




# Quantenphysik

Ein Unterrichtskonzept für Klasse 12  
im Freistaat Sachsen



- Handreichung für Lehrkräfte -

Alexander Schuster und Markus Standfuß  
September 2024



Leibniz-Institut  
für Festkörper- und  
Werkstoffforschung  
Dresden



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Diese Handreichung entstand im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit  
im 1. Staatsexamen mit der Didaktik der Physik der Technischen Universität Dresden  
und dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.

## 2. Auflage

© CC BY-NC-SA 4.0 | <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Alexander Schuster, Markus Standfuß

Betreut durch Prof. Dr. Gesche Pospiech, Carsten Albert, Moritz Förster  
Dresden 2024

Autoren: Alexander Schuster, Markus Standfuß

Umschlag: Patricia Bäuchler

Formatierungsvorlage: Alexander Schuster, Carsten Albert

Druck im Auftrag der Autoren:

WIRmachenDRUCK GmbH, Mühlbachstr. 7, 71522 Backnang

Dieses Werk entstand in freundlicher und enger Kooperation der Professur für Didaktik der Physik an der Technischen Universität Dresden und dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V.

## Vorwort und Einleitung

Liebe Lehrerinnen und Lehrer,

Quantenphysik ist heute im Alltag allgegenwärtig und ein hochspannendes und aktuelles Teilgebiet der Physik. Durch ihre hohe Relevanz für moderne Technologien leistet sie einen großen Beitrag zur Allgemeinbildung, ist zur Ausbildung eines modernen physikalischen Weltbilds nicht wegzudenken und wurde folglich ausführlich Teil der Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife. Aus diesem Grund sind auch die Lehrpläne der Länder im Wandel, die um weiterführende konzeptuelle Aspekte, entsprechend der Novellierung der Bildungsstandards ergänzt werden. Quantenphysik gilt aber als ein anspruchsvoll zu unterrichtendes Themengebiet, weshalb einige Aspekte besonders beachtet werden sollten. Quantenphysik ist nicht nur auf fachlicher Ebene ein intensiv erforschter Teilbereich der Physik. Gerade durch seine Aktualität, wird das Lehren und Lernen von Quantenphysik ebenfalls intensiv erforscht.

Die in dieser Lehrkräftehandreichung vorgestellten Materialien sowie deren fachlichen und didaktischen Hintergründe wurden im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit im ersten Staatsexamen an der Technischen Universität Dresden für den sächsischen Lehrplan entwickelt. Dabei wurde der aktuelle didaktische Forschungsstand zur Vermittlung von Quantenphysik berücksichtigt. Richtschnur war dabei, moderne Konzepte, Experimente und unterrichtliche Zugänge in den Vordergrund zu rücken. Der Fokus verschiebt sich damit von eher traditionellen Zugängen wie über den Fotoeffekt, für die aus fachlicher Sicht auch semiklassische Alternativerklärungen denkbar sind, hin zu rein quantenphysikalisch erklärbaren Phänomenen.

Die Materialien und das didaktische Konzept wurden im Juli 2024 in einem Ferienkurs erprobt und mit Fragebögen qualitativ evaluiert. Daraufhin wurden anhand der Evaluationsergebnisse Anpassungen am Unterrichtskonzept getroffen. Die hier vorgestellten Materialien und deren fachlichen und didaktischen Hintergründe stellen die nach der Evaluation überarbeiteten Materialien dar.

Diese Handreichung ist als eine Unterstützung zu dem Unterrichtskonzept zu sehen. Sie bietet zum einen wichtige Informationen, die für die Umsetzung von Unterricht mit den bereitgestellten Materialien zentral sind und zum anderen nützliches Hintergrundwissen.

In **Kapitel 1** erhalten Sie einen Überblick über das Unterrichtskonzept, mit den zugrundeliegenden zentralen, aus dem Forschungsstand abgeleiteten Gestaltungsideen- und Prinzipien.

In **Kapitel 2** erhalten Sie nützliche fachliche Hintergrundinformationen und didaktische Begründungen für das Konzept.

In **Kapitel 3** finden Sie die Unterrichtsmaterialien.

Viel Spaß mit den Materialien und eine spannende Zeit mit der Quantenphysik wünschen

Alexander Schuster  
(TU Dresden/IFW Dresden)

Markus Standfuß  
(TU Dresden)

Kontakt über das Kontaktformular auf [klasse12.quantenunterricht.de](https://klasse12.quantenunterricht.de)

## Zugang zu den Materialien

Alle Materialien zum Unterrichtskonzept stehen unter CC BY-NC-SA 4.0 lizenziert auf der Projekthomepage zum Download bereit

[klasse12.quantenunterricht.de](https://klasse12.quantenunterricht.de)



# Inhalt

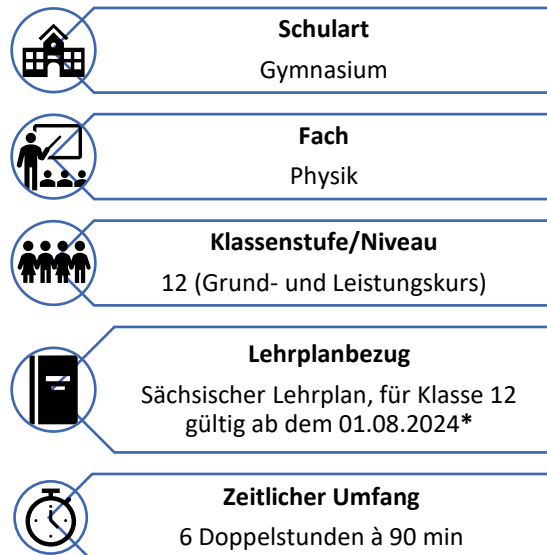
<b>1. Überblick über das Unterrichtskonzept .....</b>	<b>1</b>
1.1 Unterrichtspraktische Eckpunkte.....	1
1.2 Didaktische Kerngedanken .....	3
1.3 Umsetzung im Unterricht.....	8
<b>2. Ergänzende Hintergrundinformationen .....</b>	<b>13</b>
2.1 Fachliche Hinweise und Hintergrundinformationen .....	13
2.2 Fachdidaktische Begründung für das Konzept .....	34
2.3 Hintergründe der Simulation zum Doppelspaltexperiment .....	37
<b>3. Anhang Materialien zum Unterrichtskonzept .....</b>	<b>43</b>
Stundenverlaufspläne .....	43
Arbeitsblätter .....	57
Linkliste .....	87



# 1. Überblick über das Unterrichtskonzept

## 1.1 Unterrichtspraktische Eckpunkte

### Rahmenbedingungen



### Benötigtes Vorwissen



### Kompetenzziele nach Kultusministerkonferenz, 2020

Im Unterrichtskonzept werden alle vier, für die Allgemeine Hochschulreife erforderlichen Kompetenzen des Kompetenzmodells der KMK-Bildungsstandards gefördert (Sach-, Erkenntnisgewinnungs-, Kommunikations- und Bewertungskompetenz). In den Verlaufsplänen sind für jede Stunde darüber hinaus Feinlernziele angegeben.

Die im Unterrichtsverlauf abgedeckten Kompetenzen lauten dabei konkret:

---

\*und ggf. andere, bereits nach den Vorgaben der Bildungsstandards im Bereich Quantenphysik modernisierte Lehrpläne

## Sachkompetenz

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien (S1).
- ...erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten (S2).
- ...wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen (S3).
- ...erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus (S5).

## Erkenntnisgewinnungskompetenz

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...identifizieren und entwickeln Fragestellungen zu physikalischen Sachverhalten (E1).
- ...erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen (E6).
- ...beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen (E8).

## Kommunikationskompetenz

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder (K3).
- ...formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert (K4).
- ...präsentieren physikalische Sachverhalte sowie Lern- und Arbeitsergebnisse sach-, adressaten- und situationsgerecht unter Einsatz geeigneter analoger und digitaler Medien (K7).
- ...tauschen sich mit anderen konstruktiv über physikalische Sachverhalte aus, vertreten, reflektieren und korrigieren ggf. den eigenen Standpunkt (K9).

## Bewertungskompetenz

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...reflektieren Auswirkungen physikalischer Weltbetrachtung sowie die Bedeutung physikalischer Kompetenzen in historischen, gesellschaftlichen oder alltäglichen Zusammenhängen (B8).

## 1.2 Didaktische Kerngedanken

### Zugang

Bisherige Lehrkonzepte zu Quantenphysik bauen vor allem auf historischen Experimenten, wie dem Photoeffekt auf (Müller und Wilhelm, 2021; Pospiech und Schöne, 2012). Dieser Ansatz wird nach neuesten Erkenntnissen der Didaktik meist nicht mehr als ideal angesehen, da er Schülervorstellungen befördern kann, die der Entwicklung einer fachlich adäquaten Vorstellung quantenphysikalischer Prinzipien entgegenstehen könnten (Rode und Barth, 2017). Ebenso beinhalten bisherige Lehrpläne häufig keine modernen Aspekte der Quantentheorie (z. B. die Verschränkung) (Pospiech und Schöne, 2012). Die Reform des sächsischen Lernplans mit thematischer Erweiterung im Bereich Quantenphysik und Anpassung auf die Bildungsstandards im Fach Physik bietet somit das Potential neue Wege zu gehen, die den Erkenntnissen aktueller physikdidaktischer Forschung Rechnung tragen.

Klassische Physik und Quantenphysik unterscheiden sich fundamental. Deshalb gilt es die Andersartigkeit der Quantenphysik besonders zu betonen, wie zum Beispiel durch Verschränkung oder der Existenz echten Zufalls. Daher werden Experimente benötigt, die zwangsläufig auf die Charakteristika der Quantenphysik hinführen und keine alternativen Erklärungen bieten, mit denen die Quantenphysik als Fortführung der bekannten klassischen Physik verstanden wird (Waitzmann, 2023). Im hier vorgestellten Unterrichtskonzept erfolgt deshalb der Einstieg in die Quantenphysik über den Nachweis des Photons mittels der Koinzidenzmethode. Dieser Zugang lässt -anders als der Photoeffekt- keine klassischen Erklärungen zu und charakterisiert so eindeutig die Eigenschaften des Quantenobjekts Photon. Danach werden grundlegende Phänomene der Quantenphysik (basierend auf den Wesenszügen der Quantenphysik nach Küblbeck und Müller, 2002) exemplarisch anhand unterschiedlicher Experimente am Mach-Zehnder-Interferometer und dem Doppelspaltexperiment erarbeitet. Ebenfalls beinhaltet das Unterrichtskonzept eine Einführung moderner Begriffe der Quantentheorie, sowie der Philosophie der Quantenphysik, die diskutiert werden.

### Umstrukturierung der Reihenfolge im Lehrplan

Die Zielsetzung, Quantenphysik anhand des Photons einzuführen und danach die Wesenszüge der Quantenphysik daran zu erarbeiten, führt zu einigen notwendigen Änderungen in der Reihenfolge, der im sächsischen Lehrplan geforderten Themen. Der Lernbereich „Quantenobjekte“ im sächsischen Lehrplan wird also in diesem Unterrichtskonzept **nicht** in der dort vorgesehenen Chronologie unterrichtet, sondern folgt, begründet durch aktuelle Forschung in der Didaktik, einer abweichenden Reihenfolge. Die im vorliegenden Konzept erarbeiteten Lehrmaterialien decken nur

die Aspekte des Lernbereichs ab, die im Vergleich zum sächsischen Lehrplan von 2012 ergänzt wurden, da zu den Themen des Lehrplans von 2012 bereits eine Vielzahl an Materialien existieren. Die hier vorgestellten Materialien sind dafür gedacht, als Einstieg in den Bereich Quantenphysik eingesetzt zu werden. Der Teil des Lehrplans von 2012 (mit Photoeffekt etc.) wird entgegen der Chronologie des Lehrplans erst **nach** dem hier vorgestellten Teil unterrichtet. Welcher Teil des Lernbereichs mit den hier vorgestellten Materialien abgedeckt wird, ist in Abbildung 1 dargestellt. In Abbildung 2 ist die genaue Chronologie der Themen im Unterricht dargestellt.

<p>Kennen der Zusammenhänge der Größen Energie, Impuls, Frequenz und Wellenlänge zur Beschreibung von Photonen als Quantenobjekte</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- äußerer lichtelektrischer Effekt <ul style="list-style-type: none"> <li>· experimentelle Ergebnisse</li> <li>· Einsteins Lichtquantenhypothese, Photonenmodell, Energie eines Photons <math>E = h \cdot f</math></li> <li>· Energiebilanz <math>h \cdot f = E_{\text{kin}} + W_A</math>, Gegenfeldmethode, Grenzfrequenz, Experiment zur Bestimmung von <math>h</math></li> </ul> </li> <li>- Impuls des Photons <math>p = \frac{h}{\lambda}</math></li> <li>- Äquivalenz von Energie und Masse <math>E = m \cdot c^2, m = \frac{h \cdot f}{c^2}</math></li> </ul> <p>Übertragen der Kenntnisse auf andere Quantenobjekte</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Beugung</li> <li>- de-Broglie-Wellenlänge <math>\lambda = \frac{h}{p}</math></li> <li>- Unterschiede zu Photonen</li> </ul>	<p>Umkehrung des lichtelektrischen Effekts bei Leuchtdioden</p> <p>Widersprüche zur Wellentheorie des Lichts aufzeigen</p> <p>Kometenschweif</p> <p>Interferenzerscheinungen bei Elektronen, Neutronen, Atomen und Molekülen</p>
<p>Kennen grundlegender Aspekte der Quantentheorie</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- stochastische Vorhersagbarkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>· Interferenz und Superposition, Determiniertheit der Zufallsverteilung</li> <li>· Deutung mittels des Quadrats der quantenmechanischen Wellenfunktion (qualitativ)</li> <li>· Komplementarität</li> </ul> </li> <li>- quantenphysikalisches Weltbild <ul style="list-style-type: none"> <li>· Besonderheiten des quantenphysikalischen Messprozesses, Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus</li> </ul> </li> </ul>	<p>Doppelspaltexperiment bei geringer Intensität Interferenz einzelner Photonen Interferenz einzelner Elektronen Wahrscheinlichkeitsinterpretation, Computersimulation</p> <p>Richard Feynman: „Quantenobjekte sind weder Welle noch Teilchen, sondern etwas Drittes!“</p> <p>Nichtlokalität der Quantenobjekte; Kopenhagener Deutung; Quantenphysik und Philosophie</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Heisenberg'sche Unschärferelation</li> </ul>	<p>Ort–Impuls–Unbestimmtheit <math>\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h</math>, Energie–Zeit-Unbestimmtheit, Verbreiterung von Spektrallinien,</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Komplementarität von Weginformationen und Interferenzfähigkeit, Delayed-choice-Experiment</li> <li>· Problematik der Übertragung von Begriffen aus der Anschauungswelt in die Quantenphysik</li> <li>- Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen</li> </ul>	<p>Grenzen der Gültigkeit der Gesetze der klassischen Physik</p> <p>Grundgedanke der verzögerten Quantenwahl, Quantenradierer</p>

Abbildung 1: Lernbereich 4 *Quantenobjekte* der 12. Klasse LK im sächsischen Lehrplan (Sächsisches Staatsministerium für Kultus, 2022). Markiert sind die Aspekte des Lehrplans, die mit den hier vorgestellten Materialien abgedeckt werden.

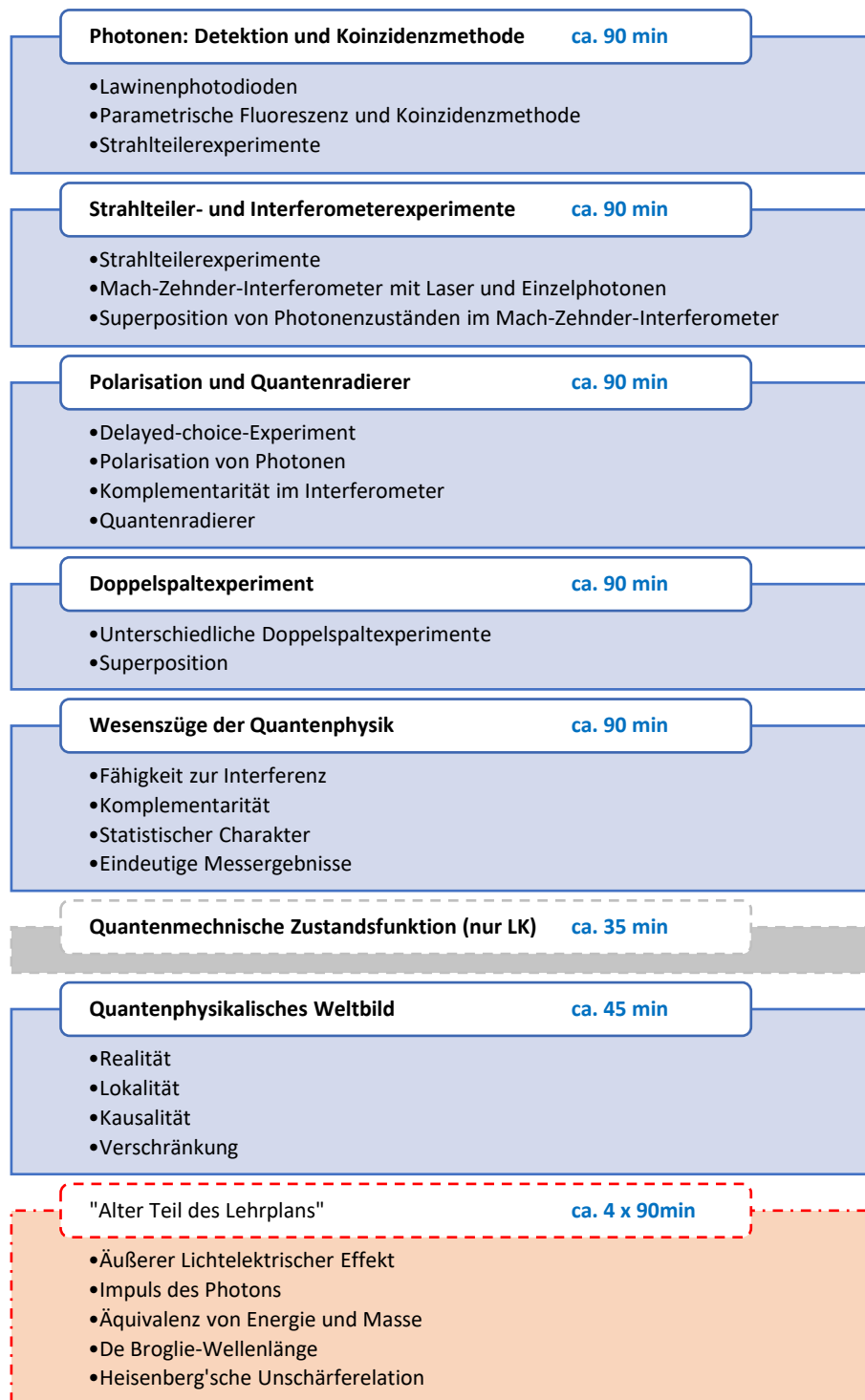
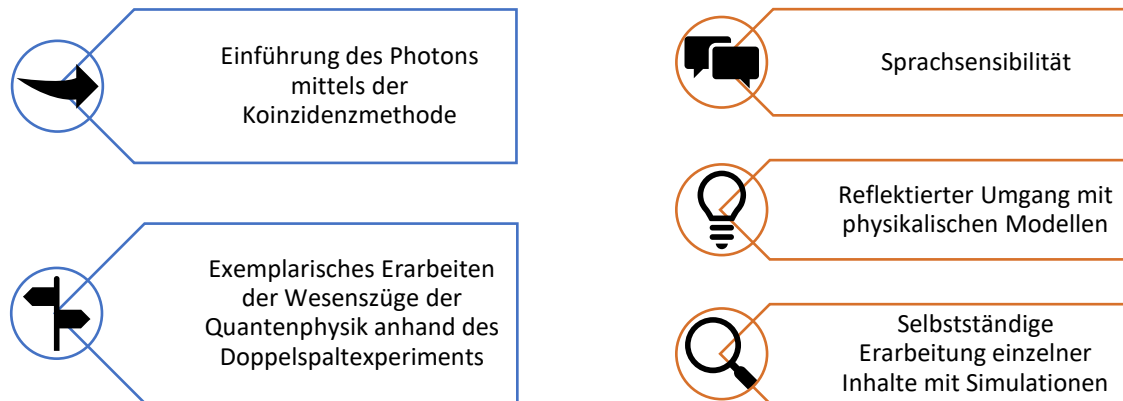


Abbildung 2: Sachstruktur für den Unterricht im Lernbereich Quantenobjekte im sächsischen Lehrplan.



## Entwicklungsgrundsätze

Bei der Entwicklung der Unterrichtsmaterialien lagen die folgenden **inhaltlich-** und **methodisch-** didaktischen Grundsätze zugrunde:



## Begriffliche Besonderheiten

Quantenphysik sprachlich zu vermitteln ist nicht einfach, denn das Sprechen mit Alltagssprache bzw. der Sprache der klassischen Physik über Phänomene der Quantenphysik kann für das Verständnis kontraproduktive Schülervorstellungen erzeugen. Es ist daher besonders wichtig auf Sprachsensibilität zu achten (Rode und Barth, 2017). Aus diesem Grund basiert das Unterrichtskonzept auf einigen besonderen Begriffen, die im Unterricht konsistent verwendet werden sollten. Die folgenden, für diesen Unterricht relevanten Begriffe, haben sich als sinnvoll herausgestellt.

Begriff	Bedeutung und Begründung für die Verwendung
<b>Quantenobjekt</b>	<i>Quantenobjekt</i> ist ein bewusst allgemein gehaltener Begriff für alle Objekte, deren Verhalten nur mit den Gesetzen der Quantenphysik beschrieben wird (bspw. Photonen, Elektronen, Moleküle etc.) (Pospiech, 2021). Mit der Verwendung des Begriffes soll vermieden werden, Teilchenvorstellungen zu bestärken (Rode und Barth, 2017).
<b>quantenphysikalischer Messprozess ↔ klassische Messung</b>	Das Messen hat in der Quantenphysik einen aktiven Charakter, also erzeugt Eigenschaften und Messwert erst, wohingegen eine Messung in der klassischen Physik eine schon vorhandene Eigenschaft und einen zugehörigen Messwert feststellt. Die Verwendung des Begriffes <i>Messprozess</i> beim Sprechen über das Messen in der Quantenphysik hebt den aktiven Charakter gegenüber klassischen <i>Messungen</i> hervor (z. B. Albert und Pospiech, 2023).

<b>Superposition</b>	Hier wird ein Begriff verwendet, der aus der klassischen Physik bereits bekannt ist. Diese quantenphysikalische Superposition unterscheidet sich grundlegend von der eines klassischen Systems, was entsprechend thematisiert und gegenübergestellt werden sollte.
<b>Auflösen der Superposition</b>	Im Unterricht wird bei einem Messprozess an einem sich in Superposition befindlichen Quantenobjekt von „Auflösung der Superposition“ gesprochen. Der Begriff ist im Gegensatz zu „Kollaps der Wellenfunktion“ neutral in Bezug auf die unterschiedlichen Interpretationen der Quantenphysik, indem bspw. nicht die Frage zwischen Stetigkeit und Unstetigkeit der Zustandsreduktion aufgeworfen wird.
<b>Eigenschaft „Weg“</b>	Der Messprozess in der Quantenphysik ist aktiv. Durch diesen Messprozess wird die Superposition aufgelöst und der Zustand des Quantenobjekts erst festgelegt, z.B. welcher Detektor klickt. Die Eigenschaft „Weg“ existiert also vor dem Messprozess nicht (Küblbeck und Müller, 2002).

## 1.3 Umsetzung im Unterricht

### Skizze des Ablaufs

#### 1. Doppelstunde:

- Erarbeiten der Funktionsweise einer Lawinenphotodiode mittels Lawinenanalogie und der Problematik der Dunkelzählereignisse
- Kennenlernen der parametrischen Fluoreszenz und der Koinzidenzmethode
- Erarbeiten des Strahlteilers und Experiment mit Laserlicht (Simulation)

#### 2. Doppelstunde:

- Durchführung des Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen (Simulation), womit die Unteilbarkeit des Photons demonstriert werden kann
- Durchführung des Strahlteilerexperiments (Simulation) zur Verteilung der Klicks an den Detektoren des Strahlteilers und damit Untersuchung des statistischen Charakters
- Kennenlernen des Mach-Zehnder-Interferometers (Aufbau, Funktionsweise) und der dazugehörigen Simulation
- Durchführung des Experiments (Simulation) am Mach-Zehnder-Interferometer mit Laserlicht und Einzelphotonen. Dabei Untersuchung der Interferenz bei klassischem Licht und Einzelphotonen
- Kennenlernen der Superposition von Photonenzuständen

### 3. Doppelstunde:

- Systematisierung zum Wellen- und Teilchenmodell in der Quantenphysik mit dem Ziel des reflektierten Umgangs mit Modellen
- Erarbeitung des Delayed-Choice Experiments zur Frage, ob Photonen "entscheiden", ob sie Phänomene zeigen, die mit dem Wellen- oder Teilchenmodell erklärt werden können
- Kennenlernen der Polarisierung von Photonen
- Experiment (Simulation) zum Mach-Zehnder-Interferometer mit zwei Polarisationsfiltern zum Untersuchen der Komplementarität von Weginformation und Interferenzbild
- Durchführung des Quantenradierer-Experiments im Mach-Zehnder-Interferometer (Simulation)

### 4. Doppelstunde:

- Gegenüberstellung zwischen Mach-Zehnder-Interferometer und Doppelspaltexperiment
- Einführung des Doppelspaltexperiments als Experiment, mit dem im weiteren Verlauf des Unterrichts alle wichtigen Wesenszüge der Quantenphysik abgeleitet werden + Arbeit mit unterschiedlichen Doppelspaltexperimenten (Licht geringer Intensität, Einzelphotonen)
- Ableitung des ersten Teils des Wesenszugs der Quantenphysik *Fähigkeit zur Interferenz* aus den kennengelernten Doppelspaltexperimenten
- Genauere Untersuchung des Wesenszugs selbstständig an einer Simulation zu Doppelspaltexperiment

### 5. Doppelstunde:

- Wiederholung des Quantenradierers, diesmal mit Anwendung des Wissens auf den Doppelspalt. Schülerinnen und Schüler überlegen sich selbst, wie ein Quantenradierer am Doppelspaltexperiment umgesetzt werden kann.
- Ableitung des zweiten Wesenszugs der Quantenphysik *Komplementarität* aus dem Quantenradierer
- Erarbeitung des Determinismus als Grundprinzip der klassischen Physik am Lotto spielen und dem Würfelwurf
- Erarbeitung des dritten Wesenszugs der Quantenphysik *Statistischer Charakter* selbstständig durch die Schülerinnen und Schüler anhand der Simulation zum Doppelspaltexperiment

- Erarbeitung des vierten Wesenszugs der Quantenphysik *Eindeutige Messergebnisse* gemeinsam am Doppelspaltexperiment

#### 6. Doppelstunde:

- Verallgemeinerung der Wesenszüge der Quantenphysik auf andere Quantenobjekte durch Betrachtung eines Doppelspaltexperiments mit Elektronen
- Nur für Leistungskurs: Einführung der quantenmechanischen Zustandsfunktion und Anwendung auf das Doppelspaltexperiment mit Elektronen
- Erarbeiten der Aspekte des quantenphysikalischen Weltbilds Realität, Lokalität und Kausalität durch Gegenüberstellung Quantenphysik/klassische Physik
- Kennenlernen der Verschränkung am EPR-Experiment

## Materialübersicht

	Bemerkungen
<b>1. DS</b>	
Verlaufsplan 1.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Präsentation 1.DS	pdf/editierbar als PPT-Datei
Arbeitsblatt 1.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Text Kristall und Fluoreszenz 1.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Detektor_Video_(Bitzenbauer_2020_CD)	Video im mp4-Format
<b>2. DS</b>	
Verlaufsplan 2.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Präsentation 2.DS	pdf/editierbar als PPT-Datei
Arbeitsblatt 2.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
<b>3. DS</b>	
Verlaufsplan 3.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Präsentation 3.DS	pdf/editierbar als PPT-Datei
Arbeitsblatt 3.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Text Delayed-choice 3.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
<b>4. DS</b>	
Verlaufsplan 4.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Präsentation 4.DS	pdf/editierbar als PPT-Datei
AB4_Text DS Einzelphotonen AB4_Text DS Geringe Intensität	pdf/editierbar als Word-Datei
AB4_WZ1_Interferenz.docx	pdf/editierbar als Word-Datei
<b>5. DS</b>	
Verlaufsplan 5.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Präsentation 5.DS	pdf/editierbar als PPT-Datei
AB5_Quantenradierer_WZ2_Komplementarität	pdf/editierbar als Word-Datei
AB5_WZ3_WZ4_Statistischer Charakter_Messergebnisse	pdf/editierbar als Word-Datei
<b>6. DS</b>	
Verlaufsplan 6.DS	pdf/editierbar als Word-Datei
Präsentation 6.DS	pdf/editierbar als PPT-Datei
AB6_Zustandsfunktion	pdf/editierbar als Word-Datei
AB6_Weltbild_Kausalität AB6_Weltbild_Realität	pdf/editierbar als Word-Datei
<b>Zusätzlich</b>	
Lehrkräftehandreichung	Digital als pdf
Simulation zum Strahlteiler	<i>strahlteiler.quantensimulation.de</i>
Simulation zum Mach-Zehnder-Interferometer	<i>interferometer.quantensimulation.de</i>
Simulation zum Doppelspaltexperiment	<i>doppelspalt.quantensimulation.de</i>
Beispielaufgaben mit Erwartungshorizont	editierbar als Word-Datei



## 2. Ergänzende Hintergrundinformationen

In diesem Abschnitt werden zunächst fachlich vertiefende Informationen zu den Inhalten der Unterrichtsstunden gegeben. Im Anschluss wird die didaktische Konzeption der Einheit begründet und ein vertiefender Einblick in die Hintergründe der Simulation zum Doppelspaltexperiment gegeben.

### 2.1 Fachliche Hinweise und Hintergrundinformationen

#### Quantenobjekte

Als Quantenobjekte werden alle Objekte bezeichnet, deren Verhalten nur durch die Quantentheorie korrekt beschreibbar ist (Pospiech, 2021). Beispiele dafür sind Photonen, Elektronen oder auch größere massebehaftete Objekte wie Moleküle.

#### Quantenobjekt Photon

*Photonen* werden im Rahmen der Quantenelektrodynamik beschrieben und bezeichnen „quantisierte Anregungen der Moden des elektromagnetischen Feldes“ (Müller und Greinert, 2023). Dabei sind z.B. die möglichen Strahlengänge des Lichts in einem Interferometer Moden.

#### Detektoren

Zuerst gilt es darzustellen, wie Photonendetektoren, insbesondere die im Unterrichtskonzept verwendeten *Avalanche Photo Diode* (APD), funktionieren. APDs, im Unterrichtskonzept *Lawinen-Diode* genannt, basieren auf dem inneren Photoeffekt. Bei einer ausreichend großen Energie der eintreffenden Photonen im Absorptionsgebiet ( $\pi$ -Zone in Abbildung 3) werden zuvor gebundene Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben. Da an den Dioden eine hohe Sperrspannung anliegt, werden die freien Elektronen stark in Richtung der p-dotierten Zone beschleunigt und können so durch Stoßionisation weitere Elektronen auf das Leitungsband heben. Dieser Prozess kann von jedem frei gewordenen Elektron wiederholt werden; es kommt zur *Ladungsträgerlawine* (Martin, 2017). Bei ausreichend großen Schichtdicken führt dieser Strom an Ladungsträgern zum Durchbruch, ein Strom kann gemessen werden. Man sagt, der Detektor „klickt“.

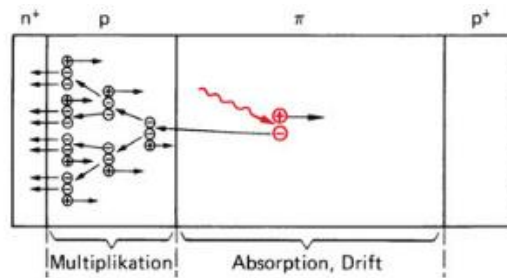


Abbildung 3: Aufbau einer APD (Martin, 2017)

Allerdings werden Elektronen nicht nur durch die Absorption der Energie einfallender Photonen gelöst; es wird auch ein Strom bei Dunkelheit gemessen. Dies nennt man *Dunkelzählereignisse*. Zu unterscheiden sind primäre und sekundäre Dunkelzählereignisse. Die Ursache von primären Dunkelzählereignissen liegt in dem Herauslösen von Elektronen bei hohen Temperaturen, da auch durch die Zufuhr von thermischer Energie Ladungsträger gelöst werden können. Weiterhin beeinflusst die anliegende Spannung aufgrund von höherer Emissions- und Auslösewahrscheinlichkeit die primären Ereignisse. Mit Kühlung der Detektoren lassen sich diese Ereignisse minimieren (Cova et al., 1996). Sekundäre Dunkelzählereignisse haben ihren Ursprung in dem Einfangen von Elektronen in Defektstellen des Materials. Nach einiger Zeit werden diese wieder freigesetzt und lösen eine Ladungsträgerlawine aus, obwohl kein Photon eingefallen war. Dieser Prozess wird als *afterpulsing* bezeichnet (Cova et al., 1996).

### Koinzidenzmethode

So ist es unklar, ob der registrierte Strom durch einfallende Photonen oder Dunkelzählereignisse hervorgerufen wurden. Dementsprechend benötigt es ein Verfahren, um diese beiden Ursachen in den Messdaten zu erkennen. Hierbei ist der Prozess der *spontanen parametrischen Abwärtskonversion in nichtlinearen Kristallen*, oder auch *parametrische Fluoreszenz* genannt, relevant. Häufig wird auch die englische Bezeichnung *spontaneous parametric downconversion* (SPDC) verwendet (Müller, 2009).

Trifft eine elektromagnetische Welle auf ein dielektrisches Material (z.B. einen Kristall), regt diese die Elektronen zum Schwingen an. Dabei wird die Schwingungsrichtung durch die Polarisation charakterisiert

$$P = \varepsilon_0(\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \dots) \quad (1)$$

Dabei stellt  $\chi^{(n)}$  die dielektrische Suszeptibilität n-ter Ordnung dar und  $\varepsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante im Vakuum (Müller, 2009).



Für geringe Feldstärken ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Polarisation von der Feldstärke; in diesem Fall spricht man von linearer Optik. Für höhere Feldstärken, wie z.B. durch einen Laser, tragen Terme 2. und höherer Ordnung der Feldstärke zur Polarisation bei; man spricht von *nichtlinearer Optik*. Ein Phänomen der nichtlinearen Optik ist die *parametrische Fluoreszenz*, die ein quantenphysikalischer Prozess ist und nicht klassisch erklärt werden kann. Einfallende Photonen werden in zwei austretende Photonen umgewandelt, welche signal- und idler-Photon genannt werden (Müller, 2009). Es gilt Impuls- und Energieerhaltung, woraus folgt, dass die Summe der Frequenzen von signal- und idler-Photon gleich der des Ausgangsphotons ist. Die beiden Photonen verlassen den Kristall, der z.B. aus Beta-Barium-Borat (BBO) ist, unter dem gleichen Winkel zur optischen Achse auf zwei Kreiskegeln. Dabei werden zwei verschiedene Typen der parametrischen Fluoreszenz unterschieden: beim ersten Typ werden beide emittierten Photonen gleich polarisiert und liegen auf einem gemeinsamen Kreiskegel, beim zweiten auf sich schneidenden Kegeln mit orthogonaler Polarisation; an den Schnittpunkten beider Kegel können verschränkte Photonen erzeugt werden (Müller, 2009).

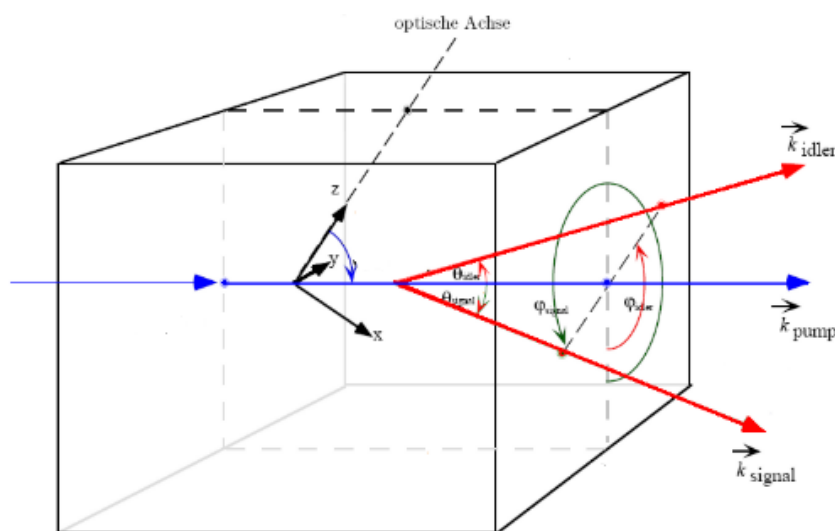


Abbildung 4: parametrische Fluoreszenz (Müller, 2009)

Endergebnis des vorgestellten Prozesses ist die gleichzeitige Emission von zwei Photonen unter dem gleichen Winkel. Durch Platzieren von zwei Detektoren hinter dem Kristall können diese detektiert werden. Wenn signal- und idler-Photon registriert sind, klicken beide Detektoren innerhalb eines festgelegten Koinzidenzfensters, dies bezeichnet man als *Koinzidenz* (Bitzenbauer, 2020). Das Koinzidenzfenster ist möglichst klein zu wählen, um zufällige Koinzidenzen (das zufällige Auftreten von zwei Dunkelzählereignissen im selben Koinzidenzfenster) zu minimieren. Üblicherweise liegt dieses im Bereich von 2-5 ns (Bronner, 2010). Im Sinne der didaktischen Reduktion wird im Unterrichtsgang Koinzidenz mit

Gleichzeitigkeit gleichgesetzt. Hierbei ist relevant, dass der Koinzidenzaufbau die Grundlage für alle weiteren quantenoptischen Experimente legt und diesen immer vorgeschaltet ist; auf die explizite Erwähnung wird aber nachgehend verzichtet.

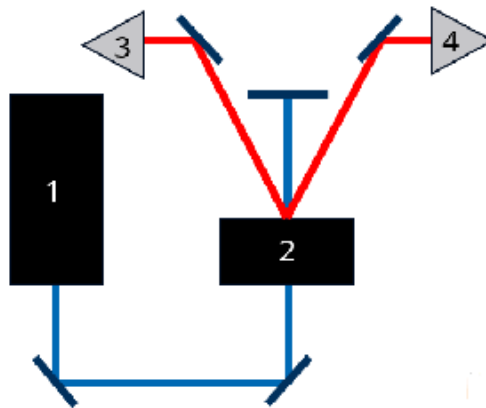


Abbildung 5: Koinzidenzaufbau (eigene Darstellung, nach Bitzenbauer, 2020).

1: Quelle, 2: nichtlinearer Kristall, 3 und 4: Detektoren

## Quantenphysikalische Zustände und Superpositionen

Der Begriff des Zustands besitzt in der Quantenphysik eine zentrale Bedeutung. Der Zustand eines Quantenobjektes wird durch die quantenphysikalische Wellenfunktion (je nach Autor auch teilweise Zustandsfunktion genannt, z.B. in Pospiech, 2021) beschrieben. Diese Funktion  $\psi$  enthält alle physikalischen Größen, die das Quantenobjekt beschreiben, je nach Objekt beispielsweise Ladung, Ort oder Polarisierung (Pospiech, 2021).

Die Dimension  $n$  des Vektorraums ergibt sich aus der maximalen Anzahl an  $n$  linear unabhängigen Vektoren. Diese  $n$  linear unabhängigen Vektoren bilden die Basis des Vektorraums. Jeder Vektor des Vektorraums lässt sich dann als Linearkombination der einzelnen Basisvektoren schreiben. Zustände von Quantenobjekten werden im Folgenden in Dirac-Notation angegeben. Beispielsweise kann der Zustand eines Photons bezüglich des Wegs im Doppelspaltexperiment entweder als rechter Spalt, angegeben in Dirac-Notation durch  $|\text{rechter Spalt}\rangle$  oder als linker Spalt, angegeben in Dirac-Notation durch  $|\text{linker Spalt}\rangle$  angegeben sein (man nennt diese Zustände *Basiszustände*). Das Besondere in der Quantenphysik ist, dass sich die Photonen aber auch in einer Superposition aus beiden Zuständen befinden können (basierend auf Homeister, 2013; angepasst durch A. S.). Mathematisch beschrieben wird die Superposition eines Photons bezüglich des Wegs im Doppelspaltexperiment als

$$|\psi\rangle = \alpha \cdot |\text{rechter Spalt}\rangle + \beta \cdot |\text{linker Spalt}\rangle. \quad (2)$$

$\alpha$  und  $\beta$  werden *Amplituden* genannt und sind im Allgemeinen komplexwertig. Entsprechend der Born'schen Wahrscheinlichkeitsinterpretation (siehe Kapitel zum statistischen Charakter), müssen die Amplituden der Normierungsbedingung

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (3)$$

gehören (basierend auf Homeister, 2013; Dür und Heusler, 2012; angepasst durch A. S.). Die komplexwertigen Amplituden geben den jeweiligen Beitrag der Basiszustände an, die in der Superposition überlagert sind (Homeister, 2013; Dür und Heusler, 2012). Folglich lässt sich jeder beliebige Zustand bezüglich des Wegs  $|\psi\rangle$  als eine Summe  $\alpha \cdot |\text{rechter Spalt}\rangle + \beta \cdot |\text{linker Spalt}\rangle$  mit unterschiedlichen Amplituden  $\alpha$  und  $\beta$  beschreiben (Pospiech, 2021). Dies ist reine Mathematik: jeder Vektor lässt sich als Linearkombination der Basisvektoren darstellen.

### Photonen am Strahlteiler

Mithilfe einer Einzelphotonenquelle können Einzelphotonen-Experimente an Strahlteilerwürfeln durchgeführt werden. Dazu werden zwei Photodetektoren an den beiden Ausgängen des Strahlteilers positioniert, siehe Abbildung 6. Man beobachtet immer nur einen klickenden Detektor pro emittiertem Photon, wobei die Wahrscheinlichkeiten für Detektor 1 bzw. 2 gemäß der Transmissions- und Reflexionswahrscheinlichkeit verteilt sind.

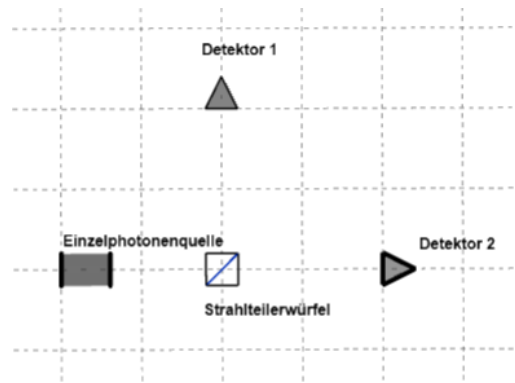


Abbildung 6: Strahlteilerwürfel mit Detektoren (eigene Darstellung)

Formal lässt sich das mithilfe der Dirac-Notation darstellen. Der Eigenzustand

$$|\psi\rangle_{\text{Anfang}} = |1\rangle_1 |0\rangle_2 \quad (4)$$

stellt ein eintreffendes Photon am Strahlteiler dar. Dabei bezeichnen die Indizes 1-2 die jeweiligen Aus- bzw. Eingänge des Strahlteilers, siehe Abbildung 5.  $|1\rangle_1$  steht dabei für ein Photon an Eingang 1 und  $|0\rangle_2$  für kein Photon an Eingang 2.

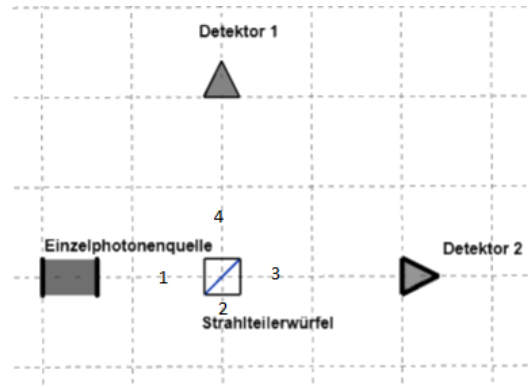


Abbildung 7: Strahlteiler (eigene Darstellung, nach Waitzmann, 2023)

Bei gleicher Reflexions- und Transmissionswahrscheinlichkeit stellt sich der ergebende Zustand dar als

$$|\psi\rangle_{\text{Ende}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_3|0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}}|0\rangle_3|1\rangle_4) \quad (5)$$

(Waitzmann, 2023). Gut erkennbar ist hier die Superposition des Transmissions- und Reflexionszustandes. Für Interferometer-Experimente bedeutsam ist die auftretende Phasenverschiebung zwischen dem reflektierten und transmittierten Anteil von  $\pi/2$ , welche zu dem Vorfaktor  $e^{i\frac{\pi}{2}}$  führt. Ursache hierfür ist die Totalreflexion an der Mediumsgrenze des Strahlteilers (Filk, 2008). Relevant ist hier zu betonen, dass der Zustand erst durch die Detektion (also durch den Messprozess) festgelegt wird; im Bild der Kopenhagener Deutung gesprochen ist dies der *Kollaps der Wellenfunktion*. Davor ist der Zustand nicht vorherbestimmt; die Eigenschaft „Weg“ existiert also bis zum Klicken eines Detektors nicht.

Ein Photon wird also entweder im Detektor am transmittierten oder reflektierten Ausgang registriert. So kann die Unteilbarkeit und damit eine der zentralen Eigenschaften des Photons gezeigt werden. Mathematisch kann dies mithilfe der Korrelationsfunktion beschrieben werden, die das Verhältnis von auftretenden Koinzidenzen zu den erwarteten Koinzidenzen beschreibt

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{P_{12}}{P_1 P_2}. \quad (6)$$

Dabei gibt  $P_{12}$  die Wahrscheinlichkeit vom gleichzeitigen Detektieren an beiden Detektoren an, während  $P_1$  und  $P_2$  die Einzelwahrscheinlichkeiten angeben und  $\tau$  den Koinzidenzzeitraum (Bronner, 2010). Klassisch betrachtet müsste dabei  $g^{(2)}(\tau) > 1$  gelten. Idealerweise ergibt sich aufgrund der Unteilbarkeit ein Wert von 0, im Experiment erreicht man dies nicht vollständig und erhält Ergebnisse deutlich kleiner als 1, was dafürspricht, dass weniger Koinzidenzen auftreten, als bei zufälligem Verhalten erwartet werden würden. Experimentell weist man dies nach, indem man das Strahlteilerexperiment in einem Arm des Koinzidenzaufbaus platziert und die Koinzidenzen

zwischen dem Detektor im anderen Arm und den Detektoren des Strahlteilers betrachtet (Weber, 2018). Mithilfe dieses Experiments sind die Wesenszüge „statistischer Charakter“ und „eindeutige Messergebnisse“ demonstrierbar (Küblbeck und Müller, 2002).

### Polarisation von Photonen

Die Eigenschaft *Polarisation* von Photonen lässt sich in einem zweidimensionalen komplexen Vektorraum (Hilbertraum) mittels zweier Basiszustände angeben; gebräuchlich sind hier  $|H\rangle$  und  $|V\rangle$  oder  $|D_+\rangle$  und  $|D_-\rangle$ . Diese stehen für verschiedene Polarisationswinkel:  $|H\rangle$  und  $|V\rangle$  für  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , sowie  $|D_+\rangle$  und  $|D_-\rangle$  für  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$ . Der Polarisationszustand eines Photons lässt sich dann als Linearkombination von Basiszuständen beschreiben:

$$|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle \quad (7)$$

Es gilt  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$  und aufgrund der Normierung  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . Wird ein Photon an einem Polarisationsfilter des Winkels  $\alpha$  transmittiert, hat es danach den Zustand  $|\alpha\rangle$ . Trifft ein Photon mit dieser Polarisation auf einen Filter des Winkels  $\beta$ , ergibt sich die Transmissionswahrscheinlichkeit zu

$$P = \cos^2(\beta - \alpha) \quad (8)$$

(Bronner, 2010). Dies entspricht dem aus der Wellenoptik bekannten Gesetz von Malus. Die Polarisation einzelner Photonen kann als Modell für den Photonenspin genommen werden (Filk, 2008).

### Messprozess

Der Messprozess in der Quantenphysik ist im Allgemeinen, im Gegensatz zur klassischen Physik indeterministisch, also nicht vorbestimmt, sondern statistischer Natur. In der klassischen Physik, würde ein Experiment mit den gleichen Anfangs- und Versuchsbedingungen auch immer wieder das gleiche Ergebnis zeigen (Determinismus), in der Quantenphysik ist dies im Allgemeinen nicht möglich (Müller und Greinert, 2023). Es lassen sich folglich nur Wahrscheinlichkeiten für ein mögliches Messergebnis angeben (Pospiech, 2021). Aus den möglichen Messergebnissen für ein quantenphysikalisches Experiment lassen sich Häufigkeitsverteilungen zum Beispiel in Form von Histogrammen erstellen. Solche Histogramme geben dann Aufschluss über relative Häufigkeiten der möglichen Messergebnisse. Die statistische Verteilung der Messergebnisse ist aber berechenbar und entspricht dem Betragsquadrat der quantenmechanischen Wellenfunktion. Dies nennt man die Born'sche Wahrscheinlichkeitsformel.

Allgemein lässt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Observable (physikalisch messbare Größe, z.B. Ort) durch Bildung des Skalarprodukts zwischen der Wellenfunktion  $\psi$  und den Eigenzuständen der betrachteten Observablen berechnen. In darstellungsunabhängiger Dirac-Notation erfolgt die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte für eine Observable gemäß

$$P_n = |\langle a_n | \psi(\vec{x}, t) \rangle|^2 \quad (9)$$

mit  $|a_n\rangle$  als zum Messwert  $a_n$  gehörenden Eigenzustand der Observablen  $A$  (Müller und Wilhelm, 2021; Weidlich, 2016). Aus der Born'schen Wahrscheinlichkeitsinterpretation ergibt sich dann in der Folge auch die oben beschriebene Normierungsbedingung in Formel 3, da sich die Wahrscheinlichkeiten aller Basiszustände zu 1 addieren müssen.

Ebenso kann die Born'sche Wahrscheinlichkeitsformel im Ortsraum dargestellt werden. Dazu wird die Ortsbasis  $|\vec{x}\rangle$  verwendet und der Zustand  $|\psi\rangle$  auf einen Ortszustand  $|\vec{x}\rangle$  gemäß

$$\langle \vec{x} | \psi(t) \rangle = \psi(\vec{x}, t) \quad (10)$$

projiziert. Die Wahrscheinlichkeitsdichte  $\rho$  ein Quantenobjekt an einem Ort  $\vec{x}$  zum Zeitpunkt  $t$  zu finden ist dann im Ortsraum gegeben als

$$\rho(\vec{x}, t) = |\psi(\vec{x}, t)|^2 = |\langle \vec{x} | \psi(t) \rangle|^2 \quad (11)$$

(Müller und Wilhelm, 2021; Hohenester und Irgang, 2023). Die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in einem bestimmten Bereich des Raums zu finden, ergibt sich durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichte über diesen Bereich. Zu beachten ist, dass dies keine Folge der mathematischen Beschreibung ist, sondern von Physikern als eine Deutung der Wellenfunktion formuliert wurde.

### **Mach-Zehnder-Interferometer**

Das Mach-Zehnder-Interferometer dient dem Untersuchen und Veranschaulichen von Interferenzphänomenen. Grundsätzlich ähnelt es dem Doppelspaltexperiment, wobei der Vorteil in einer größeren räumlichen Trennung der Arme als beim Doppelspalt liegt (Filik, 2008). Grundsätzlich besteht es aus zwei Strahlteilerwürfeln, zwei Spiegeln, sowie einer Quelle und Schirmen bzw. Detektoren.

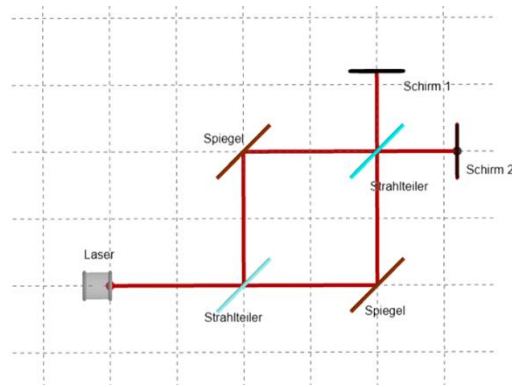


Abbildung 8: Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers

Der eintreffende Laserstrahl kann am ersten Strahlteiler entweder reflektiert oder transmittiert werden. Anschließend werden beide Teilstrahlen jeweils an einem Spiegel reflektiert und können am oberen Strahlteiler ebenfalls wieder reflektiert oder transmittiert werden. Man beobachtet das Licht im Allgemeinen auf beiden, dahinterliegenden Schirmen. Das Licht, welches an den Schirmen beobachtet werden kann, unterscheidet sich in einer wichtigen Eigenschaft: das Licht, welches zu Schirm 2 gelangt, wird immer einmal am Strahlteiler reflektiert (also phasenverschoben) und einmal transmittiert (ohne Phasenverschiebung), während das Licht, welches an Schirm 1 beobachtet werden kann, entweder zweimal reflektiert (Phasenverschiebung von  $\pi$ ) oder zweimal transmittiert wird (keine Phasenverschiebung). An Schirm 1 ist also eine destruktive Interferenz zu beobachten, an Schirm 2 eine konstruktive (Filk, 2008).

Analog gilt dies auch für die Durchführung des Experimentes mit Einzelphotonen: man beobachtet ausschließlich Klicks des Detektor 2 und keine an Detektor 1. Dies kann als Interferenz der Einzelphotonen gedeutet werden. In Dirac-Notation ergibt sich für das Photon bei dem 1. Strahlteiler (ST)

$$|\psi\rangle_{\text{Anfang}} = |1\rangle_1 |0\rangle_2 \rightarrow |\psi\rangle_{\text{Ende ST 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_3 |0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}} |0\rangle_3 |1\rangle_4) \quad (12)$$

Dies folgt analog zur Beschreibung am Strahlteiler mittels einer Superposition aus transmittiertem und reflektiertem Zustand.

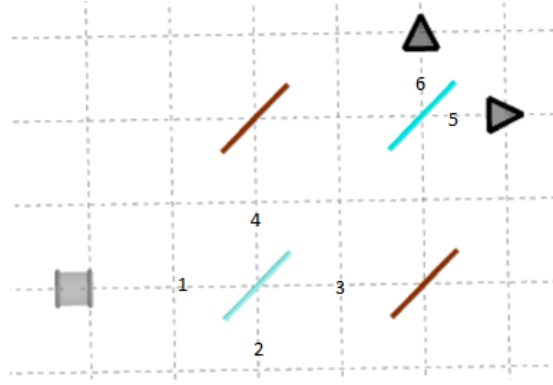


Abbildung 9: Darstellung Interferometer mit Zuständen. (eigene Darstellung)

Nach dem 2. Strahlteiler ergibt sich:

$$|\psi\rangle_{\text{Ende ST 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_3|0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}}|0\rangle_3|1\rangle_4) \quad (13)$$

$$\rightarrow |\psi\rangle_{\text{Ende ST 2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(e^{i\frac{\pi}{2}}|1\rangle_5|0\rangle_6 + |0\rangle_5|1\rangle_6)\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(e^{i\frac{\pi}{2}}|1\rangle_5|0\rangle_6 + e^{i\pi}|0\rangle_5|1\rangle_6)\right) \quad (14)$$

Dieser ergibt sich wiederum aus der Betrachtung der Superpositionen unter Einbeziehung der Phasenverschiebung bei Reflexion am Strahlteiler. Mittels Born'scher Wahrscheinlichkeitsformel ergibt sich für Detektor 2 (Hohenester und Irgang, 2023)

$$P(5) = |{}_5\langle 1||\psi\rangle_{\text{Ende ST 2}}|^2 = 1 \quad (15)$$

Dies folgt aus der Bildung des Skalarprodukts mit der komplexen Konjugierten. Analog ergibt sich für Detektor 1

$$P(6) = |{}_6\langle 1||\psi\rangle_{\text{Ende ST 2}}|^2 = 0 \quad (16)$$

Angenommen wurde hier, dass die Streckenlängen identisch sind; mit z.B. Glaskeilen kann hier zusätzlich der Experimentieraufbau erweitert werden und z.B. der auftretende Phasenunterschied wieder ausgeglichen werden.

### Delayed-Choice Experiment

In den Experimenten werden Phänomene beobachtet, die mit dem Wellenmodell erklärt werden können (z.B. die auftretenden Interferenzeffekte im Mach-Zehnder-Interferometer mit Einzelphotonen), andererseits Phänomene, die mit dem Teilchenmodell erklärt werden können (z.B. die auftretenden Effekte am Strahlteilerwürfel). Eine klassische Denkweise wäre, dass das Photon bei Eintritt in das Interferometer „entscheidet“, welche Effekte es im Experiment zeigt. Dazu wurde der Interferometer-Aufbau so modifiziert, dass der zweite Strahlteiler erst in dem Aufbau platziert wurde, wenn das Photon in den Aufbau emittiert wurde. Beim Eintritt ohne Strahlteiler müsste es sich nach der klassischen Denkweise also für Phänomene entscheiden, die



mit dem Teilchenmodell erklärt werden können. Dabei wurde der Aufbau durch spezielle Zellen, die die Polarisation ändern konnten, Prismen, die Photonen einer bestimmten Polarisation ablenken und Verzögerungsschleifen in den Armen des Interferometers realisiert (Küblbeck und Müller, 2002). Beim Vergleich des bekannten Interferometeraufbaus mit eingebautem 2. Strahlteiler und dem Aufbau, bei welchem erst der Strahlteiler hinzugefügt wird, konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Diese klassische Vorstellung ist also falsch (Küblbeck und Müller, 2002). Das Ergebnis ist aber vor dem theoretischen Hintergrund plausibel: Durch den aktiven Messprozess wird erst bei der Detektion festgelegt, welche Phänomene beobachtet werden können. Vor dem Messprozess ist der Zustand nicht vorherbestimmt.

### Mach-Zehnder-Interferometer mit Polarisationsfiltern/Quantenradierer

In die Arme des Mach-Zehnder-Interferometers können zwei Polarisationsfilter eingesetzt werden, wobei die eingestellten Polarisationen genau senkrecht zueinander eingestellt sind (z.B. 90° und 0°). Den Photonen wird die Polarisation des Filters aufgeprägt, das heißt, sie sind danach 90°- bzw. 0° polarisiert. Damit ist keine Interferenz mehr möglich. An diesem Beispiel lässt sich das Komplementaritätsprinzip der Quantenphysik verdeutlichen: Eine Weginformation (die unterschiedlichen Polarisationen) und Interferenzeffekte schließen sich gegenseitig aus (Küblbeck und Müller, 2002).

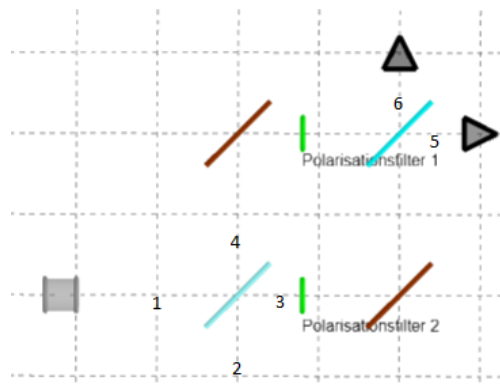


Abbildung 10: Interferometer mit Polarisationsfiltern 1 (0°) und 2 (90°). (eigene Darstellung)

Für das Interferometer mit Polarisationsfiltern 90° und 0° ergibt sich:

$$|\psi\rangle_{\text{Anfang}} = |1\rangle_1 |0\rangle_2 \rightarrow |\psi\rangle_{\text{Ende ST 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_3 |0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}} |0\rangle_3 |1\rangle_4) \quad (17)$$

$$|\psi\rangle_{\text{nach Filtern}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|V\rangle_3 |0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}} |0\rangle_3 |H\rangle_4) \quad (18)$$

$$|\psi\rangle_{\text{Ende ST 2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\frac{\pi}{2}} |V\rangle_5 |0\rangle_6 + |0\rangle_5 |V\rangle_6) + \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\frac{\pi}{2}} |H\rangle_5 |0\rangle_6 + e^{i\pi} |0\rangle_5 |H\rangle_6) \right) \right) \quad (19)$$

$$|\psi\rangle_{\text{Ende ST 2}} = \frac{1}{2}(e^{i\frac{\pi}{2}}|V\rangle_5|0\rangle_6 + |0\rangle_5|V\rangle_6) + \frac{1}{2}(e^{i\frac{\pi}{2}}|H\rangle_5|0\rangle_6 + e^{i\pi}|0\rangle_5|H\rangle_6) \quad (20)$$

Es folgt für die Wahrscheinlichkeiten an den Detektoren

$$P(5) = |{}_5\langle 1 || \psi \rangle_{\text{Ende ST 2}}|^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(-\frac{1}{2}\right)^2 = 0,5 \quad (21)$$

$$P(6) = |{}_6\langle 1 || \psi \rangle_{\text{Ende ST 2}}|^2 = 0,5 \quad (22)$$

Man erkennt hier den Wegfall der Interferenz und das gleichverteilte Klicken der beiden Detektoren. Erst mit der Überführung in die 45°-Basis lässt sich wieder Interferenz erzeugen, z.B. durch den Einsatz zweier weiterer Polarisationsfilter nach dem Strahlteilerwürfel. Dieses Experiment wird als *Quantenradierer* bezeichnet (Bronner, 2010). Dabei werden die zuvor aufgeprägten 90° bzw. 0° Polarisation umgeprägt auf 45° in beiden Armen, die Weginformation (durch die unterschiedliche Polarisation) wurde also „ausradiert“. Es folgt

$$|\psi\rangle_{\text{Anfang}} = |1\rangle_1|0\rangle_2 \rightarrow |\psi\rangle_{\text{Ende ST 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_3|0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}}|0\rangle_3|1\rangle_4) \quad (23)$$

$$|\psi\rangle_{\text{nach Filtern}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle_3|0\rangle_4 + e^{i\frac{\pi}{2}}|0\rangle_3|H\rangle_4) \quad (24)$$

$$|\psi\rangle_{\text{Ende ST 2}} = \frac{1}{2}(e^{i\frac{\pi}{2}}|V\rangle_5|0\rangle_6 + |0\rangle_5|V\rangle_6) + \frac{1}{2}(e^{i\frac{\pi}{2}}|H\rangle_5|0\rangle_6 + e^{i\pi}|0\rangle_5|H\rangle_6) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_{\text{n. Filter 3,4}} &= \frac{1}{2} \left( \left( \frac{e^{i\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{2}} (|D_+\rangle_5|0\rangle_6 - |D_-\rangle_5|0\rangle_6) + \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_5|D_+\rangle_6 - |0\rangle_5|D_-\rangle_6) \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{e^{i\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{2}} (|D_+\rangle_5|0\rangle_6 + |D_-\rangle_5|0\rangle_6) + \frac{e^{i\pi}}{\sqrt{2}} (|0\rangle_5|D_+\rangle_6 + |0\rangle_5|D_-\rangle_6) \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (26)$$

Es folgt für die Wahrscheinlichkeiten an den Detektoren

$$P(5) = |{}_5\langle 1 || \psi \rangle_{\text{n.Filter 3,4}}|^2 = 1 \quad (27)$$

$$P(6) = |{}_6\langle 1 || \psi \rangle_{\text{n.Filter 3,4}}|^2 = 0 \quad (28)$$

Hier ist wieder die Interferenz erkennbar.

### Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten

Auch das Doppelspaltexperiment ist im Prinzip ein Interferometeraufbau, bei dem aber beide klassische denkbaren Wege nicht räumlich voneinander getrennt sind. Die Physik ist aber zwischen beiden Experimenten übertragbar. Will man bei dem Doppelspaltexperiment Quantenphänomene beobachten, so muss man dies mit einzelnen Quantenobjekten, wie beispielsweise Photonen durchführen (Müller und Greinert, 2023). Sendet man einzelne Photonen durch ein

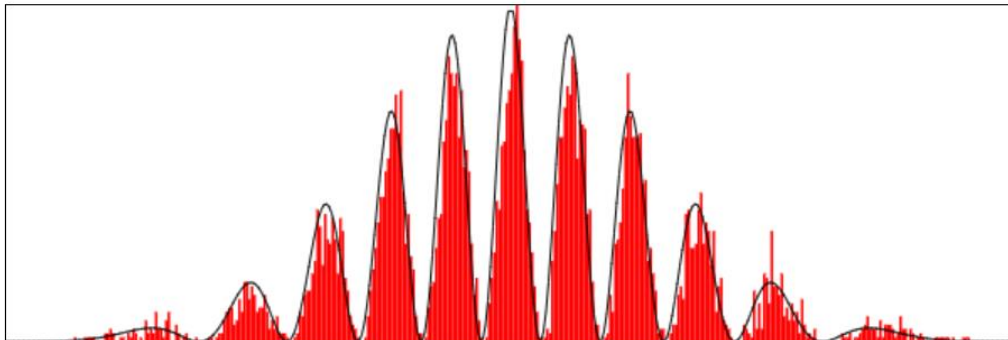
Doppelspaltexperiment, so benötigt man auch Detektoren, die einzelne Photonen detektieren können oder einen Schirm, bei dem die Energie eines einzelnen Photons zum Schwärzen eines Punktes ausreicht (Filk, 2019). Man wird im Experiment unregelmäßige Einschläge, als kleine Punkte auf einem Schirm detektieren können. Bei wenigen Einschlägen erscheinen die Punkte zufällig verteilt. Lässt man das Experiment länger laufen, so wird man nach einiger Zeit Bereiche auf dem Schirm feststellen können, an denen die Punktedichte höher ist, als an anderen Bereichen (Filk, 2019). Es gibt also Bereiche des Schirms, auf die Photonen häufiger treffen als auf andere Bereiche. Es bildet sich folglich auch mit einzelnen Photonen ein Interferenzmuster mit Interferenzminima und Interferenzmaxima aus. Das zu beobachtende Bild lässt sich nicht mit der Vorstellung des Photons als ein kleines Teilchen erklären. Wäre Licht ein Fluss vieler kleiner teilchenartiger Photonen, so müsste sich die Punktverteilung auf dem Schirm als die Summe der Bilder von jeweils einem abgedeckten Einzelspalt ergeben. Die Gesamtintensität  $I_g$  wäre damit folglich durch

$$I_g(x) = I_1(x) + I_2(x) \quad (29)$$

mit  $x$  als Ort auf dem Schirm, mathematisch beschrieben (Filk, 2019). Die zwei Ereignisse wären damit als statistisch unabhängig charakterisiert. Ein Teilchen kann also nur entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2 gelaufen sein (Filk, 2019). Dies ist nicht der Fall, das gesamte Interferenzbild entspricht nicht der Addition der Bilder von jeweils nur einem geöffneten Spalt. Es bildet sich auch bei einzelnen Quantenobjekten ein beispielsweise mit Licht vergleichbares Interferenzbild aus, nur dass dieses bei einzelnen Quantenobjekten durch die einzelnen Einschläge einen körnigen Charakter aufweist (Feynman et al., 2015). In Abbildung 11 ist das Ergebnis eines Doppelspaltexperiments mit Einzelphotonen dargestellt. Die Erkenntnisse über das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen lassen sich auf eine Durchführung mit anderen einzelnen Quantenobjekten, z.B. Elektronen, übertragen. Würde man im Experiment bestimmen wollen, durch welchen der beiden Spalte das Quantenobjekt gelaufen ist, muss eine Messeinrichtung am Doppelspalt angebracht werden. Bei Elektronen kann man dies beispielsweise mit einer Spule realisieren, in der ein durchlaufendes Elektron einen Stromimpuls induziert; bei Photonen macht man sich die Polarisierung zu Nutze (Filk, 2019). Eine Erkenntnis der Orts- oder Wegmessung ist dann, dass ein Quantenobjekt immer nur an einem der Spalte nachgewiesen wird. Damit ist ausgeschlossen, dass sich Quantenobjekte, ähnlich wie klassische Wellen, anteilig auf beide Spalte aufteilen. Ebenso zeigt das Experiment, dass sobald ein Messprozess, durch welchen Spalt ein Quantenobjekt gelaufen ist durchgeführt wird, keine

Interferenz mehr auf dem Schirm sichtbar ist. Die Einschläge auf dem Schirm bilden stattdessen eine flächige Verteilung (Filk, 2019).

### Histogramm



### Schirmbild

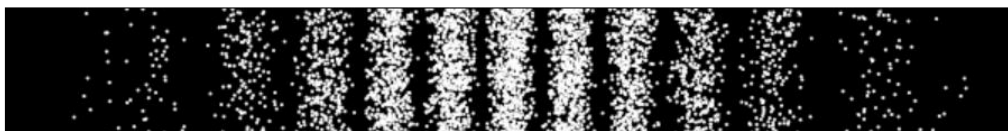


Abbildung 11: Screenshot aus der Simulation zum Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen. Erkennbar ist das körnige Schirmbild, darüber das Histogramm der Photonen auf dem Schirm mit darübergelegter rechnerischen Häufigkeitsverteilung (eigene Darstellung).

( $n = 5000$ ; Wellenlänge  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ; Spaltabstand  $a = 2000 \text{ nm}$ ; Spaltbreite  $b = 500 \text{ nm}$ )

## Wesenszüge der Quantenphysik (nach Küblbeck und Müller, 2002)

### 1. Statistischer Charakter

Die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion  $\psi(\vec{x}, t)$  ist durch die Schrödingergleichung, eine Differentialgleichung, determiniert. Die Wellenfunktion ist in diesem Fall von Ort und Zeit abhängig im Ortsraum dargestellt. Eine Lösung der Schrödingergleichung ist die quantenmechanische Wellenfunktion (Müller und Wilhelm, 2021). Nach der Born'schen Wahrscheinlichkeitsformel entspricht die Wahrscheinlichkeitsdichte, ein Quantenobjekt zur Zeit  $t$  am Ort  $\vec{x}$  zu detektieren, nach einem Messprozess bezüglich des Ortes, dem Betragsquadrat  $|\psi(\vec{x}, t)|^2$  der quantenmechanischen Wellenfunktion am Ort  $\vec{x}$  (Küblbeck und Müller, 2002). Es gilt also

$$\rho(\vec{x}, t) = |\psi(\vec{x}, t)|^2 \quad (30)$$

(Küblbeck und Müller, 2002). Ist die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion durch die Schrödingergleichung determiniert, so ist es folglich auch das Betragsquadrat. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung 30 ist somit anhand der Anfangsbedingungen zu jedem Zeitpunkt vorausberechenbar (Küblbeck und Müller, 2002). Mit der Wahrscheinlichkeitsdichte  $P(\vec{x}, t)$  selbst können über das Messergebnis allerdings nur Wahrscheinlichkeitsaussagen

getroffen werden. Die Quantenobjekte werden im Verlauf des Experiments an zufälligen Orten auf dem Schirm sichtbar. Nachdem viele Objekte durch den Doppelspalt gesendet wurden, bildet sich ein erkennbares Interferenzmuster aus, wie oben in Abbildung 11 dargestellt (Müller und Greinert, 2023). Folglich müssen zwei Fälle unterschieden werden: Aussagen über Einzelereignisse und Aussagen über Ensembles (vieler gleichartig präparierter Quantenobjekte). Nur im Falle eines ausreichend großen Ensembles an Quantenobjekten sind Vorhersagen über Wahrscheinlichkeiten möglich. Man kann reproduzierbar vorhersagen, wo viele Objekte auf dem Schirm detektiert werden und wo wenige (Müller und Greinert, 2023). Führt man den Versuch erneut unter gleichen Bedingungen durch, so ist die Häufigkeitsverteilung bis auf statistische Schwankungen wieder die Gleiche (Müller und Greinert, 2023). Da die Quantenphysik aber im Allgemeinen indeterministisch ist, sind über Einzelereignisse auch im Allgemeinen keine Aussagen möglich. In der klassischen Physik ergibt ein Experiment unter immer konstant gehaltenen Bedingungen auch immer wieder das gleiche Ergebnis. Dieser Determinismus ermöglicht beispielsweise, dass man beim Bogenschießen zielen kann (Müller und Greinert, 2023). Ein vergleichbares Zielen existiert in der Quantenphysik nicht. Auch ein Ensemble aus vielen gleich präparierten Quantenobjekten ist nicht so manipulierbar, dass ein einzelnes Objekt auf einen vorher festgelegten Punkt auf dem Schirm auftrifft (Müller und Greinert, 2023). Dies ist keine „unzureichende Kontrolle über Anfangsbedingungen“, sondern dem prinzipiellen indeterministischen Charakter der Quantenphysik geschuldet (Müller und Greinert, 2023; Küblbeck und Müller, 2002).

## 2. Fähigkeit zur Interferenz

Ein massebehaftetes Quantenobjekt, wie zum Beispiel ein einzelnes Elektron, lässt sich im Doppelspaltversuch mit der folgenden Wellenfunktion beschreiben

$$\psi(\vec{x}, t) = \psi_1(\vec{x}, t) + \psi_r(\vec{x}, t). \quad (31)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron am Ort  $\vec{x}$  einem Schirm auftrifft, wird nach der Born'schen Wahrscheinlichkeitsformel folgendermaßen berechnet

$$|\psi_1(\vec{x}, t) + \psi_r(\vec{x}, t)|^2 = |\psi_1(\vec{x}, t)|^2 + |\psi_r(\vec{x}, t)|^2 + 2 \cdot \text{Re}[\psi_1^*(\vec{x}, t) \cdot \psi_r(\vec{x}, t)] \quad (32)$$

(Küblbeck und Müller, 2002). Die ersten beiden Terme geben dabei die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Spalte an, der letzte Term ist der Interferenzterm (Küblbeck und Müller, 2002). Es muss komplex konjugiert berechnet werden, da es sich bei der Wellenfunktion  $\psi(\vec{x}, t)$  um eine komplexwertige Funktion handelt. Der Interferenzterm kann dabei, analog zu reellen

Funktionen, wie für Interferenz üblich positive und negative Werte annehmen (Küblbeck und Müller, 2002). Folglich ist es aus der Formel klar ersichtlich, dass keine Interferenz auftreten kann, wenn eine der Funktionen, entweder  $\psi_l(\vec{x}, t)$  oder  $\psi_r(\vec{x}, t)$  gleich 0 ist. Zusammenfassend kann also nur Interferenz stattfinden, wenn eine Wellenfunktion  $\psi_l(\vec{x}, t)$  oder  $\psi_r(\vec{x}, t)$  ungleich 0 ist, also mehrere klassisch denkbare, ununterscheidbare Möglichkeiten für das Elektron im Doppelspaltexperiment bestehen (Küblbeck und Müller, 2002; Müller und Greinert, 2023).

### 3. Eindeutige Messergebnisse

Quantenobjekten lassen sich im allgemeinen bestimmte Eigenschaften grundsätzlich nicht zuschreiben. Beispielsweise ist es nicht möglich, bei Elektronen im Doppelspaltexperiment über einen bestimmten Spalt zu sprechen, durch den sie gelaufen sind; es lässt sich ihnen auch kein Weg zuordnen, solange nicht gemessen wird (Müller und Greinert, 2023). Demgemäß wird die Eigenschaft Ort erst in dem zugehörigen Messprozess erzeugt. Das Messergebnis gibt den Ort an (Müller und Greinert, 2023). In der Quantenphysik erhält man nach einem Messprozess immer ein eindeutiges Messergebnis, auch wenn sich das Objekt, an dem gemessen wird, vorher in einer Superposition bezüglich der gemessenen Eigenschaft befunden hat (Müller und Greinert, 2023). Beispielsweise befindet sich ein Elektron ohne Messprozess im Doppelspaltexperiment bezüglich des Wegs in einer Superposition aus den Basiszuständen  $|\text{rechter Spalt}\rangle$  und  $|\text{linker Spalt}\rangle$ . Misst man bezüglich des Orts, so wird man als Messergebnis einen der beiden Basiszustände erhalten, also einen der beiden in der Superposition überlagerten Zustände und damit entweder das Messergebnis *rechter Spalt* oder das Messergebnis *linker Spalt* (Küblbeck und Müller, 2002). Dabei ändert sich die Gesamtwellenfunktion. Da die Wahrscheinlichkeit für die nicht realisierte Möglichkeit nach dem Messprozess gleich 0 sein muss, besteht diese nach dem Messprozess nur noch aus der Wellenfunktion für die Möglichkeit gleich dem Messergebnis (Küblbeck und Müller, 2002). Dieser Vorgang wird *Zustandsreduktion* oder *Auflösung der Superposition* (oder auch Kollaps der Wellenfunktion, dazu in Kapitel 2.3 mehr) genannt. Welches Messergebnis durch einem Messprozess herauskommt, ist wie unter *Statistischer Charakter* beschrieben indeterministisch, also echt zufällig. Die Ortsmessung verändert die Wellenfunktion so, dass keine Interferenz mehr auf dem Schirm beobachtbar ist (Küblbeck und Müller, 2002). Misst man nun nochmals an dem Objekt, beispielsweise den Spalt durch den das Quantenobjekt gelaufen sein soll, so wird man das gleiche Messergebnis wie bei dem ersten Messprozess erhalten, da die Wellenfunktion zu diesem Zeitpunkt bereits auf einen der beiden möglichen Messergebnisse reduziert ist (Küblbeck und Müller, 2002). Voraussetzung dafür ist, dass der

zweite Messprozess sofort nach dem ersten Erfolg, sodass zwischen den Messungen keine Zeitentwicklung erfolgen kann.

#### **4. Komplementarität**

Unter dem *Komplementaritätsprinzip* versteht man in der Quantenphysik, dass sich zwei Beschreibungsweisen gegenseitig ausschließen, aber dennoch beide zur Beschreibung des Phänomens nötig sind. Hier ist in erster Linie die Komplementarität von *Weginformation* und *Interferenz* von Relevanz. Bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments mit Quantenobjekten fällt auf, dass keine Interferenz mehr zu beobachten ist, wenn man den Quantenobjekten einen Spalt zuordnen kann, durch den sie gelaufen sind, man also die Weginformation besitzt (Müller und Greinert, 2023). Zusätzlich aber findet auch schon keine Interferenz mehr statt, wenn durch Hinterlassen einer Spur auch nur die Möglichkeit besteht, die Weginformation zu messen, der Messprozess aber gar nicht unbedingt durchgeführt wurde (Müller und Greinert, 2023; Küblbeck und Müller, 2002). So eine Spur kann bei Einzelphotonen zum Beispiel die unterschiedliche Polarisierung hinter den Spalten sein. Praktisch würde man dafür beispielsweise Photonen hinter dem einem Spalt horizontal und hinter dem anderen Spalt vertikal polarisieren. Folglich würde man die Möglichkeit erhalten, mit einem Messprozess bezüglich der Polarisierung festzustellen, durch welchen Spalt das Photon gelaufen ist. Eine Interferenz wäre dann nicht mehr zu beobachten, auch schon ohne Messprozess des Polarisationszustands. Nimmt man für das Experiment aber beispielsweise Elektronen, muss man für Komplementarität mit Kohärenz argumentieren. Eine Wechselwirkung des Elektrons mit einer Messeinrichtung zerstört die Kohärenz zwischen den Teilwellenfunktionen beider Spalte, eine notwendige Bedingung für Interferenz, woraufhin das Quantenobjekt die Fähigkeit zur Interferenz verliert (Filk, 2019). Dabei muss kein direkter Energie- oder Impulsübertrag stattfinden, alleine die Existenz der Möglichkeit ‚die Weginformation zu bestimmen‘ sorgt für ausreichende Dekohärenz, die Interferenz unmöglich macht (Filk, 2019).

#### **Verschränkung**

Verschränkung ist ein Phänomen, das in Systemen mehrerer Quantenobjekte auftreten kann. Das System nimmt dann als Ganzes einen Zustand ein, ohne, dass man den einzelnen Objekten noch eigene Zustände zuordnen kann.

Das einfachste System mehrerer Quantenobjekte ist ein Zweizustandssystem. Ein Zweizustandssystem ist ein quantenphysikalisches System, das sich nur in einem von zwei möglichen Basiszuständen oder in einer Superposition der beiden Basiszustände befinden kann

(Dür und Heusler, 2014). Verschränkung bietet sich an, darstellungsunabhängig in Dirac-Notation zu demonstrieren.

Man betrachte zwei voneinander unabhängige Zweizustandssysteme der Quantenphysik (Qubits) mit den Basiszuständen 0 und 1. Diese können beschrieben werden durch

$$|\psi_A\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (33)$$

$$|\psi_B\rangle = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle \quad (34)$$

(Dür und Heusler, 2014). Verknüpft man beide Qubits als Produktzustand miteinander, so wird der Zustand der beiden unabhängigen Qubits beschrieben durch

$$|\Phi\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle \quad (35)$$

(Dür und Heusler, 2014). Nimmt man Operationen oder einen Messprozess an einem der einzelnen Qubits vor, so sind diese unabhängig vom Zustand des zweiten Qubits. Dessen Zustand bleibt unverändert bei Änderung des Zustands am ersten Qubit (Dür und Heusler, 2014). Man nennt den Gesamtzustand dann separierbar, denn er lässt sich durch die Verknüpfung als Produktzustand in Einzelzustände faktorisieren (Müller und Greinert, 2023). Verschränkt sind Quantenobjekte dahingegen, wenn sich deren Gesamtzustand nicht in ein Produkt aus Einzelzuständen zerlegen lässt (Müller und Greinert, 2023). Ein Beispiel dafür ist der folgende normierte Zustand

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle). \quad (36)$$

Sind zwei Quantenobjekte miteinander verschränkt, dann sind die Objekte bzw. deren Verhalten nicht mehr getrennt voneinander beschreibbar, sie verhalten sich zusammen wie ein einzelnes Objekt und besitzen zur Beschreibung des Zustands auch nur eine gemeinsame Wellenfunktion. In dem beschriebenen Fall in Formel 36 können sich nach einem Messprozess nur entweder beide Qubits im Zustand  $|0\rangle$ , oder beide im Zustand  $|1\rangle$  befinden. Ein Messprozess an einem der verschränkten Quantenobjekte löst die Superposition für das gemeinsame Gesamtsystem auf. Dies geschieht auch über beliebige Distanzen durch die globale Zustandsreduktion für den gemeinsamen Zustand beider Objekte (Dür und Heusler, 2014; Hohenester und Irgang, 2023). Nachgewiesen werden Verschränkungen anhand von Korrelationen. Erzeugt man mehrere verschränkte Photonenpaare und gibt diese an zwei räumlich voneinander getrennte Beobachter und lässt diese Messprozesse an den Photonen vornehmen und deren Ergebnisse vergleichen, so werden sie im Falle von Verschränkung stärkere Korrelationen bemerken, als man klassisch erwarten würde (Müller und Greinert, 2023).



## Das quantenphysikalische Weltbild

### 1. Realität

Miller (2024) definiert in der Stanford Encyclopedia of Philosophy den Begriff Realität klassischerweise durch das Vorhandensein zweier Eigenschaften, *Existenz und Objektivität*. Dies bedeutet, dass Gegenstände und Objekte um real zu sein, existieren müssen und zwar objektiv, also unabhängig von subjektiven Einflüssen (Miller, 2024). Beispielsweise ist der Mond real, da dieser existiert (man kann ihn beobachten, umkreisen und auf ihm landen) und dies unabhängig davon, was Menschen über ihn denken oder überhaupt von seiner Existenz wissen (Miller, 2024). Eine eigene klassische Arbeitsdefinition für Realität kann also folgendermaßen formuliert werden:

*Objekte und ihre Eigenschaften zusammen mit Werten existieren unabhängig von Beobachtungen, Messungen, individuellen Überzeugungen, etc.*

Betrachtet man die Quantenphysik, so wird schon aus den vorangegangenen Kapiteln (z. B. Statistischer Charakter, Eindeutige Messergebnisse) klar, dass die klassische Definition von Realität nur eine eingeschränkte Gültigkeit behält. Dies führt zu der historischen Debatte, ob die Quantenphysik vollständig ist, also für jedes Objekt der Realität auch ein Objekt in der Theorie existiert und Interpretationen der Quantenphysik, die auf verborgenen Variablen basieren (Küblbeck und Müller, 2002).

### 2. Lokalität

Die klassische Physik wird als lokale Theorie angesehen, was bedeutet, dass keine Fernwirkungen existieren (Küblbeck und Müller, 2002). Es existieren in der klassischen Physik also nur Nahwirkungen; Änderungen an einer Stelle können in kurzer Zeit auch nur Wirkung in der unmittelbaren Umgebung zeigen. Bekannt ist schon von Einstein, dass sich eine Wirkung nur mit maximal Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann (Küblbeck und Müller, 2002). Ein Beispiel dafür ist, dass das Bewegen eines Körpers kein instantaner Vorgang ist, da sich die Kraft erst über elektromagnetische Felder zwischen den einzelnen Atomen ausbreiten muss (Küblbeck und Müller, 2002). Nichtlokal ist eine Theorie hingegen, wenn in ihr Fälle existieren, bei denen eine Ursache eine Wirkung instantan an einem weit entfernten Objekt hervorrufen kann (Küblbeck und Müller, 2002).

## Die Bell'sche Ungleichung

Ein Kriterium zur Unterscheidung nicht-lokal-realistischer von lokal-realistischen Theorien gibt die Bell'sche Ungleichung (Müller und Greinert, 2023). Bell hatte den Anspruch, eine lokal-realistische Alternativtheorie zur Quantenphysik mit verborgenen Variablen zu formulieren (Müller und Greinert, 2023). Für die Gleichung wird also zum einen Realismus angenommen, also, dass alle Observablen schon vor einem Messprozess feste Werte besitzen, zum anderen wird Lokalität angenommen, also, dass Messergebnisse zweier raumartig gelegener Teilsysteme nicht voneinander abhängen (Müller und Greinert, 2023; Dürr und Lazarovici, 2018). Zur Herleitung der Bell'schen Ungleichung in einem Spezialfall wird angenommen, dass zwei Quantenobjekte 1 und 2 gemeinsam präpariert und jeweils eins zu räumlich getrennten Beobachtern Alice und Bob, mit Messgeräten A und B, geschickt werden, sodass die Objekte nicht mehr miteinander wechselwirken können. Durch einen Messprozess an den Quantenobjekten kann bei Alice Objekt 1 eine der beiden Observablen  $\alpha$  oder  $\beta$  gemessen werden, bei Bob an Objekt 2 entweder die Observablen  $\gamma$  oder  $\delta$  (Müller und Greinert, 2023). Welche Observable gemessen wird, kann der Beobachter für jedes Objekt frei entscheiden und die möglichen Messergebnisse sind  $\pm 1$  (Müller und Greinert, 2023). Dieses Paar an Quantenobjekten wird durch ein, das ist eine Annahme bei der Bell'schen Ungleichung, Set an verborgenen Parametern beschrieben, welche die Messergebnisse determinieren (Küblbeck und Müller, 2002; Müller und Greinert, 2023). Die Observablen  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  sind als Annahme bei der Bell'schen Ungleichung auch ohne Messprozess mit festen Werten  $A_\alpha, A_\beta, B_\gamma, B_\delta$  (Müller und Greinert, 2023). Es lässt sich daraus der folgende Ausdruck formulieren

$$A_\alpha \cdot (B_\gamma + B_\delta) + A_\beta \cdot (B_\gamma - B_\delta), \quad (37)$$

dessen Sinn sich in der weiteren Betrachtung ergibt (Müller und Greinert, 2023). Da die Observablen nur die möglichen Messergebnisse  $\pm 1$  besitzen kann nach einem Messprozess nur entweder:  $(B_\gamma + B_\delta) = 0$  gelten, also  $(B_\gamma - B_\delta) = \pm 2$  oder  $(B_\gamma - B_\delta) = 0$ , also  $(B_\gamma + B_\delta) = \pm 2$ ; in jedem Fall ist also der Ausdruck 37 gleich  $\pm 2$ , bzw. sein Betrag  $\leq 2$  (Müller und Greinert, 2023). Multipliziert man den Ausdruck 37 aus und bildet den Erwartungswert von vielen Messprozessen, ergibt sich eine spezielle Form der Bell'schen Ungleichung, die auf Clauser, Horne, Shimony und Holt zurückgeht, die Bell-CHSH-Ungleichung:

$$|\langle A_\alpha B_\gamma \rangle + \langle A_\alpha B_\delta \rangle + \langle A_\beta B_\gamma \rangle - \langle A_\beta B_\delta \rangle| \leq 2 \quad (38)$$

mit den Zufallsvariablen  $A_\alpha, A_\beta, B_\gamma, B_\delta$  die die Werte  $\pm 1$  annehmen können und eine durch verborgene Parameter bestimmte gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung besitzen (Müller und Greinert, 2023; Näger und Stöckler, 2018). Diese Gleichung wurde in realen Experimenten überprüft, wobei man herausfand, dass es möglich ist, Zustände so zu präparieren, dass die Bell-CHSH-Ungleichung 38 nicht gültig und somit widerlegt ist (siehe Nobelpreis für Physik von 2022: Loophole-free experiments). Folglich muss mindestens eine der Annahmen, die der Formulierung der Bell'schen Ungleichung zu Grunde liegen, falsch sein. Entweder die Lokalität der Quantenphysik ist verletzt, die Annahme der klassisch realistischen Beschreibung der Quantenphysik oder beides (Müller und Greinert, 2023; Dürr und Lazarovici, 2018). Die Quantenphysik ist also nicht gleichzeitig lokal und realistisch.

### 3. Kausalität

Kausalität ist klassisch über den Begriff des Determinismus zu definieren. Dieser Begriff ist von Hoefer (2024) im Stanford Encyclopedia of Philosophy dadurch definiert, dass jedes Ereignis durch vorhergegangene Ereignisse und Naturgesetze bedingt ist. Zukünftige Ereignisse können also anhand von Startbedingungen und den gültigen Naturgesetzen theoretisch berechnet werden. Es gibt folglich eine klare Ursache-Wirkungsbeziehung. Wie bereits im Kapitel Wesenszüge der Quantenphysik unter dem Statistischen Charakter beschrieben, ist die Quantenphysik im Allgemeinen indeterministisch. Man unterscheidet zwischen Einzelereignissen, die in der Quantenphysik selbst bei gleicher Präparation im Allgemeinen nicht vorhersagbar, also indeterministisch sind, und Ensembleereignissen also Experimente mit vielen gleich präparierten Quantenobjekten, in denen sich bei Wiederholung des Experiments immer wieder eine determinierte Häufigkeitsverteilung für die möglichen Ausgänge des Experiments ergibt (Müller und Greinert, 2023; Küblbeck und Müller, 2002). Das Prinzip von Kausalität, das sich in der Definition auf den Determinismus zurückführen lässt, ist also in der Quantenphysik nur eingeschränkt gültig.

Im Unterrichtskonzept werden die Aspekte des quantenphysikalischen Weltbilds rein qualitativ in Bezug auf die Wesenszüge der Quantenphysik abgeleitet, indem in den Wesenszügen Brüche mit den klassischen Definitionen der Begriffe gesucht werden. So ist es im Sinne der didaktischen Reduktion ausreichend, aus dem Wesen des quantenphysikalischen Messprozesses und der Existenz von Superpositionen die Realität in der Quantenphysik als ungültig zu bezeichnen. Ebenso reicht es, die Nichtlokalität der Quantenphysik am Phänomen der Verschränkung zu behandeln. Das genaue Ergebnis der Experimente zur Bell-CHSH-Gleichung, dass die Quantenphysik nicht

gleichzeitig real und lokal ist, wird hier im Sinne der didaktischen Reduktion vereinfacht zu dem Fakt, dass beides in der Quantenphysik ungültig ist. Ihnen als Lehrkraft steht es aber natürlich frei, an dieser Stelle weiter in Detail zu gehen.

## 2.2 Fachdidaktische Begründung für das Konzept

Das vorliegende Unterrichtsmaterial wurde auf Grundlage des Erlanger und Münchner Unterrichtskonzepts erstellt (Bitzenbauer, 2020; Küblbeck und Müller, 2002).

### Fachsprache und Unterrichtssprache

Beim Unterricht über Quantenphysik ist man häufig gezwungen, einen Kompromiss zwischen fachlicher Korrektheit und didaktischer Reduktion einzugehen.

- **Auflösen der Superposition**

Zu Beginn des Unterrichts wird nach einem Messprozess an einem sich in Superposition befindenden Quantenobjekt vom „Auflösen der Superposition“ gesprochen. Handelt es sich bei der Lerngruppe um einen Leistungskurs, so kann dieser Begriff in Unterrichtssprache später bei der Thematisierung der quantenphysikalischen Wellen-, bzw. Zustandsfunktion durch den Fachbegriff „Kollaps der Wellenfunktion“ ersetzt werden. Dieser kann mathematisch beschrieben werden als die Zustandsreduktion eines Superpositionszustands  $|\psi\rangle$  aller möglichen Eigenzustände  $|\phi_i\rangle$  mit den zugehörigen Amplituden  $c_i$

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n c_i |\phi_i\rangle \quad (39)$$

auf einen der Eigenzustände  $|\phi_i\rangle$ . Das Messergebnis ist dann der zum Eigenzustand gehörende Eigenwert.

### Entwicklungsgrundsätze

- **Sprachsensibilität**

Eine hohe sprachliche Sensibilität und bewusster Umgang mit Unterrichtssprache stellt einen wichtigen Aspekt dar, um die komplexen Aspekte der Quantenphysik zu beschreiben (z.B. Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Rode und Barth, 2017). So sollten Grundbegriffe definiert werden und spezielle Begriffe, wie *Quantenobjekte* oder *Messprozess* eingeführt werden, um klassische Physik und Quantenphysik klar gegeneinander abzugrenzen. Der Grund dafür liegt in der Herausforderung, eine abstrakte, den Schülerinnen und Schülern

gänzlich neue Theorie mit Wörtern der klassischen Physik zu beschreiben, die potentiell schon klassische Assoziationen aus dem Alltag besitzen. Sprechweisen, die den Welle-Teilchen-Dualismus in Verbindung mit klassischen Konzepten bringen, sind nicht geeignet zur Vermittlung im Unterricht, da „Widersprüche zur klassischen Physik verdeckt bleiben und die Spezifika quantenphysikalischer Erklärungen nicht eindeutig dargelegt werden“ (Waitzmann, 2023). Die Verwendung einer klaren und konsistenten Sprechweise sollte den quantenphysikalischen Charakter betonen und fehlerbehaftete Analogiebildungen vermeiden. Ebenso soll die Bedeutung des Messprozesses für das Ergebnis der Messung hervorgehoben werden.

Nichtsdestotrotz ist wichtig zu betonen, dass nicht alle Begriffe durchweg sauber benutzt werden können, und dass klassische Begriffe teilweise für das Beschreiben der Quantenobjekte benutzt werden, wenn es keine adäquate Möglichkeit des Ausdrucks gibt. Dies vereinfacht das Sprechen über Quantenphysik, solange man sich bewusst ist, dass dies immer nur ein Hilfsmittel ist und nicht der Realität entspricht, gemäß dem Zitat von Werner Heisenberg:

„Die Quantentheorie ist so ein wunderbares Beispiel dafür, dass man einen Sachverhalt in völliger Klarheit verstanden haben kann und gleichzeitig doch weiß, dass man nur in Bildern und Gleichnissen von ihm reden kann.“

(Werner Heisenberg, zitiert nach Filk, 2019).

- **Einführung des Photons mittels Koinzidenzmethode**

Bisherige Unterrichtszugänge zur Quantenphysik bauen vor allem auf historischen Experimenten auf. Beispielhaft hierfür sind vor allem der Photoeffekt (1888) und der Compton-Effekt (1922). Beide Effekte führen gemäß eines historischen Zugangs in die Welt der Quantenphysik ein (Hentschel, 2017). Klassische Physik und Quantenphysik unterscheiden sich fundamental. Besonders die Andersartigkeit der Quantenphysik gilt es zu betonen, wie zum Beispiel Verschränkung oder die Existenz eines echten Zufalls. Daher werden Experimente benötigt, die zwangsläufig auf die Charakteristika der Quantenphysik hinführen und keine alternativen Erklärungen bieten, mit denen die Quantenphysik als Fortführung der bekannten klassischen Physik verstanden wird (Waitzmann, 2023). Allerdings lassen sich sowohl der Photoeffekt als auch der Compton-Effekt semi-klassisch erklären, sodass hier die Grundprinzipien der Quantenphysik „hineininterpretiert werden“ (Waitzmann, 2023) müssten. Ausgangspunkt dieser Sichtweise ist, dass die Schwingungen der Materie als quantisiert betrachtet werden und die eintreffende Strahlung mithilfe der Maxwell'schen Gleichungen charakterisiert werden könne (Hentschel, 2017). Die

Einführung des Photons mittels der Koinzidenzmetode bietet den Vorteil, dass genau diese semi-klassischen Erklärungen umgangen werden und eine fachlich richtige Charakterisierung der Photonen erfolgen kann.

- **Exemplarisches Lernen der Wesenszüge der Quantenphysik anhand des Doppelspaltexperiments**

Das Doppelspaltexperiment bietet die Möglichkeit, alle nach dem Lehrplan zentralen Wesenszüge der Quantenphysik zu erarbeiten. Mit diesen wird rein qualitativ gearbeitet, sodass das benötigte mathematische Vorwissen dadurch reduziert wird. Die Wesenszüge der Quantenphysik nach Küblbeck und Müller (2002) sind allerdings gut anknüpfungsfähig, sodass man einen guten Übergang in eine mathematische Betrachtung auf universitärem Niveau finden kann. Die wiederkehrende Arbeit mit dem gleichen exemplarischen Experiment strukturiert den Unterricht darüber hinaus und stellt ein besseres und tiefergehendes Verständnis sicher, da sich nicht immer an eine neue experimentelle Situation gewöhnt werden muss (Kircher, 2010).

- **Reflektierter Umgang mit physikalischen Modellen**

Um ein korrektes Bild der Quantenphysik zu vermitteln, ist es wichtig, die Quantenphysik nicht einfach als Ergänzung zur klassischen Physik zu betrachten (Bitzenbauer, 2020). Sprechweisen, die diesen Unterschied nicht klar hervorheben, können fehlerhafte, mechanistische Schülervorstellungen begünstigen. Deshalb ist besonders der Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus einzuordnen, zu reflektieren und zu betonen, dass lediglich Phänomene der Quantenobjekte mit dem Wellen- oder Teilchenmodell beschrieben werden.

- **Selbstständige Erarbeitung einzelner Inhalte mit Simulationen**

Simulationen werden analog einem Schülerexperiment eingesetzt, um den Unterricht aktiver und selbstregulierter zu machen. Ebenso ermöglicht dies Wege zur Binnendifferenzierung. Schülerinnen und Schüler können in der Simulation selbstgesteuert Parameter variieren und deren Auswirkungen beobachten. Die Nutzung von Experimenten, bzw. deren Simulationen gilt außerdem als motivationssteigernd, kann tragem Wissen entgegenwirken und fördert das naturwissenschaftliche Arbeiten (Girwidz, 2010). Darüber hinaus fördert das selbstständige Arbeiten an Simulationen wichtige Kompetenzen der Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz.

## Weitere Entscheidungen

- **Interpretationen der Quantenphysik**

Im Unterricht werden die unterschiedlichen Interpretationen der Quantenphysik nicht explizit thematisiert und beim Namen genannt, da insbesondere Interpretationen wie die Viele-Welten-Theorie einen Anschein von einer gewissen Mystik der Quantenphysik erwecken. Nur die Kopenhagener Deutung der Quantenphysik mit der Interpretation des Betragsquadrats der Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsdichte nach Max Born wird im Leistungskurs thematisiert, aber nicht explizit beim Namen genannt. Ebenso wird die Kopenhagener Deutung im Zusammenspiel mit der Ensemble-Interpretation beim Wesenszug *Statistischer Charakter* implizit thematisiert, aber nicht näher charakterisiert. Einzelne Ereignisse sind nach der Kopenhagener Deutung der Quantenphysik nicht vorbestimmt, sondern es lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten für das Messergebnis nach dem Kollaps der Wellenfunktion angeben. Bei einem Ensemble aus gleichartigen Quantenobjekten lassen sich aber statistische Voraussagen treffen.

- **Wesenszüge der Quantenphysik**

Im Unterricht wird Quantenphysik anhand der Wesenszüge der Quantenphysik nach Küblbeck und Müller (2002) charakterisiert, da diese auch die Basis für die Überarbeitung der Bildungsstandards bilden und damit sinngemäß in den sächsischen Lehrplan übernommen wurden (Kultusministerkonferenz, 2020; Sächsisches Staatsministerium für Kultus, 2022). Ebenso sind die Wesenszüge gut etabliert und der darauf aufbauende milq-Lehrgang evaluiert.

## 2.3 Hintergründe der Simulation zum Doppelspaltexperiment

Teil der Unterrichtsmaterialien ist ebenfalls eine Simulation zum Doppelspaltexperiment, die anstelle eines realen Schülerexperiment eingesetzt werden kann und im Zusammenspiel mit den zugehörigen Arbeitsblättern ermöglicht, dass Schülerinnen und Schüler daran selbstständig zwei der vier Wesenszüge der Quantenphysik erarbeiten können.

Das Programm simuliert ein Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen. Als Parameter können die Wellenlänge der Einzelphotonen, der Spaltabstand und die Spaltbreite des Doppelspalts in einem sinnvollen Rahmen variiert werden. Ebenso kann der Versuchsaufbau verändert werden, indem jeweils ein Spalt des Doppelspalts verschlossen werden kann. Die Skizze des Versuchsaufbaus passt sich entsprechend der Wahl, ob und welcher Spalt verschlossen wird, an.

Es können *1 Photon*, *10 Photonen* oder *1000 Photonen* nacheinander durch einen entsprechenden Klick durch den Versuchsaufbau gesendet werden. Jeder weiße Punkt auf dem Schirmbild

entspricht einem aufgetroffenen Photon. Über dem Schirmbild ist ein Histogramm der aufgetroffenen Photonen in Abhängigkeit des Ortes auf dem Schirm dargestellt. Ein Klick auf *Reset* setzt sowohl die Simulationsparameter auf die Standardeinstellungen zurück, also auch das Schirmbild. Aktiviert man den *theoretischen Intensitätsverlauf*, so wird im Histogramm eine rechnerische Wahrscheinlichkeitsverteilung, bzw. eine zu erwartende Häufigkeitsverteilung eingeblendet.

Die Simulation basiert auf den aus der Wellenoptik bekannten Formeln für Interferenzmuster. Man betrachtet dazu eine ebene Welle der Wellenlänge  $\lambda$ , die auf einen Doppelspalt der Spaltbreite  $b$ , mit Spaltabstand  $a$  trifft. Durch den Gangunterschied, der sich durch die unterschiedlichen Abstände von den Spaltöffnungen und Punkten auf dem Schirm ergibt, ergibt sich Interferenz, Kohärenz der Wellen vorausgesetzt. Für Parallelstrahl- und Kleinwinkelnäherung wird angenommen, dass der Schirm weit weg von dem Doppelspalt steht. An den Orten, an denen der Gangunterschied zu den Spaltmitten ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt, findet man ein Minimum der Intensität vor. An den Orten mit Gangunterschied als ganzzahliges Vielfaches von der Wellenlänge bildet sich auf dem Schirm ein Interferenzmaximum aus. Da aber bereits jeder der Einzelspalte ein Beugungsmuster ausbildet, ist die gesamte Intensitätsverteilung des Doppelspalts das Produkt aus zwei Intensitäten, also der Beugung am Einzelspalt der Breite  $b$  und die von zwei punktförmigen Quellen im Abstand  $a$  und gegeben durch

$$I(a) = I_0 \left( \frac{\sin(\gamma)}{\gamma} \right)^2 \cos^2 \delta \quad (40)$$

mit  $\gamma = \frac{k}{2} b \sin \alpha$  als Phasenunterschied der Wellen vom oberen und unteren Rand je eines Spalts und  $\delta = \frac{k}{2} a \sin \alpha$  als der Phasenunterschied zwischen den Teilwellen aus beiden Spalten.

$\alpha$  entspricht dem Beobachtungswinkel und  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  der Wellenzahl.

Die berechneten Intensitäten im Interferenzmuster werden in der Simulation in Wahrscheinlichkeiten für das Auftreffen von einzelnen Photonen umgerechnet.

Die Simulation zum Doppelspaltexperiment bietet bewusst einen höheren Funktionsumfang, als zum Unterricht mit dem hier beschriebenen Konzept benötigt. So kann die Simulation auch sinnvoll über die vorgeschlagenen Inhalte dieses Unterrichtskonzepts hinaus eingesetzt werden.



### Vertiefende fachliche und didaktische Literatur

- Erlanger Unterrichtskonzept: Bitzenbauer, P. (2020). Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik (Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 303). Logos.
- Münchner Unterrichtskonzept (milq): Küblbeck, J., & Müller, R. (2007). Die Wesenszüge der Quantenphysik Modelle, Bilder und Experimente (3., unveränderte Auflage). Aulis.
- Fachliche Vertiefung: Müller, R., & Greinert, F. (2023). Quantentechnologien: für Ingenieure. De Gruyter Oldenbourg.

## Literaturverzeichnis

- Albert, C., & Pospiech, G. (2023). Quantenphysik in Klasse 9 — Ergebnisse einer Akzeptanzbefragung für ein Spin-First Unterrichtskonzept. PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG Frühjahrstagung, 2023.
- Bitzenbauer, P. (2020). Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik (Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 303). Logos.
- Bronner, P. (2016). Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons (Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 103). Logos.
- Cova, S., Ghioni, M., Lacaita, A., Samori, C., Zappa, F. (1996). Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. APPLIED OPTICS. Vol. 35 No. 12. <https://doi.org/10.1364/AO.35.001956>
- Dür, W., & Heusler, S. (2012). Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1 (11), 01–16.
- Dür, W., & Heusler, S. (2014). Was man von zwei Qubits über Quantenphysik lernen kann: Verschränkung und Quantenkorrelationen. PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1 (13), 11–34.
- Dürr, D., & Lazarovici, D. (2018). Verständliche Quantenmechanik: Drei mögliche Weltbilder der Quantenphysik. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55888-1>
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2015). Feynman Vorlesungen über Physik Band 5 Quantenmechanik. De Gruyter (O). <https://doi.org/doi:10.1515/9783110367744>
- Filk, T. (2008). Grundlagen und Probleme der Quantenmechanik. Vorlesungsskript. [URL]: [https://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public\\_html/Skripte/Texte/Quanten](https://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public_html/Skripte/Texte/Quanten) (letzter Abruf 01.08.2024)
- Filk, T. (2019). Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59736-1>
- Girwidz, R. (2010). Medien im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & P. Häußler (Hrsg.), Physikdidaktik: Theorie und Praxis. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01602-8>
- Hentschel, K. (2017). Lichtquanten. Die Geschichte des komplexen Konzepts und mentalen Modells von Photonen. Springer. Berlin Heidelberg
- Hoefer, C. (2024). Causal Determinism. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Hrsg.), The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2024 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/sum2024/entries/determinism-causal/>
- Homeister, M. (2013). Quantum Computing verstehen: Grundlagen - Anwendungen - Perspektiven (3. Aufl. 2013). Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint Springer Vieweg.
- Hohenester, U., & Irgang, K. (2023). Einführung in die Quantenmechanik: Für Studierende des Lehramts Physik. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65980-9>
- Küblbeck, J., & Müller, R. (2002). Die Wesenszüge der Quantenphysik Modelle, Bilder und Experimente (2., überarbeitete Auflage). Aulis.
- Kultusministerkonferenz (Hrsg.). (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife.
- Kircher, E. (2010). Methoden im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & P. Häußler (Hrsg.), Physikdidaktik: Theorie und Praxis. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01602-8>
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & Van Joolingen, W. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education [Publisher: APS]. Physical review physics education research, 13 (1), 010109.
- Martin, R. (2017). Optoelektronik. In Hering, E., Besser, K. & Gutekunst, J. (Hrsg.) (2017): Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. S. 307–379. Springer. Berlin Heidelberg.
- Miller, A. (2024). Realism. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Hrsg.), The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2024 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/sum2024/entries/realism/>
- Müller, R., & Greinert, F. (2023). Quantentechnologien: für Ingenieure. De Gruyter Oldenbourg.
- Müller, R., & Wilhelm, T. (2021). Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik. In T. Wilhelm, H. Schecker & M. Hopf (Hrsg.), Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis (S. 335–368). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2_11)

- Müller, S. (2009). Frequenzverschränkung bei der parametrischen Fluoreszenz. Bachelorarbeit. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Näger, P. M., & Stöckler, M. (2018). Verschränkung und Nicht-Lokalität: EPR, Bell und die Folgen. In Philosophie der Quantenphysik: Zentrale Begriffe, Probleme, Positionen. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54276-7>
- Pospiech, G. (2021). Quantencomputer & Co: Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformation verständlich erklärt. Springer Spektrum.
- Pospiech, G., & Schoene, M. (2012). Quantenphysik in Schule und Hochschule. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/392>
- Rode, M., & Barth, M. (2017). Quantenphysik gehört in den Physikunterricht! Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 28 (162), 2–6.
- Sächsisches Staatsministerium für Kultus (Hrsg.). (2022). Lehrplan Gymnasium Physik.
- Waitzmann, M. (2023). Wirkung eines quantenoptischen Realexperiments auf das physikalische Reasoning. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Weber, K.-A. (2018). Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten (Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 269). Logos.
- Weidlich, W. (2016). Grundkonzepte der Physik: Mit Einblicken für Geisteswissenschaftler. De Gruyter. <https://doi.org/doi:10.1515/9783110442458>



### 3. Anhang Materialien zum Unterrichtskonzept

#### Stundenverlaufspläne

##### 1. Doppelstunde

###### Verlaufsplan und Lernzielübersicht 1. Doppelstunde

###### Lernziele:

Die SuS erklären die Entstehung von Klicks bei der Detektion von Photonen an Lawinen-Dioden.

Die SuS erklären die Koinzidenzmethode und die Funktion der einzelnen Komponenten des Aufbaus.

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

1

###### Verlaufsplan

Zeit/ Minute n	Phase	Sozialform/ Methode	Inhalt	Medien	Bemerkungen
7min (7min)	Begrüßung/Einführung	UG	Motivation über Zeitungsartikel, Zielsetzung der folgenden Stunden erklären mit Endziel eigene Verschlüsselung; Leitfrage 1 formulieren	PPP	Einstieg: heutige Verschlüsselungen in naher Zukunft nicht mehr sicher→darum Quantenkryptographie  SuS sollen Artikel lesen und unbekannte Fachbegriffe nennen→neue Begriffe wie „Photon“, „Verschränkung“, „Polarisation“ tauchen auf in Artikeln→Photon vorläufig definieren/postulieren und damit Leitfrage 1 motivieren  Sprechweise so: Wir wissen jetzt noch nichts über das Photon; ich kann aber sagen, dass Photonen Energieportionen sind. Diese werden wir im Folgenden näher untersuchen. Dafür müssen wir erstmal feststellen, wann ein Photon vorhanden ist, es also detektieren
13min (20min)	Erarbeitung Funktionsweise Detektoren	EA	Lawinenanalogie nachvollziehen mittels Video	AB, Video, PPP	Video vorspielen  AB: Detektoren Aufgabe 1

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

2

2min (22min)	Ergebnissicherung Detektor	UG	Inhalte der Tabelle werden verglichen	PPP, AB	Ergebnissicherung mittels Vergleichs (s. Powerpoint)  Hinweis, dass pro bestimmten Strom ein „Klick“ von Detektor → allerdings auch Klick, wenn kein Photon einfällt → nächste Aufgabe
7min (29min)	Ergebnissicherung Dunkelzählereignisse	PA	SuS fassen Informationen zu Dunkelzählereignissen zusammen	PPP	AB: Detektoren Aufgabe 2  Ergebnissicherung mittels Vergleich (s. PPP)
5min (34min)	Ergebnissicherung Merksatz	EA	SuS fassen gesammeltes Wissen zusammen	AB	Hier Gesamtsicherung: Leitfrage 1 ist beantwortet.
4min (38min)	Motivation parametrische Fluoreszenz	LV	Neues Thema motivieren	PPP	Doch Problematik der Dunkelzählereignisse → wie können wir sicher sein, dass 1 Klick = 1 Photon?  → wir brauchen Methode dazu; Diese Frage ist Einstieg für parametrische Fluoreszenz → Leitfrage 2
15min (53min)	Erarbeitung parametrische Fluoreszenz	EA, PA	Erarbeitung der Methode aus Text und Zusammenfassen der wichtigsten Punkte in PA	Informatio nstext, AB	selbstgeschriebener Text  AB: parametrische Fluoreszenz Aufgabe 1  Hier bei Bedarf Hilferklärung über E-Niveaus (s.

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

3

					Lehrkräftehandreichung)
5min (58min)	Ergebnissicherung parametrische Fluoreszenz	UG	kurzes Vorstellen am Ende durch ein Paar	AB	
5min (63min)	Erarbeitung Koinzidenzmethode- Aufgabe 1	PA	Analyse des Koinzidenzzettels und Diskussion in Paar über den Zusammenhang der Messreihe mit der parametrischen Fluoreszenz und wie das dem Ziel (Einzelphotonexperimente) helfen kann	AB	Ausgangsstellung: Wir haben die Messungen von 2 Detektoren, untersucht diese mithilfe der folgenden Aufgaben selbstständig.  SuS sollen selbst den Zusammenhang erkennen. (Aufgabe 1)
2min (65min)	Vergleich Aufgabe 1	UG	SuS stellen ihre Beobachtungen vor, danach PPP	PPP	Vgl. bevor Aufgabe 2 gemacht wird, damit jeder diese machen kann. Koinzidenzen auf AB markieren lassen.
3min (68min)	Erarbeitung Koinzidenzmethode- Aufgabe 2	PA	SuS versuchen selbstständig auf Verbindung parametrische Fluoreszenz und Koinzidenzzettel zu kommen	AB	Bei parametrischer Fluoreszenz werden 2 Photonen ausgesendet, hier auf Zettel haben wir teilweise genau zwei Klicks gleichzeitig
2min	Vergleich Aufgabe 2	UG	SuS stellen ihre Beobachtungen		

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

4

(70min)			vor, danach PPP		
8min (78min)	Ergebnissicherung Koinzidenzmethode	EA	Lückentext und Merksatz vervollständigen lassen	AB	SuS sollen das Wissen selbstständig rekapitulieren und Fazit formulieren; danach Vergleich und Hinweis, dass dieser Aufbau vor jedem Experiment geschaltet ist (wichtig für 2.DS)  Leitfrage 2 wird damit beantwortet  Hinweis, dass Koinzidenzaufbau immer vor Experimente geschaltet ist, aber nicht explizit immer mitbetrachtet wird  Vertiefend: Koinzidenzfenster (s. Lehrkräftehandreichung)
5min (83min)	Erarbeitung Strahlteiler	LV	Leitfrage 3 formulieren; Theorieteil Strahlteiler kurz vorstellen mit Realobjekt	PPP, Realobjekt	Bis jetzt: Photon untersucht und verstanden; jetzt wird dieses neue Quantenobjekt untersucht → Leitfrage 3  Realobjekt in Demonstration einbeziehen  Strahlteiler Aufgabe 1
5min (88min)	Experiment Strahlteiler klassisches Licht	PA	Simulation mit klassischem Licht durchführen und Strahlengang einzeichnen+ Lückentext ausfüllen	Simulation , AB	

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

5

2min (90min)	Ergebnissicherung Strahlteiler klassisches Licht	UG	Kurzer Vergleich	PPP	Strahlteiler Aufgabe 2  Experiment mit Realobjekt zeigen
	Ergebnissicherung (bei Bedarf)	UG; LV	Zusammenfassen von bisher gelerntem durch Fragen der Lehrperson	PPP	Als Puffer; die Sachen sind aus der Stunde bekannt und können bei Zeitknappheit auch weggelassen werden

LV= Lehrervortrag; UG= Unterrichtsgespräch; GA= Gruppenarbeit; EA=Einzelarbeit PA=Partnerarbeit

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

6

## 2. Doppelstunde

### Verlaufsplan und Lernzielübersicht 2. Doppelstunde

#### Lernziele:

Die SuS führen die Simulation am Strahlteiler mit Einzelphotonen durch und beschreiben ihre Beobachtungen (statistischer Charakter).

Die SuS führen die Simulation am MZI mit klassischem Licht und Einzelphotonen durch und erklären die auftretenden Phänomene mithilfe bekannter Modelle.

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

1

Zeit/ Minuten	Phase	Sozialform/ Methode	Inhalt	Medien	Bemerkungen
6min (6min)	Wiederholung 1. DS	Think pair share	SuS sollen Zusammenfassung der letzten DS geben und die gegebenen Fachbegriffe sinnvoll integrieren. Zuerst alleine darüber Gedanken machen (2min), dann in Partnerarbeit besprechen (2min) und in Klasse vorstellen (2min)	PPP	Zurückerkinnern/rekapitulieren der letzten DS
7min (13min)	Experiment Strahlteiler Photon	PA	Strahlteiler mit Detektoren in Skizze einzeichnen lassen; Simulation durchführen und Beobachtung beschreiben	AB, Simulation	Betonung, dass Koinzidenzaufbau immer vorgeschaltet → wird im Folgenden nicht mehr explizit erwähnt
3min (16min)	Ergebnissicherung Strahlteiler Photon	UG	Vergleich der Beobachtung und Merksatz ausfüllen lassen	AB	Betonung der „neuen“ Physik, da wir Phänomene sehen, die mit der bisherigen Physik nicht beantwortet werden können
6min (23min)	Zusammenfassung Quantenphysik	LV	Einführen der „neuen“ Physik	PPP	

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

2



10min (33min)	Erarbeitung stat. Charakter	EA	Messung wird allein durchgeführt 20 mal	AB, Simulation	Statistischer Charakter Aufgabe 1
10min (43min)	Sicherung stat. Charakter	UG	Zusammentragen der Messwerte der gesamten Klasse und Fazit formulieren, Merksatz ausfüllen lassen	AB, PPP	Lehrperson sammelt vorne Ergebnisse der Einzelmessungen
10 min (53min)	Einführung Interferenz	GA	In 4er-Gruppen wir noch vorhandenes Wissen zur Interferenz gesammelt; anschließend kurz zusammengefasst in der Klasse	AB	Andere optische Experimente sollen mit Photonen probiert werden → Interferenz
5min (58min)	Einführung Interferometer	LV	Vorstellen des Interferometers, hier speziell des MZI	PPP	Aber Hinweis, dass es auch andere Interferometer-Typen gibt  Letzter Punkt der Info-Seite nicht ganz so relevant  Hier gleiche Anordnung der Fotos → als Lehrperson direkte Verbindung ziehen (das ist Spiegel in real, das in Simulation, ...)  Interferometer Aufgabe 1

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

3

10min (68min)	Interferenz bei klassischem Licht	PA	Mithilfe von Simulation in Skizze Strahlengang des Lichts einzeichnen und Interferenzmuster skizzieren	AB, Simulation	Danach kurzer Vergleich  Interferometer Aufgabe 2
6min (74min)	Interferenz bei Einzelphotonen	PA	Simulation durchführen und Beobachtung beschreiben; Versuch einer Erklärung	AB, Simulation	Interferometer Aufgabe 3
5min (79min)	Ergebnissicherung Interferenz	UG	Merksatz selbstständig formulieren lassen und Eingehen auf Problematik des Begriffs „Weg“	AB, PPP	Betonung des aktiven Charakters des Messprozesses! (beide Begriffe aber nicht nennen)  Mögliche Formulierung: erst durch das Detektieren des Photons durch einen Klick am Detektor (der Messprozess) wird die eine oder die andere Möglichkeit realisiert
2min (81min)	Definition Superposition	LV	Betonung, dass Eigenschaft „Weg“ nicht existiert; bis zum Klicken eines Detektors Superposition beider Möglichkeiten	PPP	
8min (89min)	Übung Superposition	GA	Zuerst Analogie-Tabelle zur Eissorte mit eigenen Möglichkeiten füllen; dann Karikatur analysieren	AB	Bei Karikatur eventuell Tipp, dass sich die Karikatur auf die

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Markus Standfuß ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

4

					<p>Superposition von Möglichkeiten aus der Quantenphysik bezieht</p> <p>Eventuell: Klassischer 3-Schritt zur Analyse (ist den SuS aus Geschichte bekannt): Beschreibung, Deutung, Bewertung (muss aber nicht sein)</p> <p>Superposition Aufgabe 1 und 2</p> <p>Generell ist die 1. Aufgabe relevanter als die 2., dies kann als Erweiterung und erhöhtes Anforderungsniveau gesehen werden und kann bei Zeitknappheit weggelassen werden</p>
--	--	--	--	--	--

LV= Lehrervortrag; UG= Unterrichtsgespräch; GA= Gruppenarbeit; EA=Einzelarbeit PA=Partnerarbeit

### 3. Doppelstunde

#### Verlaufsplan und Lernzielübersicht 3. Doppelstunde

##### Lernziele:

Die SuS erklären den Messprozess an einem Polarisationsfilter, formulieren Hypothesen für eine Anordnung mehrerer Polfilter und planen diese auch, um vorgegebene Endmessergebnisse zu erhalten

Die SuS formulieren eine Hypothese für den Quantenradierer mithilfe des bereits bekannten Wissens

Die SuS präsentieren ihre Erkenntnisse aus dem eigenständigen Durchführen der MZI-Simulation mit zwei Polarisationsfiltern

#### Verlaufsplan

Zeit/ Minuten	Phase	Sozialform/ Methode	Inhalt	Medien	Bemerkungen
3min (3min)	Vergleich Superposition	UG	Aufgaben werden verglichen	PPP	
5min (5min)	Systematisierung Modelle	UG	Systematisierung der Begriffe; SuS ordnen selbstständig ein Phänomen jeweils ein, was mit dem Teilchen- /Wellenmodell erklärt werden kann  Leitfrage 3 beantwortet; Leitfrage 4 wird formuliert	AB, PPP	Hinweis auf exakte Sprechweise! (zeigen Phänomene, die mit dem T.-/ W.modell erklärt werden können; nicht sowas wie zeigen Teilchen/Welleneigenschaften; Begriff des Welle-Teilchen- Dualismus vermeiden)
15min (25min)	Erarbeitung Delayed-Choice	EA	SuS lesen erst selbstständig Text und arbeiten wichtigste Punkte heraus ( <b>think-pair-share</b> )	AB, Informationstext	
5 min (25min)	Sicherung Delayed-Choice	PA	SuS besprechen Erkenntnisse mit Partner ( <b>think-pair-share</b> )	AB	
5min (30min)	Vergleich Delayed-Choice+ Vorstellen	UG	1 Paar stellt Erkenntnisse vor, ggf. beantwortet Lehrperson Rückfragen ( <b>think-pair-share</b> )	AB, PPP	Leitfrage 4 beantwortet

5min (35min)	Einführung Polarisation	LV	Vorstellen des Themas von Lehrperson		Leitfrage 5 formulieren  Auch Realobjekt Polarisationsfilter verwenden
5min (40min)	Übung Polarisation	UG	Frage, was passiert bei Anordnung Photon- vertikaler Polfilter-Detektor und Photon- horizontaler Polfilter-Detektor an PPP im UG besprechen+ Lückentext auf AB ausfüllen	PPP	Hier werden jeweils Fotos von Realexperiment mit Laser gezeigt und die SuS vermuten darauf aufbauend, was mit Einzelphotonen beobachtet werden kann
5min (45min)	MZI mit Polarisationsfiltern- Erarbeitung	EA	Klasse wird in 2 Gruppen geteilt (eine für klass. Licht, die andere für Einzelphotonen)  Jeder macht sich zuerst mit dem Experiment seiner Gruppe vertraut	Simulation	Wichtig: roten Faden wieder aufnehmen, Polarisation war nur ein Hilfsmittel  Hinweis: hier erstmal selber die Simulation in Ruhe anschauen, noch nicht die Lösung der Aufgaben versuchen
15min (60min)	MZI mit Polarisationsfiltern- Austausch	GA	In 2 Gruppen werden die Experimente jeweils durchgeführt, besprochen und die Aufgaben absolviert	AB, Simulation	
10min (70 min)	MZI mit Polarisationsfiltern- Vorstellen	Präsentation	Einer aus jeder Gruppe stellt kurz Simulation und Erkenntnisse vor	AB, Simulation, PPP	Hinweis: die andere Gruppe jeweils vervollständigt das Experiment, was sie nicht hatten

					Zum Vorstellen kann Simulation genutzt werden  Vgl. auf Folie; Hinweis, dass Wegmarkierung nur bei unterschiedlichen Winkeln
2min (72min)	MZI mit Polarisationsfiltern- Sicherung	EA	Lückentext wird ausgefüllt	AB	
18min (90min)	Quantenradierer	PA	Aufgaben 1 und 2 durchführen; Vermutung aufstellen und mit Simulation überprüfen	AB, Simulation	Die gleichen Anordnungen vertikaler/horizontaler Filter+45°-Filter gab es in den Übungen schonmal  Am Ende Leitfragen der gesamten Einheit zusammenfassen

LV= Lehrervortrag; UG= Unterrichtsgespräch; GA= Gruppenarbeit; EA=Einzelarbeit PA=Partnerarbeit

## 4. Doppelstunde

### Verlaufsplan und Lernzielübersicht 1. DS

#### Lern- und Kompetenzziele:

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...erklären den Wesenszug der Quantenphysik *Fähigkeit zur Interferenz* am Beispiel des Doppelspaltexperiments mit Einzelphotonen unter Verwendung des Fachbegriffs *Superposition*.
- ...erläutern den grundlegenden Aufbau und Ablauf des Doppelspaltexperiments mit Licht, Licht geringer Intensität und Einzelphotonen.
- ...erklären das Phänomen der Interferenz von Photonen am Doppelspalt unter Nutzung des Modells des Photons (S1).
- ...präsentieren Aufbau, Durchführung und Ergebnis des Doppelspaltexperiments mit Licht geringer Intensität oder mit Einzelphotonen sach-, adressaten- und situationsgerecht unter Einsatz geeigneter analoger oder digitaler Medien (K5/K7).
- ...tauschen sich mit anderen konstruktiv über die Gültigkeit der Ergebnisse des Doppelspaltexperiments mit Licht geringer Intensität aus und reflektieren Physik damit im geschichtlichen Kontext (K9/B8).
- ...arbeiten selbstständig, entdeckend in einem Schülerexperiment zum Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen.

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

1

Zeit/ Minuten	Phase	Funktion	Sozialform/ Methode	Inhalt	Medien
5min (5min)	Begrüßung /Einführung	Zielsetzung erklären	LV	Zielsetzung der folgenden drei Doppelstunden erklären, evtl. kurze Zusammenfassung des bisher gelernten und Wechsel von Interferometerexperimente → Doppelspaltexperiment, Gegenüberstellung	PPP
10min (15min)	Einstieg/ Aktivierung	Gleiches Vorwissen sicherstellen	Think-Pair- Share	Wiederholung des Doppelspaltexperiments in der Wellenoptik mit klassischem Laserlicht	PPP, ABs
1min (16min)	Überleitung		LV	Erklärung Übergang Laserlicht → Geringe Intensität → Einzelphotonen	PPP
25min (41min)	Erarbeitung		GA	Erarbeitung des Doppelspaltexperiments mit Licht geringer Intensität nach Taylor und mit Einzelphotonen nach Grangier, Roger, Aspect und Darstellung und Präsentation des Aufbaus, der Idee und des Ergebnisses	Informationstext e,Plakate/digitale s Tool
15min (56min)	Ergebnissicherung	Zusammenfassung der Ergebnisse	UG	Besprechung der Ergebnisse aus der Gruppenarbeit, Ergebnissicherung des jeweils anderen Experiments	Plakate/digitales Tool
9min (65min)	Erarbeitung/ Ergebnissicherung	Reflexion der Aussagekraft im Hintergrund	EA	Schüler:innen reflektieren die kennengelernten historischen Experimente und argumentieren, ob Licht geringer Intensität vergleichbar ist mit Einzelphotonen. Reflexion, ob es legitim ist aus Licht geringer Intensität auf Quantenobjekte zu schließen	Informationstext. PPP

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

2

		der Quantenphysik			
2min (67min)	Ergebnissi cherung	Wesenszug 1	UG	Ableitung des ersten Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“ anhand der vorher erarbeiteten Experimente	PPP
16min (83min)	Erarbeitung g/SE	Wesenszug 1	SE in PA	Erarbeitung des ersten Wesenszugs, bzw. der Bedingung für Interferenz am Schülerexperiment/Simulation zum Doppelspaltexperiment	PPP, Simulation. AB
7min (90min)	Ergebnissi cherung	Wesenszug 1	UG	Besprechung SE und Ergebnissicherung des ersten Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“	PPP, Simulation, AB

LV= Lehrervortrag;

UG= Unterrichtsgespräch;

GA= Gruppenarbeit;

EA=Einzelarbeit

PA=Partnerarbeit

SE= Schülerexperiment

## 5. Doppelstunde

### Verlaufsplan und Lernzielübersicht 2. DS

#### Lern- und Kompetenzziele:

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...erklären die Wesenszüge der Quantenphysik Komplementarität, Statistischer Charakter sowie Eindeutige Messergebnisse am Beispiel des Doppelspaltexperiments mit Einzelphotonen unter Verwendung von Fachbegriffen (Unterscheidbarkeit, Messprozess, Indeterminismus, Weginformation).
- ...arbeiten selbstständig, entdeckend in einem Schülerexperiment zum Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen.
- ...formulieren unter Verwendung der Wesenszüge der Quantenphysik chronologisch und kausal korrekt strukturiert (K4).

1

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Zeit/ Minuten	Phase	Funktion	Sozialform/ Methode	Inhalt	Medien
15min (15min)	Erarbeitung g/SE	Erarbeitung Wesenszug 2	SE in PA	Anwendung des bisherigen Wissens. Eigenständige Erarbeitung eines Quantenradierers am Doppelspalt. Herleitung des zweiten Wesenszugs Komplementarität	PPP, Simulation, AB
10min (25min)	Ergebnissi cherung	Ergebnissicher ung Wesenszug 2	UG	Besprechung des Quantenradierers am Doppelspalt und Ergebnissicherung des zweiten Wesenszug Komplementarität	PPP, AB
5min (30min)	Erarbeitung g	Determinismus Erarbeitung	Think-Pair- Share	Erarbeitung des Begriffes Determinismus an Beispiel Würfelwurf und Lotto	PPP
15min (45min)	Erarbeitung g in SE	Erarbeitung Wesenszug 3,4	SE/PA	Arbeit mit der Simulation zum Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen wie mit einem Schülerexperiment und Erarbeitung des Wesenszugs Statistischer Charakter	Simulation, AB
15min (60min)	Ergebnissi cherung	Besprechung SE, Festhalten Wesenszug 3	UG	Besprechung der Ergebnisse des Schülerexperiments und Formulierung des Wesenszugs Statistischer Charakter	PPP, AB
10min (70min)	Erarbeitung g	Erarbeitung	UG	Erarbeitung des dritten Wesenszug Eindeutige Messergebnisse gemeinsam im Plenum im Unterrichtsgespräch	PPP
5min (75min)	Ergebnissi cherung	Festhalten Wesenszug 4	UG	Formulierung des vierten Wesenszug Eindeutige Messergebnisse	PPP

2

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

15min (90min)	Übung/Anwendung	Festigung Wesenszüge	EA/PA	Übung der kennengelernten Wesenszüge mit Anwendungsaufgaben	PPP/Quiz auf bspw. Menti o.Ä.
------------------	-----------------	-------------------------	-------	---	----------------------------------

LV= Lehrervortrag; UG= Unterrichtsgespräch; GA= Gruppenarbeit; EA=Einzelarbeit PA=Partnerarbeit

SE= Schülerexperiment

Die grau hinterlegte Übungsphase ist erst bei der Überarbeitung der Zeitplanung nach der Erprobung und Evaluation dazu gekommen. In der ursprünglichen Unterrichtsplanung war für diese Phase keine Zeit mehr. Die Zeit für diese Phase wurde gewonnen, durch die Erkenntnis der Evaluation, dass die Erarbeitung des statistischen Charakters deutlich weniger Zeit benötigt, als zur Erprobung angedacht.



## 6. Doppelstunde

### Verlaufsplan und Lernzielübersicht 3. DS

#### Lern- und Kompetenzziele:

Die Schülerinnen und Schüler...

- ...erklären die Verschränkung von zwei Quantenobjekten und begründen damit den daraus resultierenden Bruch mit dem Lokalitätsprinzip der klassischen Physik unter Verwendung der im Unterricht kennengelernten Fachbegriffe (S1).
- ...können die Aspekte des quantenphysikalischen Weltbilds *Kausalität* und *Realität* unter Bezugnahme auf die Wesenszüge der Quantenphysik in der Quantenphysik erläutern (S1/K4).

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

1

Zeit/ Minuten	Phase	Funktion	Sozialform/ Methode	Inhalt	Medien
10min (10min)	Einleitung	Überleitung zu Zustandsfkt.	UG	Überleitung von Doppelspaltexperiment mit Photonen zu Elektronen und damit Motivation der Einführung der Zustandsfunktion	PPP
15min (25min)	Erarbeitung	Erarbeitung der Zustandsfunktion	LV/UG	Erarbeitung der Zustandsfunktion, deren Eigenschaften und Ableitung der kennengelernten Wesenszüge anhand der Wellenfunktion	PPP
10min (35min)	Übung/ Anwendung	Anwendung des Wissens zur Zustandsfunktion	EA	Anwendung des Wissens über die quantenmechanische Zustandsfunktion in einer Argumentationsaufgabe zu einem Zitat	PPP
30min (65min)	Erarbeitung	Erarbeitung quantenphysik. Weltbild	Gruppenpuzzle	Erarbeitung der Aspekte des quantenphysikalischen Weltbilds Realität und Kausalität in einem Gruppenpuzzle	Infotexte, ABS, PPP
10min (75min)	Ergebnis- cherung	Festhalten Realität, Kausalität	UG	Zusammentragen der Ergebnisse des Gruppenpuzzle und festhalten der Begriffe Realität und Kausalität	Infotexte, ABS, PPP

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

2

15min (90min)	Erarbeitung g	Erarbeitung Lokalität, Verschränkung	UG	Gemeinsame Erarbeitung der Lokalität/Nichtlokalität anhand des EPR- Experiments und Kennenlernen der Verschränkung als 5. Wesenszug	PPP
------------------	------------------	--	----	--	-----

LV= Lehrervortrag;

UG= Unterrichtsgespräch;

GA= Gruppenarbeit;

EA=Einzelarbeit

PA=Partnerarbeit

## Detektoren

Lawinen-Diode	Schneelawine
Ladungen auf hohem elektrischem Potential	Ansammlung von Schnee auf Hügel
	Schneemasse wird durch kleine mechanische Störung in Bewegung versetzt
Freigesetzte Elektronen setzen wiederum Elektronen frei	
	spontaner, kleinerer Schneeabgang

In Detektoren wird ein \_\_\_\_\_ von Elektronen ausgelöst, wenn ein \_\_\_\_\_ aufgenommen wird. Diesen \_\_\_\_\_ kann man messen. Allerdings klickt ein Detektor teilweise auch, wenn keine Photonen vorhanden sind. Diese Klicks nennt man \_\_\_\_\_.



### Koinzidenzmethode

Jeder senkrechte Strich auf dem Zettel entspricht einem \_\_\_\_\_ des jeweiligen Detektors. Dabei sind die einzelnen Klicks der Detektoren \_\_\_\_\_ verteilt. Allerdings liegen teilweise auch Striche direkt \_\_\_\_\_. Das heißt, dass hier beide Detektoren \_\_\_\_\_ geklickt haben. Dieses gleichzeitige Klicken nennt man „Koinzidenz“. Eine Koinzidenz weist also zwei gleichzeitige Photonen nach, welche zum Beispiel mittels \_\_\_\_\_ erzeugt wurden. Deshalb wird diese Methode Koinzidenzmethode genannt. Mithilfe dieser lassen sich \_\_\_\_\_ der Detektoren herausfiltern. Man sagt, Photonen werden aus dem Laserlicht herauspräpariert.

### Schlussfolgerung

Photonen sind Energieportionen, die mithilfe von \_\_\_\_\_ erzeugt und mit der \_\_\_\_\_ nachgewiesen werden können.

## Leitfrage 3: Was kann man beobachten, wenn man optische Experimente mit Photonen durchführt?

### Strahlteiler

**Aufgabe 1:** Führe den Versuch mit klassischem Licht am Strahlteiler durch und zeichne in die Skizze den Strahlengang ein. Vervollständige den Lückentext.

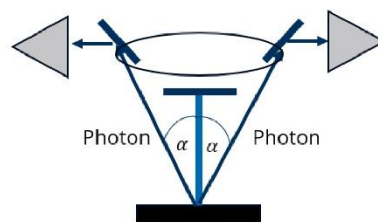


Strahlteiler bestehen aus zwei \_\_\_\_\_ und teilen das einfallende Licht in einen \_\_\_\_\_ Anteil und einen \_\_\_\_\_ Anteil, hier im Verhältnis 50/50.

### Spezieller Kristall und parametrische Fluoreszenz

Das zentrale Element des Aufbaus (siehe Skizze in der Aufgabe) ist ein spezieller Kristall, auf den ein Laserstrahl, der sogenannte Pumpaser, gelenkt wird. Der Kristall besteht aus einem nichtlinearen Medium, hier sogenanntes  $\beta$  – Bariumbromat (BBO). Sobald der Laser auf den Kristall trifft, absorbiert dieser die Energie. Dadurch wird dieser angeregt und gibt anschließend die Energie wieder ab. Diesmal allerdings in zwei Photonen, die dann den Kristall in leicht abweichenden Winkeln zur optischen Achse verlassen und einen Kegel bilden (siehe Bild unten). Entscheidend dabei ist, dass immer genau zwei Photonen ausgesendet werden. Das heißt, dass beide Photonen gleichzeitig an den Detektoren ankommen und diese gleichzeitig klicken. Dieser Prozess wird **parametrische Fluoreszenz** genannt. Fluoreszenz beschreibt dabei den Prozess des spontanen Abgebens von Photonen aus einem Material.

Dabei ist dieser Prozess sehr selten, die Wahrscheinlichkeit beträgt ca.  $1:10^{11}$ . Zentral ist, dass immer zwei Photonen gleichzeitig ausgesendet werden. Wir sagen, die Photonen werden aus dem Licht **herauspräpariert**.



## 2. Doppelstunde

**Aufgabe 2:** Zeichne in den Koinzidenzaufbau den Strahlteiler mit Detektoren ein. Beschreibe deine Beobachtungen bei der Durchführung des Experiments mit Photonen.



### Definition

Photonen sind einzelne Energieportionen, die \_\_\_\_\_ sind. Die Energie ist also quantisiert, es handelt sich bei Photonen um \_\_\_\_\_.

Wir nutzen in der Quantenphysik ein neues Modell des Lichts (Licht als unteilbare Energieportion), welches wir charakterisieren müssen!

### Was ist Quantenphysik?

Wir sehen bei Photonen Effekte, die wir mit der klassischen Physik nicht erklären können → wir brauchen eine „neue Physik“, um diese Phänomene zu erklären, die sogenannte **Quantenphysik**.

Beim Sprechen über Quantenphysik bedient man sich **klassischer Sprache**; man muss sich aber bewusst sein, dass dies nur ein **Hilfsmittel** ist und nicht der Realität entspricht!

### Statistischer Charakter

#### Aufgabe 1:

- a) Führe dazu die Simulation 20x aus und notiere dir, wie oft Detektor 1 und 2 detektiert haben. Kreuze auch jeweils in den Feldern an, welcher Detektor geklickt hat. Beschreibe deine Beobachtung.

#### Eigene Messung

Anzahl Klicks Detektor 1	
Anzahl Klicks Detektor 2	

Beobachtung:

--

[illegible]

b) Trage in die untere Tabelle die Anzahlen der gesamten Klasse ein. Beschreibe deine Beobachtung.

### Messung der Klasse

Anzahl Klicks Detektor 1	
Anzahl Klicks Detektor 1	

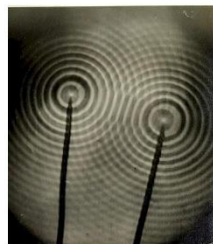
Beobachtung:

### Merksatz

Welcher Detektor bei einem Photon klickt, ist \_\_\_\_\_ und nicht vorherbestimmt. Lediglich \_\_\_\_\_ lassen sich angeben!

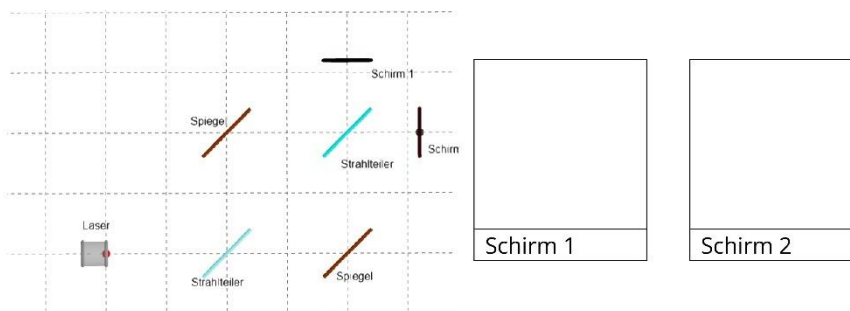
## Interferometer

**Aufgabe 1:** Notiere, was du über das Phänomen Interferenz noch weißt. Beziehe dazu die Grafik mit ein.



## Interferenz von Wasserwellen

**Aufgabe 2:** Skizziere den Strahlengang bei klassischem Licht im abgebildeten Mach-Zehnder-Interferometer (MZI) und die auftretenden Muster auf den Schirmen.





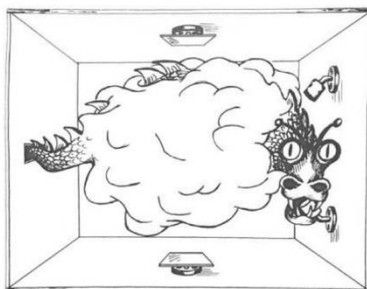


### Definition

**Aufgabe 1:** Fülle die Vergleichstabelle aus. Dabei wird die Superposition am Strahlteiler mit der Analogie der Wahl einer Eissorte verglichen, wobei man sich zuerst nicht sicher ist.

Superposition am Strahlteiler	Superposition bei Wahl der Eissorte
2 Möglichkeiten: 1. oder 2. Detektor	
	Unsicherheit bis zur Bestellung
Es klickt 1. Detektor	

- Interpretiere mit deinem bisherigen Wissen die Karikatur des „smoky dragon“, verwende dazu die gelernten Fachbegriffe.
- Gehe auf Grenzen und Unterschiede der Analogie zu der quantenphysikalischen Superposition ein.



### 3. Doppelstunde

Photonen sind Quantenobjekte und zeigen Phänomene, die mithilfe des

Teilchenmodells  
-z.B. registriert  
Detektor ein „Klick“

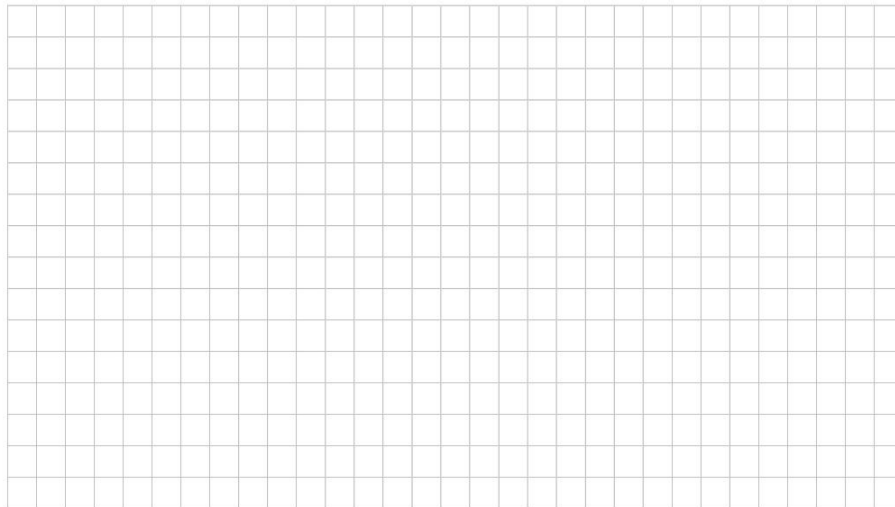
Wellenmodells  
-z.B. können Photonen  
Interferenz zeigen

erklärt werden können. Sie sind aber weder Teilchen noch Welle!

**Leitfrage 4: „Entscheidet“ das Photon vorher, ob es Phänomene zeigt, die mit dem Teilchen- oder Wellenmodell erklärt werden können?**

#### Delayed-Choice

**Aufgabe 1:** Lies dafür den angegebenen Text von Müller und fasse die relevanten Punkte so zusammen, dass du mithilfe von diesen das Thema vorstellen kannst.



#### Merksatz

Photonen „entscheiden“ nicht, welche Phänomene gezeigt werden. Sie sind Quantenobjekte und erst bei der Detektion treten Phänomene auf, die mit dem Teilchen- oder Wellenmodell erklärt werden können.

## Leitfrage 5: Kann man eine „Wegmarkierung“ dem Photon geben und ihm die Information „Weg“ aufprägen?

### Polarisation

#### Definition

Polarisation bezeichnet die Schwingungsrichtung einer Welle im Wellenmodell.

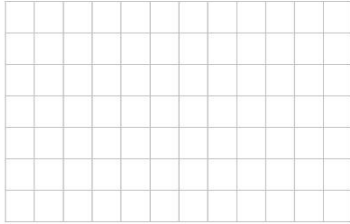
Durch Experimente beobachten wir bei Polarisationsfiltern:

Das Photon wird \_\_\_\_\_ transmittiert oder absorbiert. Das geschieht mit einer bestimmten \_\_\_\_\_. Photonen haben nach Passieren des Polarisationsfilters dessen Polarisation.

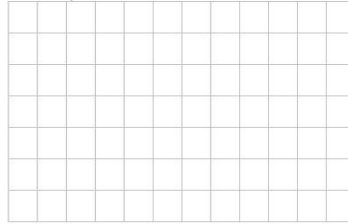
### Weginformation und Interferenz

**Aufgabe 1:** Beschreibe deine Beobachtung, wenn beide Polarisationsfilter gleich eingestellt sind.

klassisches Licht

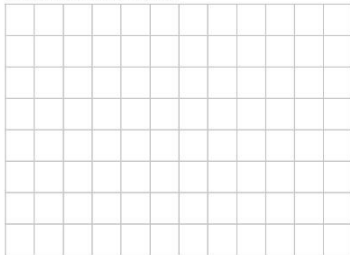


Einzelphotonen

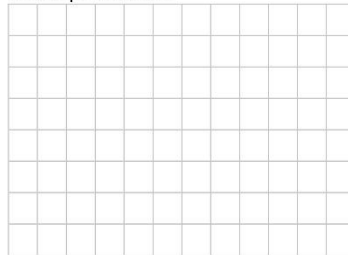


**Aufgabe 2:** Beschreibe deine Beobachtung, wenn die beiden Polarisationsfilter senkrecht zueinander eingestellt sind.

klassisches Licht



Einzelphotonen



Wenn man \_\_\_\_\_ beobachten will, kann man keine Wegmarkierung setzen.



### Experimente mit verzögerter Entscheidung (Delayed-Choice)

Wenn man an klassischen Vorstellungen festhalten will, kann man die im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Ergebnisse folgendermaßen zu erklären versuchen: Beim Eintritt in die Apparatur würde das Photon irgendwie feststellen, ob es sich um eine Interferenzapparatur handelt oder um eine Apparatur, bei der es „Welcher-Weg“-Information preisgeben muss. Entsprechend würde es sich anschließend „wellenhaft“ oder „teilchenhaft“ verhalten.

Um zu zeigen, dass solche Vorstellungen ungenügend sind, führte John Wheeler 1978 den Begriff des [...] „Delayed-Choice-Experiments“, auch „Experiment mit verzögerter Entscheidung“ genannt] ein. Hierbei wird die genaue Konfiguration des Experiments erst festgelegt, nachdem das Photon seine Entscheidung bereits getroffen haben müsste.

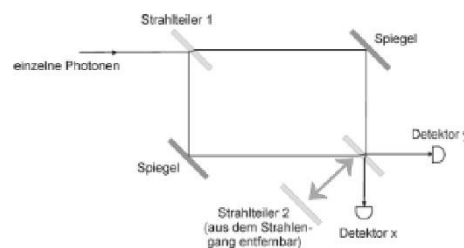


Abb. 7.14: Wheelers Vorschlag zum „Experiment mit verzögerter Entscheidung“

Der von Wheeler vorgeschlagene Aufbau ist der gleiche wie [...] [im bereits bekannten Mach-Zehnder-Interferometer], allerdings mit dem Unterschied, dass der zweite Strahlteiler sehr schnell entfernt bzw. wieder eingesetzt werden kann (Abb. 7.14). Betrachten wir ein Photon, das durch den ersten Strahlteiler in die Apparatur eintritt. Wenn der zweite Strahlteiler nicht vorhanden ist, handelt es sich um nichts anderes als um das im letzten Abschnitt beschriebene Antikoinzidenz-Experiment von Grangier et al [Hinweis: im Unterricht war dies das Experiment mit einem Strahlteiler]. Das Photon wird nach Reflexion durch einen der Spiegel ohne weitere Störung entweder von Detektor x oder von Detektor y nachgewiesen. Dabei wird „Welcher-Weg“-Information gesammelt; ein Interferenzmuster zeigt sich nicht.

Wenn der zweite Strahlteiler jedoch vorhanden ist, liegt die schon beschriebene Interferometer-Anordnung vor, und Interferenz kann beobachtet werden. „Welcher-Weg“-Information ist nicht zugänglich, und das Photon trägt zum Interferenzmuster bei. Bis hierher also nichts Neues.

Wheelers Vorschlag ist nun, die Entscheidung über das Einsetzen oder Nicht-Einsetzen von Strahlteiler 2 hinauszuzögern, bis sich das Photon bereits hinter dem ersten Strahlteiler befindet. Nehmen wir an, dass Strahlteiler 2 anfangs nicht vorhanden ist. Nach der klassischen Vorstellung müsste sich das Photon sich dann beim Eintritt in die Apparatur für „Teilchenverhalten“ entscheiden und einen der beiden Wege wählen. Interferenz könnte nicht beobachtet werden, und auch das unterdessen erfolgte Einsetzen von Strahlteiler 2 könnte an der Entscheidung des Photons nicht mehr ändern. Das Experiment wurde 1987 von zwei Gruppen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching [Hel87] und an der Universität von Maryland durchgeführt, und es zeigte sich, dass die klassische Vorstellung nicht mit dem Ergebnis übereinstimmt.

Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 7.15 gezeigt. Das „Entfernen“ des zweiten Strahlteilers musste durch einen Trick verwirklicht werden, denn es war nicht möglich, ihn in der benötigten kurzen Zeit physisch zu entfernen. Stattdessen wurde ein „ausschaltbarer Spiegel“ in einen der Wege gestellt. Er bestand aus einer Pockels-Zelle [...] und einem Glan-Prisma.

[...]

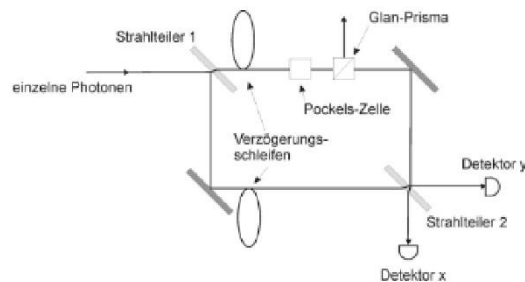


Abb. 7.15: Schema des Experiments mit verzögerter Entscheidung

Im Experiment wurden die Ergebnisse zweier Messdurchgänge verglichen: Einmal war die Pockels-Zelle ständig offen (d. h. es handelte sich um ein gewöhnliches Interferenzexperiment). Beim zweiten Mal wurde sie von geschlossen auf offen umgeschaltet, nachdem das Photon den ersten Strahlteiler passiert hatte. Dies war das Experiment mit verzögerter Entscheidung. Um sicherzustellen, dass die Pockels-Zelle (Schaltzeit 5 ns) erst an- oder ausgeschaltet wurde, nachdem das Photon für eine gewisse Zeit (5 ns) in der Apparatur war, wurde eine Glasfaser-Verzögerungsstrecke (Verzögerungszeit 30 ns) in die beiden Wege eingesetzt.

[...] Es ist nicht gelungen, durch die verzögerte Entscheidung die Photonen „hereinzulegen“. Die klassische Vorstellung, dass das Photon sein Verhalten beim Eintritt in die Apparatur nach dieser ausrichtet, stimmt mit den experimentellen Ergebnissen nicht überein.“

Quelle: Küblbeck, J., Müller, R. (2003). Quantitative Beschreibung der vier Wesenszüge. S. 122-124. Braunschweig.



## 4. Doppelstunde

### Das Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen

Die Physiker Philippe Grangier (1957), Gérard Roger und Alain Aspect (1947) führten im Jahr 1986 erstmals Experimente mit Einzelphotonen durch.

Grangier, Roger und Aspect nutzen für ihre Versuche keinen Doppelspalt, sondern ein Mach-Zehnder-Interferometer. Statt auf einen Doppelspalt trifft das Licht auf einen halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler). Dies ist eine Glasplatte, die im Winkel zur Ausbreitungsrichtung des Lichts steht. Fällt Licht schräg auf die Glasplatte, so wird ein Teil des Lichts reflektiert, ein anderer Teil tritt durch die Glasplatte hindurch. Mit technischen Maßnahmen kann man erreichen, dass 50% des Lichts reflektiert und 50% durchgelassen werden. Die beiden Lichtstrahlen werden später über Spiegel wieder zusammengeführt und das wieder vereinte Licht beobachtet. Da die Ergebnisse physikalisch gleichwertig sind, werden hier die entsprechenden Versuche mit einem Doppelspalt beschrieben.

#### Aufbau und Durchführung

Durch eine Koinzidenzschaltung wird sichergestellt, dass sich immer nur ein einzelnes Photon im Versuchsaufbau befindet. Dieses einzelne Photon kann dann durch einen Doppelspalt geschickt werden. Hinter jedem Spalt befindet sich je ein Detektor  $D_1$  und  $D_2$ .

#### Beobachtung

Wird der Versuch sehr häufig mit vielen Photonen wiederholt, werden circa 50% der Photonen am Detektor  $D_1$  und 50% der Photonen am Detektor  $D_2$  nachgewiesen. Eine Koinzidenz der Detektoren  $D_1$  und  $D_2$  kommt so gut wie nie vor. Es spricht also entweder der eine oder der andere Detektor an, praktisch nie beide Detektoren gleichzeitig. Setzt man einen Schirm ein, oder einen flächigen Detektor, so kann man einzelne Einschläge von Photonen feststellen. Es entsteht eine Verteilung wie bei einem klassischen Doppelspaltversuch.

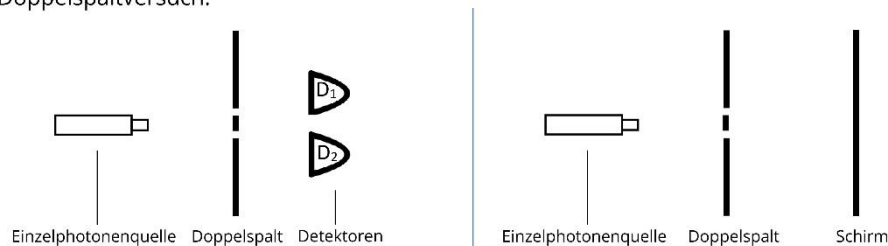


Abb.: Aufbauten Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen

(Leifi Physik, Quantenobjekt Photon, Versuche von Grangier, Roger und Aspect, letzter Zugriff am 16.08.2024  
<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/versuche/versuche-von-grangier-roger-und-aspect>)  
Die Abbildungen sind eigene Darstellungen.



### Das Doppelspaltexperiment mit Licht geringer Intensität

Wer/Wann:

---

Idee:

---

---

Versuchsaufbau:

---

---

---

---

Ergebnis:

---

---

---

### Licht geringer Intensität = Einzelphotonen?

Heute weiß man, dass durch einfaches Abschwächen der Lichtintensität mit den meisten Lichtquellen kein Strahl aus aufeinanderfolgenden einzelnen Photonen erzeugt werden kann. Vielmehr entstehen in solchen Quellen 'Klumpen' aus zwei oder mehr Photonen, die gleichzeitig ausgesandt werden. Diesen Effekt bezeichnet man als **Bunching**. Auch ist mittlerweile bekannt, dass ein einzelnes Photon nicht ausreicht, um ein Korn des Films zu schwärzen. Das Taylor-Experiment war also kein reines "Ein-Photonen-Experiment". Streng genommen konnte Taylor also damals noch nicht ausschließen, dass es die Wechselwirkung mehrerer Photonen untereinander ist, die die Interferenz hervorruft

Mit modernen Mitteln kann man jedoch im Labor „echte“ Einzelphotonenquellen bauen. Mit solchen Quellen lässt sich heute das Experiment wiederholen und nachweisen, dass Taylors Vermutung damals richtig war.

---

---

---

---

---

---

(Leifi Physik, Quantenobjekt Photon, Versuche von Grangier, Roger und Aspect, letzter Zugriff am 16.08.2024  
<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/versuche/versuche-von-grangier-roger-und-aspect>)

2

Quantenunterricht Klasse 12 © 2024 von Alexander Schuster ist lizenziert unter CC BY-NC-SA 4.0. Um eine Kopie der Lizenz einzusehen, besuche <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

## Das Doppelspaltexperiment mit Licht geringer Intensität

In den Anfängen der Quantenphysik (ab 1905) wurde gelegentlich die Vermutung geäußert, dass die Interferenzerscheinungen am Doppelspalt durch eine Wechselwirkung der Photonen untereinander verursacht werden könnten. Geoffrey Ingram Taylor (1886-1975) konnte diese Vermutung bereits 1908 durch sein berühmt gewordenes Taylor-Experiment erheblich entkräften.

### Aufbau und Durchführung

Im Originalaufbau des Experiments wurde das Licht einer Gasflamme durch rußgeschwärzte Platten unterschiedlicher Schwärzung abgeschwächt und an einer Nadelspitze gebeugt. Der Experimentieraufbau ist folglich ein Doppelspaltexperiment, da das Licht durch die Nadel auf zwei Wege aufgeteilt wird, analog zu einem klassischen Doppelspalt. Das Ergebnis wurde auf langzeitbelichteten Fotoplatten festgehalten. Die größte verwendete Belichtungszeit betrug ungefähr drei Monate und zur Lichtstärke schreibt Taylor, „dass der Betrag an Energie, der während der längsten Belichtungszeit auf die fotografische Platte fällt, derselbe ist, der von einer normalen Kerze abgegeben wird, die in einer Entfernung von etwas mehr als einer Meile steht.“

Bei der von Taylor gewählten Abschwächung des Lichts konnte man davon ausgehen, dass sich in der Beugungsanordnung gleichzeitig so wenige Photonen befanden, dass sich diese nicht gegenseitig beeinflussen konnten.

### Beobachtung

Bei extrem schwacher Belichtung auf dem Film traten zunächst nur regellos angeordnete Schwärzungspunkte auf. Bei sehr langer Belichtungszeit ergab sich aber dann das gleiche Interferenzbild, als wenn man die Nadelspitze nur kurzzeitig, aber mit hellem Licht beleuchtete. Es entsteht eine körnige Verteilung auf dem Schirm. Bei vielen Punkten, beobachtet man eine Verteilung, wie bei einem klassischen Doppelspaltversuch.

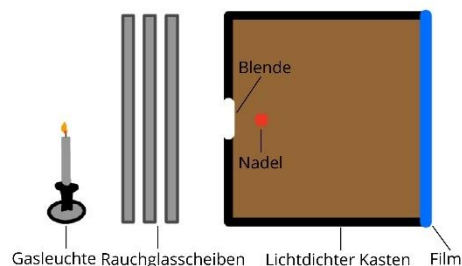


Abb.: Aufbau des Doppelspaltexperiments nach Taylor (Seitenansicht)

(Leifi Physik, Quantenobjekt Photon, Doppelspaltversuch von Taylor, letzter Zugriff am 16.08.2024  
<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/versuche/doppelspaltversuch-von-taylor>)  
Die Abbildung ist eine eigene Darstellung.

### Das Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen

Wer/Wann:

---

Idee:

---

---

Versuchsaufbau:

---

---

---

---

Ergebnis:

---

---

---

### Licht geringer Intensität = Einzelphotonen?

Heute weiß man, dass durch einfaches Abschwächen der Lichtintensität mit den meisten Lichtquellen kein Strahl aus aufeinanderfolgenden einzelnen Photonen erzeugt werden kann. Vielmehr entstehen in solchen Quellen 'Klumpen' aus zwei oder mehr Photonen, die gleichzeitig ausgesandt werden. Diesen Effekt bezeichnet man als **Bunching**. Auch ist mittlerweile bekannt, dass ein einzelnes Photon nicht ausreicht, um ein Korn des Films zu schwärzen. Das Taylor-Experiment war also kein reines "Ein-Photonen-Experiment". Streng genommen konnte Taylor also damals noch nicht ausschließen, dass es die Wechselwirkung mehrerer Photonen untereinander ist, die die Interferenz hervorruft

Mit modernen Mitteln kann man jedoch im Labor 'echte' Einzelphotonenquellen bauen. Mit solchen Quellen lässt sich heute das Experiment wiederholen und nachweisen, dass Taylors Vermutung damals richtig war.

---

---

---

---

---

---

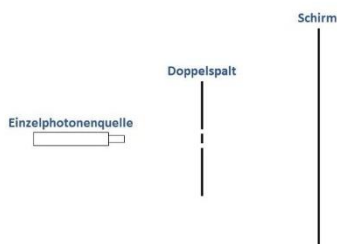
(Leifi Physik, Quantenobjekt Photon, Versuche von Grangier, Roger und Aspect, letzter Zugriff am 16.08.2024  
<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/versuche/versuche-von-grangier-roger-und-aspect>)

## WZ 1: Fähigkeit zur Interferenz

### Aufgabenstellung:

Untersuche mit der Simulation zum Doppelspaltexperiment, unter welcher Bedingung Interferenz bei Quantenobjekten auftritt.

### Versuchsaufbau:



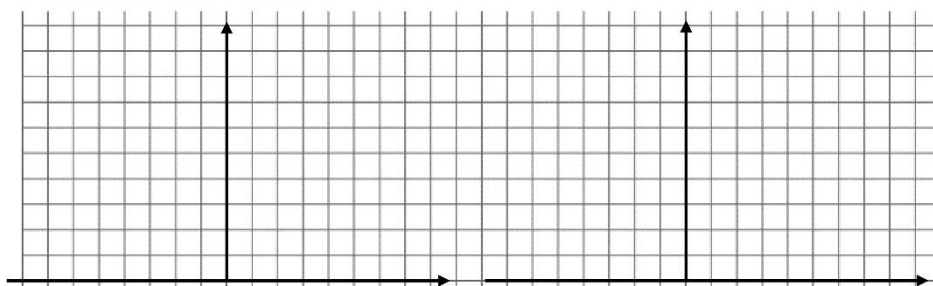
### Funktionsweise:

Durch den Klick auf den Button „x Photonen erzeugen“, werden x Einzelphotonen in der Photonenquelle erzeugt und durch den Doppelspalt in Richtung des Schirms geschickt.

Zu sehen ist in der Simulation das Schirmbild. Ein Punkt auf dem Schirm entspricht einem an dieser Stelle aufgetroffenen Photon.

### Versuchsdurchführung:

1. Stelle sicher, dass **nur der linke Spalt** des Doppelspalts geöffnet ist und lasse mehrmals 1000 Photonen durch den Spalt fliegen. Skizziere die Häufigkeitsverteilung (Einhüllende des Histogramms) der aufgetroffenen Photonen auf dem Schirm. Öffne nun **nur den rechten Spalt** des Doppelspalts und lasse mehrmals 1000 Photonen durch den Spalt fliegen. Skizziere ebenfalls die Häufigkeitsverteilung der Photonen auf dem Schirm.



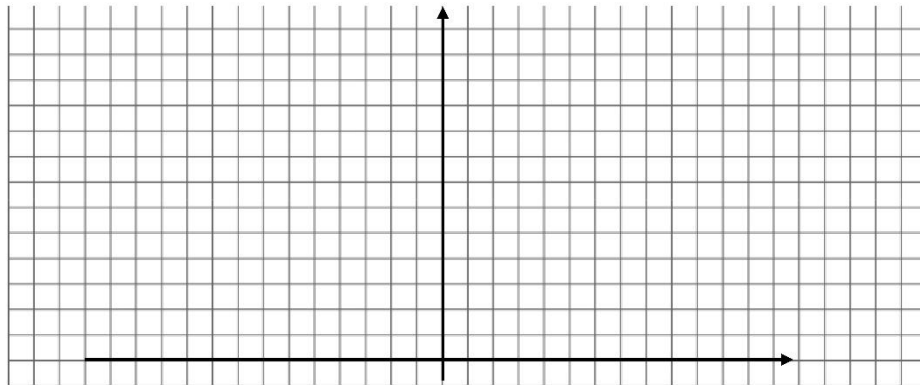
Beschreibe deine Beobachtungen.

---

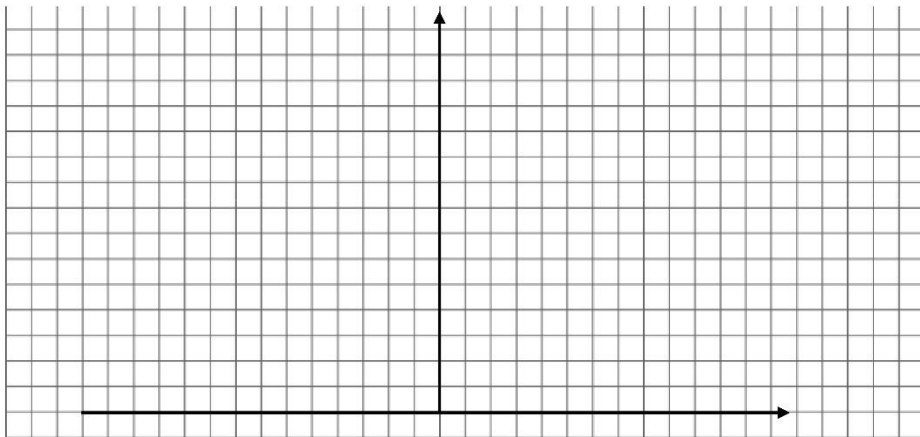
---

---

Skizziere die Häufigkeitsverteilung, wenn die Verteilungen beider einzeln geöffneten Spalte addiert werden.



2. Öffne nun wieder beide Spalte des Doppelspalts, sende mehrmals 1000 Photonen durch den Doppelspalt und skizziere die Häufigkeitsverteilung auftreffender Photonen auf dem Schirm.



### Auswertung:

Finde eine Regel dafür, unter welcher Bedingung im Doppelspaltexperiment Interferenz mit Einzelphotonen auftritt und wann nicht.

---

---

---

---

### Wesenszüge der Quantenphysik

#### 1. Fähigkeit zur Interferenz:

---

---

---

---

---

---

## 5. Doppelstunde

## Quantenradierer am Doppelspalt

## WZ 2: Komplementarität

### Aufgabenstellung:

Wende dein Wissen zum Quantenradierer im Mach-Zehnder-Interferometer auf den Quantenradierer am Doppelspalt an. Verwende bei deinen Erklärungen das Vorwissen zu dem Quantenradierer am Interferometer.

## 1. Versuchsaufbau:

Überlege dir, wie man einen Quantenradierer am Doppelspalt mit Einzelphotonen umsetzen könnte und skizziere den Versuchsaufbau.

## 2. Versuchsdurchführung:

Beschreibe den Ablauf des Experiments zum Quantenradierer am Doppelspalt und dessen einzelne Phasen detailliert

[illegible]

### 3. Erklärung des Versuchs:

Erkläre den Quantenradierer am Doppelspalt mit Hilfe deines Vorwissens über die Interferometerexperimente.

Unter welcher Bedingung findet im Experiment Interferenz am Doppelspalt statt, wann nicht?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### Wesenszüge der Quantenphysik

#### 2. Komplementarität:

---

---

---

---

---

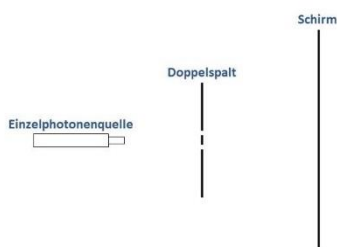


### WZ 3: Statistischer Charakter

#### Aufgabenstellung:

Erarbeite dir selbstständig mithilfe des Simulationsexperiments zum Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen den Wesenszug der Quantenphysik Statistischer Charakter.

#### Versuchsaufbau:



#### Funktionsweise:

Durch den Klick auf den Button „x Photonen erzeugen“, werden x Einzelphotonen in der Photonenquelle erzeugt und durch den Doppelspalt in Richtung des Schirms geschickt.

Zu sehen ist in der Simulation das Schirmbild. Ein Punkt auf dem Schirm entspricht einem an dieser Stelle aufgetroffenen Photon.

#### Versuchsdurchführung:

1. Erzeuge durch Klick auf den Button „1 Photon erzeugen“ ein einzelnes Photon und beobachte, wo dieses nach Durchgang durch den Doppelspalt auf den Schirm auftrifft. Versuche nun vorherzusagen, wo auf dem Schirm ein zweites Photon auftreffen wird und sende danach das Photon durch den Versuchsaufbau. Beschreibe deine Beobachtungen. Wiederhole den Vorgang mit weiteren einzelnen Photonen. Ist es vorhersagbar, wo auf dem Schirm ein einzelnes Photon nach Durchgang durch den Doppelspalt auftreffen wird?

---

---

---

---

---

---

---

2. Erzeuge nun 100 Photonen und beschreibe kurz das Bild auf dem Schirm. Sende danach weitere 100 Photonen und beschreibe das Bild auf dem Schirm. Erzeuge nun sehr viele, mehrere Tausend Photonen im Versuchsaufbau und beschreibe erneut kurz das Bild auf dem Schirm.

Kann die Verteilung der Photonen auf dem Schirm nun vorhergesagt werden?

Wie genau ist die Vorhersage der Verteilung?

---

---

---

---

---

---

---

#### Auswertung:

Fasse deine experimentellen Befunde zusammen. Was war im Experiment zufällig und nicht vorhersagbar, was war im Experiment vorhersagbar/determiniert?

---

---

---

---

## Wesenszüge der Quantenphysik

### 3. Statistischer Charakter

---

---

---

---

---

### 4. Eindeutige Messergebnisse

---

---

<p>Quantenunterricht Klasse 12</p>	<p>TU Dresden/IFW Dresden</p>	<p>Dresden/2024</p>
<p><b>Die quantenmechanische Zustandsfunktion</b></p> <p><math>\psi(\vec{r}, t)</math></p> <p>„Psi von r und t“, Funktion abhängig von Ort und Zeit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gibt quantenmechanischen Zustand eines Quantenobjektes an</li> <li>Funktionswert nicht messbar → Zustandsfunktion ist mathematisches Tool</li> <li>Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeitsverteilung</li> </ul>	<p><b>Die quantenmechanische Zustandsfunktion</b></p> <p><math>\psi(\vec{r}, t)</math></p> <p>„Psi von r und t“, Funktion abhängig von Ort und Zeit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gibt quantenmechanischen Zustand eines Quantenobjektes an</li> <li>Funktionswert nicht messbar → Zustandsfunktion ist mathematisches Tool</li> <li>Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeitsverteilung</li> </ul>	<p><b>Die quantenmechanische Zustandsfunktion</b></p> <p><math>\psi(\vec{r}, t)</math></p> <p>„Psi von r und t“, Funktion abhängig von Ort und Zeit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gibt quantenmechanischen Zustand eines Quantenobjektes an</li> <li>Funktionswert nicht messbar → Zustandsfunktion ist mathematisches Tool</li> <li>Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeitsverteilung</li> </ul>
<p><b>Wesenszüge der Quantenphysik und die Zustandsfunktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zustandsfunktion hat Gestalt einer Wellenfunktion → <b>Fähigkeit zur Interferenz</b></li> <li>Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeiten, Messprozess an Quantenobjekt kann zu verschiedenen Messergebnissen führen → <b>Statistischer Charakter</b></li> <li>Messprozess → Kollaps der Wellenfunktion, immer eindeutiges Messergebnis → <b>Eindeutige Messergebnisse</b></li> </ul>	<p><b>Wesenszüge der Quantenphysik und die Zustandsfunktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zustandsfunktion hat Gestalt einer Wellenfunktion → <b>Fähigkeit zur Interferenz</b></li> <li>Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeiten, Messprozess an Quantenobjekt kann zu verschiedenen Messergebnissen führen → <b>Statistischer Charakter</b></li> <li>Messprozess → Kollaps der Wellenfunktion, immer eindeutiges Messergebnis → <b>Eindeutige Messergebnisse</b></li> </ul>	<p><b>Wesenszüge der Quantenphysik und die Zustandsfunktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zustandsfunktion hat Gestalt einer Wellenfunktion → <b>Fähigkeit zur Interferenz</b></li> <li>Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeiten, Messprozess an Quantenobjekt kann zu verschiedenen Messergebnissen führen → <b>Statistischer Charakter</b></li> <li>Messprozess → Kollaps der Wellenfunktion, immer eindeutiges Messergebnis → <b>Eindeutige Messergebnisse</b></li> </ul>



## Lokalität

### Mögliche Definition Lokalität:

Räumlich getrennte Systeme haben keinen Einfluss aufeinander. Deren Physik kann lokal beschrieben werden. Eine Messung an dem einen System hat keinen Einfluss auf das andere System.




### Lokalität in der Quantenphysik:

Existenz von Zuständen von zwei oder mehr Objekten, die nur gemeinsam beschrieben werden können, auch bei räumlicher Trennung.

→ \_\_\_\_\_

Zwei oder mehr, auch möglicherweise weit voneinander entfernte \_\_\_\_\_ können sich in einem \_\_\_\_\_ Zustand befinden. Ein \_\_\_\_\_ an einem Objekt führt auch zur Auflösung der Superposition bei dem anderen Objekt. Dies passiert \_\_\_\_\_ und über beliebig große Distanzen.

### Zusammenfassung:

Lokalität	Realität	Kausalität
		

Quantenphysik ist...

---

---

---

## Das quantenphysikalische Weltbild

### Realität

Einen intensiv diskutierten Aspekt in der Philosophie der Physik stellt das Verhältnis von unserer klassischen Welt, wie wir sie alltäglich erleben, und der Quantenphysik dar. Insbesondere wird dabei diskutiert, inwiefern Quantenobjekte die gängigen Definitionen von Realität, Kausalität und Lokalität erfüllen.

Realität, Kausalität und Lokalität sind sehr schwer definierbare Begriffe. Eine mögliche Definition von Realität stellt die folgende dar:

#### Definition Realität:

*„Objekte und ihre Eigenschaften, zusammen mit Werten existieren unabhängig von Beobachtungen und Messungen.“*

#### Aufgabenstellung:

Diskutiert und nehmt begründet mit eurem Wissen über Quantenphysik Stellung zu der gegebenen Definition, inwiefern diese auch in der Quantenphysik ihre Gültigkeit behält oder nicht.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Lokalität

### Mögliche Definition Lokalität:

Räumlich getrennte Systeme haben keinen Einfluss aufeinander. Deren Physik kann lokal beschrieben werden. Eine Messung an dem einen System hat keinen Einfluss auf das andere System.




### Lokalität in der Quantenphysik:

Existenz von Zuständen von zwei oder mehr Objekten, die nur gemeinsam beschrieben werden können, auch bei räumlicher Trennung.

→ \_\_\_\_\_

Zwei oder mehr, auch möglicherweise weit voneinander entfernte \_\_\_\_\_ können sich in einem \_\_\_\_\_ Zustand befinden. Ein \_\_\_\_\_ an einem Objekt führt auch zur Auflösung der Superposition bei dem anderen Objekt. Dies passiert \_\_\_\_\_ und über beliebig große Distanzen.

### Zusammenfassung:

Lokalität	Realität	Kausalität
		

Quantenphysik ist...

---

---

---



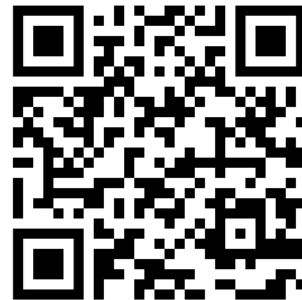
[illegible]

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

## Linkliste

Download aller Unterrichtsmaterialien

[klasse12.quantenunterricht.de](https://klasse12.quantenunterricht.de)



Simulation Strahlteiler

[strahlteiler.quantensimulation.de](https://strahlteiler.quantensimulation.de)



Simulation Mach-Zehnder-Interferometer

[interferometer.quantensimulation.de](https://interferometer.quantensimulation.de)



Simulation Doppelspaltexperiment

[doppelspalt.quantensimulation.de](https://doppelspalt.quantensimulation.de)



