



# 2QA - Entanglement Demonstrator

Manual v0.0

Julian Maisch  
[julian.maisch@physics.uni-hannover.de](mailto:julian.maisch@physics.uni-hannover.de)

Ilja Gerhardt  
[ilja.gerhardt@physics.uni-hannover.de](mailto:ilja.gerhardt@physics.uni-hannover.de)

# Einleitung

## Der sachliche Hintergrund

### Grundelemente der Quantenmechanik

Ein *Photon* ist die kleinste Energieeinheit des Lichts. Man kann es auch als „Lichtteilchen“ bezeichnen. Durch Wellenlänge  $\lambda$  bzw. Frequenz  $\nu$  ist der Energiewert des Photons bestimmt:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot \nu}{\lambda} \quad (1)$$

Dieser Teilchencharakter zeigt sich beim Vorgang der Messung. Der Detektorklick ist der Nachweis für das Auftreffen eines Photons. Die Vorhersage dieser Detektorklicks ist allerdings nur statistisch möglich.

### Messprozess am Beispiel der Polarisation von Photonen

### Was ist Verschränkung?

Verschränkung ist ein grundlegendes quantenmechanisches Konzept. Hier befinden wir uns im Bereich der Quantenoptik, d.h. die quantenmechanischen Phänomene beziehen sich auf einzelne Photonen.

Als einleitendes Grundexperiment lässt sich ein Photon vorstellen, das auf einen Strahlteiler trifft

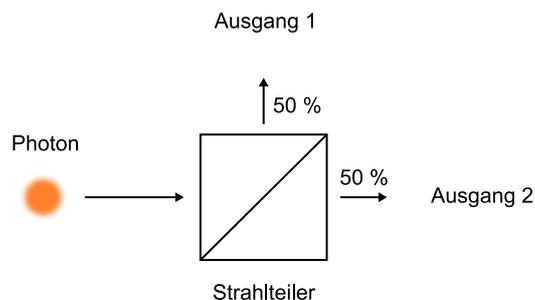


Abbildung 1: Ein Photon trifft auf einen Strahlteiler

Ein Strahlteiler hat die Eigenschaft, dass ein Photon, das auf einen Eingang trifft zu 50% den einen Ausgang und zu 50% den anderen Ausgang wieder austritt. Nach dem quantenmechanischen Grundprinzip der Superposition ist allerdings zunächst nicht festzustellen welchen der beiden möglichen Wege das einzelne Photon geht. „Es geht beide Wege gleichzeitig“ bzw. in den Worten der Quantenmechanik befindet es sich in einem Superpositionszustand. Werden nun hinter beiden Ausgängen entsprechende Messgeräte (Detektoren für Einzelphotonen) aufgestellt, wird es immer ein eindeutiges Messergebnis an einem oder dem anderen Detektor geben. Die Messergebnisse werden allerdings statistisch verteilt sein und können einzeln betrachtet nicht eindeutig vorhergesagt werden. Das ist das Messprinzip der Quantenmechanik.

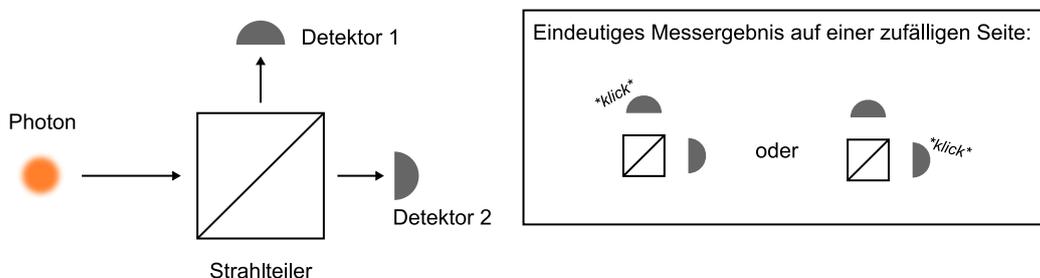


Abbildung 2: Detektion nach dem Strahlteiler

Mit diesem Grundexperiment ist die Verschränkung noch nicht zu erkennen. Dafür sind zwei Photonen notwendig und man kann eine bestimmte Eigenschaft dieser Photonen betrachten. Hier wird das die Polarisation aller einzelnen Photonen sein, was zur sog. Polarisations-Verschränkung führt (eines der bekanntesten Beispiele).

Zur näheren Erklärung der Polarisationsverschränkung wird das Grundexperiment von oben verändert. Nun sollen zwei Photonen gleichzeitig auf den Strahlteiler treffen und beide haben eine klar vorgegebene Polarisation. Als Beispiel hat eines horizontale Polarisation (H) und eines vertikale (V).

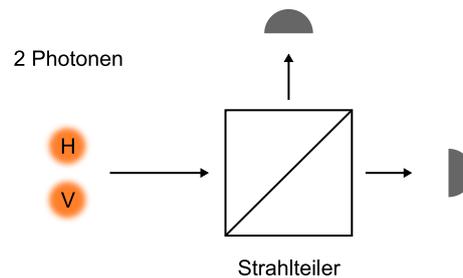


Abbildung 3: Zwei polarisierte Photonen treffen auf einen Strahlteiler

Die Detektoren können durch entsprechende Filter so eingestellt werden, dass sie eine bestimmte Polarisationsrichtung nachweisen.

Nach dem Auftreffen beider Photonen gehen diese jeweils in beide Ausgangswege (Superposition!), man weiß nicht, welches Photon welchen Weg nimmt, und es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, welches Photon an welchem Detektor nachgewiesen werden kann. Hier sollen jetzt die Fälle betrachtet werden, wenn an beiden Detektoren genau ein Photon nachgewiesen wird. Wählt man Detektoren ohne Polarisationsfilter (wie oben) ist zunächst vollständig unklar, welches Photon auf welchen Detektor getroffen ist.

Nun werden die Polarisationsfilter mit einbezogen (Funktionsweise siehe oben). Angenommen vor beide Detektoren wird ein Filter gestellt, der V-Photonen durchlässt, aber H-Photonen vollständig blockiert. Nun wird immer nur noch ein Detektor ein Photon anzeigen, weil es immernoch gesichert ist, dass ein H-Photon dabei ist, das so nicht nachgewiesen werden kann.

Davon ausgehend wird nun nur vor einem Detektor ein V-Filter gestellt. Wenn nun an beiden Detektoren gleichzeitig

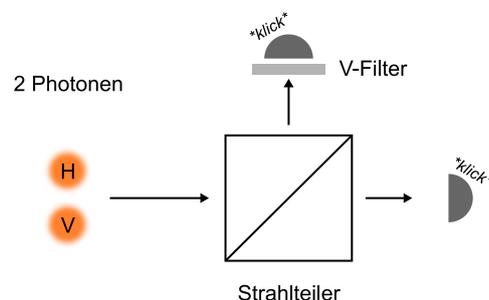


Abbildung 4: Zwei polarisierte Photonen (H und V) treffen auf einen Strahlteiler. Detektion mit einem V-Filter.

ein Photonnachweis passiert, ist klar, dass an Detektor 1 ein V-Photon nachgewiesen wurde. Damit ist automatisch klar, dass an Detektor 2 ein H-Photon nachgewiesen wurde (obwohl dort kein Filter steht). Wird dort zusätzlich ein H-Filter platziert, werden die entsprechenden Messergebnisse nicht verändert. Das ist nicht überraschend! Dieses Ausschlussprinzip können wir auch mit klassischen Prinzipien nachvollziehen.

Das Spannende in der Quantenmechanik und das Besondere an der Verschränkung ist erst mit einer veränderten Einstellung zu erkennen. Vor einem Detektor wird eine 45°-Einstellung gewählt (D/A-Einstellung, siehe oben). Beispielsweise wird D gewählt. Falls an beiden Detektoren ein Photon detektiert wird, was ist nun über die Polarisation bekannt? Und welche Filtereinstellung am zweiten Detektor muss gewählt werden, um die Messereignisse im Vergleich nicht zu verringern? In der (klassischen) „HV-Denkweise“ ist das zunächst nicht zu beantworten. Das Ausschlussprinzip, wie oben, funktioniert nicht, da die Detektion von H und V nach einer diagonalen Filtereinstellung zufällig verteilt ist (siehe oben). D.h. es ist keine Information über H und V gewonnen werden.

In der Quantenmechanik hilft aber wieder die Überlagerungsdenkweise. Und zwar kann man sich ein V-Photon oder ein H-Photon auch jeweils als Überlagerung von D und A vorstellen (siehe oben). Die Beschreibungen sind gleichwertig und das Besondere an der Quantenmechanik. In dieser quantenmechanischen Denkweise lässt auch in dem jetzigen Fall wieder das Ausschlussprinzip anwenden. Wird an dem einen Detektor ein D-Photon nachgewiesen, muss am anderen Detektor ein A-Photon gewesen sein. Und das obwohl ursprünglich ein H- und ein V-Photon hineingeschickt wurden.

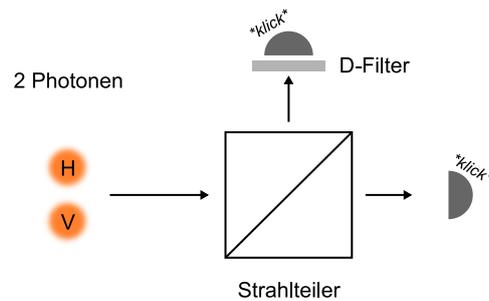


Abbildung 5: Zwei polarisierte Photonen (H und V) treffen auf einen Strahlteiler. Detektion mit einem D-Filter.

## Der Experimentelle Aufbau

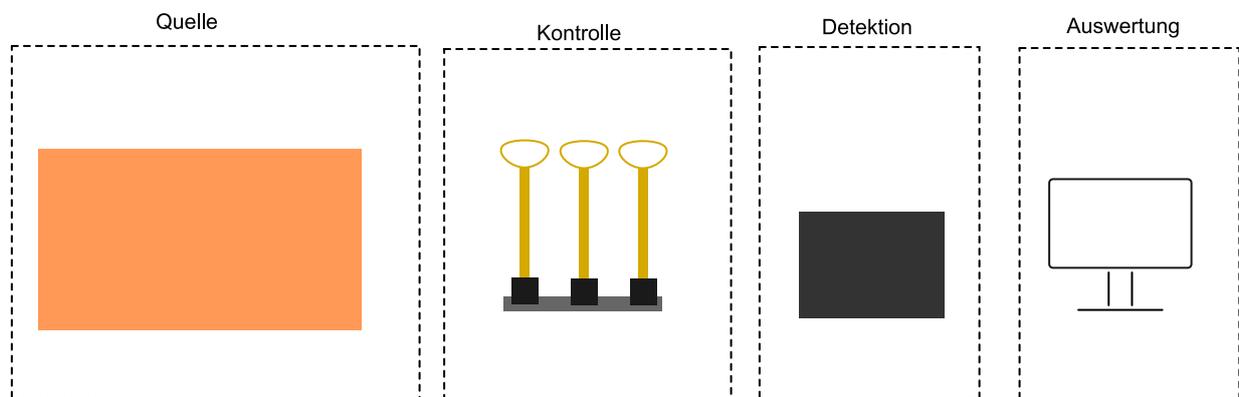


Abbildung 6: Setup overview: Hier soll ein Foto hin, in dem die Teile markiert sind.

Der experimentelle Aufbau besteht aus vier Elementen: Quellen-, Kontroll- und Detektions- und Auswerte-Einheit.

### Die Quelle

Die vorliegende Quelle dient zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare. Kernstück ist der nicht-lineare Kristall - hier das Material Beta-Bariumborat (BBO). Der Kristall ermöglicht den nicht-linearen Prozess der spontanen parametrischen Fluoreszenz (spontaneous parametric-downconversion (SPDC)). Die Details hierzu werden in Abschnitt ?? beschrieben. Zusammengefasst werden im Kristall eintreffenden Photonen des Lasers (Wellenlänge  $\lambda = 405 \text{ nm}$ ) in jeweils zwei Photonen der doppelten Wellenlänge umgewandelt.

### Die Kontrolleinheit

Die Kontrolleinheit besteht aus den drei goldenen Hebeln (vgl. Abb. ??). Durch die Hebelbewegung wird Polarisation der Photonen kontrolliert.

### Die Detektionseinheit

In der Detektionseinheit werden die Photonen nachgewiesen. Um das Eintreffen eines einzelnen Photons nachzuweisen ist ein Die Detektion ist so aufgebaut, dass gleichzeitig vier verschiedene Polarisationen unterschieden werden können. Die Elemente sind in Abb. ?? gezeigt. Insgesamt sind 8 Detektoren eingebaut. Dabei handelt es sich um sog. Lawinen-Photo-Detektoren (avalanche photodiode (APD)), die jeweils einzelne Photonen nachweisen können. Vor den Detektoren sind zwei verschiedene Arten von Strahlteilern (beam splitter (BS)) platziert.

### Die Auswerteinheit

Die Detektorsignale werden von einem Time Tagger erfasst und anschließend in der Software verarbeitet. Für die Soft

# Der experimentelle Aufbau im Detail

*Will be inserted*

# Was ist für Lehrkräfte wichtig?

## Zielgruppe

Das Exponat kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden: die interessierte Öffentlichkeit (z.B. Mitmach-Ausstellung, Messe, . . . ), Schulklassen (thematisch gymnasiale Oberstufe) oder auch als Praktikumsversuch an der Universität. Je nach gewählter Zielgruppe wird das Exponat unterschiedlich verwendet.

Die Zielgruppen unterscheiden sich sowohl im vorausgesetzten Vorwissen (siehe unten) und gleichzeitig im Umgang mit dem Exponat. Der gamifizierte Ansatz erlaubt einen Umgang mit dem Exponat ohne besonderes Vorwissen. Obwohl ein tatsächliches Experiment der Quantenphysik bedient wird, stehen die Details nicht im Vordergrund. Stattdessen wird auf einen spielerischen Umgang gesetzt und insbesondere der Spaß steht im Vordergrund. Der Umgang mit einem fortgeschrittenen Experiment der Quantenphysik wird erfahrbar gemacht.

Im nächsten Schritt können anhand des Exponats die zugehörigen physikalischen Konzepte erläutert und diskutiert werden. Bei Verwendung im Rahmen bspw. einer Messe, kann dies im direkten Austausch passieren. Für einen Lehrkontext können entsprechende Lerneinheiten vorbereitet werden (siehe ???).

Inhaltlich zentral ist das Konzept der Verschränkung (siehe oben).

## Vorwissen

Für die interessierte Öffentlichkeit:

- kein besonderes Vorwissen

Für eine Schulklasse:

- Licht (Energie, Polarisation)
- Quantenphysik (insb. Superposition)
- Einzelphotonen
- Detektion von Licht/einzelne Photonen
- Funktionsweise eines Lasers

Für universitäre Zielgruppe (bspw. Praktikum):

- Grundlagen der Quantenphysik
- Verschränkte Zustände
- Bell'sche Ungleichung, CHSH-Ungleichung
- SPDC

## Verknüpfte Themenfelder

- Laser
- SPDC (Umwandlung von Photonen)
  - Energieerhaltung
- Messprozess
  - Quantenphysik: Kollaps der Wellenfunktion
  - Wie funktioniert ein Einzelphotonen-Detektor
- Korrelationsmessung
  - Was sind Koinzidenzen?
  - Messgenauigkeit
- Unterschied klassische vs. quantenmechanische Korrelation

- bspw. Bertlmann Socken
- Was ist ein Schlupfloch (loophole) im qm Fall
- Welche Grundannahmen sind notwendig?
- Philosophische Konzepte (z.B. Nicht-Lokalität)

# Verschränkungs-Challenges

## Bell-Challenge

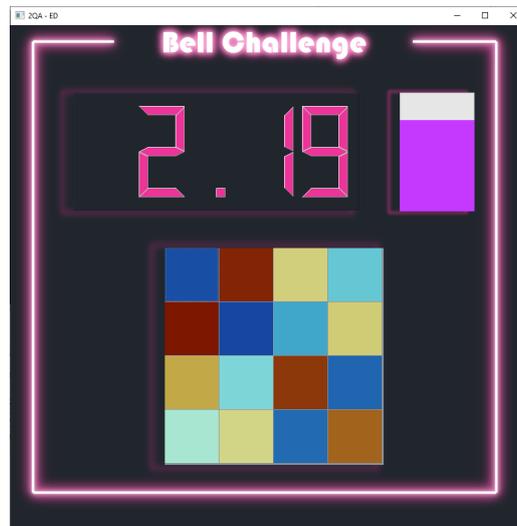


Abbildung 7: Bell Challenge

## Polytop-Challenge

*Coming soon*

## Wie baue ich den 2QA-Verschränkungs-demonstrator selbst?

*Coming soon*

## Abkürzungen

**APD** avalanche photodiode

**BS** beam splitter

**BBO** Beta-Bariumborat

**SPDC** spontaneous parametric-downconversion