



Lokalität und Realität, verschränkte Photonen – Version I

Konzeptionsgruppe Physik 2023

J. Küblbeck [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Verschränkte Photonen (LF/BF)

Der Physik Nobelpreis 2022

wurde vergeben für

„Experimente mit verschränkten Photonen,
Nachweise der Verletzung der Bell'schen Ungleichung und
Pionierarbeiten auf dem Gebiet der Quanteninformation“

Bezug zum Bildungsplan

Die Schülerinnen und Schüler können

(8) erläutern, dass messbare Eigenschaften von Objekten der klassischen Physik bereits vor ihrer Messung real vorliegen und dass der Wert der Messung unabhängig davon ist, ob überhaupt gemessen wurde. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für *Quantenobjekte* im Allgemeinen nicht gilt (**Realität**) zum Beispiel bei (**verschränkten Photonen**)

LF

(9) erläutern, dass räumlich getrennte Objekte eines zusammengesetzten Systems aus Objekten der Klassischen Physik alle ihre messbaren Eigenschaften unabhängig voneinander besitzen. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für *Quantenobjekte* im Allgemeinen nicht gilt (**Lokalität**, zum Beispiel bei (**verschränkten Photonen**))

LF

Identischer Inhalt in LF und BF

Bezug zum Bildungsplan

Die Schülerinnen und Schüler können

(7) erläutern, dass messbare Eigenschaften von Objekten der klassischen Physik bereits vor ihrer Messung real vorliegen und dass der Wert der Messung unabhängig davon ist, ob überhaupt gemessen wurde. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für *Quantenobjekte* im Allgemeinen nicht gilt (Realität) zum Beispiel bei (verschränkten Photonen)

BF

(8) erläutern, dass räumlich getrennte Objekte eines zusammengesetzten Systems aus Objekten der klassischen Physik alle ihre messbaren Eigenschaften unabhängig voneinander besitzen. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für *Quantenobjekte* im Allgemeinen nicht gilt (Lokalität) zum Beispiel bei (verschränkten Photonen)

BF

Identischer Inhalt in LF und BF

Verschränkte Photonen (LF/BF)

1. Grundlage: Polarisierung von Licht und von Photonen
2. Das Phänomen:
 - a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?
 - b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?
 - c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?
3. Lokalität \leftrightarrow Nichtlokalität
4. Realität \leftrightarrow Unbestimmtheit

1. Grundlage: Polarisation

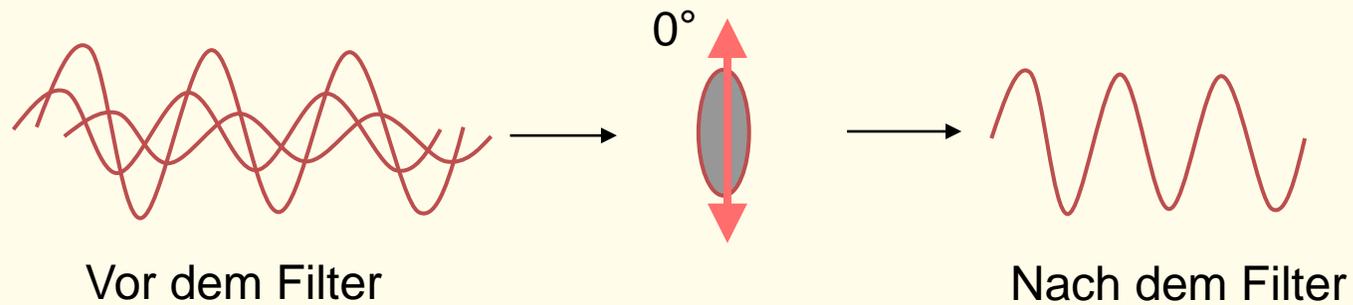
a) Bei Licht

b) Bei Photonen

1a) Polarisation bei Licht

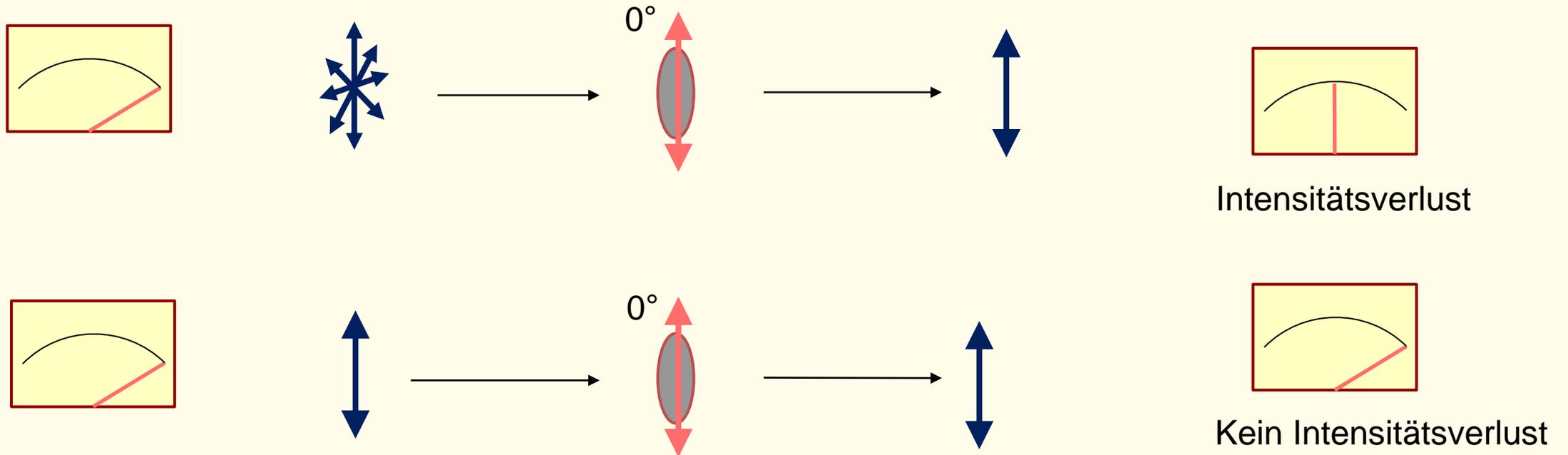
1a) Polarisation bei Licht

- Unpolarisiertes Licht trifft auf ein 0° -Polarisationsfilter:



1a) Polarisation bei Licht

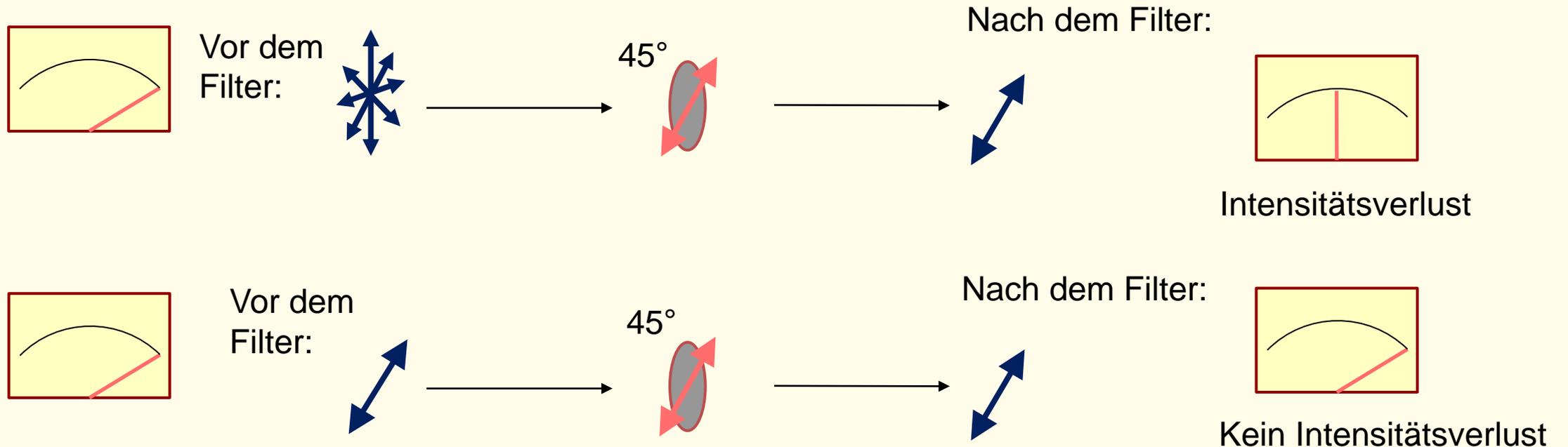
- Unpolarisiertes Licht trifft auf ein 0° -Polarisationsfilter:



Vorher unpolarisiertes Licht hat nach dem Filter Polarisation 0° .
Es wird von einem weiterem 0° -Filter zu 100 % durchgelassen.

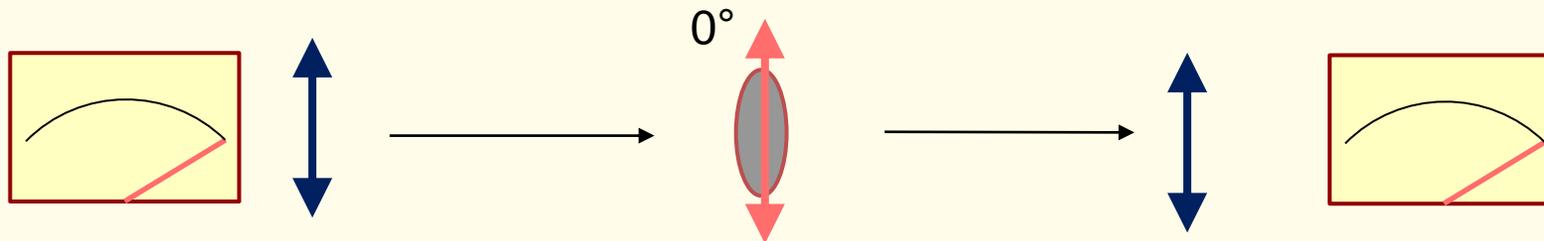
1a) Polarisation bei Licht

- Unpolarisiertes Licht trifft auf 45°-Polarisationsfilter:

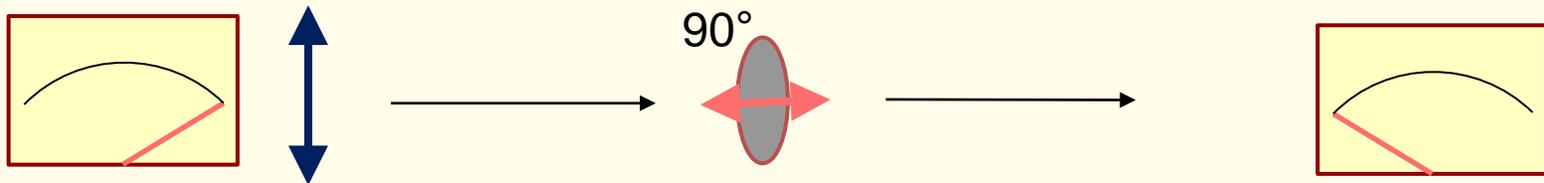


Vorher unpolarisiertes Licht hat nach dem 45°-Filter Polarisation 45°. Es wird von einem weiterem 45°-Filter zu 100 % durchgelassen.

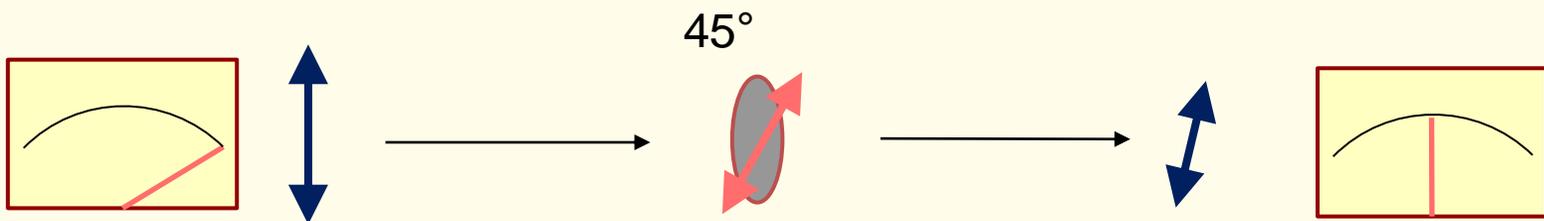
0°-Licht trifft auf verschiedene Polarisationsfilter:



0°-Licht wird vom 0°-Filter zu 100 % durchgelassen.



0°-Licht wird vom 90°-Filter vollständig blockiert.

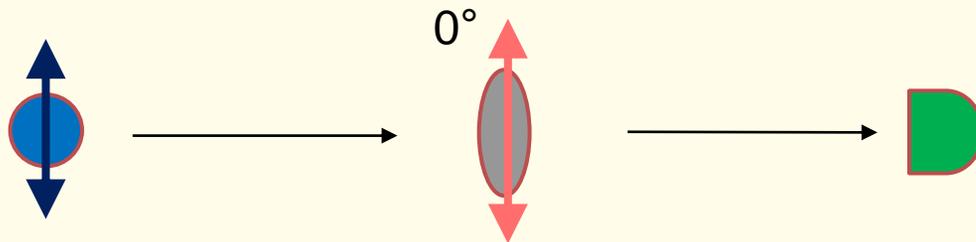


0°-Licht wird vom 45° Filter zu 50 % durchgelassen.

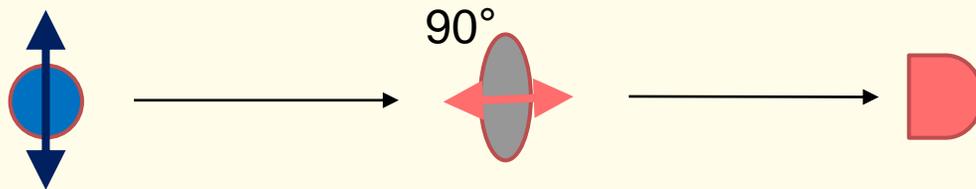
Anschließend ist es 45°-Licht, das zu 100 % durch ein 45°-Filter geht.

1b) Polarisation bei Einzelphotonen

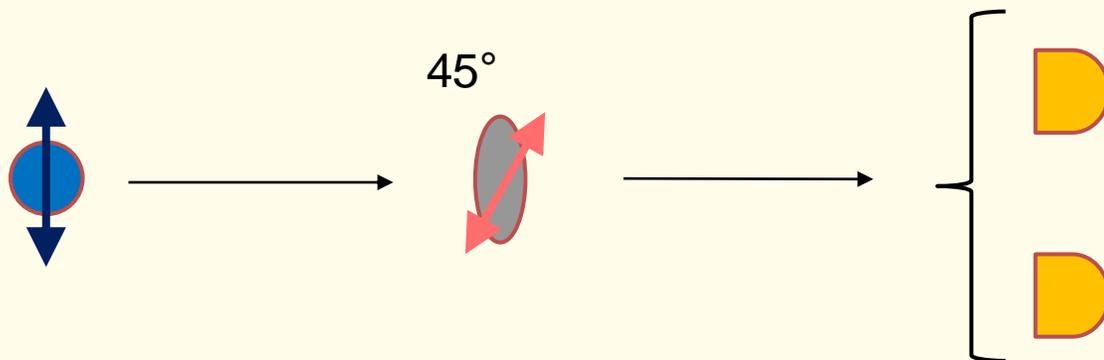
Ein 0° -Photon trifft auf verschiedene Polarisationsfilter:



0° -Photon wird mit 100 %
Wahrscheinlichkeit
durchgelassen.

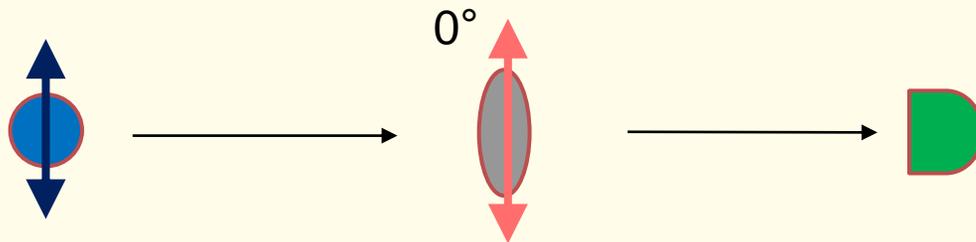


0° -Photon wird mit 100 %
Wahrscheinlichkeit
absorbiert.

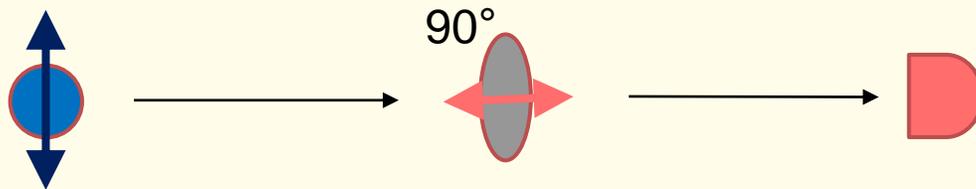


0° -Photon wird mit 50 %
durchgelassen...
... und mit 50 %
absorbiert.

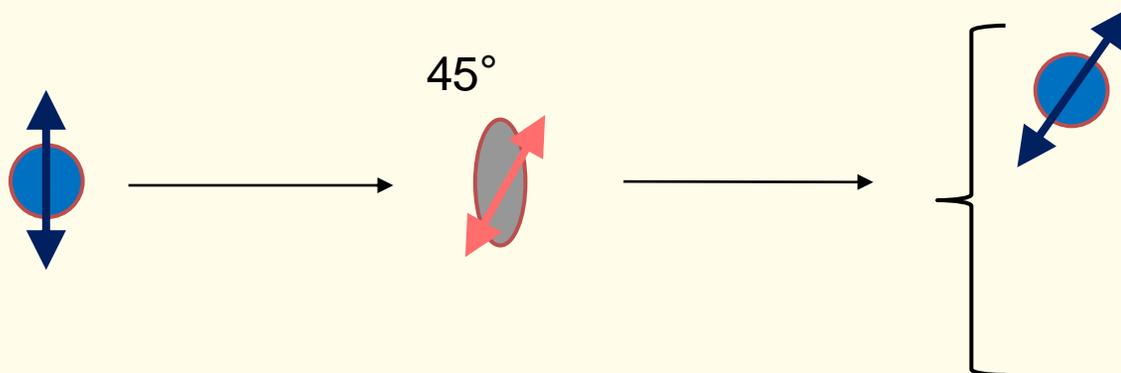
Ein 0° -Photon trifft auf verschiedene Polarisationsfilter:



0° -Photon wird mit 100 % Wahrscheinlichkeit durchgelassen.

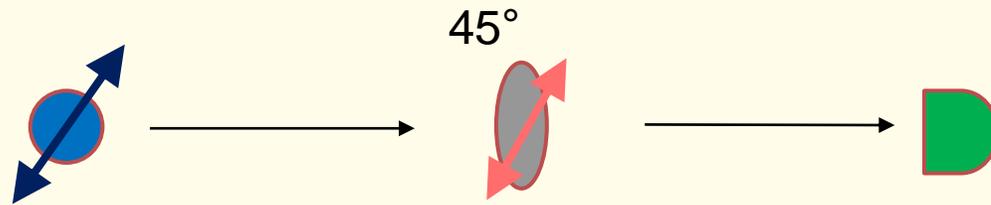


0° -Photon wird mit 100 % Wahrscheinlichkeit absorbiert.

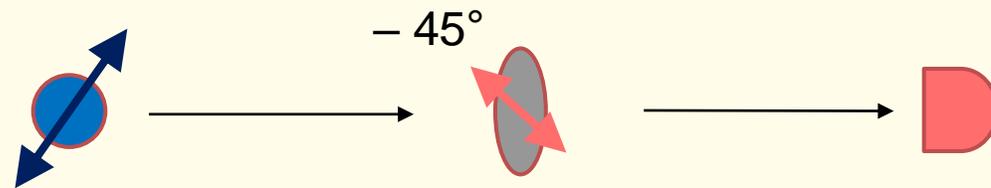


Wenn es durchgelassen wird, ist es anschließend ein 45° -Photon.

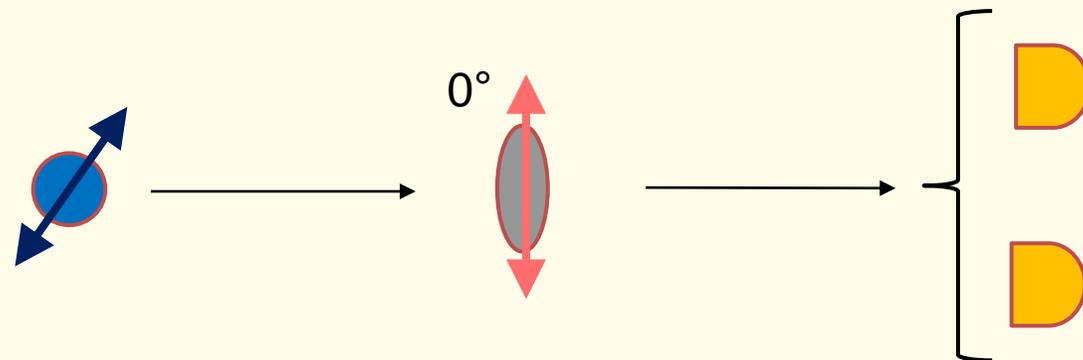
Ein 45° -Photon trifft auf verschiedene Polarisationsfilter:



45° -Photon wird mit 100 %
Wahrscheinlichkeit
durchgelassen.



45° -Photon wird mit 100 %
Wahrscheinlichkeit
absorbiert.



45° -Photon wird mit 50 %
durchgelassen...
... und mit 50 %
absorbiert.

1b) Polarisation bei Einzelphotonen

Was ist ein 0° -Photon?

Ein Photon, das mit 100 % Wahrscheinlichkeit von einem 0° -Filter durchgelassen wird.

Wie erzeugt man ein 0° -Photon?

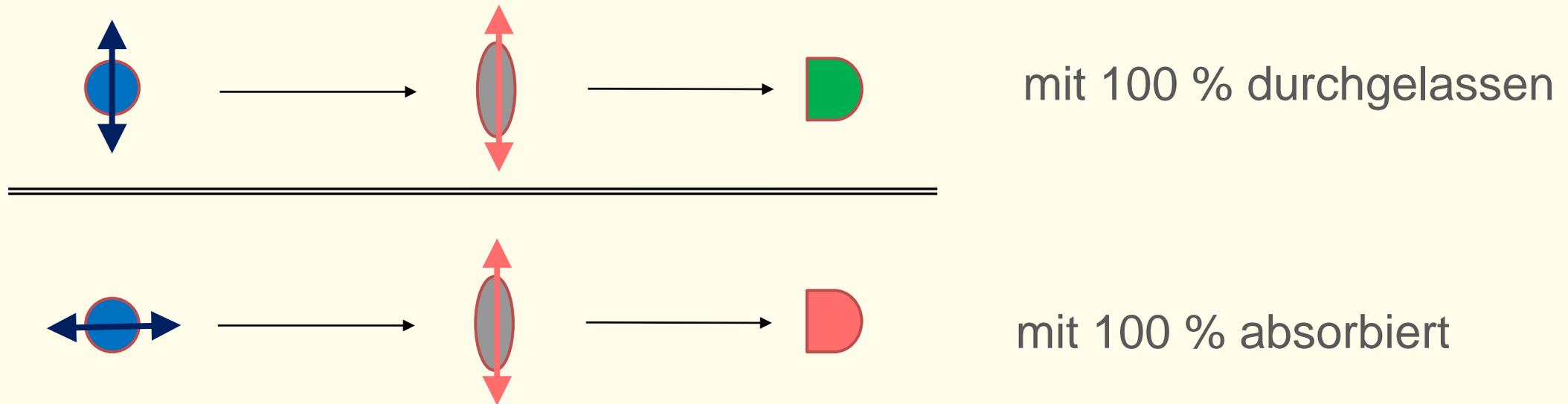
Indem man ein beliebiges Photon auf ein 0° -Filter schickt und hofft, dass es durchkommt.

Was bedeutet, dass die Polarisation eines Photons unbestimmt ist?

1b) Polarisation bei Einzelphotonen

Was bedeutet, dass die Polarisation eines Photons unbestimmt ist?

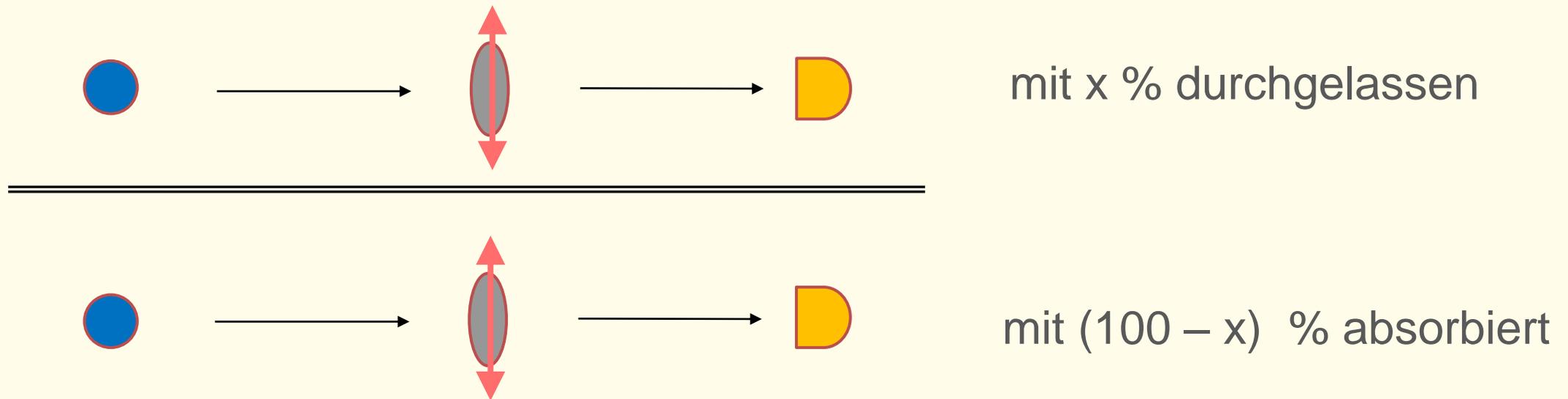
Die Polarisation eines Photons kann bezüglich einer Polarisationsrichtung bestimmt sein. Dann wird es mit 100 % Wahrscheinlichkeit durchgelassen oder mit 100 % absorbiert.



1b) Polarisation bei Einzelphotonen

Was bedeutet, dass die Polarisation eines Photons unbestimmt ist?

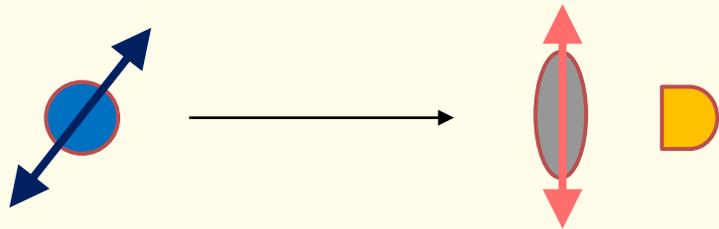
Die Polarisation eines Photons kann bezüglich einer Polarisationsrichtung unbestimmt sein.



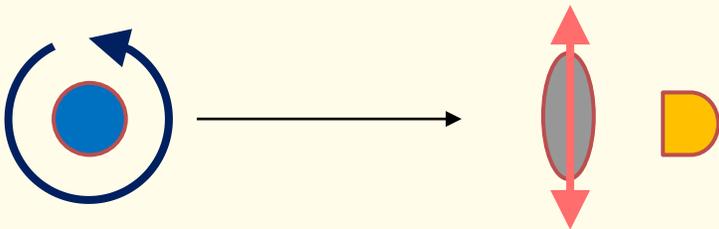
1b) Polarisation bei Einzelphotonen

Zwei Beispiele:

- Ein 45° -Photon ist bezüglich 0° in der Polarisation unbestimmt.



- Ein zirkular polarisiertes Photon ist bezüglich allen linearen Polarisationen unbestimmt.



Für beide Beispiele gilt:

Das Photon wird in beiden Fällen mit 50 % Wahrscheinlichkeit durchgelassen (1) und mit 50 % Wahrscheinlichkeit absorbiert (0).

Wiederholte Messungen der Polarisation führen zu einer Folge von Zufallszahlen:
1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0

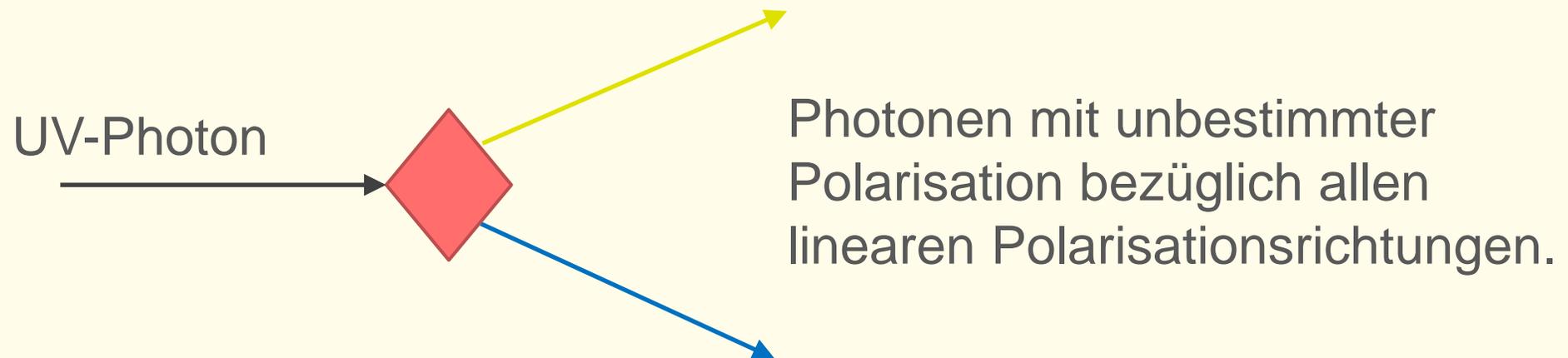
Verschränkte Photonen (LF/BF)

1. Grundlage: Polarisierung von Licht und von Photonen
2. Das Phänomen:
 - a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?
 - b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?
 - c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?
3. Lokalität \leftrightarrow Nichtlokalität
4. Realität \leftrightarrow Unbestimmtheit

2a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?

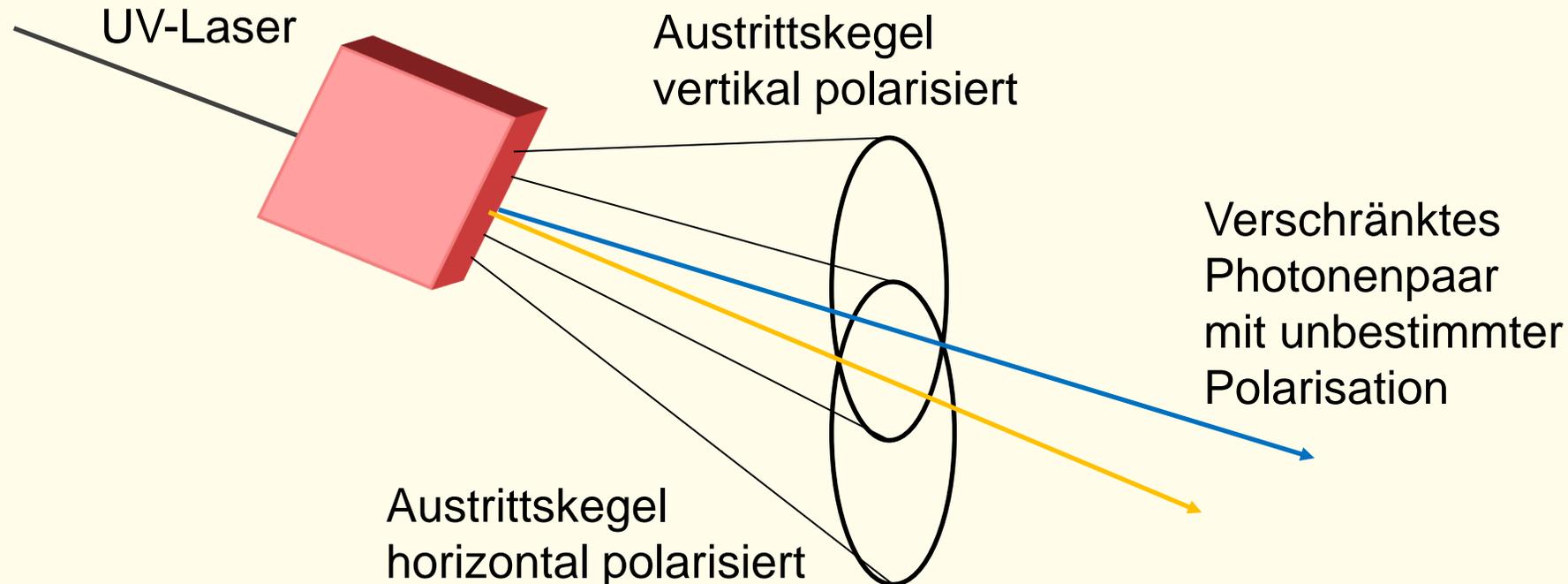
Möglichkeit 1: Mit einem nichtlinearen Kristall (z.B. Bariumborat)

Schema:



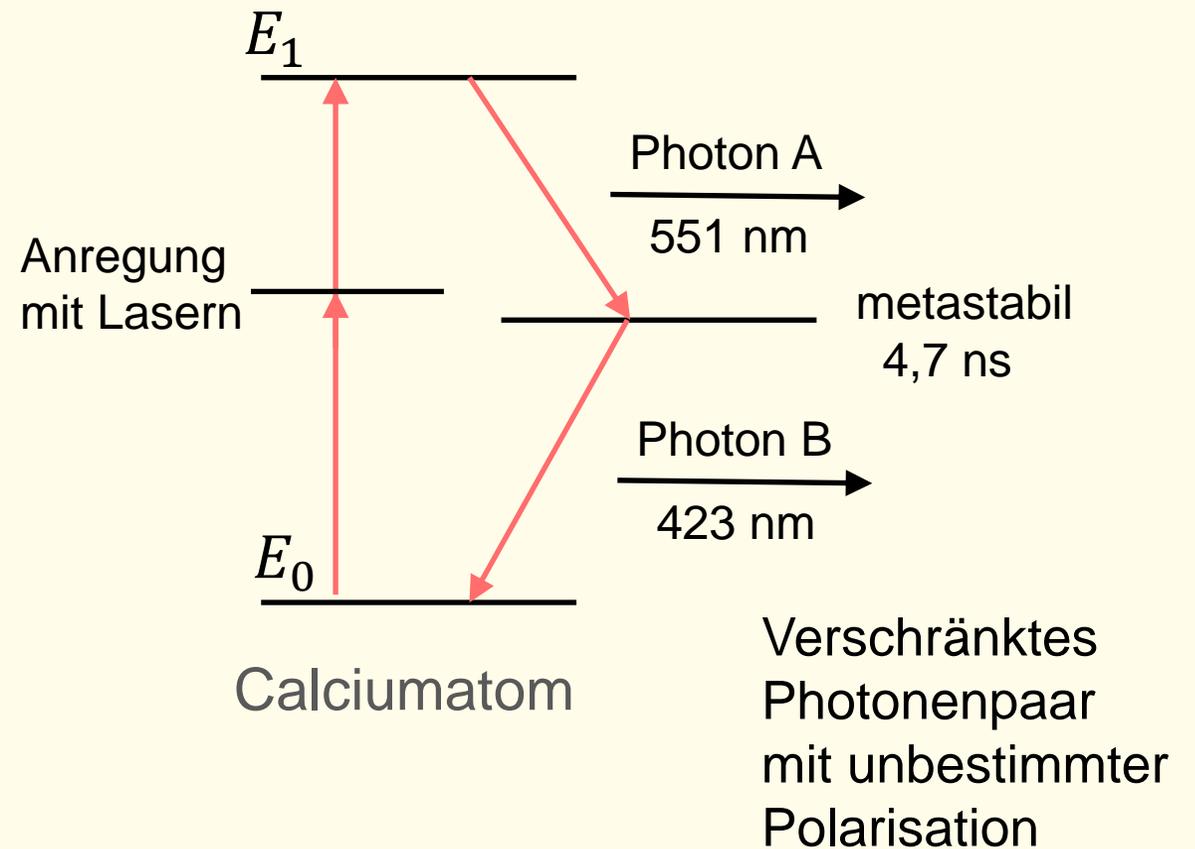
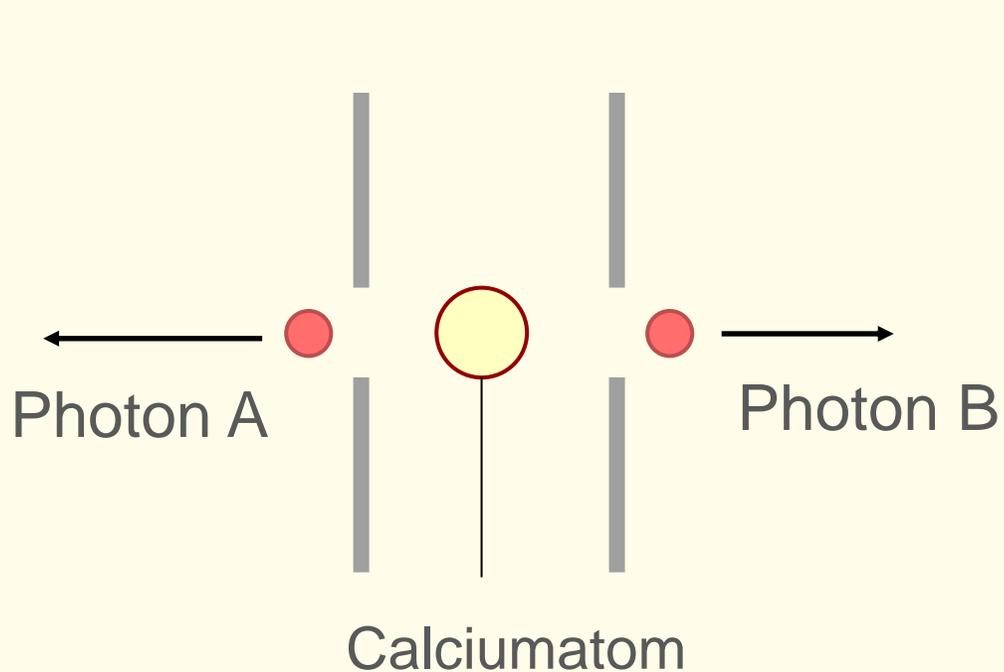
2a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?

Möglichkeit 1: Mit einem nichtlinearen Kristall (z.B. Bariumborat)



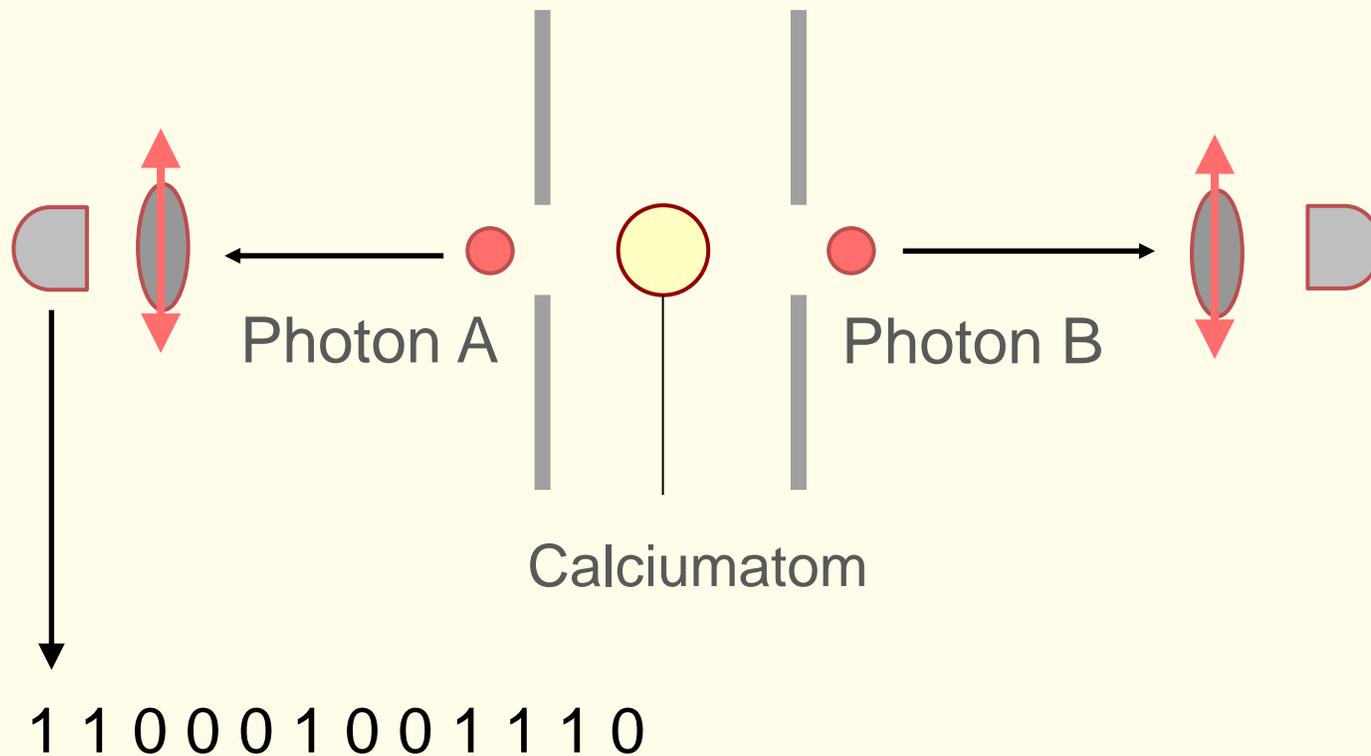
2a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?

Möglichkeit 2: Kaskadenprozess

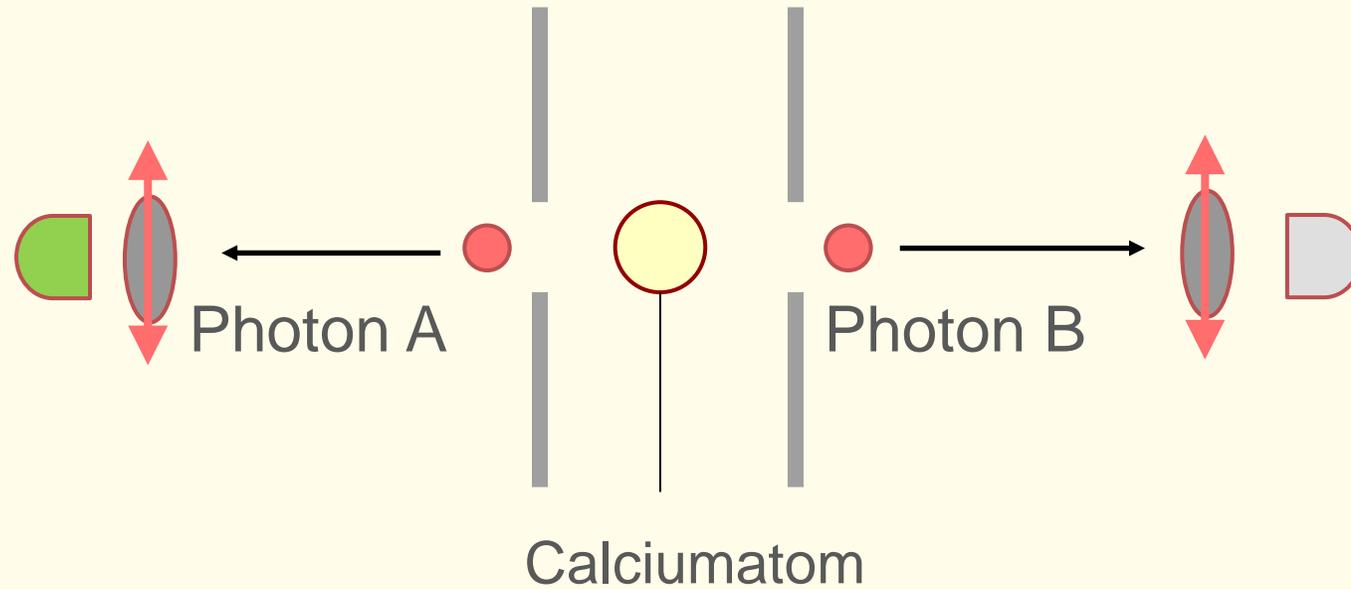


2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?

Die Messungen an jedem Filter führen zu einer Folge von Zufallszahlen.

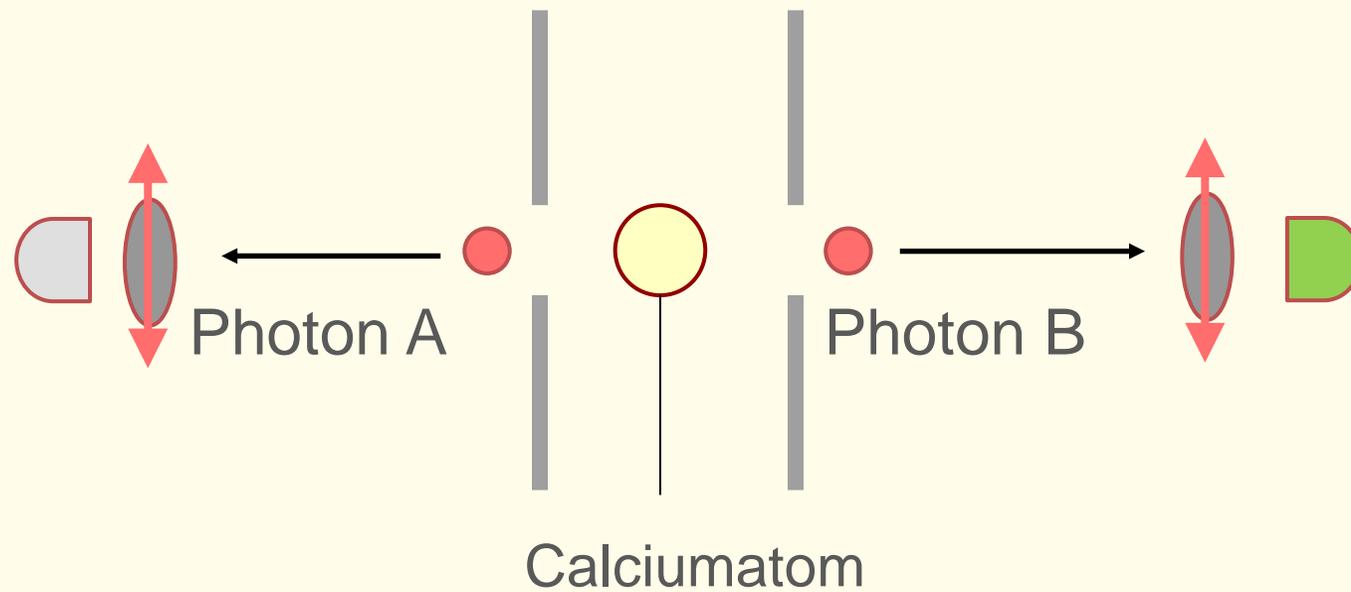


2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?



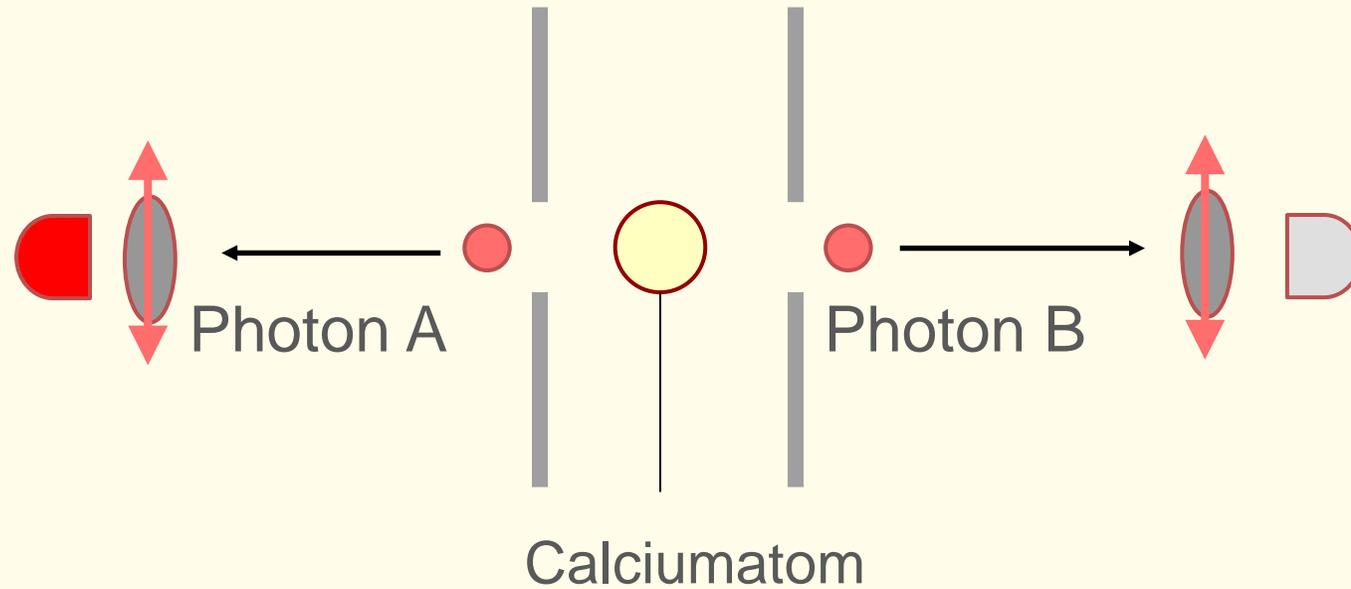
Photon	
A	B
1	

2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?



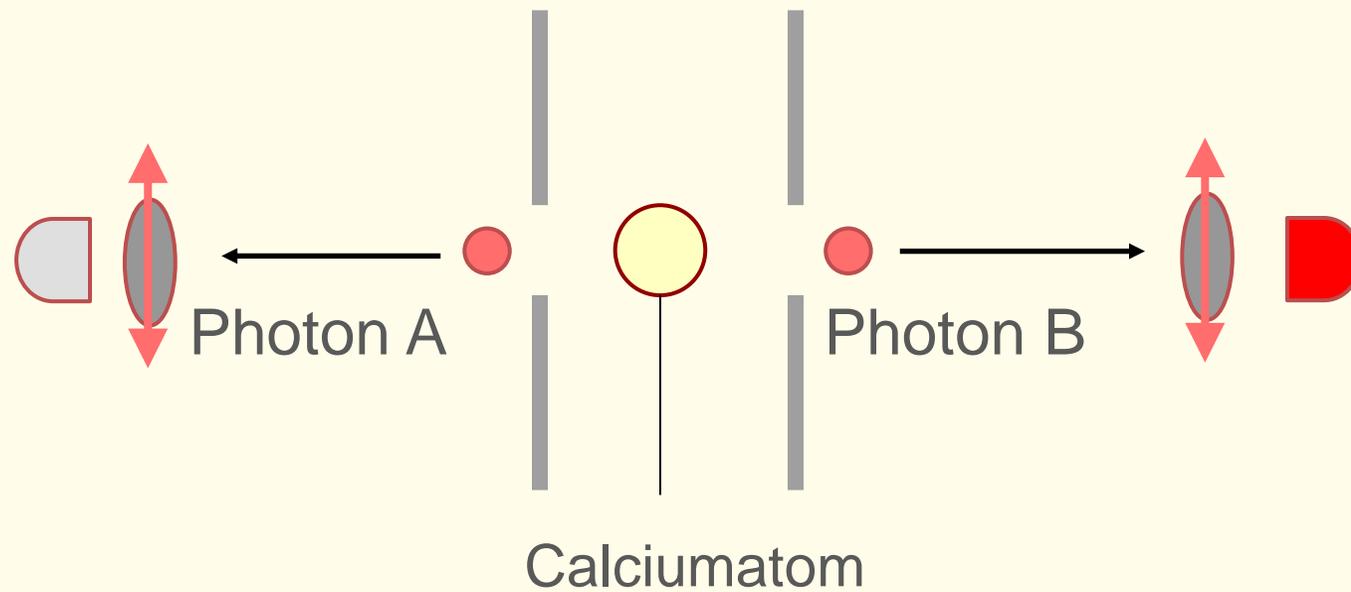
Photon	
A	B
1	1

2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?



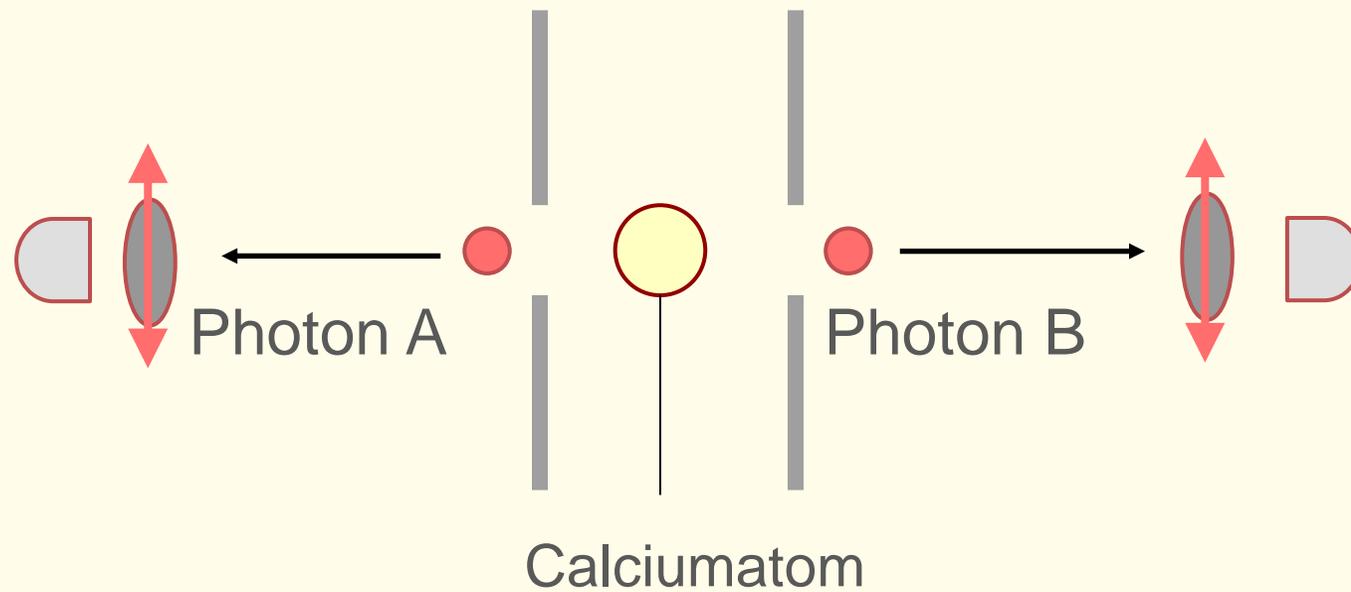
Photon	
A	B
1	1
0	

2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?



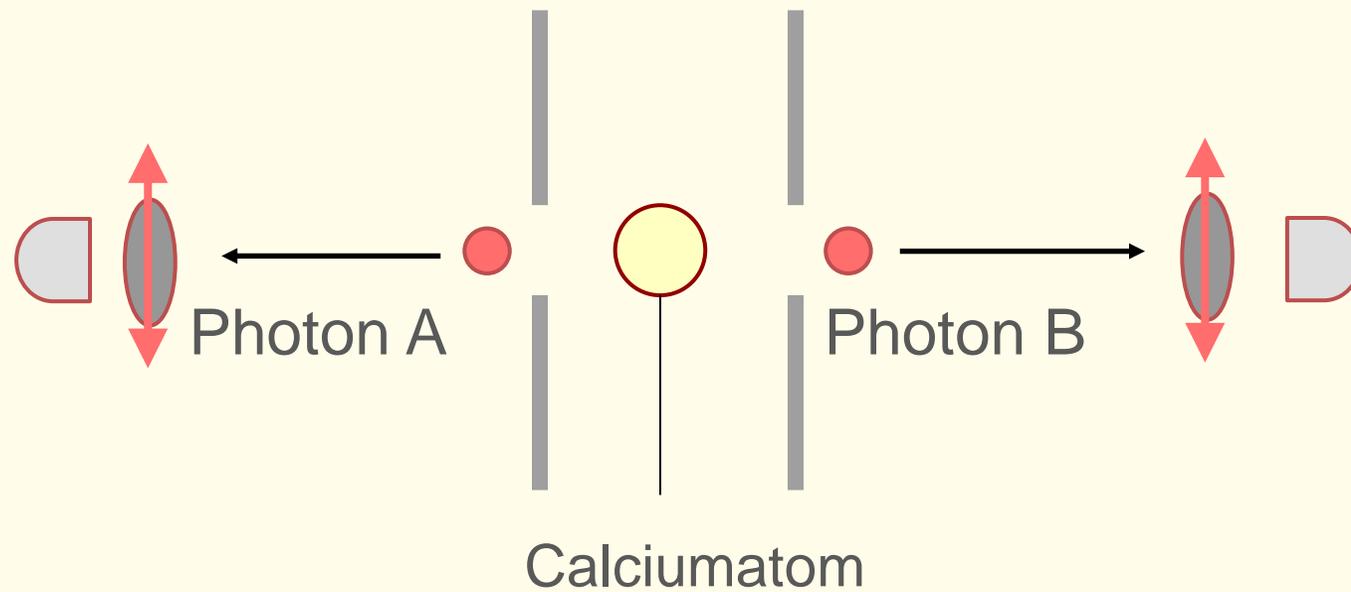
Photon	
A	B
1	1
0	0

2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?



Photon	
A	B
1	1
0	0
0	0
0	0
1	1
0	0
1	1
1	1

2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?



Korrelation

Photon	
A	B
1	1
0	0
0	0
0	0
1	1
0	0
1	1
1	1

2b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?

Korrelation

Verschränkte Photonen I	
A	B
1	1
0	0
0	0
0	0
1	1
0	0
0	0
0	0

Antikorrelation

Verschränkte Photonen II	
A	B
1	0
0	1
0	1
0	1
1	0
0	1
0	1
0	1

Keine Korrelation

Nicht verschränkte Photonen	
A	B
1	0
0	0
0	1
0	1
1	1
0	0
0	1
0	1

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?

Klassische Beschreibungsversuche:

- mit Münzen und Handschuhen

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?



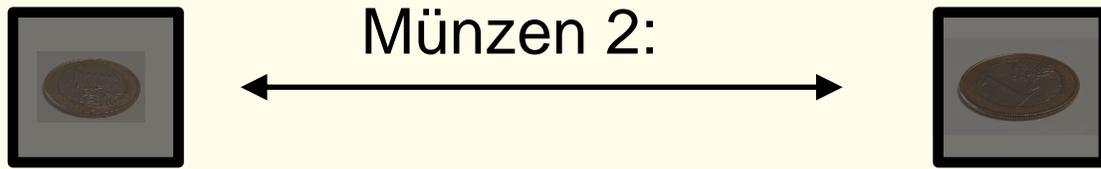
Anton und Berta bewegen zwei Münzen, voneinander weg, dann wirft Anton seine Münze und Berta ihre Münze.

Problem: Diese Analogie kann die Korrelation nicht beschreiben.

Keine Korrelation

Zwei Münzen	
A	B
1	0
0	0
0	1
0	1
1	1
0	0
0	1
0	1

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?



Anton und Berta nehmen von einem Tisch zwei Kästchen, in jedem befindet sich eine Münze. Sie bewegen die Kästchen voneinander weg und öffnen sie dann.



Korrelation erklärbar durch präparierte Kästchen.
„Verborgene Parameter“

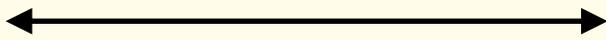
Korrelation

Münzen verdeckt	
A	B
1	1
0	0
0	0
0	0
1	1
0	0
1	1
1	1

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?



Handschuhe:



Anton und Berta nehmen von einem Paar je einen Handschuh und stecken ihn ein, ohne ihn anzuschauen. Sie bewegen sich auseinander und schauen dann nach.

Korrelation erklärt! (Eigentlich Antikorrelation)

Problem: Die Handschuhe hatten die Eigenschaft schon vor dem Nachschauen.

Antikorrelation

Handschuhe	
A	B
L	R
R	L
R	L
R	L
L	R
R	L
R	L
R	L

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?

Können die Photonen die Polarisations-eigenschaft nicht (wie die Handschuhe oder wie die präparierten Münzen) vor der Messung schon haben?

Nein!

Vor der Messung ist die Polarisation der Photonen unbestimmt (z.B. zirkular).

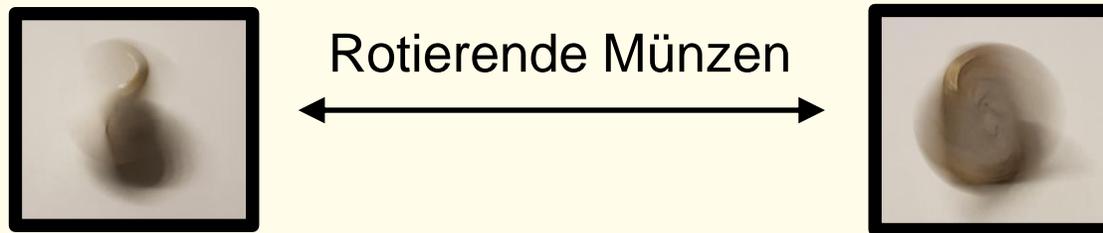
2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?

Man kann zeigen, dass die Polarisation der Photonen nicht vorher schon (verborgen) irgendwie festliegt.

Stichworte:

- Sogenannte „Lokale Theorien mit verborgenen Parametern“
- Die Bellsche Ungleichung (sagt unterschiedliche Ergebnisse für lokale Theorien mit verborgenen Parametern und der Quantenphysik voraus).
- Experimente mit Einzelphotonen (gemäß Aspect et al.) entscheiden klar für die Quantenphysik und gegen Theorien mit verborgenen Parametern.

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?



(Modellieren der Unbestimmtheit bis zur Messung)

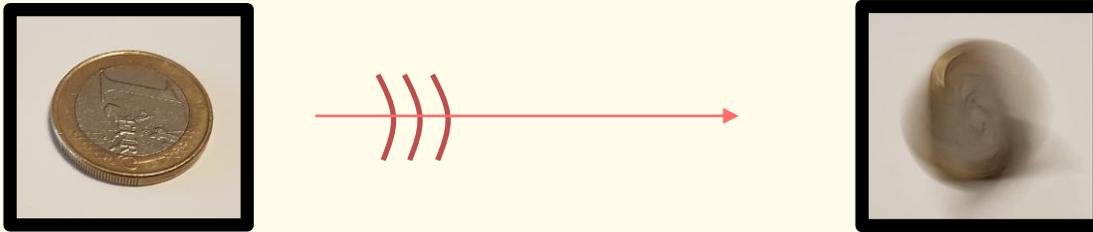
Anton und Berta bewegen zwei Münzen, die jeweils in einem Kästchen rotieren, voneinander weg. Dann warten beide, bis die Münze auf eine Seite fällt und beide schauen nach.

Problem: Korrelation nicht erklärbar.

Keine Korrelation

Zwei Münzen	
A	B
1	0
0	0
0	1
0	1
1	1
0	0
0	1
0	1

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?



Rotierende Münzen:
Versuch, die Korrelation zu erklären:

Münze 1 fällt zufällig und gibt Münze 2
per Funksignal durch, wie sie fallen muss.
Münze 2 hat eine Mechanik, mit der sie sich
auf jede Seite legen kann.

Problem:
Das Funksignal kann maximal
mit Lichtgeschwindigkeit ausgetauscht
werden. Die Korrelation tritt bei den Photonen
aber auch bei gleichzeitiger Messung auf.

Korrelation

Münzen mit Funk	
A	B
1	1
0	0
0	0
0	0
1	1
0	0
1	1
1	1

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?

Ergebnis:

Wie die Korrelation zustande kommt, ist klassisch nicht erklärbar.



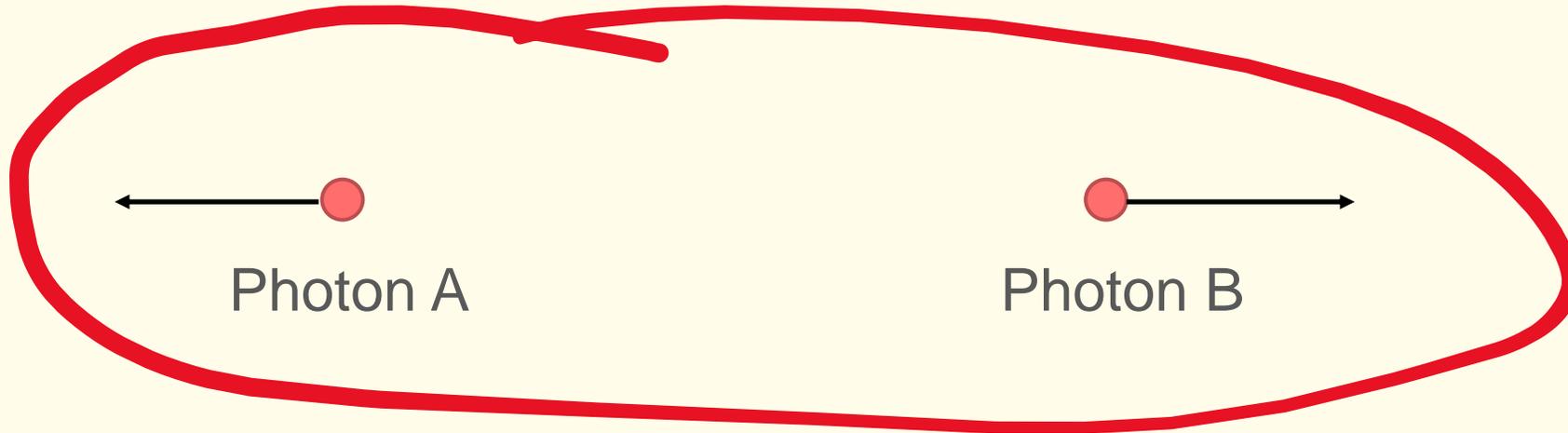
Quantenhandschuhe



Korrelation

Verschr. Photonen	
A	B
1	1
0	0
0	0
0	0
1	1
0	0
1	1
1	1

2c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?



Eigentlich bilden die zwei verschränkten Photonen zusammen **ein Objekt**.

(Ohne materielle Verbindung oder klassische Wechselwirkung zwischen den beiden!)

(Vielleicht ist räumliche Trennung nur eine Illusion?)

Verschränkte Photonen (LF/BF)

1. Grundlage: Polarisation von Licht und von Photonen
2. Das Phänomen:
 - a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?
 - b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?
 - c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?
3. Lokalität \leftrightarrow Nichtlokalität
4. Realität \leftrightarrow Unbestimmtheit

3. Lokalität – Nichtlokalität

In der klassischen Physik ...

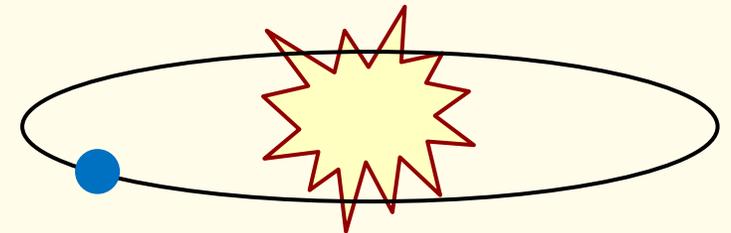
... gilt das Prinzip der Lokalität:

Eine Ursache wirkt sich **kurz danach nur in der unmittelbaren Umgebung** aus.
(Maximalgeschwindigkeit für die Ausbreitung einer Wirkung ist die Lichtgeschwindigkeit.)

Beispiel:

Auch wenn die Sonne in diesem Moment explodieren würde, hätten wir noch 8 ruhige Minuten.

Ohne vorherige Anzeichen können wir es gar nicht vorher wissen. Woher auch?



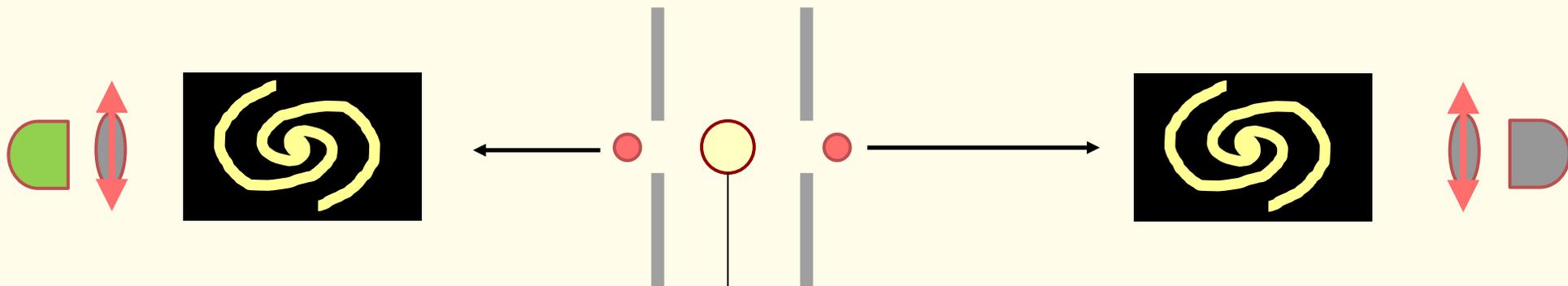
3. Lokalität – Nichtlokalität

In der Quantenphysik ist das nicht immer so:

Z.B. bei verschränkten Photonen:

Eine Messung an Photon A wirkt sich **instantan auch über weite Entfernungen** auf den Zustand von Photon B aus:

Vor der Messung an Photon A: Messergebnis an Photon B hängt vom Zufall ab.
Nach der Messung an Photon A: Messergebnis an Photon B liegt fest.



3. Lokalität – Nichtlokalität

Kann damit Information mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen werden?

Nein, nur eine Folge von Zufallszahlen: 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 ...

→ Quantenverschlüsselung

Verschränkte Photonen (LF/BF)

1. Grundlage: Polarisierung von Licht und von Photonen
2. Das Phänomen:
 - a) Wie erzeugt man verschränkte Photonen?
 - b) Woran erkennt man verschränkte Photonen?
 - c) Was ist nichtklassisch an verschränkten Photonen?
3. Lokalität \leftrightarrow Nichtlokalität
4. Realität \leftrightarrow Unbestimmtheit

4. Realität – Unbestimmtheit

In der klassischen Physik ...

... hat ein Körper eine bestimmte Geschwindigkeit oder Temperatur

- auch schon, bevor man diese misst,
- unabhängig davon, ob man misst oder nicht.

Geschwindigkeit und Temperatur sind Teil der Realität.

Der Einfluss einer Messung kann im Prinzip beliebig klein gemacht werden.

4. Realität – Unbestimmtheit

In der Quantenphysik ist das nicht so.

Bei verschränkten Photonen ist

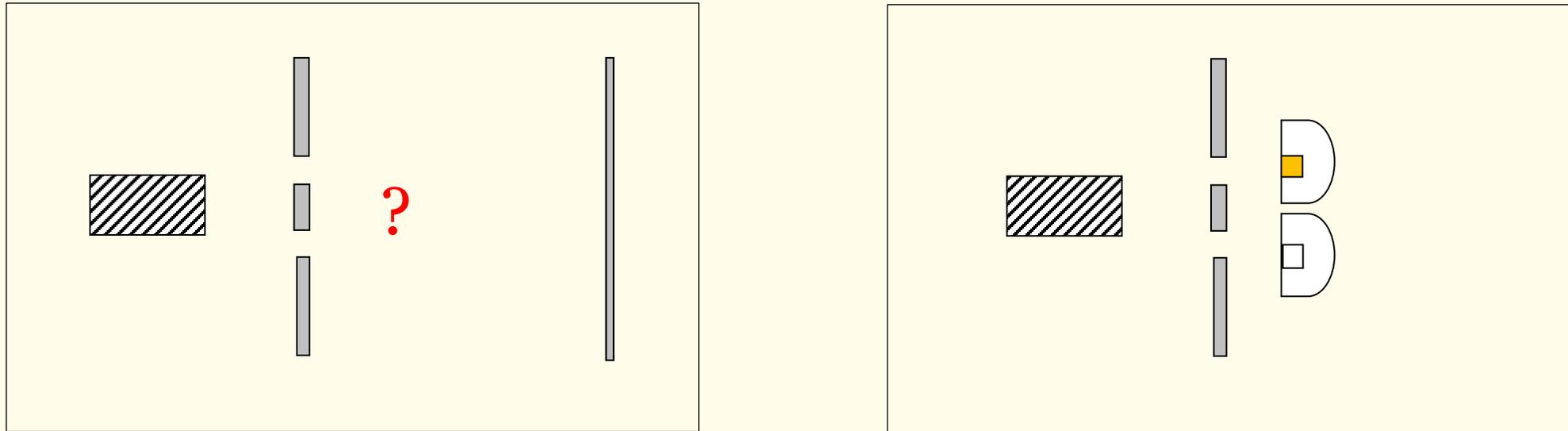
- vor der Messung die Polarisation unbestimmt.
- nach der Messung die Polarisation bestimmt.

Vor der Messung war die Polarisation nicht Teil der Realität.

Eine Messung kann den Zustand eines Quantenobjekts stark ändern.

4. Realität – Unbestimmtheit

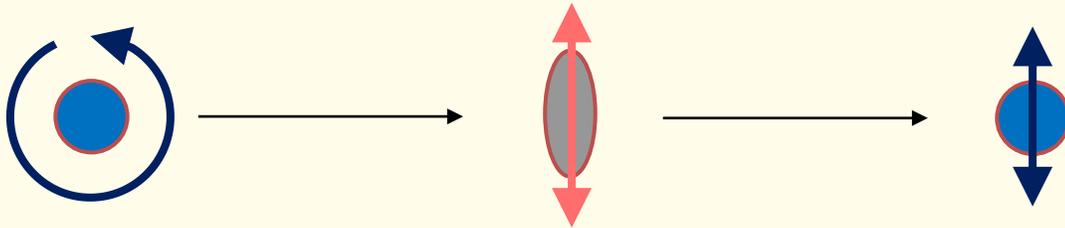
Das kennen wir eigentlich schon vom Doppelspalt:



- Durch die Messung wird Realität erzeugt.

4. Realität – Unbestimmtheit

- Ebenso bei der Polarisationsmessung:



- Durch die Messung wird Realität bezüglich 0° -Polarisation erzeugt.

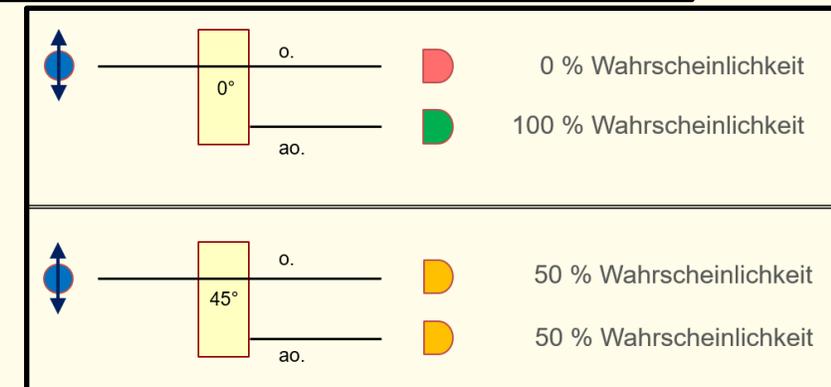
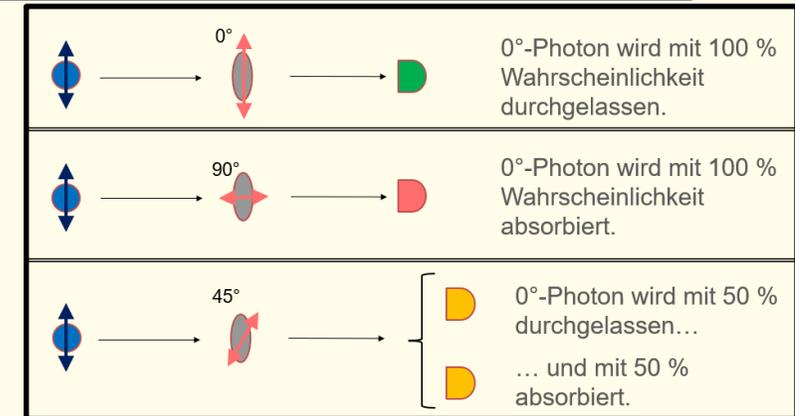
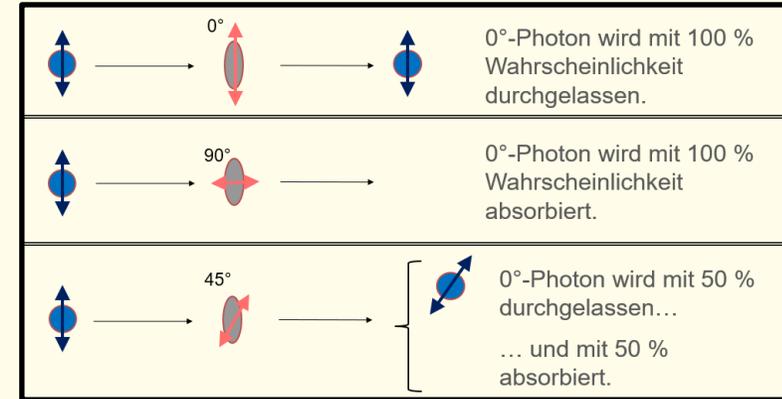
Überblick über das Material

1. Powerpoints

- 3 Alternativen zur Polarisation:
 - „Polarisation_mit_Filtern_ohne_Messung“
 - „Polarisation_mit_Filtern_mit_Messung“
 - „Polarisation_mit_Kristallen_ohne_Messung“
- Verschränkte Photonen:
Das Phänomen und das Scheitern jeder Art von klassischer Beschreibung.

2. Arbeitsblätter

- Korrelation und verschränkte Photonen
- Realität und Lokalität



Überblick über das Material

1. Powerpoints

- 3 Alternativen zur Polarisation:
 - „Polarisation_mit_Filtern_ohne_Messung“
 - „Polarisation_mit_Filtern_mit_Messung“
 - „Polarisation_mit_Kristallen_ohne_Messung“
- Verschränkte Photonen:
Das Phänomen und das Scheitern jeder Art von klassischer Beschreibung.

2. Arbeitsblätter

- Korrelation und verschränkte Photonen
- Realität und Lokalität

Korrelation und Verschränkung

Ziel
Sie können anhand von Beispielen erklären, inwiefern Realität in der Quantenphysik oft erst durch eine Messung erzeugt wird und inwiefern in der Quantenphysik das Prinzip der Lokalität aufgegeben werden muss.

1. Klassische Korrelationen

a) Zwei Münzen werden 8 mal geworfen. In der linken Spalte von Tabelle 1 sind die Ergebnisse für Münze 1 eingetragen. Tragen Sie in die rechte Spalte ein typisches Ergebnis für Münze 2 ein.

Kopf	Links
Kopf	Links
Zahl	Rechts
Kopf	Links
Zahl	Rechts
Zahl	Rechts
Kopf	Links

Tabelle 1

Links	Rechts
Links	Rechts
Rechts	Rechts
Links	Rechts
Rechts	Rechts
Rechts	Rechts
Links	Links

Tabelle 2

b) Sie ziehen aus einer Urne mit ein Paar Handschuhen jeweils einen Handschuh. Handschuhe jeweils in der linken Spalte von Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Ziehungen eingezeichnet. Tragen Sie in die rechte Spalte ein typisches Ergebnis für den in der Urne verschwindenden Handschuh ein.



c) f

Aufgaben von Realität und Lokalität

Ziel
Sie können anhand von Beispielen erklären, inwiefern Realität in der Quantenphysik oft erst durch eine Messung erzeugt wird und inwiefern in der Quantenphysik das Prinzip der Lokalität aufgegeben werden muss.

2. 1. Realität von Größen

a) Geben Sie für eine Metallkugel fünf Größen an, die man messen könnte, die aber auch einen festen Wert haben, wenn man nicht misst.

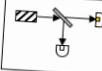
b) Zeigen Sie am Beispiel eines Atoms in einem Interferometer-Experiment, dass ein Atom die Größe „Ort“ nicht haben muss.

2. Erzeugung von Realität

a) In den nebenstehenden zwei Abbildungen sind zwei Situationen mit einem Quantenobjekt ikonisch dargestellt, in denen durch eine Ortsmessung Realität erzeugt wird.



b) Erläutern Sie dies jeweils und gehen Sie dabei auch darauf ein, inwiefern der entsprechende Anteil an Realität vorher nicht da war und woher man das weiß.



3. Ein zirkular polarisiertes Photon ist unbestimmt in der Polarisation. Wenn man an ihm die Polarisation z. B. mit einem Filter misst, ist das ein Zufallsexperiment. Erläutern Sie mit Hilfe der Zeichnung rechts!



4. Lokalität in der klassischen Physik

Betrachten Sie zwei fixierte geladene Körper A und B. Körper A wird nun näher zu Körper B gebracht.

a) Begründen Sie, wie sich die Kraft auf Körper B verändert.

b) Erklären Sie, warum diese Veränderung nicht instantan geschieht.

Überblick über das Material

- 4311_up_polarisation_mit_filtern_ohne_messung: Unterrichtspräsentation zur Polarisation von Licht und Photonen mit Filtern (Durchlass/Absorption)
- 4312_up_polarisation_mit_filtern_und_messung: Unterrichtspräsentation zur Polarisation von Licht und Photonen mit Filtern und Detektoren
- 4313_up_polarisation_mit_kristallen_und_messung: Unterrichtspräsentation zur Polarisation von Licht und Photonen mit Kalkspatkristallen und Detektoren
- 4314_up_verschraenkung_phaenomen: Unterrichtspräsentation zu Korrelationen bei der Verschränkung
- 4315_up_lokalitaet_realitaet: Unterrichtspräsentation zu den Prinzipien Lokalität und Realität und dem Aufgeben derselben in der Quantenphysik
- 4321_ab_realitaet_quantenphysik: Arbeitsblatt passend zu 4315
- 4322_ab_korrelation_verschraenkung: Arbeitsblatt passend zu 4314