

Interferenz jenseits der Kohärenzlänge durch Verschränkung einzelner Photonen

Florian Bier*, Andreas Strunz*, Jan-Peter Meyn*

*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, andreas.strunz@physik.uni-erlangen.de und jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

Kurzfassung

Experimente mit einzelnen Photonen eignen sich, um faszinierende Eigenschaften der Quantenphysik zu demonstrieren. Die wohl interessanteste ist die Verschränkung. Bisher wurden Demonstrationsexperimente zu dieser Thematik mit polarisationsverschränkten Photonen erstellt. Nach einem Vorschlag von Franson haben wir einen Aufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Verschränkung zweier Photonen hinsichtlich deren Frequenz darzustellen. Dabei werden Photonenpaare durch parametrische Fluoreszenz erzeugt und gelangen in räumlich getrennte Michelson-Interferometer. Innerhalb der Kohärenzlänge zeigt sich die klassisch erwartete Interferenz. Bei Armlängenunterschieden jenseits der Kohärenzlänge ist Zwei-Photonen-Interferenz mit einer Sichtbarkeit von 49% möglich, sofern die Armlängendifferenzen beider Interferometer identisch sind. Dieser nichtlokale Effekt kann im Demonstrationsexperiment vor Ort sowie online als interaktives Bildschirmexperiment nachvollzogen werden. Mit unserem Aufbau kann Zwei-Photonen-Interferenz und klassisch erwartete Interferenz ohne Umbauten gezeigt werden. Damit wird das Verschränkungsphänomen ohne den Wissensbereich Polarisation für die Schul- und Universitätsausbildung greifbar. Da zudem darauf geachtet wurde nur Standardmaterialien moderner Quantenoptiklabore zu verwenden, ist es vielerorts leicht möglich den Aufbau zu übernehmen. Das Experiment ist mit kurzer Erklärung auf <http://www.QuantumLab.de> verfügbar.

1. Quantenphysik und Verschränkung in Unterricht und Lehre

1.1. Quantenphysik

Unterrichtseinheiten zur Quantenphysik folgen meist der historischen Entwicklung mit Experimenten wie:

- a) Photoeffekt (1905)
- b) Franck-Hertz-Versuch (1914)
- c) Compton-Effekt (1922)

Soll die Quantennatur des Lichtes im Unterricht behandelt werden, so kann leider auf keinen dieser historischen Versuche zurückgegriffen werden, denn diese Experimente können im Rahmen der Quantentheorie mit klassischem elektromagnetischen Feld als Störung beschrieben werden. Die Absorption einer elektromagnetischen Welle ist beispielsweise ein Standardproblem der Atom- und Molekülphysik (zum Beispiel [1], S. 329).

Experimente, die die Quantennatur des Lichts eindeutig zeigen, hielten im Laufe des letzten Jahrzehnts zunehmend Einzug in die Lehre. Zu den Experimenten zählen Quantenkryptographie, Verschränkung, Quantenzufall etc. [2–6].

Es wurden Labore zur Ausbildung von Schülern und Studenten in Quantenoptik eingerichtet [2–4, 6]. Praktikumsexperimente sind kommerziell erhältlich [5]. Mit interaktiven Bildschirmexperimenten (IBE)

sind Quantenoptikexperimente über das Internet verfügbar [6].

1.2. Verschränkung

Schrödinger bezeichnete die Verschränkung „nicht als einen, sondern vielmehr als den charakteristischen Zug der Quantenmechanik“ [7].

Das EPR-Paradoxon [8] verdeutlicht die Faszination und den Stellenwert der Verschränkung. Dabei laufen zwei „Teilchen“, die anfänglich miteinander wechselwirken, auseinander. Führt man bei einem eine Orts- oder Impulsmessung durch, so ist damit die gleiche Observable des anderen Teilchens bestimmt. Dadurch lassen sich zwei komplementäre Eigenschaften eines Teilchens gleichzeitig messen. Dies steht laut der Argumentation von Einstein, Podolski und Rosen im Widerspruch zur Heisenberg'schen Unschärferelation. Dieses einstmalige Gedankenexperiment konnte inzwischen im Labor belegt werden. Es beruht auf der Tatsache, dass sich die beiden Teilchen in einem verschränkten Zustand befinden. Zum Einstieg in die Thematik Verschränkung gibt es populärwissenschaftliche Bücher wie [9, 10].

Verschränkungsexperimente, die derzeit in der Lehre eingesetzt werden können, beruhen auf Polarisationsverschränkung [11]. Derartige verschränkte Zustände können mittels parametrischer Fluoreszenz (PDC) er-

zeugt werden [12]. Allgemein können diese mit

$$|\Phi\rangle = a|HH\rangle + be^{i\varphi}|VV\rangle \quad (1)$$

beschrieben werden. H und V stehen für horizontale bzw. vertikale Polarisation, φ ist ein Phasenfaktor, a und b Amplituden.

Wir untersuchten die Möglichkeit, ein Verschränkungsexperiment ohne den Begriff der Polarisation der Lehre zugänglich zu machen. Damit wird vermieden, das Schüler Polarisation als notwendige Voraussetzung erachten oder so selbst als Quantenphänomen sehen. Als Vorbild dient die Frequenzverschränkung nach Franson [13]

2. Zwei-Photonen-Interferenz nach Franson

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des von Franson vorgeschlagenen Experiments zur Zwei-Photonen-Interferenz [13]. Zwei Photonen werden zeitgleich von einem Atom in zwei getrennte Mach-Zehnder-Interferometer emittiert (sog. Atomkaskade). Da ein Mach-Zehnder-Interferometer frequenzselektiv ist und die beiden Photonen durch das gemeinsame Entstehen korrelieren, sind die Einstellungen beider Interferometer miteinander verknüpft. Daraus ergibt sich folgende Frequenzverschränkung:

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i + |\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i) \quad (2)$$

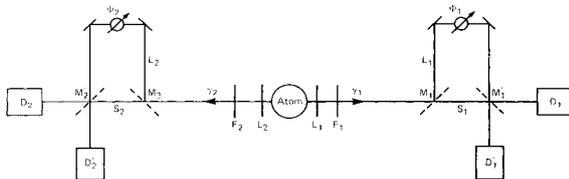


Abb. 1: Schema des vorgeschlagenen Experiments
Dieser theoretische Vorschlag zur Zweiphotoneninterferenz wurde mehrfach experimentell bestätigt [14, 15].

3. Unser Aufbau

3.1. Schema des Aufbaus

Abbildung 2 zeigt eine schematische Skizze unseres Aufbaus. Um eine durchdachte Umsetzung dieses Experimentes zu realisieren, waren einige Änderungen notwendig. Statt der Atomkaskade verwenden wir einen Barium-Beta-Borat-Kristall. Dieser generiert aufgrund von parametrischer Fluoreszenz durch das Bestrahlen mit einem Single-Mode 405 nm Diodenlaser Photonenpaare im Spektralbereich von 810 nm. Anstatt der Mach-Zehnder-Interferometer setzen wir aus folgenden Gründen Michelson-Interferometer ein:

- a) Weniger optische Komponenten (Strahlteiler) werden benötigt.
- b) Der Aufbau ist leichter justierbar, vergleiche Abbildung 3.

c) Die Armlängendifferenz ist aufgrund der beweglichen Spiegel (S_{A2}, S_{B2}) einfach einstellbar.

d) Experimentelle Bestätigungen des theoretischen Vorschlags benutzen ebenfalls Michelson-Interferometer.

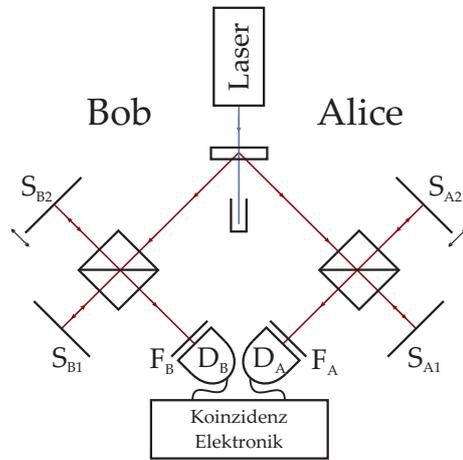


Abb. 2: Vereinfachter Aufbau unseres Experiments

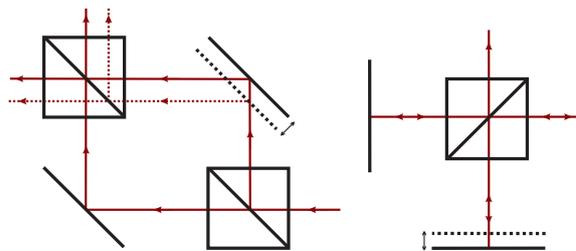


Abb. 3: Justageunterschiede zwischen einem Mach-Zehnder- (links) und einem Michelson-Interferometer (rechts)

3.2. Michelson-Interferometer

In Abbildung 4 sieht man den Aufbau eines Michelson-Interferometers [16]. Dieses besteht aus variabler Lichtquelle, Detektor, festem Spiegel und beweglichem Spiegel. Als Detektor sind das Auge, Schirme, Photodioden oder Ähnliches geeignet.

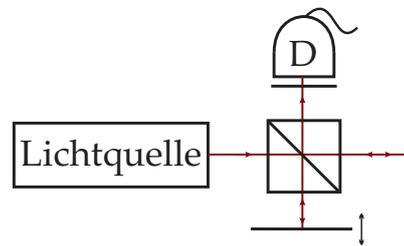


Abb. 4: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers für unterschiedliche Lichtquellen und Detektoren

Im Folgenden werden Interferenzmuster und Kohärenzlängen unterschiedlicher Lichtquellen kurz skizziert. Die Graphen beruhen nicht auf experimentelle Daten, sondern auf Berechnungen.

Ein Laser hat in der Regel eine sehr enge spektrale Bandbreite (Abbildung 5). Daraus ergibt sich eine

sehr große Kohärenzlänge, was einen äußerst breiten Interferenzbereich zur Folge hat (Abbildung 6).

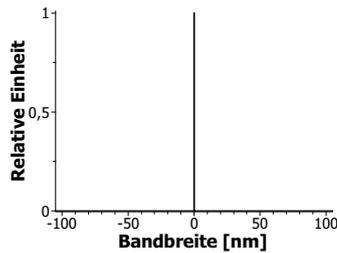


Abb. 5: Spektrale Bandbreite eines Lasers

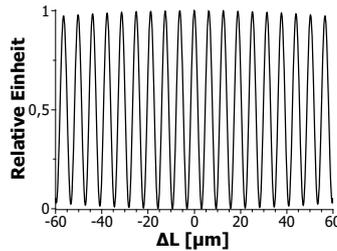


Abb. 6: Interferenzbereich eines Lasers

Ein Modell einer Spektrallampe wird an dieser Stelle durch ein Spektralband, welches breiter als eine Emissionslinie ist, veranschaulicht (Abbildung 7). Dieses hat eine geringere Kohärenzlänge und einen kleineren Bereich, in dem es zu Interferenz kommen kann (Abbildung 8).

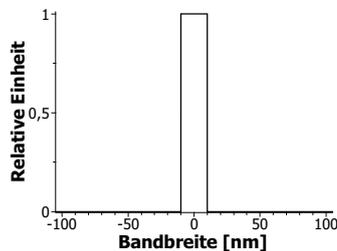


Abb. 7: Spektralband als Modell einer Spektrallampe

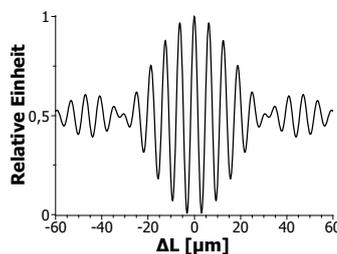


Abb. 8: Interferenzbereich eines Spektralbandes

Das emittierte Licht, zum Beispiel einer Halogenlampe, besitzt einen noch breiteren Spektralbereich. In Abbildung 9 soll dies durch eine Bandbreite von 200nm verdeutlicht werden. Das resultierende Interferenzmuster kann nur noch bei sehr kleinen Armlängendifferenzen zwischen festem und beweglichem Spiegel beobachtet werden.

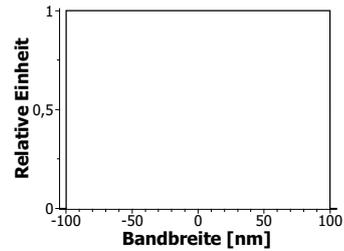


Abb. 9: Breites spektrales Band als Modell thermischen Lichtes

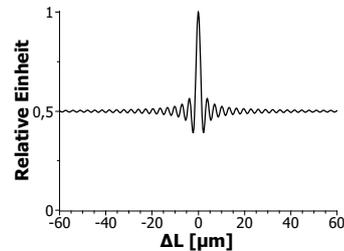


Abb. 10: Interferenzbereich eines breiten spektralen Bandes

3.3. Zwillingsphotonenquelle

Die in unserem Kristall generierten Zwillingsphotonen unterliegen der Energieerhaltung (Formel 3).

$$\hbar\omega_L = \hbar\omega_A + \hbar\omega_B \quad (3)$$

$$\hbar\omega = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_L} = \frac{1}{\lambda_A} + \frac{1}{\lambda_B} \quad (5)$$

Durch Umformung erhält man eine Abhängigkeit von den Wellenlängen (Formel 5). Diese kann durch verschiedenste Zahlenkombinationen erfüllt werden. Der einzig feste Parameter ist die Pumplaserwellenlänge λ_L von 405nm. Zwei mögliche Lösungen sind in Formel 6 und 7 angeführt.

$$\frac{1}{405 \text{ nm}} = \frac{1}{810 \text{ nm}} + \frac{1}{810 \text{ nm}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{405 \text{ nm}} = \frac{1}{809 \text{ nm}} + \frac{1}{811 \text{ nm}} \quad (7)$$

Aufgrund der vielen erlaubten Kombinationen ergibt sich eine Bandbreite der generierten Photonpaare von ca. 300nm. Dies entspricht einer Kohärenzlänge von ungefähr 2 μm .

3.4. Aufbau auf optischen Tisch

Abbildung 11 zeigt die Umsetzung des Verschränkungsaufbaus auf dem optischen Tisch. Die beiden Interferometer werden gemäß den Gepflogenheiten der Quantenoptik mit *Alice* und *Bob* bezeichnet.

Der bewegliche Spiegel des Interferometers bei *Alice* (gestreift) ist auf einem manuellen Verschiebetisch montiert. Die Armlängendifferenz Δl_A dieses Interferometers wird vor dem Experiment per Hand eingestellt und bleibt anschließend konstant. Insgesamt kann der Spiegel um 50mm verschoben werden.

Die Armlängendifferenz Δl_B des Interferometers bei Bob (kariert) wird durch einen Piezoverschiebetisch justiert. Vor dem Experiment wird dieser mittels Stellschraube per Hand voreingestellt (5 mm Verschiebeweg). Im laufenden Experiment kann der Spiegel mittels des Piezos um $20\ \mu\text{m}$ verfahren werden. Dabei beträgt die Positioniergenauigkeit $10\ \text{nm}$.

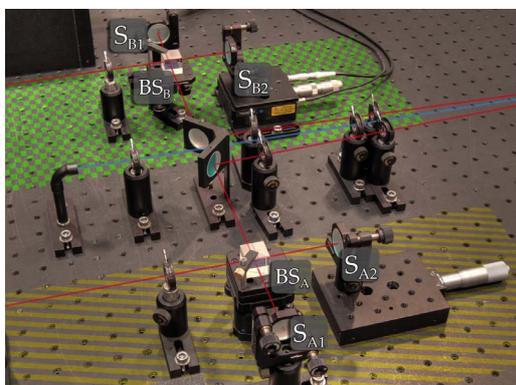


Abb. 11: Detailansicht des Aufbaus

3.5. Filter

Der Interferenzbereich darf nicht zu schmal sein, da sonst zu wenige Maxima und Minima vorhanden sind um von einem Interferenzbereich zu sprechen. Jedoch sollte dieser auch nicht zu breit sein, da sonst der Piezoverschiebeweg ($20\ \mu\text{m}$) nicht genügt, um das ganze Interferenzmuster abzufahren. Daher muss die spektrale Bandbreite der Zwilling photons eingengt werden. Dazu wurden unterschiedliche optische Filter untersucht. Abbildungen 12 - 14 zeigen die Interferenzbereiche untersuchter Filter bei Verwendung der Fluoreszenzphotonen.

In den Experimenten wird aufgrund dieser Voruntersuchungen der Langpass-715 nm-Filter eingesetzt.

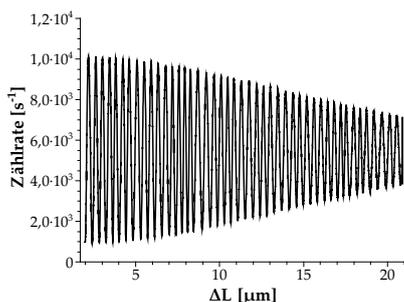


Abb. 12: Bandpass $800 \pm 5\ \text{nm}$, $l_c \approx 65\ \mu\text{m}$

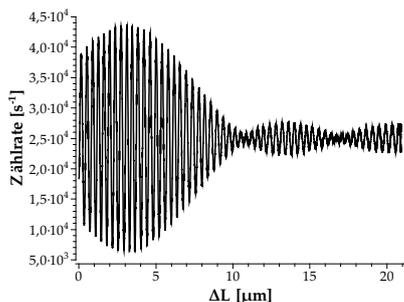


Abb. 13: Bandpass $800 \pm 20\ \text{nm}$, $l_c \approx 16\ \mu\text{m}$

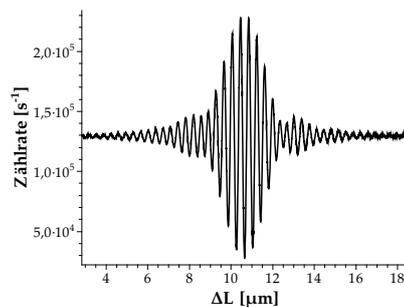


Abb. 14: Langpass $715\ \text{nm}$, $l_c \approx 3,5\ \mu\text{m}$

4. Ergebnisse

Abbildung 15 zeigt den Betrag der Einhüllenden des Interferenzmusters bei verschiedenen Armlängendifferenzen Δl_B des Interferometers Bob. Der Armlängendifferenzunterschied wurde bei Alice während des ganzen Experimentes konstant auf $\Delta l_A = 50\ \mu\text{m}$ eingestellt, der von Bob wurde mittels Stellschraube des Piezoverschiebetisches in $20\ \mu\text{m}$ Intervalle unterteilt. Diese Abschnitte wurden stets mit einer Genauigkeit von $10\ \text{nm}$ mit dem eingebauten Piezo abgerastert.

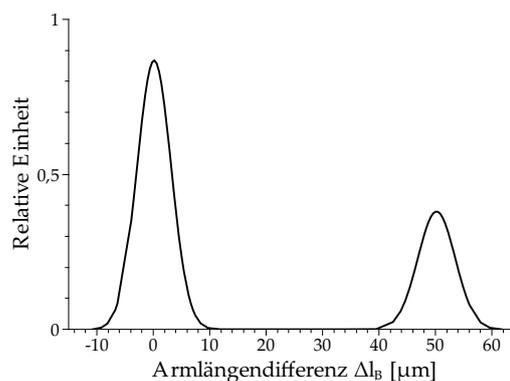


Abb. 15: Gezeigt ist Betrag der Einhüllenden des Interferenzmusters in Abhängigkeit von Δl_B , $\Delta l_A = 50\ \mu\text{m}$

Zunächst konnte die klassisch erwartete Interferenz bei $\Delta l_B = 0$ bestätigt werden. Des Weiteren konnte Interferenz festgestellt werden, falls die Armlängendifferenzen beider Interferometer gleich groß waren.

In einer weiteren Messung (Abbildung 16) wurde Δl_A auf $30\ \mu\text{m}$ voreingestellt. Bei Bob wird ein Bereich von $|\Delta l_A - \Delta l_B| \leq 10\ \mu\text{m}$ durchfahren.

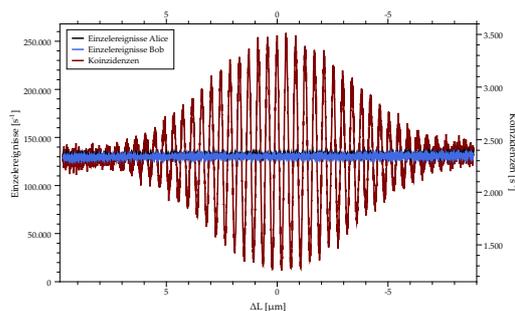


Abb. 16: $\Delta l_A = 30\ \mu\text{m}$, $\Delta l = \Delta l_A - \Delta l_B \leq l_c$

Deutlich ist das Interferenzmuster der Koinzidenzen zu sehen. Die Einzelzählraten sowohl bei Alice, als auch bei Bob zeigen hingegen keinerlei Interferenz bei den jeweils eingestellten Armlängendifferenzen Δl_B .

Zusammenfassend kann man sagen:

- Die klassisch erwartete Interferenz bei $\Delta l_{B/A} = 0 \mu\text{m}$ lässt sich verifizieren.
- Es kommt zur Zwei-Photonen-Interferenz, falls eine Armlängendifferenz von $\Delta l = \Delta l_A - \Delta l_B \approx 0 \mu\text{m}$ vorliegt.

5. Erklärung

Abbildung 17 veranschaulicht den Aufbau des Experiments, wobei die verschiedenen Armlängen gekennzeichnet sind.

Aus anderen quantenoptischen Experimenten ist bekannt, dass ein Photon alle Wege eines Interferometers durchläuft. Daher geht jedes einzelne Photon des Paares durch beide Wege des Interferometers.

Präziser ausgedrückt:

Das Photonenpaar durchläuft die Wege L_A und L_B . Falls $K_A - L_A \approx K_B - L_B$ kommt es zur Interferenz von breitbandigem Licht.

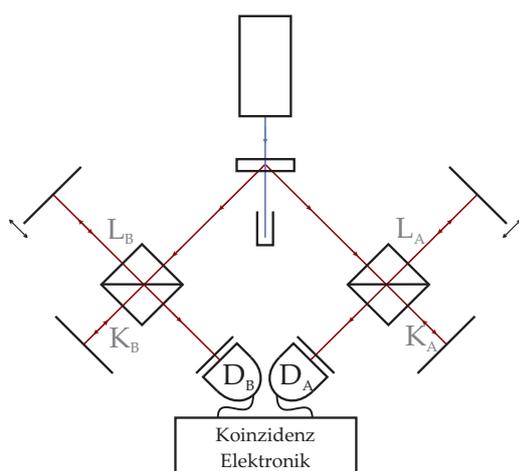


Abb. 17: Schema des Experiments

6. Interaktives Bildschirmexperiment

Das Experiment wird von uns als interaktives Bildschirmexperiment (IBE) bereitgestellt. Dieses ist mit Erklärung sowohl in deutscher als auch englischer Sprache verfügbar [6].

Abbildung 18 zeigt das verfügbare IBE. Zur Reduktion der Komplexität wurde eine feste Armlängendifferenz von $\Delta l_A = 50 \mu\text{m}$ des Interferometers bei Alice gewählt. Für das Interferometer bei Bob sind drei verschiedene Startwerte auswählbar ($\Delta l_B = 0 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ und $50 \mu\text{m}$).

Zur besseren Veranschaulichung sind die Strahlengänge einblendbar.

7. Zusammenfassung

Wir haben das erste Verschränkungsexperiment, welches ohne den Begriff der Polarisation auskommt, der

Lehre zugänglich gemacht.

Da wir durch geeignete Auswahl an Bauteilen nur auf Standardkomponenten zurückgreifen, kann dieses Experiment in dieser Form in Quantenoptiklaboren durchgeführt werden.

Das interaktive Bildschirmexperiment ermöglicht Schüler und Studenten Zugang zur digitalen Umsetzung des Versuchs.

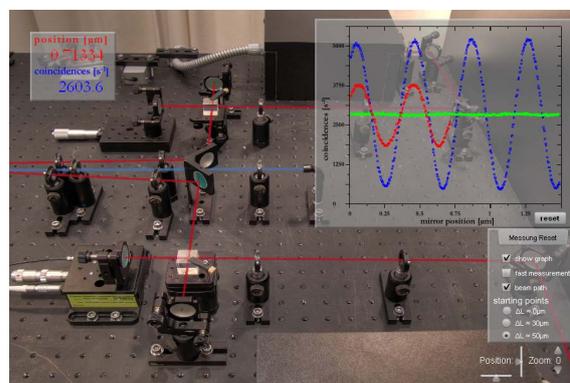


Abb. 18: Interaktives Bildschirmexperiment

8. Literatur

- H. Haken und H. C. Wolf, Molekülphysik und Quantenchemie – Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen, Springer Verlag, 5. Auflage, 2006
- Beck Lab, Whitman College, <http://people.whitman.edu/~beckmk/QM/>
- E. Galvez, Colgate University, http://departments.colgate.edu/physics/research/Photon/root/photon_quantum_mechanics.htm
- Quantum Optics and Quantum Information Laboratory, University of Rochester, <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/lukishova/QuantumOpticsLab/>
- qutools GmbH, <http://www.qutools.com>
- QuantumLab, Erlangen, <http://www.QuantumLab.de>
- E. Schrödinger, Discussion of Probability Relations between Separated Systems, Math. Proc. of Cambridge Phil. Soc., 31 (1935), Übersetzung nach Audretsch [10]
- A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, Phys. Rev. 47, 777 (1935)
- A. Zeilinger, Einsteins Spuk, Bertelsmann Verlag, 2005
- Jürgen Audretsch, Die sonderbare Welt der Quanten: Eine Einführung, Beck Verlag, 2008
- A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities, Physical Review Letters, 49 (1982)
- P. G. Kwiat, E. Waks, A. G. White, I. Appelbaum, P. H. Eberhard, Ultrabright source of

- polarization-entangled photons, Phys. Rev. A, 60, 773-776 (1999)
- [13] J. D. Franson, Bell inequality for position and time, Phys. Rev. Let., 62 (1989)
- [14] P. G. Kwiat et. al., Correlated two-photon interference in a dual-beam Michelson interferometer, Phys. Rev. A, 41 (1990)
- [15] Z. Y. Ou et. al., Observation of nonlocal Interference in Separated Photon Channels, Phys. Rev. Let. 65 (1990)
- [16] A. Strunz und J.-P. Meyn, Interferometer aufgebaut mit modernen optischen Komponenten - handlich, kostengünstig, modular, DD 18.17, DPG Frühjahrstagung Münster 2011