

Hong_ verschränkt

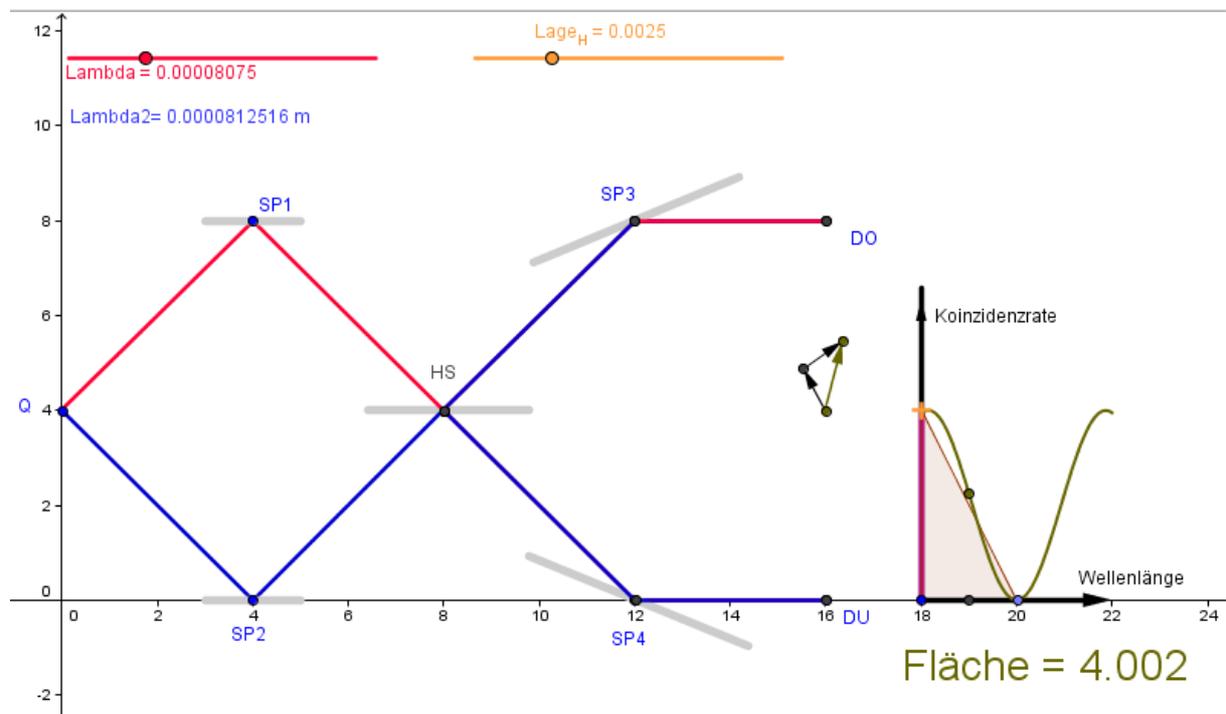
Eine ausführliche Darstellung zu diesem Experiment erschien in MNU 3/63. Im dort abgedruckten Beitrag habe ich das Experiment allerdings unzulässig vereinfacht dargestellt. Die hier aufgeschriebene Darstellung ist eine berichtigte Version.

Ziel der Modellation:

Es soll gezeigt werden, dass die Beobachtungen im Hong- Ou- Mandel- Experiment dann zutreffend zu deuten sind, wenn man die Verschränkung der Photonen angemessen modelliert.

Mit dieser Modellation soll untersucht werden, welche Folgen es hätte, wenn man an den Eingang des Interferometers eine Quelle für zwei voneinander nicht unterscheidbare einzelne Photonen setzt und die Detektoren in Koinkidenz betreibt.

[VerschränkungHong.ggb](#)



Wegen der Nicht- Unterscheidbarkeit der beiden Pfade von der Quelle zu je einem der beiden Detektoren ist überhaupt Interferenz möglich, obwohl zwei Photonen im Spiel sind. Wenn an einem Detektor ein Zählereignis ausgelöst wird, kann man ja nicht feststellen, ob es den rot oder den blau markierten Pfad gewählt hat. Es liegt also keine Welcher- Weg- Information vor – die Voraussetzung für Interferenz ist gegeben.

Im HOM- Experiment werden die beiden Detektoren in **Koinkidenz** betrieben.

Für das Auftreten eines Zählereignisses gibt es zwei Möglichkeiten, die durch die folgende Koinkidenzbedingung beschrieben werden:

Koinkidenzbedingung:

- $(PhA_DO \text{ UND } PhB_DU) \text{ ODER } (PhA_D2 \text{ UND } PhB_D1)$
- Jede Denkmöglichkeit enthält ein **UND**. Dies wird in der Zeigerdarstellung durch das Produkt der beiden beteiligten Zeiger modelliert.

Die beiden Produkte sind auf dem Bildschirm zwischen den beiden Detektoren angezeigt.

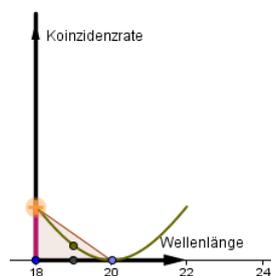
- Anschließend müssen Sie wegen der **ODER**- Verknüpfung addiert werden.
- Die **Koinzidenzrate** insgesamt wird durch das Quadrat dieser Zeigersumme dargestellt. Am rechten Bildrand sieht man diese Koinzidenzrate, als oliv gefärbte Kurve dargestellt über der Wellenlänge.

Arbeit mit dem Modell:

- Man stellt zunächst den Halbspiegel auf Null, also in die so genannte symmetrische Lage. Dazu dient der orange gefärbte Schieberegler in der oberen Bildmitte. Dann stehen die beiden Produktzeiger antiparallel und man misst keine Koinzidenzrate.
- Für eine zutreffende Beschreibung des Experimentes muss man berücksichtigen, dass die Photonen nicht monochromatisch sind. Vielmehr ergibt sich ihre Wellenlänge aus der in den Kristall eingestrahlt von 405 nm zu Paaren in der Nähe von 810 nm mit einer Schwankung um etwa 1,4%.

Bei der Entstehung der Photonenpaare gelten Impuls- und Energieerhaltung. Die Wellenlänge eines Photons, das ein pinhole durchquert, hängt deswegen von seinem Winkel gegenüber der Richtung des erzeugenden Lichtes ab. Wegen der nicht vernachlässigbaren Größe der beiden Öffnungen der pinholes hinter dem PDC- Kristall werden Photonen etwas unterschiedlicher Wellenlänge durchgelassen. Die mit ihnen verschränkten Partner am anderen pinhole besitzen dann eine andere Wellenlänge, die sich wegen der Energieerhaltung aus der des Partnerphotons ergibt. Den beiden denkmöglichen Verbindungen Quelle - Detektor müssen also jeweils verschiedene Wellenlängen zugeordnet werden.

- In der Modellation wird eine der beiden Wellenlängen mit dem roten Schieberegler eingestellt, die andere daraus automatisch berechnet (wegen der Skalierung im Geometrieprogramm in cm). Im Experiment wird die Wellenlänge zufällig variieren, jedes Photonenpaar wird eine andere Kombination aufweisen. Der Einfachheit halber nehme ich an, dass die Werte im Definitionsbereich gleichverteilt sind. Dann kann man den zeitlichen Verlauf des Experimentes dadurch modellieren, dass man für jede Einstellung des Halbspiegels die Koinzidenzrate für jeden definierten Wert der Wellenlänge bestimmt, indem man den Schieberegler für die Wellenlänge zwischen seinen beiden Anschlägen hin- und her bewegt.
- Am rechten Bildrand ist diese Koinzidenzrate über der Wellenlänge dargestellt. Man erkennt, dass die Form der Abbildung von der Lage des Halbspiegels abhängt, indem man diese am Schieberegler vorsichtig variiert:

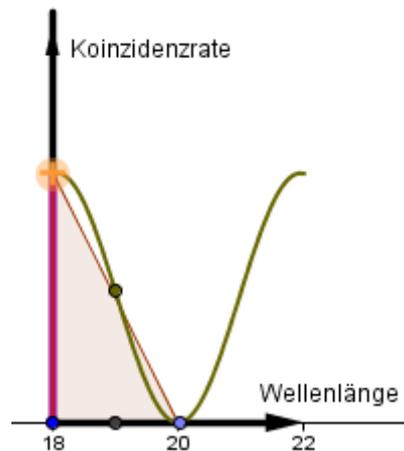


- Im Realexperiment wird bei jeder Lage des Halbspiegels über ein längeres Zeitintervall gemessen, so dass die gemessene Koinzidenzrate das Integral unter der eben modellierend erzeugten Kurve ist. „Mittelwerte sind Integrale!“ Dieses Integral ist mit der benutzten Version des Geometrieprogramms nicht automatisch ermittelbar. Daher wurden die Integrale mit Hilfe einer Dreiecks- Näherung abgeschätzt. An der rosefarbig dargestellten Dreiecksfläche erkennt man per Augenmaß, dass dieses Vorgehen nicht schlecht ist.

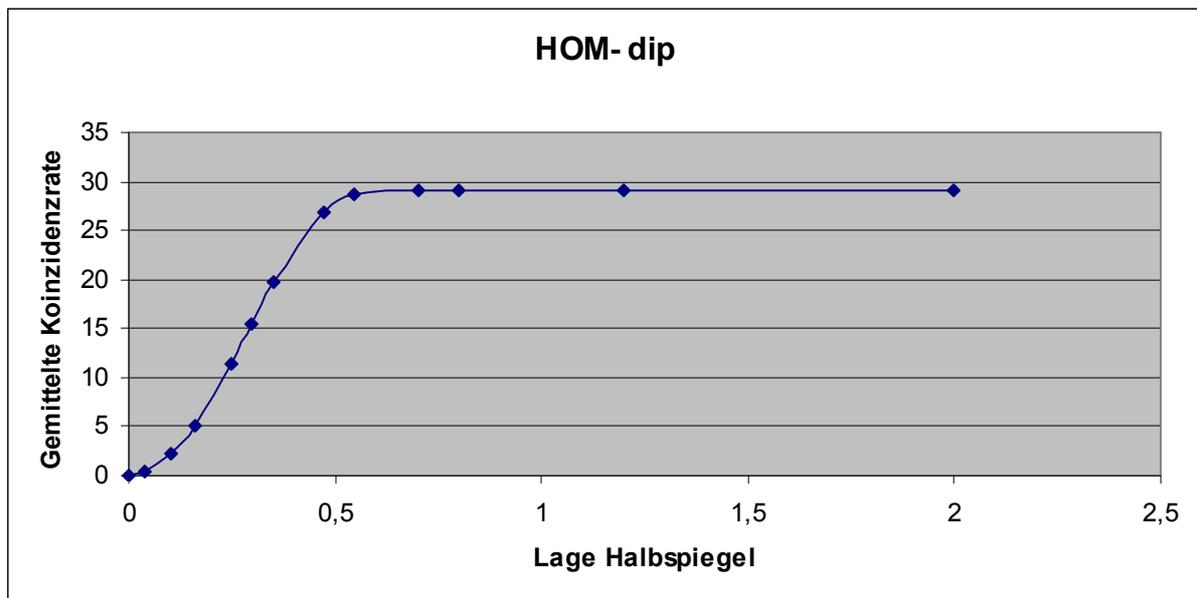
Im Einzelnen geht man so vor:

- Für jede Einstellung des Halbspiegels stellt man das orange gefärbte Kreuz durch Anfassen mit der Maus auf den Funktionswert der Kurve am linken Rand des Definitionsbereichs.
- Das Ergebnis wird dann in willkürlichen Einheiten als Fläche unterhalb des Graphen angegeben.
- Man liest für verschiedene Einstellungen des Halbspiegels diesen Näherungswert abliest und trägt ihn grafisch über der Lage des Halbspiegels auf.

Wegen der Eigenschaften der \cos^2 -Funktion erhält man konstant hohe Werte, sobald man die folgende Form überschreitet:



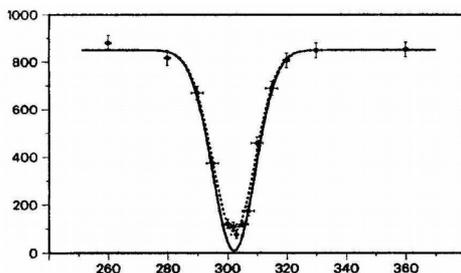
Ein fertiges Ergebnis sieht so aus:



Die vorstehende Abbildung zeigt das Integral der Koinzidenzraten/ die gemittelte Koinzidenzrate, wie man sie mit dem Modell bestimmen kann. Wie im Originalexperiment bleibt die Koinzidenzrate für hinreichend große Abweichungen von der Mittelposition des Halbspiegels konstant hoch. Dieser Bereich wird erreicht, wenn die modellierte Kurve der Koinzidenzraten erstmals eine halbe Periode der \cos^2 - Funktion zeigt.

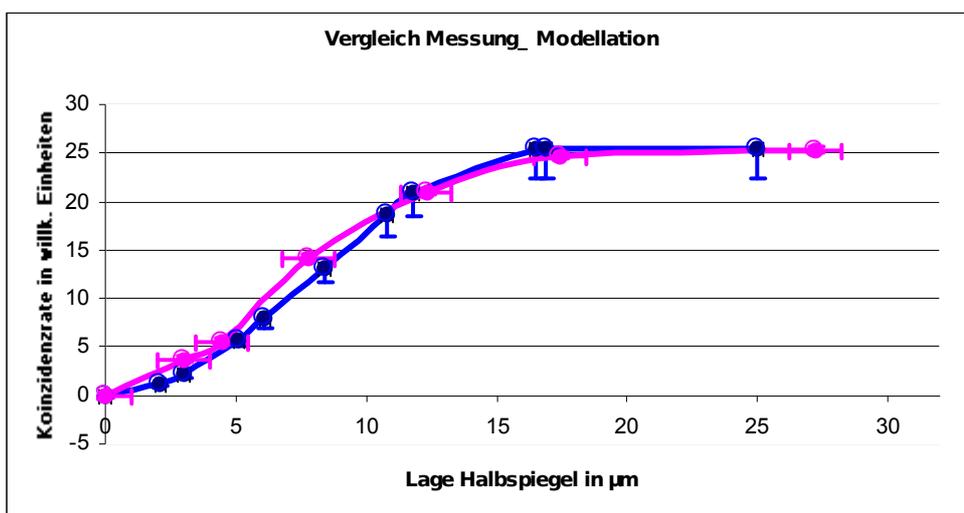
Wegen der Symmetrie wurde auf die Integration für Halbspiegel- Einstellungen links von Null verzichtet.

Dieses Ergebnis hält einem Vergleich mit dem Originalexperiment stand:



Messdaten aus dem Originalexperiment von HONG, OU & MANDEL (1987, 2046). Auf der Hochachse ist die Anzahl der je Zeiteinheit gemessenen Koinzidenzen dargestellt, auf der Rechtsachse wird die relative Lage des Halbspiegels gegenüber einer zufälligen Ausgangsstellung in μm angegeben.

Wenn man die Daten aus der Modellation mit den Original- Messdaten zusammen darstellt, erhält man den folgenden Graphen:



Dabei sind die Modellationsdaten in blau dargestellt. Die Fehlerbalken müssen im Wesentlichen berücksichtigen, dass die Unsicherheit in der Modellation von der Flächenbestimmung her kommt. Daher sind sie vertikal aufgetragen.

In pink sieht man die Originalmessdaten. Da die aus der Veröffentlichung von Hand entnommen wurden, sind die Unsicherheiten im wesentlichen durch die Ablesung der Spiegeleinstellung bedingt, was zu horizontalen Unsicherheitsbalken führt.

Der Vergleich zeigt, wie gut beide Graphen übereinstimmen.

Wenn die Wellenlänge beider Photonen konstant gleich der Soll- Wellenlänge wäre, wäre die Koinzidenzrate dauerhaft null, unabhängig von der Lage des Halbspiegels, denn dann träten in beiden zu superponierenden Termen die exakt gleichen Längen, aber wegen der konstanten Phasenverschiebung am Halbspiegel gegenphasige Zeigerstellungen auf, so dass sich kein dip ergeben würde.