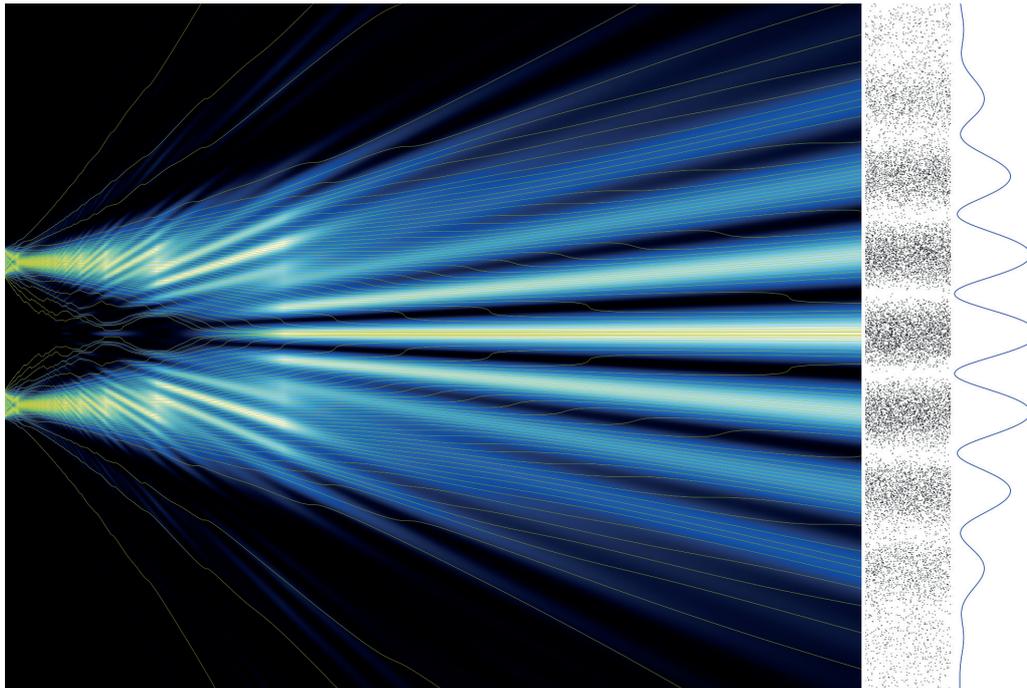


II.E.11

Quantenphysik

Quantenphysik am Doppelspalt

Matthias Borchartd



© RAABE 2023

© Alexandre Gondran/CC-by-sa 4.0

Doppelspaltversuche offenbaren Phänomene der Quantenphysik besonders deutlich, wenn die Strahlungsquelle so weit ausgedünnt wird, dass nur noch einzelne Teilchen nacheinander das Beugungsobjekt treffen. In diesem Beitrag lernen Ihre Schülerinnen und Schüler Doppelspaltversuche kennen, die mit einzelnen Photonen, Elektronen und Neutronen durchgeführt wurden, wobei sich der Wahrscheinlichkeitsbegriff als grundlegend bedeutend für die Interpretation der Ergebnisse erweisen wird.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	12/13
Dauer:	6–8 Unterrichtsstunden
Kompetenzen:	Textverständnis, Verknüpfung bekannter Inhalte mit neuen Fragestellungen, Herstellen von Analogien, Auswerten von Messergebnissen, Umstellen von Formeln, Berechnungen durchführen, Ergebnisse im Sachkontext interpretieren
Thematische Bereiche:	Doppelspaltversuch, Photonen, Materiewellen, statistische Deutung der Quantenphysik
Medien:	Grafiken, Internet, Taschenrechner

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Der Physikdidaktiker Josef Leisen bezeichnet den Doppelspaltversuch gerne als einen „didaktischen Alleskönner“ und verweist darauf, welche herausragende Bedeutung Richard Feynman dem Doppelspaltversuch in seinen berühmt gewordenen Vorlesungen zuwies: „Das zentrale Geheimnis der Quantentheorie steckt im Doppelspaltexperiment.“ Es wäre daher schade, den Doppelspaltversuch im Physikunterricht lediglich als Nachweisgerät für die Welleneigenschaften des Lichts zu behandeln. Vielmehr sollte das didaktische Potenzial dieses zentralen Experiments genutzt werden. Immerhin ist inzwischen der Doppelspaltversuch mit Elektronen, der von Claus Jönsson 1961 erfolgreich durchgeführt wurde, fester Bestandteil der Physiklehrpläne der Bundesländer geworden. Die Phänomene der Quantenphysik zeigen sich aber erst dann besonders deutlich, wenn Versuche mit Teilchen durchgeführt werden, die einzeln nacheinander auf den Doppelspalt geschickt werden.

Einzelne Teilchen und Born'sche Deutung

Der historische Versuch von Taylor vermittelt eine erste Idee, wie ein solches Experiment ablaufen könnte (**M 1**). Leider liefert Taylor in seiner Veröffentlichung von 1909 lediglich eine qualitative Beschreibung seines Versuchs. Quantitative Details zum Versuchsaufbau und zu den Ergebnissen sind kaum vorhanden. Im Material **M 2** lernen Ihre Schülerinnen und Schüler daher ein modernes Experiment mit einzelnen Photonen am Doppelspalt kennen, das eine quantitative Auswertung ermöglicht und die statistische Deutung des Versuchsergebnisses nahelegt. Überhaupt erweist sich die Born'sche Deutung der Quantenphysik als zentrale Idee bei allen vorgestellten Experimenten dieses Beitrags. Die Einbeziehung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs zur Erklärung von Experimenten mit Mikroobjekten wurde in den Geburtsjahren der Quantenphysik intensiv und kontrovers diskutiert und hat sich inzwischen als eine der wichtigsten Säulen der modernen Physik erwiesen. Besonders eindrucksvoll zeigt sich diese statistische Deutung der Quantenphysik bei Doppelspaltversuchen mit einzelnen Elektronen und mit einzelnen Neutronen. Versuche dieser Art, die sich auch für quantitative Auswertungen eignen, lernen Ihre Schülerinnen und Schüler in den Materialien **M 4** und **M 6** kennen. Die Tatsache, dass diese Experimente mit einzelnen Elektronen und Neutronen erst 2013 bzw. 1988 durchgeführt und veröffentlicht wurden, zeigt darüber hinaus, wie schwierig offenbar die Durchführung dieser Art von Doppelspaltversuchen ist.

Markierte Teilchen am Doppelspalt

Besonders faszinierend erweist sich der Doppelspaltversuch, wenn man die Teilchen beim Durchgang durch die Spalte unterscheidbar macht. Dann nämlich verschwindet das Interferenzmuster vollständig und es zeigt sich ein Ergebnis, wie man es von einzelnen Teilchen klassisch erwarten würde. In der Quantenphysik wird dieses Phänomen gerne als „Kollaps der Wellenfunktion“ bezeichnet. Wie aber markiert man Teilchen so, dass man prinzipiell feststellen kann, durch welchen der beiden Spalte sie hindurchgegangen sind? Im Material **M 3** wird ein Experiment vorgestellt, bei dem Polarisationsfolien als „Welche-Weg-Markierer“ (frei übersetzt nach dem in den englischen Quellen verwendeten Begriff „which-path-marker“) für Photonen eingesetzt wurden. Ungleich schwieriger ist es allerdings, einzelne Elektronen am Doppelspalt unterscheidbar zu machen. Dem italienischen Physiker Stefano Frabboni gelang 2010 ein solches Experiment. Schülerinnen und Schüler lernen diesen raffinierten Versuch im Material **M 5** kennen.

„Delayed Choice“-Experiment und Komplementarität

Der im Material **M 3** vorgestellte Versuch mit den Photonen, die durch zwei verschiedene Polarisationsfilter unterscheidbar gemacht wurden, hat eine weitere überraschende Erweiterung. Durch

einen dritten Polarisationsfilter kann man nämlich den Photonen auf ihrem Weg zum Beobachtungsschirm wieder eine einheitliche Polarisationsrichtung geben. Dadurch wird ihre Markierung, die sie am Doppelspalt erhalten hatten, aufgehoben und sie sind dann nicht mehr unterscheidbar. Dies hat zur Folge, dass auf dem Beobachtungsschirm wieder das bekannte Interferenzmuster des Doppelspalts sichtbar wird. Nicht der Doppelspalt „entscheidet“, wie sich das Photon zu verhalten hat (wie eine Welle oder wie ein Teilchen), sondern die verzögerte Wahl (delayed choice) der Messanordnung. Die Nichtlokalisierbarkeit der Teilchen verlangt also die Einbeziehung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation und führt im Experiment zur Interferenzerscheinung.

Entsprechende Versuche gibt es übrigens auch mit anderen Versuchsanordnungen, wie beispielsweise Mach-Zehnder-Interferometern. Auch dort wird die Lokalisierbarkeit der Photonen durch zwei orthogonal orientierte Polarisationsfilter hergestellt und die Nichtunterscheidbarkeit wieder durch einen dritten 45°-Filter erreicht. Vorteilhaft bei diesen Versuchsaufbauten ist der Platz, den man zur Einbringung der Filter zur Verfügung hat, was sich beim Doppelspaltversuch aufgrund des geringen Spaltabstands wesentlich schwieriger gestaltet. Die Physik eines Mach-Zehnder-Interferometers mit seinen halbdurchlässigen und vollreflektierenden Spiegeln und den verschiedenen Phasensprüngen an den Oberflächen ist dagegen deutlich schwieriger zu verstehen als der Doppelspaltversuch. Auch andere Versuchsanordnungen, die mit Einzelphotonendetektoren, Koinzidenzschaltungen und dergleichen arbeiten, sind im schulischen Kontext komplex und wenig zugänglich. Vom didaktischen Standpunkt aus erweist sich der Doppelspaltversuch daher in der Tat als unschlagbar – eben als eine Art „Alleskönner“.

Überblick

Material	Experiment	Inhalt	Schülerinnen und Schüler
M 1	Taylor (1909)	Einzelne Photonen am Doppelspalt (DS)	Wirklich <u>einzelne</u> Photonen?
M 2	Rueckner und Peidle (2013)	Einzelne Photonen am DS	Nachweis der Doppelspalt-Interferenz
M 3	Rueckner und Peidle (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelne Photonen • Welcher-Weg-Markierer • Delayed Choice 	<ul style="list-style-type: none"> • Born'sche Deutung • Komplementaritätsprinzip
M 4	Bach et al. (2013)	Einzelne Elektronen am DS	<ul style="list-style-type: none"> • De Broglie • Nachweis der Doppelspalt-Interferenz

Material	Experiment	Inhalt	Schülerinnen und Schüler
M 5	Frabboni et al. (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelne Elektronen • Welcher-Weg-Markierer 	<ul style="list-style-type: none"> • De Broglie • Nachweis der Doppelspalt-Interferenz • Born'sche Deutung
M 6	Zeilinger und Gähler (1988)	Einzelne Neutronen am DS	<ul style="list-style-type: none"> • Bragg-Reflexion • De Broglie • Nachweis der Doppelspalt-Interferenz

Zur Unterrichtsgestaltung

Da die vorgestellten Experimente und insbesondere ihre physikalische Interpretation recht hohe Anforderungen an die Lernenden stellen, wurden Aufbau, Durchführung und Ergebnisse der Versuche bewusst ausführlich erklärt und beschrieben. Daher lassen sich die Materialien in vielfältiger Weise in den Physikunterricht einbinden: Im Unterricht selbst, als Hausaufgabe oder auch sehr gut in Form von Referaten, die von einzelnen Lernenden im Plenum vorgetragen werden.

Weiterführende Medien

- ▶ Josef Leisen: Quantenphysik – Mikroobjekte. Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der Sekundarstufe II, Rheinland-Pfalz.
<http://www.josefleisen.de/downloads/physikdidaktik/34%20Quantenphysik%20-%20Mikroobjekte.pdf>
- ▶ G. I. Taylor: Interference Fringes with Feeble Light. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 15, 114–115, 1909.
Originaltext zum Experiment von Taylor von 1909 mit deutscher Übersetzung:
<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/geschichte/originalarbeit-von-taylor>
- ▶ W. Rueckner, J. Peidle: Young's double-slit experiment with single photons and quantum eraser, American Journal of Physics 81, 951 (2013).
<https://www.semanticscholar.org/paper/Young%27s-double-slit-experiment-with-single-photons-Rueckner-Peidle/4bd2898972a22f335d9341816c933b19ad3db2a6>
- ▶ Roger Bach et al.: Controlled double-slit electron diffraction, New J. Phys. 15 033018, 2013
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/15/3/033018>
- ▶ Anton Zeilinger et al.: Single- and double-slit diffraction of neutrons. Review of modern physics, October 1988 (DOI: 10.1103/RevModPhys.60.1067)
<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.60.1067>
- ▶ Stefano Frabboni et al.: Ion and electron beam nanofabrication of the which-way double-slit experiment in a transmission electron microscope, Appl. Phys. Lett. 97, 263101 (2010)
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3529947>

[Letzter Abruf der Internetadressen: 22.06.2023]

Auf einen Blick

1.–3. Stunde

Thema:	Einzelne Photonen am Doppelspalt
M 1	Der Versuch von Geoffrey Taylor
M 2	Einzelne Photonen am Doppelspalt
M 3	„Delayed Choice“-Experiment mit Photonen
Benötigt:	<input type="checkbox"/> Internetzugang

4./5. Stunde

Thema:	Einzelne Elektronen am Doppelspalt
M 4	Einzelne Elektronen am Doppelspalt
M 5	Elektronen am Doppelspalt mit „Welcher-Weg-Markierer“
Benötigt:	<input type="checkbox"/> Internetzugang

6. Stunde

Thema:	Einzelne Neutronen am Doppelspalt
M 6	Einzelne Neutronen am Doppelspalt

