



SCHOOL-SCOUT.DE

Unterrichtsmaterialien in digitaler und in gedruckter Form

Auszug aus:

Der Knaller-Test

Das komplette Material finden Sie hier:

School-Scout.de



Der Knaller-Test – ein grundlegendes (Gedanken)-Experiment der Quantenphysik

Axel Donges, Isny im Allgäu

1962 stellte **Dennis Gabor** (1900–1979) – der neun Jahre später den Physik-Nobel-Preis für die Erfindung der Holografie erhielt – die Behauptung auf, dass ein Gegenstand nur dann beobachtet werden kann, wenn er von mindestens einem Photon getroffen wird. Damit ist mit jeder Messung eine **Störung** des beobachteten Zustands eines Objekts verbunden. In der makroskopischen Physik ist diese Vorstellung durchaus richtig.

Dies stimmt jedoch nicht mehr uneingeschränkt in der Quantenphysik. Im Jahre 1993 stellten die beiden Physiker **Avshalom Elitzur** und **Lev Vaidman** ein Gedankenexperiment vor. Mit diesem konnten sie nachweisen, dass Objekte auch dann erkannt werden können, wenn sie mit keinem einzigen Photon in Wechselwirkung getreten sind. Dies wird als **wechselwirkungsfreie Quantenmessung** bezeichnet. 1994 konnte eine Gruppe um den Physiker **Anton Zeilinger** das Gedankenexperiment praktisch durchführen und die wechselwirkungsfreie Quantenmessung somit auch experimentell eindeutig nachweisen.

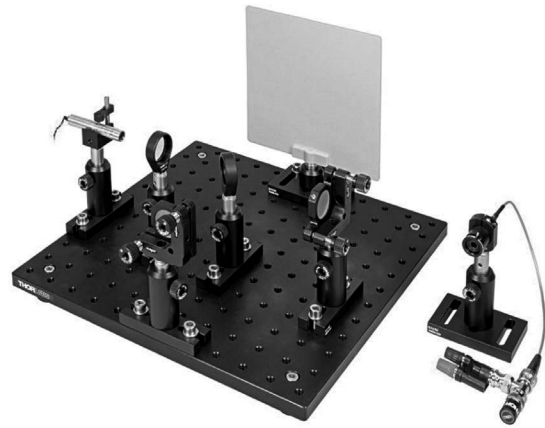


Abb. 1: Das Michelson-Interferometer

© THORLABS, Newton NJ – www.thorlabs.com

II/E

**Sehen, was nicht
gesehen wird.**

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 11/12

Dauer: 8 Stunden

Ihr Plus:

- ✓ Behandlung des Welle-Teilchen-Dualismus
- ✓ Besseres Verständnis von Grundlagen der Quantenphysik
- ✓ Hohe Aktualität

Inhalt:

- Licht als Welle
- Zwei-Strahl-Interferenz, Michelson- und Mach-Zehnder-Interferometer
- Photon als Quantenobjekt
- Wahrscheinlichkeitswelle, Interferenz und Nichtlokalität
- Knaller-Test und wechselwirkungsfreie Quantenmessung

Historische und didaktisch-methodische Hinweise

Klassische Betrachtungsweise

In unserer makroskopischen Welt ist mit jeder Messung eine Störung des beobachteten Zustands verbunden.

Dieses Prinzip wurde in der Vergangenheit auch in den Bereich der Quantenphysik übertragen. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das **Gammastrahlen-Mikroskop-Gedankenexperiment** von **Werner Heisenberg** (1901–1976). Bei diesem Gedankenexperiment wird versucht, die Position eines Elektrons dadurch zu bestimmen, dass man es mit Licht bestrahlt und die abgelenkten Photonen detektiert. Die exakte Positionsbestimmung scheitert jedoch daran, dass das Photon den Impuls auf das Elektron überträgt und so die Position des Elektrons ändert. Fazit: Eine Messung verändert den Zustand des zu beobachtenden Objekts.

Für die Physiker war es daher eine wichtige Frage, ob dieses klassische Prinzip auch in der mikroskopischen Welt gilt. Oder sollte in der Quantenphysik auch eine wechselwirkungsfreie Messung möglich sein?

Ein historisches Gedankenexperiment

In der griechischen Mythologie finden wir dazu ein klassisches Gedankenexperiment. Perseus hatte den Auftrag, Medusa zu töten. Dabei gab es ein großes Problem: Jeder, der Medusa ansah, erstarrte augenblicklich zu Stein. Perseus musste daher mit geschlossenen Augen kämpfen, was es ihm aber unmöglich machte, Medusa zu lokalisieren.

Perseus löste das Problem auf geniale Weise:

Er kämpfte mit geschlossenen Augen gegen sie und hielt dabei ein spiegelndes Schild vor sich. Es war dann nur eine Frage der Zeit, bis Medusa ihr Spiegelbild im Schild erblickte und erstarrte. Ohne Medusa anzusehen, hatte er sie besiegt und den Ort, wo sie sich beim Erstarren aufhielt, festgestellt.



© Shutterstock/Flik47

Abb. 2: Perseus mit dem Haupt der besiegten Medusa. Die Bronze-Plastik steht in Florenz. Sie wurde Mitte des 16. Jahrhunderts von dem Künstler **Benvenuto Cellini** (1500-1571) geschaffen.

Das Bomben-Test-Gedankenexperiment

Zwei Physiker von der Universität Tel Aviv – **Avshalom Elitzur** (geb. 31.5.1957) und **Lev Vaidman** (geb. 4.9.1955) – stellten 1993 eine moderne Variante des historischen Gedankenexperiments vor (**Bomben-Test**). Bei diesem Gedankenexperiment geht es um eine Bombe, die beim Auftreffen eines einzigen Photons explodiert. Sie konnten logisch einwandfrei zeigen, dass man in 25 % aller Fälle die Bombe erkennen kann, ohne dass sie von einem Photon getroffen wird (gesehen wird). Dieses Phänomen wird **wechselwirkungsfreie Quantenmessung** genannt. 1994 konnte **Anton Zeilinger** (geb. 20.05.1945) mit seiner Arbeitsgruppe die wechselwirkungsfreie Quantenmessung auch in einem Experiment verifizieren¹. Das Bomben-Test-Gedankenexperiment wird im Schulbereich „Knaller-Test“ genannt. Es ist Gegenstand dieses Beitrags.

¹ Er ersetzte die Bombe durch einen teildurchlässigen Spiegel, der das Photon nach dem Zufallsprinzip auf einen Detektor leitet. Der Nachweis des Photons durch diesen Detektor entspricht der Explosion einer Bombe.

Hinweise zur Gestaltung des Unterrichts

Die Quantenphysik ist bekanntermaßen unanschaulich und das hier behandelte Thema wurde erst vor weniger als 25 Jahre verstanden. Dennoch sollte der Knaller-Test als Gedankenexperiment im Oberstufenunterricht behandelt werden, weil er ein grundlegendes Prinzip verdeutlicht. Der experimentelle Nachweis übersteigt allerdings die Möglichkeiten der Schulphysik.

Im Material **M 1** wird das **Wellenbild** des Lichts kurz repetiert und die **Zwei-Strahl-Interferenz** abgehandelt. In **M 2** wird das klassische **Michelson-Interferometer** als Anwendungsbeispiel der Zwei-Strahl-Interferenz vorgestellt. Auf den Teilchen-Charakter des Lichts (**Photon**) und den **Welle-Teilchen-Dualismus** gehen wir im Material **M 3** ein. In den Materialien **M 4** und **M 5** wird das Verhalten einzelner Photonen in einem Michelson-Interferometer diskutiert, insbesondere auch dann, wenn man einen Interferometerarm eliminiert. Material **M 6** thematisiert die wechselwirkungsfreie Quantenmessung. In **M 7** und **M 8** wird schlussendlich das **Knaller-Experiment** behandelt und diskutiert. **M 9** dient der Lernerfolgskontrolle.

Bezug zu den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz

Allg. physikalische Kompetenz	Inhaltsbezogene Kompetenzen Die Schüler ...	Anforderungsbereich
F 1–F 4, E 1, E 3, E 4	... kennen das Wellen- und Teilchenbild des Lichts und können Aufgaben zur Zwei-Strahl-Interferenz lösen,	I, II
F 1–F 4, E 1, E 3, E 4, K 4	... verstehen das Funktionsprinzip eines Michelson- und Mach-Zehnder-Interferometer,	I–III
F 1–F 4, E 1, E 4	... kennen die Begriffe „Quantenobjekt“, „Interferenz“ und „wechselwirkungsfreie Quantenmessung“,	I, II
F 1–F 4, E 1, E 4	... verstehen den Knaller-Test.	I, II

Für welche Kompetenzen und Anforderungsbereiche die Abkürzungen stehen, finden Sie auf der beiliegenden CD-ROM 43.

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt Wh = Wiederholungsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch LEK = Lernerfolgskontrolle

M 1	Wh	Licht als Welle – frischen Sie Ihr Wissen auf!
M 2	Ab	Das Michelson-Interferometer
M 3	Wh	Licht als Teilchen – frischen Sie Ihr Wissen auf!
M 4	Ab	Einzelne Photonen im Michelson-Interferometer
M 5	Ab, LV	Photonen als Quantenobjekte
	⌚ V: 30 min	<input type="checkbox"/> Laser <input type="checkbox"/> Aufweitungslinse
	⌚ D: 5 min	<input type="checkbox"/> Michelson-Interferometer <input type="checkbox"/> Beobachtungsschirm (2 ebene Spiegel, Strahlteiler) <input type="checkbox"/> Absorber (z. B. Karton)
M 6	Ab	Wechselwirkungsfreie Quantenmessung
M 7	Ab	Das Knaller-Gedankenexperiment
M 8	Ab	Anmerkung zum Knaller-Test
M 9	LEK	Testen Sie Ihr Wissen!

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 20.

Mediathek

Welle:

- <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Kostproben/ebeneWelle/start.html>
- <http://www-tet.ee.tu-berlin.de/Animationen/EbeneWelle/>
- http://www.walter-fendt.de/ph6de/electromagneticwave_de.htm

Zwei-Strahl-Interferenz:

- <http://www.pk-applets.de/phy/interferenz/interferenz.html>
- <https://www.youtube.com/watch?v=blur0MemUQA>
- http://earthguide.ucsd.edu/earthguide/diagrams/wave_interference/wave_interference.html
- <https://www.youtube.com/watch?v=CAe3IkYnKt8>

Michelson-Interferometer:

- http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/ir_spek/ir_geraete.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/ir_spek/ir_spektroskopie/ir_geraetetechnik/ir_8_5/ftirspektr_mzu0703.vscml/Supplement/4.html
- <https://www.youtube.com/watch?v=lzBKlY4f1XA>
- <https://www.youtube.com/watch?v=zaxYZxQS0yc>
- <https://www.youtube.com/watch?v=J4Ecq7hlzYU>

Mach-Zehnder-Interferometer:

- https://www.youtube.com/watch?v=M6y_igUpyCg

Interferenz von Quantenobjekten:

- https://www.youtube.com/watch?v=Xmq_FJd1oUQ
- <https://www.youtube.com/watch?v=FwBb9rSOVdo>
- https://www.youtube.com/watch?v=IKZaHgNmQ_o

Knaller-Test (mit Mach-Zehnder-Interferometer):

- <https://homepage.univie.ac.at/franz.Embacher/dasDing/Bombe/index.html>

Lehrplanbezug (Stichworte, die mit diesem Beitrag abgedeckt werden):

- Vorstellungen von Licht, Einstein'sche Deutung, Lichtquantenhypothese
- Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe in der Quantenphysik
- Planck'sches Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
- Quantenobjekte und Messprozesse
- Eigenschaften von Quantenobjekten



SCHOOL-SCOUT.DE

Unterrichtsmaterialien in digitaler und in gedruckter Form

Auszug aus:

Der Knaller-Test

Das komplette Material finden Sie hier:

School-Scout.de

