

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.

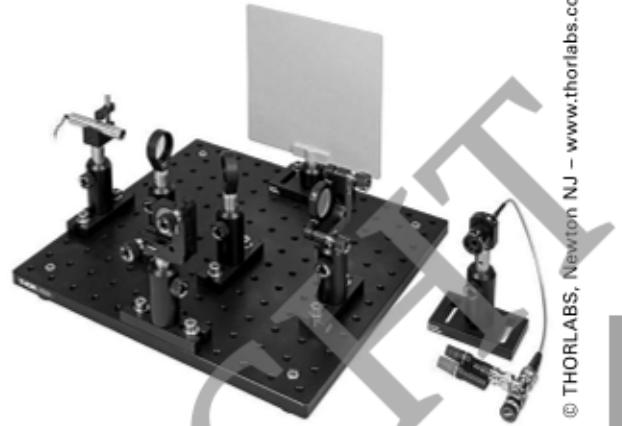


Abb. 1: Das Michelson-Interferometer

© 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

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):

- <http://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

M 2 Das Michelson-Interferometer

Die in Material **M 1** angesprochene Superposition zweier Lichtwellen lässt sich mit einem **Michelson-Interferometer**³ praktisch realisieren.

Abbildung 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Michelson-Experiments.

So funktioniert das Experiment

Ein Laserstrahl wird mithilfe eines Strahlteilers in zwei gleich intensive Laserstrahlen geteilt. Die beiden Teilstrahlen (gestrichelt dargestellt) laufen bis zum jeweiligen Umlenkspiegel (A bzw. B) und kehren dann zum Strahlteiler zurück. Dort wird jeder Teilstrahl erneut geteilt, sodass nun vier Teilstrahlen gleicher Intensität vorliegen. Zwei Teilstrahlen gelangen zum Detektor 1, die beiden anderen zum Detektor 2.

Zwei Teilstrahlen, die zum gleichen Detektor laufen, haben unterschiedliche Wege im Interferometer durchlaufen (gestrichelt dargestellt). Sie sind daher im Allgemeinen phasenverschoben.

Entgegen der grafischen Darstellung sind die Strahlengänge so justiert, dass sich jeweils zwei Teilstrahlen, die zum gleichen Detektor laufen, überlappen. Daher interferieren sie. Wird beispielsweise Spiegel B in x-Richtung verschoben, so ändert sich die Phasenverschiebung zwischen den unterschiedlich gestrichelten Teilstrahlen. Somit ändern sich mit der Spiegelverschiebung auch die von den Detektoren 1 und 2 gemessenen Intensitäten.

II/E

Schematischer Versuchsaufbau

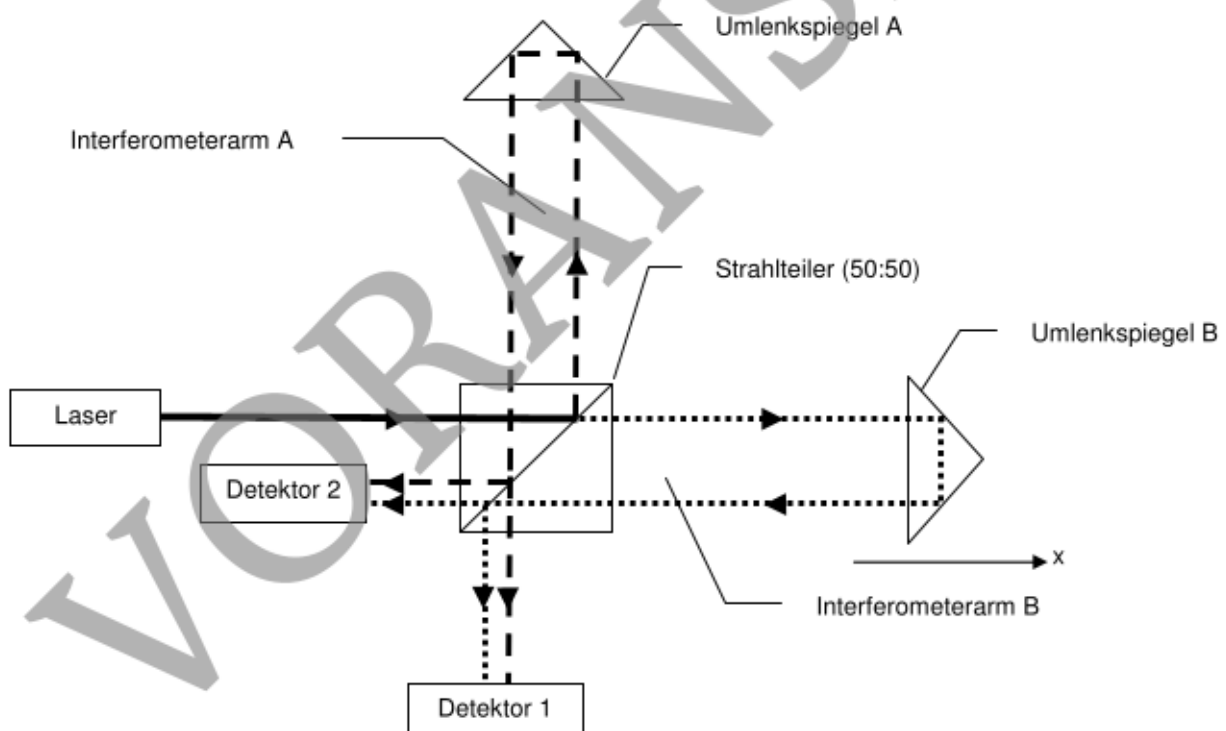


Abb. 6: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers

³ Siehe auch RAAbits Physik, II/D, Reihe 7: Das Michelson-Morley-Experiment (31. EL, Mai 2013).

M 4 Einzelne Photonen im Michelson-Interferometer – Fortsetzung

Es soll nochmals betont werden: Auch wenn sich nur ein einzelnes Photon im Interferometer aufhält, gelten die Interferenz-Gleichungen (12a) und (12b), die den Wegunterschied x der beiden Interferometerarme enthalten. Offensichtlich hat das Photon, das bei einem Detektor ankommt, Kenntnis von den Längen beider Interferometerarme. Aus klassischer Sicht ist dies unverständlich.

Es scheint so, als ob sich das Photon aufspalten und beide Interferometerarme gleichzeitig durchlaufen würde (Abb. 8). In der Quantenphysik wird dies so formuliert:

Das Photon ist auf seinem Weg von der Lichtquelle zu einem der beiden Detektoren **nicht lokalisiert** (d. h., man weiß prinzipiell nicht, wo es sich aufhält). Längs beider Interferometerarme breiten sich jedoch sogenannte **Wahrscheinlichkeitswellen** aus, die bei den beiden Detektoren konstruktiv bzw. destruktiv interferieren. So lassen sich die unterschiedlichen Detektionswahrscheinlichkeiten w_1 und w_2 (Gleichung (12a) und (12b)) – abhängig von der Spiegelverschiebung x – erklären. Erst wenn ein Photon von einem der beiden Detektoren nachgewiesen wird, weiß man (mit Sicherheit), an welchem Detektor es am Ende seines Weges angekommen ist. Wo es sich zwischenzeitlich aufgehalten hat ist prinzipiell unbekannt.



Abb. 8: Der „Quanten-Skifahrer“

II/E

Ein Interferometerarm mit Absorber

Wir diskutieren nun den Fall, dass ein **100%-Absorber** in den Interferometerarm A gebracht wird. In diesem Fall gelangen nur die kurz gestrichelt gezeichneten Teilstrahlen zu den Detektoren 1 und 2 (siehe Abb. 6). In diesem Fall kann keine Interferenz auftreten, da nur jeweils eine Lichtwelle (bzw. eine Wahrscheinlichkeitswelle) einen Detektor erreicht. Auf beide Detektoren trifft dann – unabhängig von der Länge der Interferometerarme – die gleiche Intensität auf:

$$I_1 = I_2 = I_0/4.$$

Im Teilchenmodell bedeutet dies, dass 25 % der Photonen, die den Laser verlassen, am Detektor 1 ankommen. 25 % der Photonen erreichen den Detektor 2 und die restlichen 50 % gehen im Absorber verloren. Das gleiche Ergebnis gilt für ein einzelnes Photon, das in das Interferometer eintritt:

Ein einzelnes Photon erreicht mit einer Wahrscheinlichkeit von $w_1 = 25\%$ den Detektor 1 und mit einer Wahrscheinlichkeit von $w_2 = 25\%$ den Detektor 2. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % wird es im Absorber absorbiert. Diese Wahrscheinlichkeiten sind unabhängig von der Spiegelposition x .

Dies ist auch klassisch verständlich: Ein einzelnes Photon tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % in den Strahlengang B ein. Wenn es dann erneut auf den Strahlteiler trifft, läuft es mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50 % zum Detektor 1 oder 2 weiter. Die Wahrscheinlichkeit, den Detektor 1 oder 2 zu erreichen, beträgt somit jeweils 25 %. Offensichtlich verhalten sich Photonen wie klassische Teilchen, wenn keine Interferenz möglich ist.