**Beispiel für ein konkretisiertes Unterrichtsvorhaben**

**Leistungskurs – UNterrichtsvorhaben VII**

| **UV Q\_7: Erkenntnistheorie in der Quantenphysik am Doppelspalt und einem Delayed-Choice-Experiment*****Sequenz zu der Frage:*** ***Kann das Verhalten von Elektronen und Photonen durch ein gemeinsames Modell beschrieben werden?******Quantenobjekte am Doppelspalt – komplizierter als gedacht?***Inhaltsfeld: **Quantenphysik**Zeitbedarf: ca. 10 Unterrichtsstunden à 45 Minuten | **Fachschaftsinterne Absprachen:*** Einigung auf ein geeignetes Video zu einem Delayed-Choice-Experiment
* Absprache hinsichtlich geeigneter Doppelspalt-Simulationen
 |  |
| --- | --- | --- |
| **Inhaltliche Schwerpunkte:*** Photonen und Elektronen als Quantenobjekte: Doppelspaltexperiment, Bragg-Reflexion, Elektronenbeugung; Wahrscheinlichkeitsinterpretation, Delayed-Choice-Experiment; Kopenhagener Deutung
 | **Ausgewählte Beiträge zu den Basiskonzepten:**Zufall und Determiniertheit:Determiniertheit von Zufallsverteilungen ist charakteristisch für die Aussagen der Quantenphysik. |  |
| **Übergeordnete Kompetenzerwartungen:** Eine vollständige Auflistung der übergeordneten Kompetenzerwartungen befindet sich im KLP Physik (2022).* S1, S3, S5
* E3, E4, E6,
* K3, K4, K8, K9
* B1, B8
 |  |

|  |  |
| --- | --- |
| **Inhaltsfeld****Inhaltliche Schwerpunkte**  | **Konkretisierte Kompetenzerwartungen**Schülerinnen und Schüler… |
| **Quantenphysik*** Teilchenaspekte von Photonen: Energiequantelung von Licht, Photoeffekt, Bremsstrahlung
* Photonen und Elektronen als Quantenobjekte: Doppelspaltexperiment, Bragg-Reflexion, Elektronenbeugung; Wahrscheinlichkeitsinterpretation, Delayed-Choice-Experiment; Kopenhagener Deutung
 | * erklären den Photoeffekt mit der Einstein´schen Lichtquantenhypothese (S1, S2, E3).
* beschreiben den Aufbau und die Funktionsweise der Röntgenröhre (S1),
* stellen anhand geeigneter Phänomene dar, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter aufweisen kann (S2, S3, E6, K8)
* erklären bei Quantenobjekten anhand des Delayed-Choice-Experiments unter Verwendung der Koinzidenzmethode das Auftreten oder Verschwinden eines Interferenzmusters mit dem Begriff der Komplementarität (S1, S5, E3, K3),
* erklären am Beispiel von Elektronen die De-Broglie-Hypothese (S1, S3),
* berechnen Energie und Impuls über Frequenz und Wellenlänge für Quantenobjekte (S3),
* deuten das Quadrat der Wellenfunktion qualitativ als Maß für die Nachweiswahrscheinlichkeitsdichte von Elektronen (S3),
* erläutern die Heisenberg´sche Unbestimmtheitsrelation in der Version der Unmöglichkeits-Formulierung (S2, S3, E7, E11, K4).
* interpretieren die experimentellen Befunde zum Photoeffekt hinsichtlich des Widerspruchs zur klassischen Physik (E3, E8, S2, K3),
* bestimmen aus den experimentellen Daten eines Versuchs zum Photoeffekt das Planck´sche Wirkungsquantum (E6, S6),
* interpretieren das Auftreten der kurzwelligen Grenze des Bremsstrahlungsspektrums (E6, S1),
* erklären experimentelle Beobachtungen an der Elektronenbeugungsröhre mit den Welleneigenschaften von Elektronen (E3, E6),
* modellieren qualitativ das stochastische Verhalten von Quantenobjekten am Doppelspalt bei gleichzeitiger Determiniertheit der Zufallsverteilung mithilfe der Eigenschaften der Wellenfunktion (E4, E6, K4).
* beurteilen die Problematik der Übertragbarkeit von Begriffen aus der Anschauungswelt auf Quantenobjekte (B1, K8),
* stellen die Kontroverse um den Realitätsbegriff der Kopenhagener Deutung dar (B8, K9),
* bewerten am Beispiel eines aktuellen Forschungsvorhabens die Bedeutung der Quantenphysik für die Weiterentwicklung des modernen physikalischen Weltbildes (B8, K1),
* beschreiben anhand quantenphysikalischer Betrachtungen die Grenzen der exakten Vorhersagbarkeit von physikalischen Phänomenen (B8, K8, E11).
 |

|  | **Didaktisch-methodische Anmerkungen und Empfehlungen** |
| --- | --- |
| 1. **Doppelstunde**
 | **Verhalten von Photonen und Elektronen am Doppelspalt** Einstieg in die Reihe mit dem Taylor-Experiment (Licht mit geringer Intensität am Doppelspalt) z. B. über eine Simulation von Leifi[1], die die Schülerinnen und Schüler in Partnerarbeit bearbeiten können. Ein möglicher Arbeitsauftrag könnte sein: „Vergleichen Sie die Interferenzbilder von Elektronen und Photonen am Doppelspalt.“ Am Ende sollte den Schülerinnen und Schülern deutlich werden, dass man am Interferenzbild keinen Unterschied zwischen Elektronen und Photonen feststellen kann. |
| 1. **Doppelstunde**
 | **Quantenobjekt als Begriff für Objekte in der Mikrowelt**Zu Beginn der Stunde sollte anknüpfend an das Ergebnis der Vorstunde der Oberbegriff „Quantenobjekt“ für die Objekte der Mikrowelt eingeführt werden, da sie gleiches Verhalten am Doppelspalt zeigen. Charakteristisch für Quantenobjekte sind ihre körnige Struktur (Wechselwirkung am Detektor), ihre Welleneigenschaft (Interferenzmuster) sowie der stochastische Charakter.**Wahrscheinlichkeitswellen**Darauf aufbauend wird das Konzept der Wahrscheinlichkeitswellen von Max Born in einem Lehrervortrag dargestellt. Dabei wird insbesondere auf die Welleneigenschaft der Wahrscheinlichkeitsverteilung im Raum eigegangen. Anschließend sollen die Schülerinnen und Schüler in Partnerarbeit mit dem Konzept der Wahrscheinlichkeitswelle die körnige Struktur, die Welleneigenschaft und den stochastischen Charakter der Doppelspaltinterferenz erklären: „Erklären Sie mit dem Konzept der Wahrscheinlichkeitswelle die Beobachtungen von Eigenschaften der Quantenobjekte am Doppelspalt.“ Dadurch werden für die Schülerinnen und Schüler die drei Grundeigenschaften in einem einzigen Konzept der Wahrscheinlichkeitswelle zusammengefasst. Diese Besonderheit des Born´schen Konzeptes sollte unbedingt deutlich herausgestellt werden. |
| 1. **und 4. Doppelstunde**
 | **Interpretation der Quantenphysik: Kopenhagener Deutung und Realistendeutung** Die zentrale Problemstellung liegt nunmehr darin, dass man mit der Wahrscheinlichkeitswelle zwar ein Modell für das Verhalten von Quantenobjekten hat, aber weiterhin Unklarheit über das konkrete Verhalten von Quantenobjekten am Doppelspalt besteht. Dazu erstellen die Schülerinnen und Schüler auf Basis des Schulbuches oder des Internets Kurzvorträge zu den beiden bedeutendsten Interpretationen der Quantenphysik - die Kopenhagener Deutung und die Realistendeutung. Im Anschluss werden den Schülerinnen und Schüler Aussagen berühmter Physikerinnen und Physiker zum Verhalten am Doppelspalt[2] gegeben. Diese Aussagen sollen wenn möglich der Kopenhagener Deutung oder der Realistendeutung zugeordnet werden. Dabei ist zu beachten, dass nur wenige Aussagen eindeutig zuzuordnen sind. Hierbei ist der zentrale Gedanke, dass diese Frage von Physikerinnen und Physiker immer noch kontrovers diskutiert wird, nicht abschließend geklärt ist und wahrscheinlich auch nicht geklärt werden kann.  |
| **5. Doppelstunde** | **Delayed-Choice-Experiment**Da man das konkrete Verhalten von Quantenobjekten am Doppelspalt nicht beschreibbar ist, wird mit Hilfe eines Delayed-Choice-Experiments ein weiteres, zunächst widersprüchlich wirkendes Phänomen eröffnet. Dazu schauen sich die Schülerinnen und Schüler zunächst ein Video[3] zu einem Delayed-Choice-Experiment an. Zuvor wird im Unterrichtsgespräch der experimentelle Aufbau mit Hilfe eines Arbeitsblattes [4] thematisiert und anschließend die Grundidee am Video [3] herausgestellt: Durch geschickte Anordnung des Lichtweges verschränkter Photonen ist es möglich, die „Welcher-Weg-Information“ für den Doppelspalt zu erhalten, wobei sich dann auf dem Schirm kein Interferenzbild zeigt. Liegt die „Welcher-Weg-Information“ hingegen nicht vor, so sind selektive Interferenzbilder darstellbar. Das zunächst widersprüchlich Wirkende besteht darin, dass die Entscheidung, ob die „Welcher-Weg-Information“ vorliegt oder nicht, erst dann getroffen wird, wenn sich das Interferenzmuster schon ausgebildet hat (delayed choice – verzögerter Nachweis). Die Selektion bei den dargestellten Zählraten geschieht mit Hilfe der Koinzidenzmethode bei der Detektion verschränkter Photonen. |

**Quellen /** **weiterführendes Material:**

| **Nr.** | **URL / Quellenangabe** | **Kurzbeschreibung des Materials** |
| --- | --- | --- |
| 1 | <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche/simulationen-zum-doppelspalt> | Simulation des Taylor-Experiments (Licht mit geringer Intensität am Doppelspalt) |
| 2 | <https://www.schulentwicklung.nrw.de/materialdatenbank/material/view/6087> | Aussagen zum Doppelspaltexperiment von Josef Leisen |
| 3 | https://www.youtube.com/watch?v=u9bXolOFAB8 | Video “Delayed choice quantum Eraser” von Dr. Marlan O Scully zum Delayed-Choice-Experiment |
| 4 | - | Arbeitsblatt “Das Delayed-Choice-Doppelspaltexperiment“ [Screenshot im AB aus Video [3] (ebenfalls unter “Hinweise und Materialien” zum KLP Physik 2022 im Lehrplannavigator abrufbar) |

letzter Zugriff auf die URL: 25.01.2023

*[Diese Liste/Diese Veröffentlichung/Dieses Angebot enthält Links zu externen Websites Dritter, auf deren Inhalte QUA-LiS NRW keinen Einfluss hat. Dementsprechend obliegt die Einhaltung der datenschutzrechtlichen Regelungen dem jeweiligen Anbieter bzw. Betreiber. Im Sinne der gesetzlichen Gesamtverantwortung für den Datenschutz an Schulen prüfen Schulleitungen daher vor einem Einsatz der genannten Quellen eigenverantwortlich, inwieweit und unter welchen Bedingungen die Nutzung der genannten Quellen für den beabsichtigten Zweck datenschutzrechtskonform möglich ist. Ggf. resultiert aus einer solchen Prüfung im konkreten Fall, dass die allgemeine Nutzung weitestgehend nur auf freiwilliger Basis möglich ist, d.h. Schülerinnen und Schüler (oder deren Erziehungsberechtige) bzw. Lehrerinnen und Lehrer nicht oder nur eingeschränkt zur Nutzung verpflichtet werden können.]*