ensemble-Deutung anwenden, dazu neigen könnten, sich weniger intensiv mit der Materie auseinanderzusetzen.

Statistische Aussagen

Da experimentelle Sprechweisen Parallelen zur Ensemble-Deutung aufweisen, war es bei den geäußerten Aussagen nicht immer eindeutig möglich, zwischen dieser und statistischen Aussagen zu unterscheiden. Dies spiegelt sich auch in der noch moderaten Reliabilität der Kategorie „Ensemble-Deutung“ wider. Aus diesem Grund wurde ebenfalls untersucht, inwiefern der statistische Charakter des quantenphysikalischen Realexperiments von Schülerinnen und Schülern erkannt und verbalisiert wurde. Dabei konnte kein deutungsspezifischer Unterschied festgestellt werden, und es zeigte sich, dass statistische Aussagen in Verbindung mit Realexperimenten auftreten. Im Anschluss an statistische Beschreibungen formulierten die Lernenden Aussagen über einzelne Photonen, was nicht der Ensemble-Interpretation entspricht. Dies könnte als ein Bedürfnis der Schülerinnen und Schüler interpretiert werden, aus statistischen Beobachtungen konkrete Erkenntnisse über einzelne Entitäten abzuleiten.

Vergleich der Deutungen

Die Klassifizierung der Probanden in verschiedene Nutzertypen (siehe 6.5) verdeutlicht, dass die Kopenhagener Deutung eine stärkere Verhaltensakzeptanz erfährt als die Ensemble-Deutung. Die Ensemble-Deutung könnte für Schülerinnen und Schüler schwerer zugänglich sein oder weniger intuitiv erscheinen. Diese Annahme besteht, weil keine Probanden der Ensemble-Gruppe als überzeugte Benutzer eingestuft wurden.

Aus den Ergebnissen lässt sich die Hypothese ableiten, dass die Kopenhagener Deutung bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II eine höhere Akzeptanz in der Einstellung und Anwendung findet als die Ensemble-Deutung. Diese Hypothese beruht auf einer Tendenz, die sich in dieser Studie abzeichnete. Um die hier generierte Hypothese zu verifizieren oder zu falsifizieren, sind weitere Untersuchungen mit einer größeren Stichprobe beispielsweise im Klassenverband notwendig. In jedem Fall legen die Ergebnisse nahe, weitere Untersuchungen durchzuführen, da sich Unterschiede in der Akzeptanz der Deutungen erkennen lassen.

Ein potenzieller Erklärungsansatz könnte darin liegen, dass es für den Lernenden gewohnter ist, über eine Entität zu sprechen, wodurch eine gewisse Vertrautheit mit dem Lerngegenstand entsteht. Diese könnte sich in der Anwendung von Animismen manifestieren, was im weiteren Verlauf bei der Analyse der Schülervorstellungen näher berücksichtigt wird.

Zu der Forschungsfrage:

(3) Welche Schülervorstellungen treten auf und manifestieren sich diese unter Verwendung beider Deutungen?

Beschreibungen von Photonen und Polarisation

Neben der Akzeptanz und Anwendung der Deutung wurden auch Schülervorstellungen analysiert. In den Formulierungen zur Erklärung der Polarisation von Licht wurde Photonen häufig einen Wellencharakter zugeschrieben. Dies ist vermutlich auf die Einführung des Polarisationsbegriffs durch das verwendete Material zurückzuführen, das keine spezifischen Hinweise auf die Polarisationszustände von Photonen bot. Eine weiterführende Untersuchung sollte klären, ob Schüler und Schülerinnen Photonen tatsächlich als Wellen betrachten oder ob ein Bewusstsein für den epistemischen Charakter besteht. Solche Erkenntnisse könnten Aufschluss über die ontologischen Vorstellungen von Quantenobjekten und deren Veränderung durch Experimente geben.

Die Vorstellung von Photonen als Teilchen wurde kaum geäußert und zeigte keine klare Verbindung zur verwendeten Deutung. Es wäre jedoch sinnvoll, die Vorstellungen über Quantenobjekte genauer zu erfassen. Eine Wiederholung der Studie und zusätzliche Fragen zur Ontologie könnten hier aufschlussreiche Ergebnisse liefern. In der aktuellen Studie deuteten die Lernenden meist darauf hin, dass Photonen je nach Kontext unterschiedlich wirken und die Beschreibung kontextabhängig ist.

Animismus

Im Zusammenhang mit den Schülervorstellungen ließ sich beobachten, wie die Präsentation der Kopenhagener Deutung zur Verwendung von Animismen durch die Lernenden führte, obwohl diese nicht explizit vermittelt wurden. Da die Kopenhagener Deutung von den Lernenden auch eine höhere Akzeptanz erfuhr, könnte ein Zusammenhang zwischen dieser und der Verwendung von Animismen bestehen. Püttschneider (2005, S. 188) führte eine Interventionsstudie im Chemieunterricht durch, die die Hypothese verifizierte, Animismen führen aufgrund ihrer Verständlichkeit zu einem nachhaltigen motivationalen Effekt. In dieser Studie wurden chemische Inhalte mithilfe animistischer Erklärungen präsentiert. Eine anschließende Interviewstudie, in der Schüleraussagen ausgewertet wurden, bestätigte diese Einschätzung. In der vorliegenden Arbeit wurden den Schülerinnen und Schülern zwar keine expliziten Animismen vorgestellt, dennoch verwendeten sie diese, nachdem ihnen das Experiment mit der Kopenhagener Deutung präsentiert wurde. Dies legt im Hinblick auf die Studie von Püttschneider (2005) die Hypothese nahe, dass die höhere Akzeptanz der Deutung mit der Verwendung von Animismen zusammenhängen könnte.

Zukünftige Untersuchungen sollten prüfen, ob die Einbindung von Animismen in die Präsentation von Deutungen die Akzeptanz und das Verständnis der Quantenphysik steigert. Eine zu testende Hypothese wäre, dass Animismen mit einer größeren Zustimmung zu quantenphysikalischen Experimenten verbunden sind und Lernende, die die Kopenhagener Deutung anwenden, eher zu animistischen Ausdrucksweisen neigen.

7.2 Limitationen der Erhebung

Auch diese Studie weist bestimmte Limitationen auf, die betrachtet werden, um eine fundierte Einordnung der Resultate zu ermöglichen. Einen zentralen Aspekt im Hinblick auf die Limitationen stellt die Stichprobe dar, bei der es sich um gymnasiale Oberstufenschüler und Schülerinnen handelt. Eine mögliche Erweiterung der Stichprobe könnte darin bestehen, auch Schülerinnen und Schüler anderer Schulformen, wie Gesamtschulen, einzubeziehen, um die Variation der Stichprobe zu erhöhen. Gleichwohl wird in beiden Fällen das Ziel des Abiturs verfolgt. Daher können die gewonnenen Erkenntnisse auch für andere Schulformen als weitgehend zutreffend angenommen werden.

Eine weitere methodische Limitation liegt in der Fokussierung auf ein Strahlteilerexperiment. Künftige Forschungsarbeiten sollten prüfen, inwieweit sich die Erkenntnisse zur Akzeptanz unter Verwendung weiterer Experimente, wie etwa Interferometern, zeigen.

Eine zusätzliche Einschränkung dieser Studie besteht darin, dass bei der Bewertung der Einstellungsakzeptanz (d. h. der Einschätzung der Plausibilität) das Verständnis der Interpretation mit in die Bewertung eingeflossen ist. Dies geschah durch die Orientierung an vorherigen Forschungsarbeiten. In der vorliegenden Studie wäre die Einstufung der Akzeptanz auch ohne Berücksichtigung des Verständnisses gleich ausgefallen. Nichtsdestotrotz sollte in zukünftigen Studien das Konstrukt des Verständnisses separat betrachtet werden, da es durchaus möglich ist, eine Interpretation zwar zu verstehen, sie aber nicht zu akzeptieren. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Verwendung einer Likert-Skala von 1 bis 10 zur Einstufung der Plausibilität methodisch problematisch war. Eventuell neigten die Teilnehmer aufgrund des sozialen Kontextes dazu, eine positivere Bewertung abzugeben, da sie die Skala möglicherweise auch als indirekte Bewertung der interviewenden Person interpretierten.

Um dieses Problem zu minimieren, wäre es empfehlenswert, die Skala transparenter zu gestalten und stattdessen eine Skala von 1 bis 3 zu verwenden, bei der die Kategorien klar definiert und vorformuliert sind. Das Prinzip der Likert-Skala erwies sich im Kontext des Gesprächs als grundsätzlich geeignet, den Gesprächsfluss aufrechtzuerhalten, da die Teilnehmer ihre Einschätzungen begründeten. Lediglich die Breite der Skala sollte überdacht werden.

7.3 Anpassungsempfehlungen für das Informationsangebot

Da das Design der Studie sich als geeignet erwiesen hat, um das Erkenntnisinteresse zu untersuchen, kann es als Vorlage für weitere Untersuchungen dienen. Sollte diese Arbeit als Pilotstudie genutzt werden, ist es empfehlenswert, das Material des Informationsangebots in Bezug auf die gewonnenen Erkenntnisse anzupassen. Daher werden an dieser Stelle auch Beobachtungen und Aussagen zum verwendeten Material berücksichtigt, auch wenn diese nicht im primären Fokus der Erhebung standen. Sie bieten jedoch Hinweise für die mögliche Gestaltung zukünftiger Forschungsprojekte oder für die Entwicklung von Unterrichtsmaterial für die Präsentation quantenphysikalischer Realexperimente. Um Schlussfolgerungen zu ziehen, welche Elemente des Informationsangebotes beibehalten werden sollten, können Schüleranmerkungen, wie die folgende, betrachtet werden:

Es war sehr einfach, alles zu verstehen und nachzuvollziehen, weil die einzelnen Schritte alle nachvollziehbar waren und alles sehr kleinschrittig erklärt wurde. (Raph, KG)

Die Orientierung am Basismodell „Konzeptbilden“ nach Oser & Baeriswyl (2001) und den darin enthaltenen Handlungskettenschritten erwies sich also als sinnvoll, da sie den Schülerinnen und Schülern gemäß ihrer Aussagen ermöglichte, die Inhalte nachzuvollziehen. Ein zusätzlicher Grund für das positive Feedback zur Klarheit der Handlungsschritte könnte in der expliziten Trennung der Experimentierphasen liegen, die das Durchführen, Beschreiben, Paraphrasieren der Messdaten und anschließende Deuten umfasste.

Diese Art der Strukturierung und die Fokussierung auf die Deutung scheinen nach einer Schüleraussage „normalerweise“ nicht im Unterricht anzufinden zu sein, sondern eher eine Zentrierung auf das Rechnen:

Also, es war sehr nachvollziehbar. Normalerweise hat man oft, dass man einfach Formeln runterrattert, das ist ja auch notwendig, in Anführungszeichen, aber um zu wissen, wie diese Dinge zusammenhängen nicht. Zur Aufarbeitung ist natürlich so eine Struktur hier viel angenehmer, weil man einfach nur noch mal an der Hand geführt wird und die Zusammenhänge kurz dargestellt werden. Es wird gezeigt, wie das jetzt zusammenhängt, und grob noch einmal drübergegangen wird. Mir hat es geholfen, nochmal darüber nachzudenken, und es wieder ins Gehirn zu rufen. (Daniel, EG)

In diesem Zusammenhang sei auch zu benennen, dass alle Schüler und Schülerinnen angaben, die Rechnung nachvollzogen zu haben. Die Präsentation der Rechnung ohne Formeln und allein durch Ausrechnen mit dem Taschenrechner ist im Sinne der Reduktion kognitiver Belastung empfehlenswert:

Aber sonst fand ich das eigentlich super erklärend, auch hier mit dem Taschenrechner. (Hanna, KG)

Der erste Schritt des Basismodells ist die Aktivierung des Vorwissens, die in diesem Fall durch das Betrachten und Zusammenfassen zweier Arbeitsblätter realisiert wurde. Diese wurden von allen Schülerinnen und Schülern innerhalb von 10 Minuten gelesen und anschließend angemessen zusammengefasst. Außerdem konnten Rückfragen geklärt werden. Die Gestaltung der Arbeitsblätter kann also prinzipiell beibehalten werden:

Ich fand, die Blätter waren auch angenehm zur Aufbereitung bezüglich des Hintergrundwissens. Sie waren sehr nachvollziehbar. Nur auf dem einen Blatt musste ich erst kurz nachdenken, weil es erst nach rechts und dann nach links ging, aber an sich waren diese eher tief entspannt zu lesen. (Daniel, EG)

Unter Berücksichtigung der Kritik an der Ausrichtung des Arbeitsblattes zum Photoeffekt wurde dies verbessert, wie im Anhang B dargestellt. Um die Variablen konstant zu erhalten, wurden für diese Erhebung immer die gleichen Arbeitsblätter eingesetzt. Da Unsicherheit ausgedrückt wurde, wie über die Polarisation von Photonen gesprochen werden kann, sollte eventuell eine Formulierungshilfe zum Polarisationszustand von Photonen innerhalb des Informationsangebotes ergänzt werden, oder zumindest auf den Informationsblättern, die innerhalb der Anwendungsphase verwendet wurden.

Weitere durch die Schülerinnen und Schüler als positiv bewertete Elemente waren die Präsentation des Strahlteilerexperimentes mit einem Laser innerhalb der Vorwissensaktivierung und eine Münzanalogie für die Interpretation des Einzelphotonenexperimentes:

Also, diesen Vergleich mit der Münze fand ich ganz gut. Und ja, dass man gerade halt mit diesem Laser auch sehen konnte, was passiert ist. Und das kann man ja an sich hiermit super vergleichen. Also, dass man doch zuvor das mit dem Laser gemacht hat, fand ich dann halt ganz schlau gemacht. (Levi, EG)

Die Münzanalogie resultierte folglich nicht in einer Überforderung und kann daher nicht nur im Mathematikunterricht verwendet werden, um das Konzept der Wahrscheinlichkeit zu veranschaulichen (Krüger et al., 2015), sondern auch im Physikunterricht eingesetzt werden. Ein Grund für die Befürwortung des Münzbeispiels könnte in der „ästhetisch-sinnlichen Bedeutung“ der Münze als Gegenstand aus der Lebenswelt liegen (Kircher, 2020, S. 59), der den abstrakten Wahrscheinlichkeitsbegriff mit einer realen Erfahrung verknüpft. Innerhalb der Inhaltsanalyse wurde außerdem ersichtlich, dass die Schülerinnen und Schüler teilweise Schwierigkeiten mit der Vielzahl der Fachbegriffe hatten. Für den Begriff „Strahlteiler“ wird empfohlen, den Ausdruck „halbdurchlässiger Spiegel“ zu verwenden, da dieser in der Untersuchung von den Teilnehmern bevorzugt wurde. Des Weiteren wurde in den Ausführungen der Schülerinnen und Schüler die Beschriftung der zu den Detektoren führenden Periskope mit A und B verwendet. Der Begriff „Detektor“ wurde teilweise vergessen oder durch „Empfänger“ ersetzt. Es empfiehlt sich daher, die Beschriftung direkt am Experiment durch „Detektor A“ und „Detektor B“ vorzunehmen. Die vorherige Reduktion der Fachbegriffe und der Komplexität, etwa durch das Weglassen der expliziten Benennung der einzelnen Bauteile (z.B. Photodioden), ist im Rahmen dieses Informationsangebots zu befürworten. Lediglich ein Teilnehmer äußerte Interesse am „Herstellungsprozess“ der Photonen. Bei den anderen Teilnehmern wurde dieser Aspekt nicht hinterfragt. In allen Fällen führte die Erläuterung des Koinzidenzbegriffs zunächst zu Verwirrung, da der Begriff des Koinzidenzintervalls nicht sofort verstanden wurde. Dementsprechend wäre es hier empfehlenswert, den Koinzidenzbegriff analog zu Bitzenbauer (2020, S. 49) als „gleichzeitiges Messen“ von Photonen einzuführen und den Begriff des Koinzidenzintervalls nur auf Nachfrage zu erläutern. Abgesehen von den genannten Anpassungen stellt das vorliegende Informationsangebot eine qualitativ hochwertige und fundierte Grundlage für weiterführende Studien sowie für den Einsatz in der Lehre der Quantenphysik dar.

8 Zusammenfassung und Fazit

Diese Arbeit verfolgte das Ziel, die Akzeptanz der Ensemble- und der Kopenhagener Deutung durch Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II zu untersuchen und eventuelle Unterschiede zu identifizieren. Zudem wurde erforscht, inwiefern Schülervorstellungen in diesem Kontext auftreten. Hierzu wurde den Schülerinnen und Schülern im Rahmen einer Akzeptanzbefragung ein Strahlteilerexperiment mit Einzelphotonen vorgestellt, das anschließend mithilfe der Kopenhagener bzw. der Ensemble-Deutung interpretiert wurde. Um Einblicke in die Einstellungsakzeptanz gegenüber den Deutungen zu gewinnen, wurde in Form eines Interviews erfragt, wie plausibel und verständlich die Deutungen empfunden wurden. Zur Untersuchung der Verhaltensakzeptanz, also der praktischen Anwendung der entsprechenden Deutung, sollten die Teilnehmenden das Informationsangebot mit eigenen Worten wiedergeben und die Ergebnisse im neuen Kontext mit dem Einsatz von Polarisationsfiltern interpretieren. Die Interviews wurden transkribiert und mittels strukturierender und zusammenfassender qualitativer Inhaltsanalysen untersucht. Die strukturierende Inhaltsanalyse diente dazu, deutungsspezifische Aussagen zu kategorisieren. Es zeigte sich, dass die Kopenhagener Deutung eine höhere Verhaltensakzeptanz aufweist als die Ensemble-Variante, da sie häufiger verwendet wurde und Schülerinnen und Schüler nach statistischen Aussagen solche über einzelne Photonen machten. Die Einstellungsakzeptanz, also die Plausibilität der Deutung, wurde ebenfalls mittels der strukturierenden Inhaltsanalyse untersucht. Dabei zeigte sich eine insgesamt höhere Einstellungsakzeptanz für die Kopenhagener Deutung. Lernende, die die Ensemble-Deutung als plausibel betrachteten, machten dennoch teilweise Aussagen über ein einzelnes Quantenobjekt, was der Ensemble-Deutung widerspricht, oder wandten die Kopenhagener Deutung an. Eine geäußerte Kritik an der Ensemble-Variante betraf den fehlenden Lebensweltbezug und die unklare Bedeutungszuschreibung. Die durch die induktive Inhaltsanalyse untersuchten Schülervorstellungen zeigten keinen Zusammenhang mit einer spezifischen Deutung. Animistische Vorstellungen wurden hingegen ausschließlich von Schülerinnen und Schülern geäußert, denen das Experiment im Zusammenhang mit der Kopenhagener Deutung präsentiert wurde.

Zusammenfassend fand die Kopenhagener Deutung unter den Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II sowohl in Bezug auf die Verhaltens- als auch auf die Einstellungsakzeptanz eine größere Zustimmung. Daher lässt sich annehmen, dass die Quantenmechanik mit dieser Deutung schülerorientierter unterrichtet werden könnte als mit der Ensemble-Variante.

9 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine Grundlage für weiterführende Forschung, da ein möglicher Ansatzpunkt gefunden wurde, mit welchem der Quantenphysikunterricht schülerorientierter gestaltet werden könnte, insofern Deutungen verwendet werden. Insbesondere die aufgestellte Hypothese, dass die Kopenhagener Deutung bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II eine höhere Akzeptanz findet als die Ensemble-Deutung, sollte quantitativ untersucht werden.

Da sich die Gestaltung des Informationsangebots unter Einsatz eines quantenmechanischen Realexperiments als geeignet erwiesen hat, um die Akzeptanz verschiedener Deutungen zu untersuchen, könnte dies im Klassenverband angewendet und präsentiert werden. Anschließend könnte eine quantitative Messung der Akzeptanz erfolgen, wobei die in dieser Forschung genannten Kritikpunkte mitberücksichtigt werden sollten. Der Vorteil dieser Herangehensweise liegt in der größeren erreichbaren Stichprobe sowie in der Möglichkeit, die praktische Umsetzung und Präsentation des Quantenexperiments im Klassenverband zu erproben.

Ein weiterer Ansatz bestünde darin, das in dieser Arbeit entwickelte Forschungsdesign unter Berücksichtigung der in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Verbesserungsvorschläge mit Physikstudierenden durchzuführen. Damit wäre eine Gegenüberstellung der Ergebnisse dieser Studie, also der Schülerakzeptanz mit der Studierendenakzeptanz, möglich. Außerdem könnte dadurch untersucht werden, inwiefern die Erkenntnisse dieser Studie auf den universitären Kontext übertragbar sind.

10 Literaturverzeichnis

- Abhang, R. Y. (2005). Making introductory quantum physics understandable and interesting. *Resonance*, 10(1), 63–73. <https://doi.org/10.1007/bf02835894>
- Baily, C. & Finkelstein, N. D. (2009). Development of quantum perspectives in modern physics. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 5(1), 010106. <https://doi.org/10.1103/physrevstper.5.010106>
- Baily, C. & Finkelstein, N. D. (2015). Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 11(2), 020124. <https://doi.org/10.1103/physrevstper.11.020124>
- Ballentine, L. E. (1970). The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics. *Reviews Of Modern Physics*, 42(4), 358–381. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.42.358>
- Ballentine, L. E. (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. World Scientific.
- Bartelmann, M., Feuerbacher, B., Krüger, T., Lüst, D., Rebhan, A. & Wipf, A. (2018). *Theoretische Physik 3, Quantenmechanik*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56072-3>
- Baumann, K., Sexl, R.U. (1984). Paradoxien tauchen auf. In K. Baumann & R. U. Sexl (Hrsg.), *Die Deutungen der Quantentheorie*. (S. 24–29). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-663-14179-2_2
- Bitzenbauer, P. (2020). *Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*. Logos. <https://doi.org/10.30819/5123>
- Bitzenbauer, P. (2021). Practitioners' views on new teaching material for introducing quantum optics in secondary schools. *Physics Education*, 56(5), 055008. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac0809>
- Bitzenbauer, P. & Meyn, J. (2021). Fostering students' conceptions about the quantum world – results of an interview study. *Progress in Science Education*, 4(2), 40–51. <https://doi.org/10.25321/prise.2021.1079>
- Blumör, R. (1993). *Schülerverständnisse und Lernprozesse in der elementaren Optik: Ein Beitrag zur Didaktik des naturwissenschaftlichen Sachunterrichts in der Grundschule*. Westarp.

- Bøe, M. V., Henriksen, E. K. & Angell, C. (2018). Actual versus implied physics students: How students from traditional physics classrooms related to an innovative approach to quantum physics. *Science Education*, 102(4), 649–667. <https://doi.org/10.1002/sce.21339>
- Bohr, N. (1928). Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. *The Science Of Nature*, 16(15), 245–257. <https://doi.org/10.1007/bf01504968>
- Borish, V. & Lewandowski, H. J. (2023). Seeing quantum effects in experiments. *Physical Review. Physics Education Research*, 19(2), 020144. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.19.020144>
- Bouchée, T., De Putter Smits, L., Thurlings, M. & Pepin, B. (2021). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses. *Studies in Science Education*, 58(2), 183–202. <https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963579>
- Bronner, P. (2010). *Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons*. Logos.
- Brookes, D. T. & Etkina, E. (2007). Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review Special Topics-physics Education Research*, 3(1), 010105. <https://doi.org/10.1103/physrevstper.3.010105>
- Burde, J. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Logos. <https://doi.org/10.30819/4726>
- Cleve, J. N. (2023). *Die Wesenszüge der Quantenphysik qualitativ und quantitativ – Entwicklung eines Lehrgangs zu Experimenten mit dem Quantenkoffer* (Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum). https://dp.physik.ruhr-uni-bochum.de/wp-content/uploads/sites/7/2023/09/Masterarbeit_Jan-Niklas_Cleve.pdf
- Davies, P. C. W. (1995). *Superforce: The Search for a Grand Unified Theory of Nature*. Simon & Schuster.
- Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY. (2020). *Glossar. Avalanche-Photodiode*. https://www.desy.de/schule/schuelerlabore/standort_zeuthen/kosmische_teilchen/glossar/index_ger.html?selected=A.
- Didiș, N., Eryılmaz, A. & Erkoç, Ş. (2014). Investigating students' mental models about the quantization of light, energy, and angular momentum. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 10(2), 020127. <https://doi.org/10.1103/physrevstper.10.020127>

- Döring, N. (2023). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (6. Aufl.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64762-2_10
- Dresing, T. & Pehl, T. (2015). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (6. Aufl.). Dr Dresing & Pehl GmbH.
- Dudenredaktion. (o. D.). Deutung. <https://www.duden.de/node/32065/revision/1436332>
- Eidemüller, D. (2017). *Quanten - Evolution - Geist: Eine Abhandlung über Natur, Wissenschaft und Wirklichkeit*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49379-3>
- Einstein, A. (1936). Physik und Realität. *Journal of the Franklin Institute*, 221(3), 313–347. [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(36\)91045-1](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(36)91045-1)
- Faye, J. (2019). Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In E. N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qm-copenhagen/>
- Friebe, C. (2018). Messproblem, Minimal- und Kollapsinterpretationen. In C. Friebe, M. Kuhlmann, H. Lyre, P. M. Näger, O. Passon & M. Stöckler (Hrsg.), *Philosophie der Quantenphysik* (2. Aufl., S. 41–74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54276-7_2
- Galvez, E. J. (2010). Qubit quantum mechanics with correlated-photon experiments. *American Journal Of Physics*, 78(5), 510–519. <https://doi.org/10.1119/1.3337692>
- Geyer, MA., Kuske-Janßen, W. (2019). Mathematical Representations in Physics Lessons. In G. Pospiech, M. Michelini & BS. Eylon (Hrsg.) *Mathematics in Physics Education* (1. Aufl., S. 75–102). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04627-9_4
- Gomatam, R. (2007). Niels Bohr's Interpretation and the Copenhagen Interpretation—Are the Two Incompatible? *Philosophy Of Science*, 74(5), 736–748. <https://doi.org/10.1086/525618>
- Greca, I. M. & Moreira, M. A. (2001). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education*, 86(1), 106–121. <https://doi.org/10.1002/sce.10013>
- Greca, I.M. & Freire, O. (2014). Meeting the Challenge: Quantum Physics in Introductory Physics Courses. In M. Matthews, M. (Hrsg.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (S. 183–209). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8_7
- Hammann, M. & Asshoff, R. (2014). *Schülervorstellungen im Biologieunterricht - Ursachen für Lernschwierigkeiten*. Kallmeyer/Klett.
- Hecht, E. (2023). *Optik* (8. Aufl.). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783111025599>

- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, *43*, 172–198. <https://doi.org/10.1007/bf01397280>
- Heisenberg, W. (1956). Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie. *Physikalische Blätter*, *12*(7), 289–304. <https://doi.org/10.1002/phbl.19560120701>
- Heisenberg, W., Landé, A., Born, M. & Biem, W. (1969). Auffassungen über die Quantentheorie. *Physikalische Blätter*, *25*(3), 105–113. <https://doi.org/10.1002/phbl.19690250304>
- Helfferich, C. (2011). *Die Qualität qualitativer Daten* (4. Aufl). VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-92076-4>
- Hewson, P. W., & Thorley, N. R. (1989). The conditions of conceptual change in the classroom. *International Journal of Science Education*, *11*(5), 541–553. <https://doi.org/10.1080/0950069890110506>
- Johansson, A., Andersson, S., Salminen-Karlsson, M. & Elmgren, M. (2016). “Shut up and calculate”: the available discursive positions in quantum physics courses. *Cultural Studies Of Science Education*, *13*, 205–226. <https://doi.org/10.1007/s11422-016-9742-8>
- Jung, W. (1992). Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Hrsg.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (S. 278–295). IPN.
- Kaiser, D. (2014). History: Shut up and calculate! *Nature*, *505*, 153–155. <https://doi.org/10.1038/505153a>
- Kattmann, U. (2005). Lernen mit anthropomorphen Vorstellungen? - Ergebnisse von Untersuchungen zur Didaktischen Rekonstruktion in der Biologie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *11*, 165–174.
- Kircher, E. (2020). Grundlagen der Physikdidaktik. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer, (Hrsg.), *Physikdidaktik Grundlagen* (4. Auflage, S. 25–77). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_2
- Kircher, E. & Girwidz, R. (2020a). Ziele und Kompetenzen im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer, (Hrsg.), *Physikdidaktik Grundlagen* (4. Auflage, S. 79–115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_3
- Kircher, E. & Girwidz, R. (2020b). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik. Grundlagen* (4. Auflage, S. 155–197). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_5

- Koopman, L., Kaper, H., & Ellermeijer, A. (2005). Understanding student difficulties in first year quantum mechanics courses. In *The First European Physics Education Conference*.
- Krabbe, H. & Fischer, H.E. (2020). Gestaltung von Unterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik Grundlagen* (4. Auflage, S. 117–153). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_4
- Kragh, H. (1992). A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education*, 1, 349–363. <https://doi.org/10.1007/bf00430962>
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A. & Van Joolingen, W. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review. Physics Education Research*, 13, 010109. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.13.010109>
- Krüger, K., Sill, H. D. & Sikora, C. (2015). *Didaktik der Stochastik in der Sekundarstufe I*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43355-3>
- Kuhn, W., & Strnad, J. (1995). *Quantenfeldtheorie: Photonen und ihre Deutung*. Vieweg+Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-90949-7>
- Küblbeck, J. & Müller, R. (2003). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*. Aulis
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Mashhadi, A. & Woolnough, B. E. (1999). Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities. *European Journal Of Physics*, 20(6), 511–516. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/20/6/317>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. Beltz
- Mermin, N. D. (2012). Commentary: Quantum mechanics: Fixing the shifty split. *Physics Today*, 65(7), 8–10. <https://doi.org/10.1063/pt.3.1618>
- Merzel, A., Bitzenbauer, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., Stadermann, K., Andreotti, E., Anttila, D., Bondani, M., Chiofalo, M. L., Faletič, S., Frans, R., Goorney, S., Greinert, F., Jurčić, L., Koupilová, Z., Malgieri, M., Müller, R. H., Onorato, P., Pospiech, G., Ubben, M. S., Woitzik, A. & Pol, H. J. (2024). The core of secondary level quantum education: a multi-stakeholder perspective. *EPJ Quantum Technology*, 11. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00237-x>

- Moraga-Calderón, T. S., Buisman, H. & Cramer, J. (2020). The relevance of learning quantum physics from the perspective of the secondary school student: A case study. *European Journal Of Science And Mathematics Education*, 8, 32–50. <https://doi.org/10.30935/scimath/9545>
- Müller-Böling, D. & Müller, M. (1986). *Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation*. Oldenbourg.
- Müller, C. & Duit, R. (2004). Die unterrichtliche Sachstruktur als Indikator für Lernerfolg – Analyse von Sachstrukturdiagrammen und ihr Bezug zu Leistungsergebnissen im Physikunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, (S. 147–161).
- Niebert, K. & Gropengießer, H. (2014). Leitfadengestützte Interviews. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–132). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_10
- Nistor, N. (2018). Akzeptanz von Bildungstechnologien. In H. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie* (S. 1–11). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54373-3_46-1
- Ogriseg, C. (2016). *Erzeugung von polarisationsverschränkten Photonenpaaren mittels spontaner parametrischer Fluoreszenz* (Masterarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München). [Xqp.physik.uni-muenchen.de](https://xqp.physik.uni-muenchen.de). https://xqp.physik.uni-muenchen.de/publications/theses_master/master_ogriseg.html
- Olbrecht, T. (2010). *Akzeptanz von E-Learning: Eine Auseinandersetzung mit dem Technologieakzeptanzmodell zur Analyse individueller und sozialer Einflussfaktoren*. (Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena). https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00021996/Olbrecht/Dissertation.pdf
- Oser, F. & Baeriswyl, F. J. (2001). Choreographies of Teaching: Bridging Instruction to Learning. In V. Richardson (Hrsg.), *Handbook on Research on Teaching* (4. Aufl., S. 1031–1065). American Educational Research Association (AERA).
- Özcan, Ö., Didiş, N. & Tasar, F. (2009). Students' conceptual difficulties in quantum mechanics: Potential well problems. *Eğitim fakültesi dergisi. H. U. Journal of education* 36, 169-180.
- Özcan, Ö. (2015). Investigating students' mental models about the nature of light in different contexts. *European Journal Of Physics*, 36(6), 065042. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/36/6/065042>

- 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/sce.3730660207>
- Pütttschneider, M. & Lück, G. (2004). Die Rolle des Animismus bei der Vermittlung chemischer Sachverhalte. *CHEMKON*, 11(4), 167–174. <https://doi.org/10.1002/ckon.200410014>
- Pütttschneider, M. (2005). *Die Rolle des Animismus bei der Vermittlung chemischer Sachverhalte: eine Interventionsstudie am teutolab der Universität Bielefeld*. (Dissertation, Universität Bielefeld). Cuvillier Verlag.
- Qutools (o.D.). *Quantenkoffer*. https://qutools.com/quantenkoffer_science-kit/.
- Schlosshauer, M., Kofler, J. & Zeilinger, A. (2013). A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics. *Studies in History And Philosophy Of Science. Part B Studies in History And Philosophy Of Modern Physics*, 44(3), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2013.04.004>
- Singh, C. & Marshman, E. (2015). Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 11(2), 020117. <https://doi.org/10.1103/physrevstper.11.020117>
- Stadermann, K. & Goedhart, M. (2020). Secondary school students' views of nature of science in quantum physics. *International Journal Of Science Education*, 42(6), 997–1016. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1745926>
- Thorley, N.R. & Stofflett, R.T. (1996), Representation of the conceptual change model in science teacher education. *Science Education*, 80(3), 317–339. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199606\)80:3<317::AID-SCE3>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199606)80:3<317::AID-SCE3>3.0.CO;2-H)
- Van Rooy, W. S. & Chan, E. (2017). Multimodal Representations in Senior Biology Assessments: A Case Study of NSW Australia. *International Journal Of Science And Mathematical Education/International Journal Of Science And Mathematics Education*, 15(7), 1237–1256. <https://doi.org/10.1007/s10763-016-9741-y>
- Waitzmann, M., Weber, K. A., Wessnigk, S. & Scholz, R. (2022). *Key Experiment and Quantum Reasoning*. *Physics*, 4(4), 1202–1229. <https://doi.org/10.3390/physics4040078>
- Waitzmann, M. (2023). *Wirkung eines quantenoptischen Realexperiments auf das physikalische Reasoning*. (Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover). <https://doi.org/10.15488/14065>
- Weizsäcker, C.F. (1941). Zur Deutung der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik* 118, 489–509. <https://doi.org/10.1007/BF01342929>

- Wiesner, H. (1995). Physikunterricht - an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft*, 23(2), 127–145. <https://doi.org/10.25656/01:8125>
- Wiesner, H., & Müller, R. (1996). Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik. *Physik in der Schule*, 34.
- Wodzinski, R. (1996). *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht* (Dissertation, Universität Frankfurt). LIT.

11 Anhang

Anhang A

Leitfaden der Akzeptanzbefragung

AKZEPTANZBEFRAGUNG

LEITFADEN

Vorstellung eines Einzelphotonenexperiments am Strahlteiler
mit der **Ensemble-** und der **Kopenhagener Deutung**

Josefin Metje

Einleitung

- Begrüßung: Name erfragen + eigene Person und Hintergrund vorstellen
- Wir möchten mit unserer Forschung dazu beitragen, dass Schüler und Schülerinnen einen besseren Zugang zur Quantenphysik bekommen und das Lernen erleichtert wird. Durch die Teilnahme an diesem Interview unterstützt du unsere Forschung maßgeblich, und dafür möchte ich dir schon einmal im Vorhinein danken.
- Es wird heute um die Eigenschaften von Lichtquanten, sogenannten Photonen gehen. Dazu werden wir erst dein Vorwissen zur Wellennatur des Lichtes auffrischen. Dann wirst du einiges über Photonen erfahren und Experimente damit machen. Dabei werde ich dich immer wieder fragen, wie verständlich die Erklärungen sind und dich bitten, die Experimente und Erklärungen mit eigenen Worten wiederzugeben. Wie du bereits weißt, wird das Interview als Audiodatei aufgezeichnet.
- Die Daten werden komplett anonymisiert und ich erwarte auch nicht, dass du dich bereits mit dem Thema auseinandergesetzt hast und die Antworten kennst. Damit wir wissen, welche physikalischen Beschreibungen und Erklärungen noch verbessert werden müssen, ist es wichtig, dass du im folgenden Interview offen sagst, was du denkst, was du unlogisch findest, was du verstehst und was du nicht verstehst ...
- Hast du noch irgendwelche Fragen, bevor wir anfangen?

Vorkenntnisauffrischung

THEORETISCHE BETRACHTUNG-VERHALTEN VON KLASSISCHEM LICHT

- Damit du die gleichen Vorkenntnisse hast wie alle anderen Teilnehmer dieser Studie, frischen wir nochmal mögliches Wissen zum Thema Licht bzw. Optik auf. Eventuell hast du einiges davon schon einmal im Unterricht gehört. Falls dem nicht so ist, ist das auch vollkommen in Ordnung und du lernst noch etwas dazu.
 - Ausgabe von Texten zu den Themen: Strahlteiler, Polarisation und Polarisationsfilter bei Licht (Zeitumfang ca. 10 Minuten)
- Ich würde dich dazu bitten, folgende Texte einmal durchzulesen. Anschließend bitte ich dich, die Informationen aus den Texten nochmal mündlich zusammenfassend wiederzugeben. Wenn du Fragen hast, kannst du diese jederzeit stellen.

Das Experiment ist bereits aufgebaut und justiert.

EXPERIMENTELLE BETRACHTUNG- VERHALTEN VON KLASSISCHEM LICHT

- Was du hier siehst, ist ein experimenteller Aufbau, mit dem wir das, was du gerade gelesen hast, betrachten können.
 - Auf dem Bildschirm hinter dem Spielfeld wird der Strahlengang angezeigt
- In dem Koffer befindet sich ein Laser, der einen Lichtstrahl im sichtbaren Bereich erzeugt. Der Laserstrahl kommt hier raus. Das Licht hat eine Wellenlänge von 650 nm. Das entspricht rotem Licht. Das kannst du auch sehen:
 - Papier wird in den Strahlengang hinter „der Quelle/dem Periskop“ gehalten, sodass ein roter Punkt zu sehen ist
- Und an dieser Stelle haben wir einen Strahlenteiler. Wie du gerade gelesen hast, teilt dieser den Lichtstrahl auf, sodass ca. 50 % transmittiert und 50 % reflektiert werden.
 - Papier wird in den transmittierten und den reflektierten Strahlengang gehalten
- Diese beiden Bauteile führen zu sogenannten Detektoren, die die Lichtintensität messen können, welche hier angezeigt wird.
 - Zeigt auf Detektor (Periskop) A und B und auf die jeweilige Anzeige der Intensität
- Lies doch mal ab: Welche Intensität wird dir für A und welche für B angezeigt? Genau, das ist in etwa gleich groß, weil die Hälfte des Lichtes am Strahlteiler transmittiert und die andere Hälfte reflektiert wird. Wie müsste die Intensität bei A ungefähr aussehen, wenn ich den Strahlteiler rausnehme?
 - Strahlteiler wird herausgenommen

ÜBERLEITUNG QUANTENKOFFER – THEORIE PHOTONEN

- Bis jetzt haben wir mit klassischem Licht gearbeitet. Heute soll es aber um Quantenphysik gehen. Was du hier siehst, ist ein Quantenkoffer, der uns ermöglicht, Quantenexperimente zu betrachten, wie sie heute in modernen Forschungslaboren verwendet werden. Dafür kann ich unsere Quelle umstellen, sodass wir keinen Laserstrahl mehr haben, sondern mit einzelnen Photonen experimentieren können.
- Analog zu Eben bekommst du ein paar Informationen zu Photonen. Auch hier würde ich dich bitten, den Text zu lesen und die Fragen zu beantworten.
 - Ausgabe von Text und Leseabfrage zu den Themen: Photon, Photoeffekt (Zeitumfang ca. 10 Minuten)
- Währenddessen stelle ich die Quelle so um, dass wir mit einzelnen Photonen experimentieren können. - Hast du noch Fragen?
 - Aufbau und Justage des Einzelphotonexperiments (ohne Strahlteiler)

Informationsangebot

- Nachdem wir notwendiges Hintergrundwissen aufgebaut haben, werden wir jetzt mit dem Quantenexperiment beginnen. Ich werde die Audioaufzeichnung also jetzt starten. Alles, was du sagst, wird anonym behandelt. Stelle gerne Fragen und äußere dich, wenn du etwas plausibel oder nicht verständlich findest. Bitte äußere dich auch, wenn du etwas als hilfreich empfindest.

■ Beginn der Audioaufzeichnung

PHOTONEN UND DETEKTION

- Ich habe jetzt auf einzelne Photonen umgestellt. Wir führen heute also ein Experiment mit einzelnen Photonen durch.

- Zeigt auf den Quantenkoffer

- In dem Koffer werden Photonen immer gleich erzeugt, also unter gleichen Bedingungen. Das Herstellen dieser gleichen Anfangsbedingungen nennen wir Präparation. Wenn wir unsere Experimente durchführen, verwenden wir also gleich präparierte Photonen.

- Jetzt schauen wir uns an, wie gemessen wird. Hier sind zwei Detektoren: A und B.

- Zeigt auf „Detektor“ (Periskope) A und B

- Durch Photonen wird in diesen ein elektrisches Signal erzeugt, das der Computer uns als Zählrate pro Sekunde umwandelt und anzeigt. So werden Photonen als Ereignis gezählt. Die siehst du hier. Wir haben jetzt eine andere Einheit als gerade beim Laserstrahl – also nicht mehr die Intensität. Das k steht für Tausend. Welche Zählrate hast du hier und was heißt das?

- Zeigt auf die angezeigte Zählrate von Detektor A (verbalisieren lassen der Zählrate)

- Anhand der Zählrate kannst du auch sehen, dass wir hier mit einzelnen Photonen experimentieren. Wir wissen ja, dass Photonen sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. In unserem Aufbau sind es ca. 30 cm von Quelle zum Detektor. Wenn wir unsere Strecke also die 0,3 m durch die Lichtgeschwindigkeit teilen, ergibt sich die Zeit, die die Photonen zum Detektor „brauchen“.

- Eintippen in den Taschenrechner und Einheiten dazu nennen: $\frac{0,3 \text{ (m)}}{c \text{ (}\frac{\text{m}}{\text{s}}\text{)}} = 1 * 10^{-9} \text{ (s)}$

- Das ist also ca. 1 Nanosekunde. Wenn wir das Ganze jetzt mit unserer Zählrate multiplizieren, wissen wir, wie viele Photonen sich gleichzeitig zwischen Quelle und Detektor – also auf dem „Spielfeld“ befinden.

- Eingabe in den Taschenrechner: $1 \times 10^{-9} \text{ (s)} * \text{Zählrate} = \text{ca. } 1 * 10^{-4}$

- Würden wir wollen, dass wir mindestens ein Photon haben, müsste das Spielfeld ca. 2 km lang sein.
 - Eingabe in den Taschenrechner: $\frac{2000 \text{ (m)}}{c \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} * \text{Zählrate} = \text{ca. } 1$
- Kannst du die Rechnung nachvollziehen, oder war etwas unverständlich?
- An dieser Stelle möchte ich darauf hinweisen, dass wir neben den erzeugten Photonen auch Ereignisse durch Umgebungslicht haben. Das siehst du, wenn ich den Ausgang der Quelle zuhalte.
 - Hinter „die Quelle“ (Periskop) wird ein Zettel gehalten und dann auf die Anzeige der Zählrate hingewiesen
- Außerdem wird auch eine geringe Zählrate ohne Beleuchtung angezeigt. Das heißt, es entspricht nicht gemessenen Photonenergebnissen, sondern liegt einfach ein einem zufälligen Auslösen der Detektoren. Auch wegen dieser sogenannten Dunkelzählrate erreichen wir nie eine Zählrate von 0. Trotzdem siehst du, dass die Dunkelzählrate sehr gering ist. Halte ich den Detektoreingang nicht zu, siehst du auch, dass die Rate um ein Vielfaches höher ist.
 - Der „Detektoreingang“ (Detektorperiskop A) wird zugehalten und auf die Zählrate gezeigt

DER KOINZIDENZBEGRIFF

- Wie du weißt, haben wir zwei Detektoren -A und B- zur Messung der Photonenzählrate. Gerade ist der Strahlteiler noch nicht eingesetzt. Wir haben bei Detektor B also nur die Dunkelzählrate und die Hintergrundbeleuchtung, die in die Zählrate eingeht.
 - Es wird auf die „Detektor-Periskope“ A und B gezeigt
- Der Computer kann uns anzeigen, wenn Photonen an beiden Detektoren in einem sogenannten Koinzidenzintervalls eintreten. Unser Koinzidenzintervall liegt bei 3 ns. Hier siehst du, dass gerade sehr wenig Photonen in diesem Zeitintervall in beiden Detektoren eintreten.
 - Es wird auf die Koinzidenzanzeige gezeigt
- Das „gleichzeitige“ Eintreten – also innerhalb eines Koinzidenzintervalls - von Photonen an zwei Detektoren wird Koinzidenz genannt.
- Gerade treten kaum Koinzidenzen zwischen Detektor A und B ein. Wenn wir uns das Experiment mit einzelnen Photonen am Strahlteiler anschauen, spielt der Begriff der Koinzidenz eine bedeutende Rolle.

EINZELNE PHOTONEN AM STRAHLTEILER

Zielfrage

- Wir haben gesehen, dass sich Licht an einem Strahlteiler gleichmäßig aufteilt. Was beobachtet man dann für die Photonen bei einem Strahlteiler? Dieser Frage gehen wir jetzt nach.

Durchführung:

- Ich werde jetzt den Strahlteiler einsetzen und dann können wir die Zählraten für Detektor A und B anschauen. Bevor ich das mache: Welche Zählrate haben wir gerade ohne Strahlteiler?
 - Der Strahlteiler wird eingesetzt und ggf. nachjustiert, um die Zählraten zu maximieren.

Beschreiben der Messdaten:

- Welche Zählrate hattest du vor Einsetzen des Strahlteilers und wie sieht es jetzt bei Detektor A und B aus?
 - Die Zählraten werden gemeinsam abgelesen.
- Die Zählraten an beiden Detektoren sind (in etwa) gleich hoch und betragen ungefähr die Hälfte der Zählrate ohne Strahlteiler.
- Ich habe dir vorhin den Begriff der Koinzidenz erklärt. Weißt du noch, was dieser bedeutet? (ggf. nochmal den Begriff der Koinzidenz erklären) Was würde es denn heißen, wenn unsere Ereignisse in beiden Detektoren innerhalb des Koinzidenzintervalls gemessen werden?
 - Die Koinzidenzen werden gemeinsam angeschaut.
- Wie du siehst, haben wir im Verhältnis zu den Zählraten sehr geringe Koinzidenzen.

Paraphrasieren der Messdaten als Beobachtung:

- Die gemessenen Zählraten sind absolute Häufigkeiten (Anzahl der Ereignisse in einer Grundgesamtheit). Daraus kann man relative Häufigkeiten (Anteil, mit dem ein Ereignis in einer Grundgesamtheit auftritt) bilden. Wir haben hier eine relative Häufigkeit von ca. 50 %. Die Gesamtzahl der Photonen teilt sich zu gleichen Teilen auf die beiden Detektoren auf.
- Die absolute Häufigkeit der Koinzidenzen ist sehr gering. Die relative Häufigkeit, also der Anteil der Koinzidenzen ist nahezu 0, wie du siehst:
 - Die Koinzidenzen werden im Taschenrechner durch die Gesamtereigniszahl geteilt
- Es werden keine bzw. kaum Photonen gleichzeitig in Detektor A und B gemessen.

- War bis hierin alles verständlich oder hast du noch Fragen?

Deutung der Beobachtung:

A) DIE ENSEMBLE-DEUTUNG

- Für quantenmechanische Phänomene gibt es verschiedene Deutungen.
 - Für die Deutung unserer Ergebnisse verwende ich jetzt die sogenannte Ensemble-Deutung, die von Albert Einstein und Schrödinger vertreten wurde. Der Begriff „Ensemble“ heißt so viel wie Menge gleichartiger Objekte.
 - Wir treffen danach nur Aussagen über eine ganze Menge von gleich präparierten einzelnen Photonen, also über ein Photonenensemble.
 - Über den Zustand eines einzelnen Photons treffen wir keine Aussage.
 - Nach dem Strahlteiler können die Photonen unseres Ensembles zwei mögliche Zustände haben – sie wurden reflektiert oder transmittiert.
 - Durch die Messung kann festgestellt werden, wie viele Photonen transmittiert bzw. reflektiert wurden.
 - Nach der Messung befinden sich 50% der Photonen im transmittierten und 50% im reflektierten Zustand.
-
- Bei unserem Experiment wurden die Photonen mit einer Häufigkeit von ca. 50 % in Detektor A gemessen-also transmittiert und mit einer Häufigkeit von ca. 50 % in Detektor B gemessen- also reflektiert
 - Lass mich die relative Häufigkeit anhand der Würfe einer Münze erklären. Wirfst du eine Münze 100-mal, bekommst du ca. 50-mal Kopf und 50-mal Zahl. Die relative Häufigkeit für den Zustand Zahl liegt also bei 50 %.
 - Aus dieser relativen Häufigkeit können wir für zukünftige Münzwürfe Wahrscheinlichkeitsverteilungen ableiten. Werfen wir 100 Münzen erwarten wir, dass jede Münze entweder Kopf oder Zahl anzeigen wird. Ungefähr 50 Münzen werden Kopf anzeigen und die übrigen werden Zahl anzeigen. Die erwartete Wahrscheinlichkeitsverteilung ist also 50% Kopf und 50% Zahl.
 - Bei unserem Experiment haben wir auch jeweils eine relative Häufigkeit von ca. 50 % und können damit Wahrscheinlichkeitsverteilungen für zukünftige Messergebnisse bzw. Wahrscheinlichkeitsaussagen über Verteilungen von Zuständen im Ensemble ableiten.

- Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir, eine Verteilung von 50% reflektierten und 50% transmittierten Photonen des Photonensembles.
 - Wir erwarten also, dass von beispielsweise 100 Photonen ca. 50 reflektiert und 50 transmittiert gemessen werden.
-
- Bei unserem Experiment war die relative Häufigkeit für Koinzidenzen nahe 0.
 - Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir im Ensemble eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von (fast) 0% für Photonen die gleichzeitig als reflektiert oder transmittiert gemessen werden und von (fast) 100% für Photonen die entweder reflektiert oder transmittiert gemessen werden.
 - Photonen werden also entweder reflektiert oder transmittiert. Aber nicht gleichzeitig reflektiert und transmittiert.
 - Die Photonen teilen sich also am Strahlteiler gleichmäßig auf beide Zustände – transmittiert und reflektiert- auf, ohne sich dabei selbst zu teilen.
 - War bis hierin alles verständlich oder hast du noch Fragen?

Deutung der Beobachtung:

B) DIE KOPENHAGENER DEUTUNG

- Für quantenmechanische Phänomene gibt es verschiedene Deutungen.
 - Für die Deutung unserer Ergebnisse verwende ich die sogenannte Kopenhagener Deutung, die von Heisenberg und Bohr in Kopenhagen formuliert und vertreten wurde.
 - Mit dieser Deutung treffen wir Aussagen über ein einzelnes Photon.
 - Nach dem Strahlteiler kann das einzelne Photon zwei mögliche Zustände haben -es wurde reflektiert oder transmittiert.
 - Durch die Messung findet ein Übergang von zwei möglichen Zuständen eines Photons zu einem tatsächlichen Zustand des Photons statt.
 - Nach der Messung befindet sich das Photon zu 100% in dem gemessenen Zustand.
-
- Bei unserem Experiment wurden die Photonen mit einer Häufigkeit von ca. 50 % in Detektor A gemessen-also transmittiert und mit einer Häufigkeit von ca. 50 % in Detektor B gemessen- also reflektiert
 - Lass mich die relative Häufigkeit anhand der Würfe einer Münze erklären. Wirfst du eine Münze 100-mal, bekommst du ca. 50-mal Kopf und 50-mal Zahl. Die relative Häufigkeit für den Zustand Zahl liegt also bei 50 %.
 - Aus dieser relativen Häufigkeit können wir für das zukünftige Werfen einer Münze Wahrscheinlichkeiten ableiten. Werfen wir eine Münze, erwarten wir, dass die Münze entweder Kopf oder Zahl anzeigen wird. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% wird die Münze Kopf und in mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% Zahl anzeigen.
 - Bei unserem Experiment haben wir auch jeweils eine relative Häufigkeit von ca. 50 % und können damit Wahrscheinlichkeitsaussagen für zukünftige Messergebnisse bzw. für das Eintreten eines Zustands des einzelnen Photons ableiten.
 - Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir, dass das Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50% reflektiert oder transmittiert wird.

- Wir erwarten also, dass ein einzelnes Photon mit gleicher Wahrscheinlichkeit reflektiert oder transmittiert wird.
-
- Bei unserem Experiment war die relative Häufigkeit für Koinzidenzen nahe 0.
 - Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir, dass ein einzelnes Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von (fast) 0% gleichzeitig reflektiert und transmittiert wird.
 - Ein Photon wird also entweder reflektiert oder transmittiert. Aber nicht gleichzeitig reflektiert und transmittiert.
 - Das Photon nimmt also am Strahlteiler einen der beiden Zustände – transmittiert oder reflektiert- an, ohne sich dabei selbst zu teilen.

Befragung der Akzeptanz

- Wie fandest du die Beschreibung und Deutung des Strahlteilerexperiments?
- War etwas für dich daran plausibel und einleuchtend?
- War alles für dich verständlich oder war etwas daran unverständlich?
- War etwas besonders hilfreich beim Verständnis oder verwirrend?
- Findest du etwas merkwürdig oder überraschend?
- Kam dir etwas komisch vor? Wenn ja, was genau?
- Bewerte die Deutung des Experiments zur Unteilbarkeit von Photonen/ eines Photons auf einer Skala von 1-10 hinsichtlich der Plausibilität. (1 unplausibel, 10 sehr plausibel) und begründe deine Wertung.

Paraphrasierung

- Bitte beschreibe das Strahlteilerexperiment nochmal in eigenen Worten.
- Eventuelle Stimuli zu: Koinzidenzbegriff, Strahlteiler, Aussagen die getroffen werden können, Photonen, relativen Häufigkeiten, Wahrscheinlichkeitsaussagen, Unteilbarkeit
- **Bitte beschreibe das noch etwas genauer.**
- **Fällt dir noch etwas zu (___) ein?**

Anwendung auf einen neuen Kontext

VERTIKALE UND HORIZONTALE POLARISATION HINTER STRAHLTEILER

- Hier habe ich einen Polarisationsfilter. Das Funktionsprinzip davon hast du bereits im Einstiegstext kennengelernt.
 - Ich werde jetzt jeweils einen Filter vor Detektor A und einen vor Detektor B stellen. Den einen werde ich auf vertikal einstellen und den anderen auf horizontal.
 - Hier hast du eine Abbildung für das Verhalten von Licht als elektromagnetische Welle mit den Filtern.
 - Abbildungen für Polarisationsfilter (1 A & B) werden herausgelegt.
 - Was beobachtet man dann für die Photonen mit den Filtern? Dieser Frage gehen wir jetzt nach.
 - Aus unserer Quelle erhalten wir Photonen mit einer unbestimmten Polarisation. Bevor ich diese einsetze, notieren wir uns die Zählraten von A und B.
 - Die Zählraten werden notiert.
 - Der Koffer wird nur auf Spielfeldansicht gestellt.
 - Die Filter werden eingesetzt und eingestellt.
 - Der Filter ist vertikal eingestellt und dieser horizontal.
 - Bitte stelle Vermutungen auf, was wir jetzt anstelle von Licht mit einzelnen Photonen erwarten können (bei den Detektoren A und B). Begründe gerne ausführlich. Ein Hinweis: Für mich gibt es heute kein Richtig oder Falsch. Du wirst nicht bewertet. Du brauchst also absolut keine Angst haben und kannst deinen Gedanken freien Lauf lassen.
 - Vielen Dank. Dann schauen wir mal, was passiert ist.
 - Die Zählraten werden angezeigt.
 - Ist deine Erwartung eingetroffen? Deute das tatsächlich eingetretene Ergebnis.
- Eventuelle Nachfragen/Stimuli:
- Wie sieht es denn hier mit den relativen Häufigkeiten aus?
 - Inwiefern können wir Wahrscheinlichkeitsaussagen für zukünftige Messungen machen?
 - Welche Aussagen können wir damit über ein einzelnes Photon bzw. einzelne Photonen treffen?

ERGÄNZUNG: VERTIKALE POLARISATION VOR DEM STRAHLTEILER

- Die Zählraten werden ausgeblendet.
- Gleich stellen wir einen weiteren Polarisationsfilter vor den Strahlteiler. Diesen stelle ich auf vertikal ein.
- Hier hast du eine Abbildung für das Verhalten von Licht als elektromagnetische Welle mit den Filtern.
 - Abbildungen für Polarisationsfilter (2 A & B) werden herausgelegt.
- Was beobachtet man dann für die Photonen mit den Filtern? Dieser Frage gehen wir jetzt nach.
 - Polarisationsfilter wird vor den Strahlteiler gesetzt.
- Bitte stelle wieder Vermutungen auf, was du bei den Detektoren erwartest und begründe.
 - Die Zählraten werden angezeigt.
- Ist deine Erwartung eingetroffen? Deute das tatsächlich eingetroffene Ergebnis.

Eventuelle Nachfragen/Stimuli:

- Wie sieht es denn hier mit den relativen Häufigkeiten aus?
- Inwiefern können wir Wahrscheinlichkeitsaussagen für zukünftige Messungen machen?
- Welche Aussagen können wir damit über ein einzelnes Photon bzw. einzelne Photonen treffen?

Anhang B

Arbeitsblätter zur Vorkenntnisaktivierung

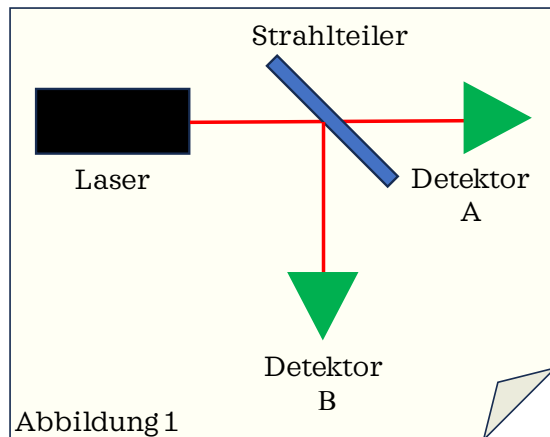
Die folgenden Unterlagen sind im Anhang B aufgeführt und werden insbesondere in Kapitel 4.2 erläutert:

- Arbeitsblatt zum Strahlteilerexperiment und Polarisation
- Arbeitsblatt zum photoelektrischen Effekt und Photonen
- Verbessertes Arbeitsblatt zum Photoeffekt

Licht am Strahlteiler

Bei dem **Strahlteiler** handelt es sich um einen halbdurchlässigen Spiegel. Wird dieser unter einem 45° Winkel in einen **Laser**-Lichtstrahl gestellt, so gehen ca. 50 % des Lichtstrahls gerade durch (transmittiert) und ca. 50 % werden reflektiert, sodass dieser Teil den Strahlteiler unter einem 90° Winkel zum einfallenden Lichtstrahl verlässt. Wird die **Intensität** hinter dem Strahlteiler mit sogenannten **Detektoren** gemessen, so kann festgestellt werden, dass die Intensität sich ebenfalls aufteilt. Die Intensität in **Detektor A und B** entspricht also jeweils ca. 50 % der ursprünglichen Intensität des **Laserstrahls** (Abb. 1).

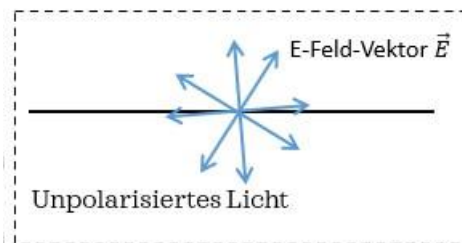
Achtung! Trifft ein Laserstrahl ins Auge, können Schäden in der Netzhaut und unter Umständen bleibend Beeinträchtigungen des Sehvermögens die Folge sein.



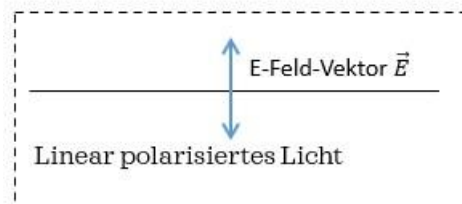
Die Lichtintensität sagt uns, wie viel Energie in Form von Licht innerhalb einer Zeit auf eine bestimmte Fläche trifft. Wenn das Licht sehr hell ist, ist die Lichtintensität hoch. Man misst sie in Watt pro m^2 - Leistung pro Fläche

Polarisation

Licht ist eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingende elektromagnetische Welle - eine sogenannte Transversalwelle.



Das Licht der Sonne und einer herkömmlichen Lampe ist meistens nicht polarisiert. Bei nicht polarisiertem Licht schwingt der Wellenzug des Lichtes zufällig in eine Raumrichtung (Abb. 2).



Das Licht aus einem Laser ist hingegen meist linear polarisiert: Von linear polarisiertem Licht spricht man, wenn das elektrische Feld immer nur in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht (Abb. 3).

Auch mit einem Polarisationsfilter kann Licht polarisiert werden. Ein Polarisationsfilter lässt (fast) nur den Anteil des Lichtes durch, der parallel zur optischen Achse des Filters schwingt. Die Lichtintensität nimmt beim Durchgang durch einen Polarisationsfilter ab.

Photoeffekt

Elektronen werden durch Licht aus Metalloberfläche gelöst

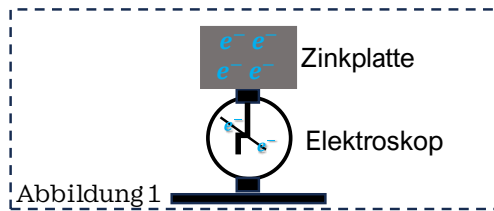


Abbildung 1

Eine Zinkplatte wird auf ein Elektroskop gesteckt und **negativ** durch Elektronen (e^-) **aufgeladen**. Das Elektroskop **schlägt aus** (Abb. 1).

danach

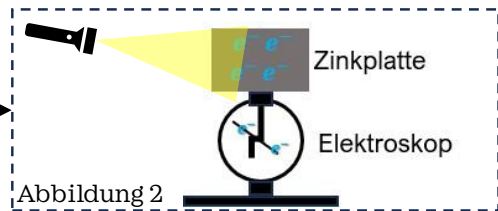


Abbildung 2

Die Zinkplatte wird mit einer **hellen Taschenlampe** beleuchtet. Es verändert sich **nichts** (Abb. 2).

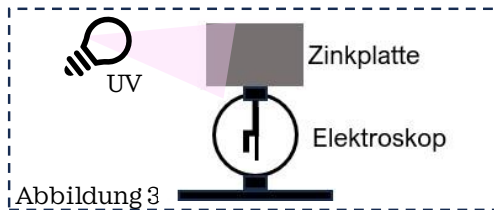


Abbildung 3

Wird die Platte mit dem **Licht einer Quecksilberdampfampe** beleuchtet, das einen hohen Anteil an **UV-Strahlung** enthält, so **entlädt** sich das Elektroskop.

Wiederholt man den Versuch mit UV-Strahlung **gleicher Frequenz** und mit höherer **Intensität**, so wird das Elektroskop **schneller entladen**. (Der Zeiger fällt schneller zurück)

Elektromagnetische Wellen sind durch ihre **Frequenz** (f) und ihre **Wellenlänge** λ charakterisiert. Dabei gilt die Beziehung $f = \frac{c}{\lambda}$. Hier ist c die **Lichtgeschwindigkeit von 299.792.458 Meter pro Sekunde**.

Die **Frequenz** (f) des Lichtes **muss hoch genug sein**, um die Elektronen herauszulösen! UV-Strahlung hat eine höhere Frequenz als das sichtbare Licht der Taschenlampe.

Die **Intensität** beeinflusst, **wie viele Elektronen pro Sekunde herausgelöst werden**. Sie beeinflusst aber **nicht, ob** Elektronen herausgelöst werden.

Lichtquanten - Photonen

Eine mögliche Erklärung: Licht besteht aus einem Strom von **Lichtquanten**, den sogenannten **Photonen**.

Für die Lichtquantenhypothese hat Einstein übrigens seinen Nobelpreis bekommen.



Die **Energie** eines Photons wird auf ein Elektron im Metall **übertragen**. Dadurch kann das Elektron das Metall verlassen.

Photonen

- sind **masselos**
- bewegen sich mit **Lichtgeschwindigkeit**
- Wir können **keine** Aussage über den genauen **Ort** eines Photons machen.
- Die **Energie des Photons**:
 $E = h \cdot f$
 h ist die Planck'sche Konstante und f die Frequenz
- Je größer die Frequenz, desto höher die Energie des Photons.

Photoeffekt

Elektronen werden durch Licht aus Metalloberfläche gelöst

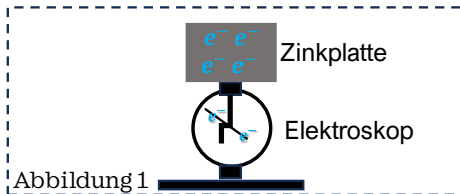


Abbildung 1

Eine Zinkplatte wird auf ein Elektroskop gesteckt und **negativ** durch Elektronen (e^-) **aufgeladen**. Das Elektroskop **schlägt aus** (Abb. 1).

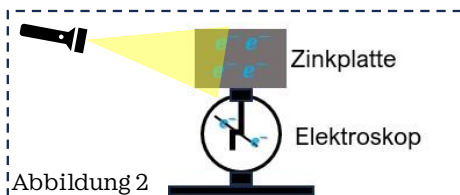


Abbildung 2

Die Zinkplatte wird mit einer **hellen Taschenlampe** beleuchtet. Es verändert sich **nichts** (Abb. 2).

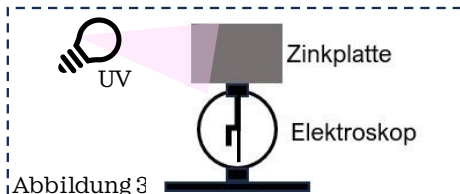


Abbildung 3

Wird die Platte mit dem **Licht einer Quecksilberdampfampe** beleuchtet, das einen hohen Anteil an **UV-Strahlung** enthält, so **entlädt** sich das Elektroskop (Abb. 3)

Wiederholt man den Versuch mit UV-Strahlung **gleicher Frequenz** und mit höherer **Intensität**, so wird das Elektroskop **schneller entladen**.
(Der Zeiger fällt schneller zurück)

Die **Frequenz (f)** des Lichtes **muss hoch genug sein**, um die Elektronen herauszulösen! UV-Strahlung hat eine höhere Frequenz als das sichtbare Licht der Taschenlampe.

Die **Intensität** beeinflusst, **wie viele Elektronen pro Sekunde herausgelöst werden**. Sie beeinflusst aber **nicht, ob** Elektronen herausgelöst werden.

Elektromagnetische Wellen sind durch ihre **Frequenz (f)** und ihre **Wellenlänge λ** charakterisiert. Dabei gilt die Beziehung $f = \frac{c}{\lambda}$.
Hier ist c die **Lichtgeschwindigkeit von 299.792.458 Meter pro Sekunde**.

Lichtquanten-Photonen

Eine mögliche Erklärung:
Licht besteht aus einem Strom von **Lichtquanten**, den sogenannten **Photonen**.

Für die Lichtquantenhypothese hat Einstein übrigens seinen Nobelpreis bekommen.



Die **Energie** eines Photons wird auf ein Elektron im Metall **übertragen**. Dadurch kann das Elektron das Metall verlassen.

Photonen

- sind **masselos**
- bewegen sich mit **Lichtgeschwindigkeit**
- Wir können **keine** Aussage über den **Ort** eines Photons machen.
- Die **Energie des Photons:**
 $E = h \cdot f$
 h ist die Planck'sche Konstante und f die Frequenz
- Je größer die Frequenz, desto höher die Energie des Photons.

Anhang C

Übersicht der Repräsentationsformen

Um das Informationsangebot in Kapitel 4.2 zu beschreiben, werden die in Tabelle 6 dargestellten Kategorien verwendet.

Tabelle 6 (Anhang)

Übersicht über die Repräsentationsformen

Repräsentationsformen	Subkategorie	Erläuterung	Beispiele aus dem Informationsangebot
Mathematisch	Algebraisch	Gleichungen, Formeln	Energie des Photons: $E = h \cdot f$
	Graphisch	Diagramme, Graphen	Diagramm der Zählraten
	Nummerisch	Messdaten, Tabellen	Zählraten
Linguistisch Verbal	Fachsprache	Präzise, klar, hohes Vorkommen von Fachterminologie	In dem Koffer werden Photonen immer gleich erzeugt, also unter gleichen Bedingungen. Das Herstellen dieser gleichen Anfangsbedingungen nennen wir Präparation
	Wissenschaftssprache	Explizit, komplexe Grammatik, unpersönlich	
	Alltagssprache	Ausdrücke der gesprochenen Sprache, häufig nicht explizit	Begrüßung
Bildlich	Symbolisches Bild	Keine Ähnlichkeit zu Objekt	Bild zur Polarisation
	Ikonisches Bild	Ähnlichkeiten zu den Objekten	Skizze des Experiments
Objekt	Symbolisches Objekt	Symbolik muss bekannt sein, um Objekt zu verstehen	Periskope als Quelle und Detektor
	Ikonisches Objekt	Ähnlichkeiten zum Objekt	-
Material- Operational*	-	Materielle Handlung, die wissenschaftliche Praxis im pädagogischen Sinn verkörpern	Experiment am Quantenkoffer
Gestisch - Kinästhetisch*	-	Gezielter Einsatz von Hand- oder Körperbewegungen zur Darstellung wissenschaftlicher Konzepte	Zettel in den Laserstrahlengang halten, um Intensität zu verdeutlichen

Anmerkung. In Anlehnung an Geyer und Kuske-Janßen (2019) und ergänzt (*) nach Van Rooy und Chan (2017).

Anhang D

Deutungen des Strahlteilerexperiments

Innerhalb des in Kapitel 4.2 vorgestellten Informationsangebotes wird das Experiment in einer Gruppe mit der Ensemble- und in der anderen mit der Kopenhagener Deutung vorgestellt. Im Anhang D ist ein tabellarischer Vergleich der Formulierungen für folgende Phasen beigefügt:

- Einführung in den Deutungskontext und den Zustandsbegriff (Tabelle 7)
- Beschreibung der Begriffe der relativen Häufigkeit und Ableiten von Wahrscheinlichkeiten nach Ensemble- und Kopenhagener Deutung (Tabelle 8)
- Deutung der Koinzidenzmessung von Einzelphotonen mit Strahlteiler, zur Illustration der Unteilbarkeit von Photonen (Tabelle 9)

Dabei sind deutungsspezifische, sprachliche Unterschiede durch Unterstreichungen hervorgehoben.

Tabelle 7 (Anhang)

Einführung in den Deutungskontext und den Zustandsbegriff

Kommentare	Ensemble-Deutung	Kopenhagener Deutung
	Für quantenmechanische Phänomene gibt es verschiedene Deutungen.	
<p>Kennlichma- chen der Deutung</p> <p>Aussage- ebenen</p>	<p>Für die Deutung unserer Ergebnisse ver- wende ich jetzt die sogenannte <u>Ensemble- Deutung</u>, die von <u>Albert Einstein und Schrödinger</u> vertreten wurde.</p> <p><u>Der Begriff „Ensemble“ heißt so viel wie Menge gleichartiger Objekte.</u></p> <p>Wir treffen danach nur Aussagen über <u>eine ganze Menge von gleich präparierten einzel- nen Photonen, also über ein Photonenensem- ble.</u> <u>Über den Zustand eines einzelnen Photons treffen wir keine Aussage.</u></p>	<p>Für die Deutung unserer Ergebnisse ver- wende ich die sogenannte <u>Kopenhagener Deutung</u>, die von <u>Heisenberg und Bohr in Kopenhagen formuliert und</u> vertreten wurde.</p> <p>Mit dieser Deutung treffen wir Aussagen über <u>ein einzelnes Photon.</u></p>
<p>Messung und Zustand</p>	<p>Nach dem Strahlteiler können <u>die Photonen unseres Ensembles</u> zwei mögliche Zustände haben – <u>sie wurden</u> reflektiert oder transmittiert. Durch die Messung kann <u>festgestellt werden,</u> <u>wie viele Photonen transmittiert bzw. reflek-</u> <u>tiert wurden.</u></p> <p>Nach der Messung befinden sich <u>50% der</u> <u>Photonen im transmittierten und 50% im re-</u> <u>flektierten Zustand.</u></p>	<p>Nach dem Strahlteiler kann <u>das einzelne Photon</u> zwei mögliche Zustände haben –<u>es wurde</u> reflektiert oder transmittiert. Durch die Messung <u>findet ein Übergang von</u> <u>zwei möglichen Zuständen eines Photons zu</u> <u>einem tatsächlichen Zustand des Photons</u> <u>statt.</u></p> <p>Nach der Messung befindet sich <u>das Photon</u> <u>zu 100% in dem gemessenen Zustand.</u></p>

Tabelle 8 (Anhang)

Beschreibung der Begriffe der relativen Häufigkeit und Ableiten von Wahrscheinlichkeiten nach Ensemble- und Kopenhagener Deutung

Kommentare	Ensemble-Deutung	Kopenhagener Deutung
Aktivierung der Beobachtung	Bei unserem Experiment wurden die Photonen mit einer Häufigkeit von ca. 50 % in Detektor A gemessen - also transmittiert und mit einer Häufigkeit von ca. 50 % in Detektor B gemessen - also reflektiert.	
Relative Häufigkeit Beispiel: Münzwurf	Lass mich die relative Häufigkeit anhand der Würfe einer Münze erklären. Wirfst du eine Münze 100-mal, bekommst du ca. 50-mal Kopf und 50-mal Zahl. Die relative Häufigkeit für den Zustand Zahl liegt also bei 50 %.	
Ableiten von Wahrscheinlichkeitsaussagen Beispiel: Münzwurf	Aus dieser relativen Häufigkeit können wir für zukünftige <u>Münzwürfe Wahrscheinlichkeitsverteilungen</u> ableiten. Werfen wir <u>100 Münzen</u> erwarten wir, dass jede Münze entweder Kopf oder Zahl anzeigen wird. Ungefähr <u>50 Münzen</u> werden Kopf anzeigen und die übrigen werden Zahl anzeigen. Die erwartete Wahrscheinlichkeitsverteilung ist also 50 % Kopf und 50 % Zahl.	Aus dieser relativen Häufigkeit können wir für das zukünftige <u>Werfen einer Münze Wahrscheinlichkeiten</u> ableiten. Werfen wir <u>eine Münze</u> , erwarten wir, dass <u>die Münze</u> entweder Kopf oder Zahl anzeigen wird. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % wird die Münze Kopf und in mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % Zahl anzeigen.
Relative Häufigkeit Photonenexperiment und Zustände	Bei unserem Experiment haben wir auch jeweils eine relative Häufigkeit von ca. 50 % und können damit <u>Wahrscheinlichkeitsverteilungen</u> für zukünftige Messergebnisse bzw. <u>Wahrscheinlichkeitsaussagen über Verteilungen von Zuständen</u> im Ensemble ableiten.	Bei unserem Experiment haben wir auch jeweils eine relative Häufigkeit von ca. 50 % und können damit <u>Wahrscheinlichkeitsaussagen</u> für zukünftige Messergebnisse bzw. <u>für das Eintreten eines Zustands des einzelnen Photons</u> ableiten.
Ableiten von Wahrscheinlichkeitsaussagen für Photonenexperiment	Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir, <u>eine Verteilung von 50 % reflektierten und 50 % transmittierten Photonen</u> des Photonenensembles. Wir erwarten also, dass von beispielsweise <u>100 Photonen ca. 50 reflektiert und 50</u> transmittiert gemessen werden.	Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir, dass das Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils <u>50%</u> reflektiert oder transmittiert wird. Wir erwarten also, dass ein <u>einzelnes Photon mit gleicher Wahrscheinlichkeit</u> reflektiert oder transmittiert wird.

Tabelle 9 (Anhang)

Deutung der Koinzidenzmessung von Einzelphotonen mit Strahlteiler zur Illustration der Unteilbarkeit von Photonen

Kommentare	Ensemble-Deutung	Kopenhagener Deutung
Relative Häufigkeiten Koinzidenz	Bei unserem Experiment war die relative Häufigkeit für Koinzidenzen nahe 0.	
Ableiten von Wahrscheinlichkeitsaussagen	Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir im Ensemble eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von (fast) 0% für Photonen, die gleichzeitig als reflektiert oder transmittiert gemessen werden und von (fast) 100 % für Photonen, die entweder reflektiert oder transmittiert gemessen werden.	Für zukünftige Messungen am Strahlteiler erwarten wir, dass ein einzelnes Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von (fast) 0 % gleichzeitig reflektiert und transmittiert wird.
	<u>Photonen werden</u> also entweder reflektiert oder transmittiert. Aber nicht gleichzeitig reflektiert und transmittiert.	<u>Ein Photon wird</u> also entweder reflektiert oder transmittiert. Aber nicht gleichzeitig reflektiert und transmittiert.
Unteilbarkeit Photonen	<u>Die Photonen teilen sich</u> also am Strahlteiler <u>gleichmäßig auf beide Zustände</u> – transmittiert und reflektiert- auf, ohne sich dabei selbst zu teilen.	<u>Das Photon nimmt</u> also am Strahlteiler <u>einen der beiden Zustände</u> – transmittiert oder reflektiert- an, ohne sich dabei selbst zu teilen.

Innerhalb des in Kapitel 4.2 beschriebenen Anwendungskontextes werden den Schülerinnen und Schülern zur Orientierung Abbildungen für die Wirkung von Polarisationsfiltern bei Licht zur Verfügung gestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Durchführung des Experiments mit Einzelphotonen.

Im Anhang E sind somit folgende Abbildungen aufgeführt:

- Vertikaler Polarisationsfilter
- Horizontaler Polarisationsfilter
- Zwei vertikale Polarisationsfilter hintereinander
- Kombination aus vertikalem und horizontalem Polarisationsfilter

Abbildung 10 (Anhang)

Polarisationsfilter mit vertikaler Polarisationsachse

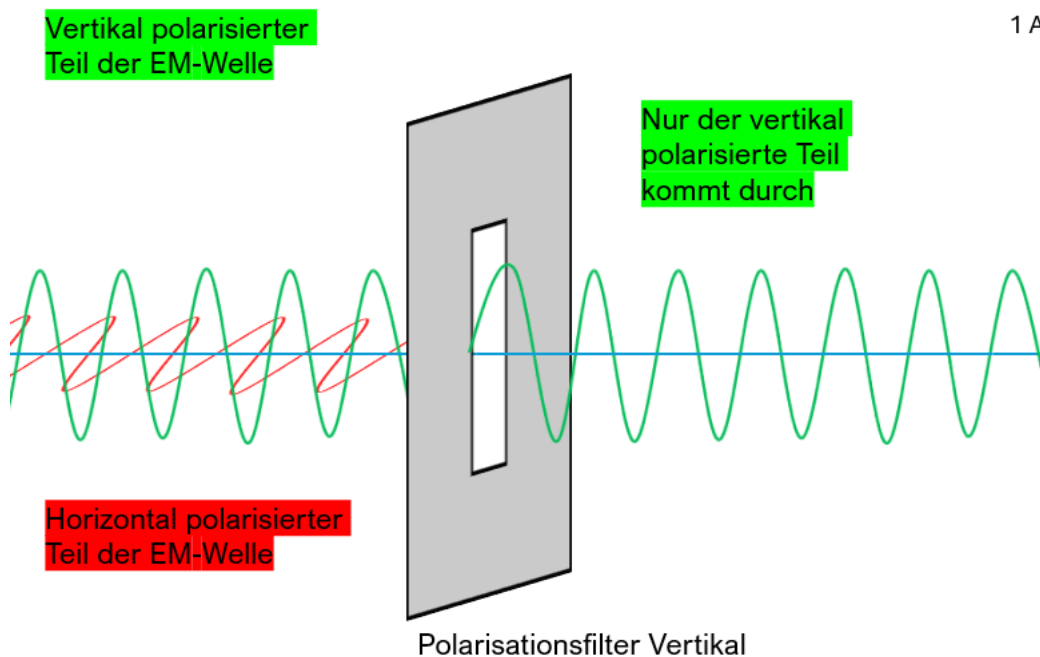


Abbildung 11 (Anhang)

Polarisationsfilter mit horizontaler Polarisationsachse

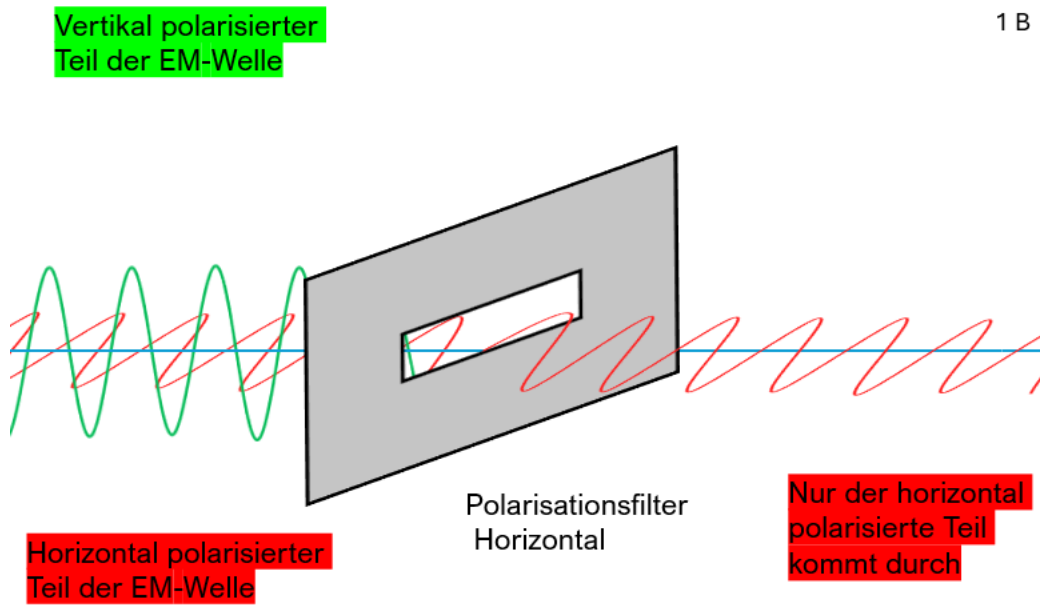


Abbildung 12 (Anhang)

Kombination aus zwei Polarisationsfiltern mit vertikaler Polarisationsachse

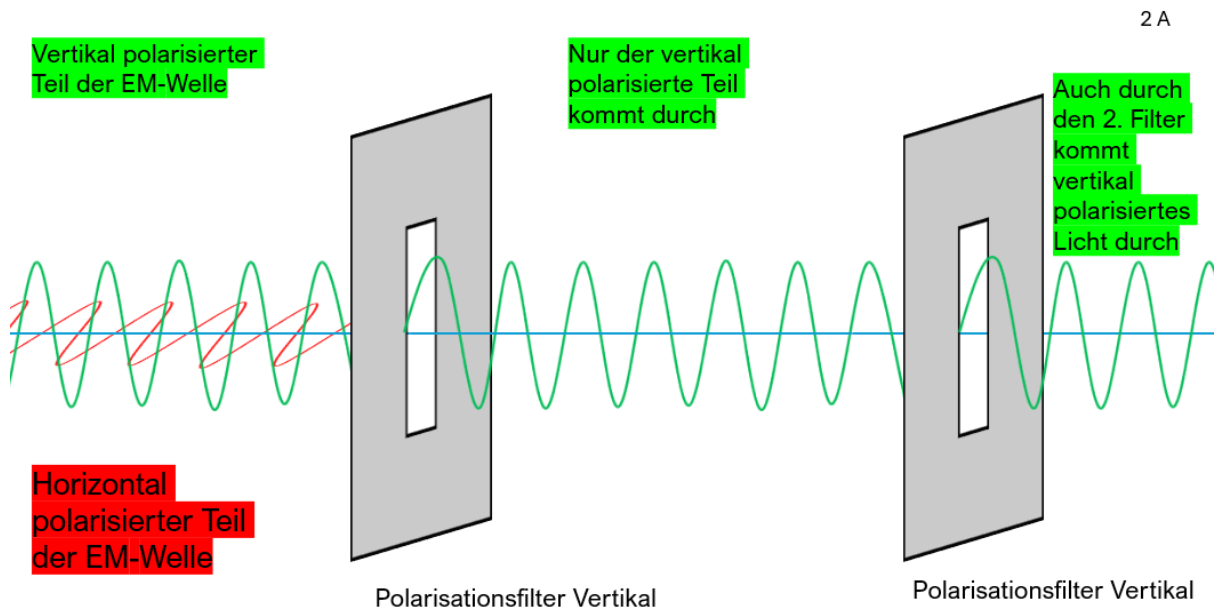
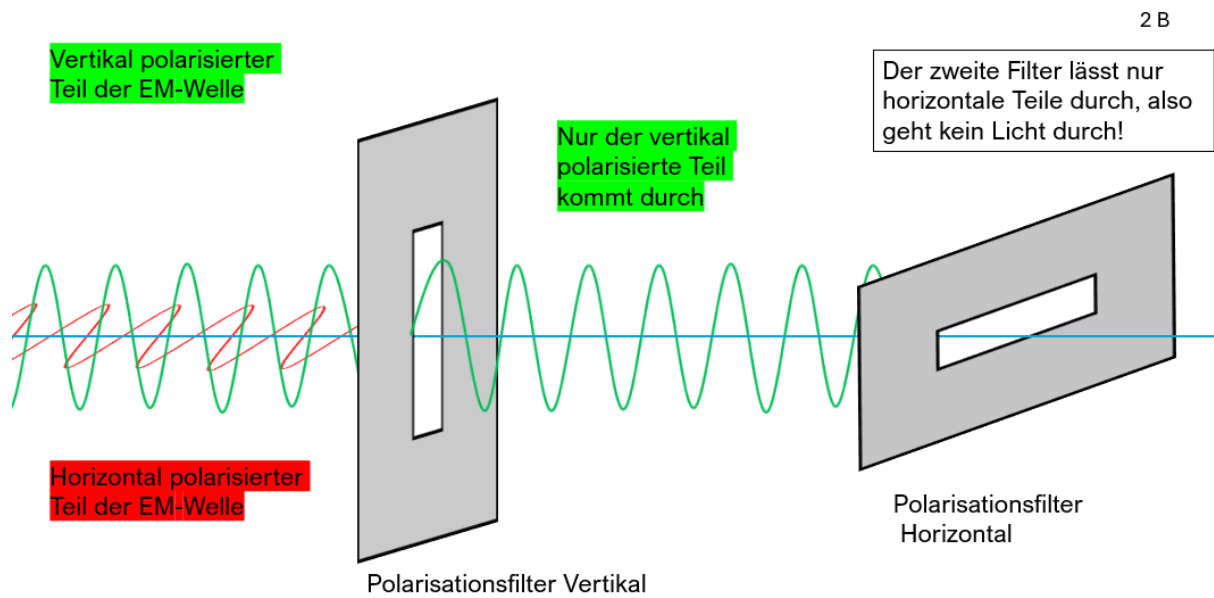


Abbildung 13 (Anhang)

Kombination aus zwei Polarisationsfiltern mit jeweils einer vertikalen und einer horizontalen Polarisationsachse



Um Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II für das Forschungsvorhaben zu rekrutieren, wurde dieses über verschiedene Kanäle beworben. Hierbei wurde folgender Flyer an Physiklehrkräfte adressiert (Kapitel 4.5):

QUANTENPHYSIK

EXPERIMENTE AN IHRER SCHULE

Liebe Lehrkraft,

Sie können Ihren Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geben, **Realexperimente mit einzelnen Photonen** zu erleben. Dafür kommen wir vom Lehrstuhl der Physikdidaktik der Ruhr-Universität Bochum an Ihre Schule. Da der Einsatz dieser Experimente in der Schule neuartig ist, wollen wir eine Akzeptanzbefragung in Einzelinterviews mit Schülerinnen und Schülern zu den Quantenexperimenten durchführen.

Weitere Informationen und Terminvereinbarung unter:

<https://terminplaner6.dfn.de/b/a2daa4cebb0dae55c40639a74bbb34e5-737079>

- Schüler und Schülerinnen der Sek. II
- Vorkenntnisse in der Quantenphysik sind nicht notwendig
- Dauer:
- Pro Teilnehmer: 1 Termin von 30 bis 90 Minuten (Juni/Juli 2024)
- Ort der Erhebung:
- Wir kommen an Ihre Schule
- Projektleitung
- Prof. Dr. Heiko Krabbe & Dr. Marco Seiter, Josefin Metje
- Interesse? Kontakt und Anmeldung:
- Josefin.metje@rub.de



Über den folgenden Pfad können die hier aufgelisteten Daten der Erhebung auf dem Server der Physikdidaktik der Ruhr-Universität Bochum abgerufen werden:

\\dps.d.physik.ruhr-uni-bochum.de\Abschlussarbeiten\MA Metje\Anhang_G

- 1- Einverständniserklärungen
- 2- Interview Audios
- 3- Interview Transkripte
- 4- Paraphrasierte Transkripte
- 5- Kodierung *MAXQDA*

Für die Transkription der Akzeptanzbefragung wurden die folgenden Transkriptionshinweise in Anlehnung an Burde (2018, S. 129) sowie Dresing und Pehl (2015, S. 21–22) formuliert:

- Der Interviewer wird mit dem Buchstaben „I“ abgekürzt und die befragte Person erhält einen anonymen fiktiven Vornamen.
- Jeder Sprechbeitrag erhält einen eigenen Absatz. Zwischen den Sprechern gibt es eine freie Zeile.
- Wortverschleifungen werden an das Schriftdeutsch angenähert. Bsp.: Aus „So’n“ wird „So ein“.
- Bedeutsame Sprechpausen, zum Beispiel durch eine Unterbrechung werden durch drei Punkte [...] gekennzeichnet.
- Wort und Satzabbrüche werden mit „/“ ausgedrückt.
- Auf die Kennzeichnung besonders betonter Wörter sowie auf die Transkription emotionaler und nonverbaler Äußerungen, wie Lachen oder Seufzen, wird verzichtet.
- Anmerkungen zu äußeren Umständen werden in Klammern gesetzt: Bsp. [Justage des Experiments]
- Rezeptionssignale und Fülllaute wie „ähm, hm, aha“ werden nicht transkribiert.
- Die Verschiedenen Phasen der Akzeptanzbefragung werden als Überschriften notiert.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Krabbe und Dr. Seiter für die Betreuung und die Begutachtung meiner Arbeit. Ihre konstruktive Kritik, die wertvollen Anregungen und das regelmäßige Feedback waren sehr hilfreich. Ebenso danke ich für die Vergabe des vielseitigen und interessanten Themas.

Den Teilnehmern des Didaktik-Seminars danke ich für die zahlreichen Ratschläge und Friedrich Strube für seine Unterstützung bei der Zweitcodierung. Ein weiterer Dank gilt Elouise Lemonakis, die mich gemeinsam mit Dr. Seiter bei der Einarbeitung in den Quantenkoffer unterstützt hat.

Mein Dank gilt auch den Lehrkräften für Ihre Vermittlung und Organisation an den Schulen. Ganz besonders danke ich den Schülerinnen und Schülern, die an meiner Befragung teilgenommen haben. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Vielen Dank auch an Dr. Ivonne Möller und Saskia Baron für den Support durch das Merchandising.

Meinen Eltern Kirsten und Klaus Metje danke ich herzlich für die stetige Unterstützung. Abschließend möchte ich meinem Verlobten Michael Abolnikov für die inspirierenden Gespräche über die Philosophie der Quantenphysik danken.