

Delayed Choice und *Komplementarität*

Erlasstagung Physik

01.-03.02.2023

J. Küblbeck [CC BY 4.0](#)

Bezug zum Bildungsplan

Bildungsplan 2016

(6) beschreiben, dass *Quantenobjekte* zwar stets Wellen- und Teilcheneigenschaften aufweisen, sich diese aber nicht unabhängig voneinander beobachten lassen. Sie können dies anhand der *Interferenzfähigkeit* und der **Welcher-Weg-Information** bei einzelnen *Quantenobjekten* erläutern (zum Beispiel Doppelspalt, Mach-Zehnder-Interferometer)

2-stündig
4-stündig

Rot: Neu im Basisfach

Orange: Zusätzlich neu im Leistungsfach

Bildungsplan 2016 Version 2

(6) **am Beispiel des Doppelspaltexperimentes** beschreiben, dass *Quantenobjekte* zwar stets Wellen- und Teilcheneigenschaften aufweisen, sich diese aber nicht unabhängig voneinander beobachten lassen. Sie können dies anhand der *Interferenzfähigkeit* und der **Welcher-Weg-Information** bei einzelnen *Quantenobjekten* erläutern (**Koinzidenzmethode** **Komplementarität**, **Delayed-choice-Variante des Doppelspaltexperimentes**)

Inhalt

1. **Koinzidenzmethode:** (Nur LF)
2. **Delayed-Choice-Experimente:** (Nur LF)
Wegunbestimmtheit auch vor der Ortsmessung
3. **Komplementarität:** (LF und BF)
Welcher-Weg-Markierung,
Welcher-Weg-Information

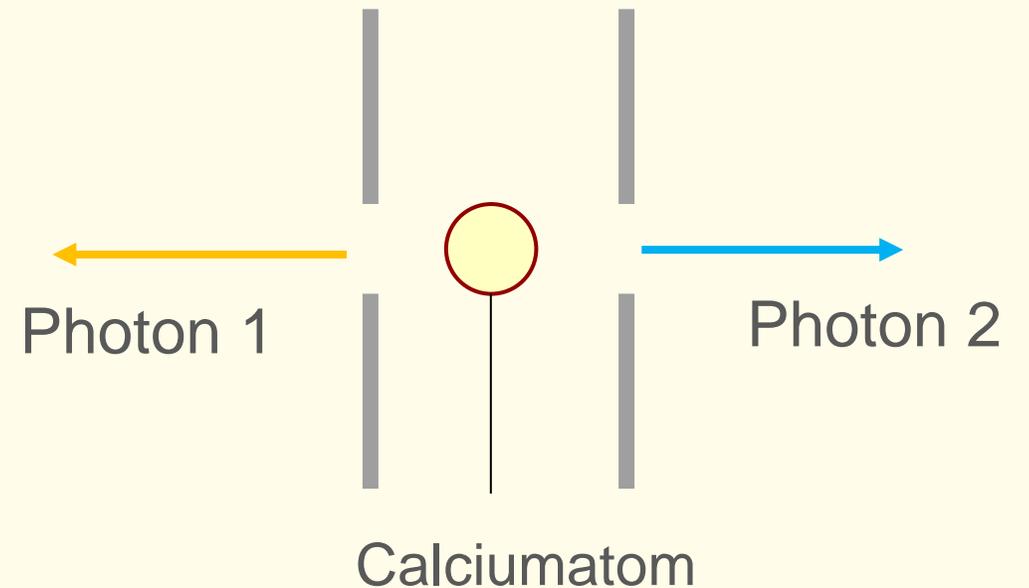
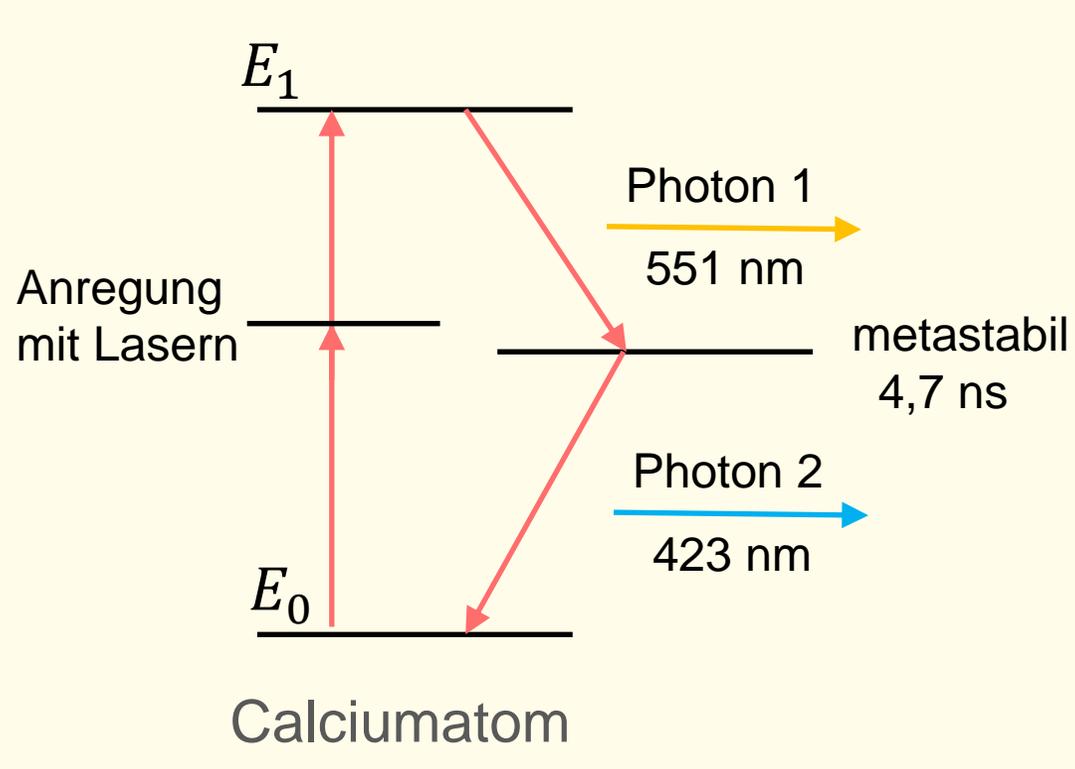
„**Komplementarität**“ steht zwar neu im Bildungsplan, wurde aber wohl häufig schon zusammen mit der *Welcher-Weg-Information* unterrichtet.

1. Koinzidenzmethode (nur LF)

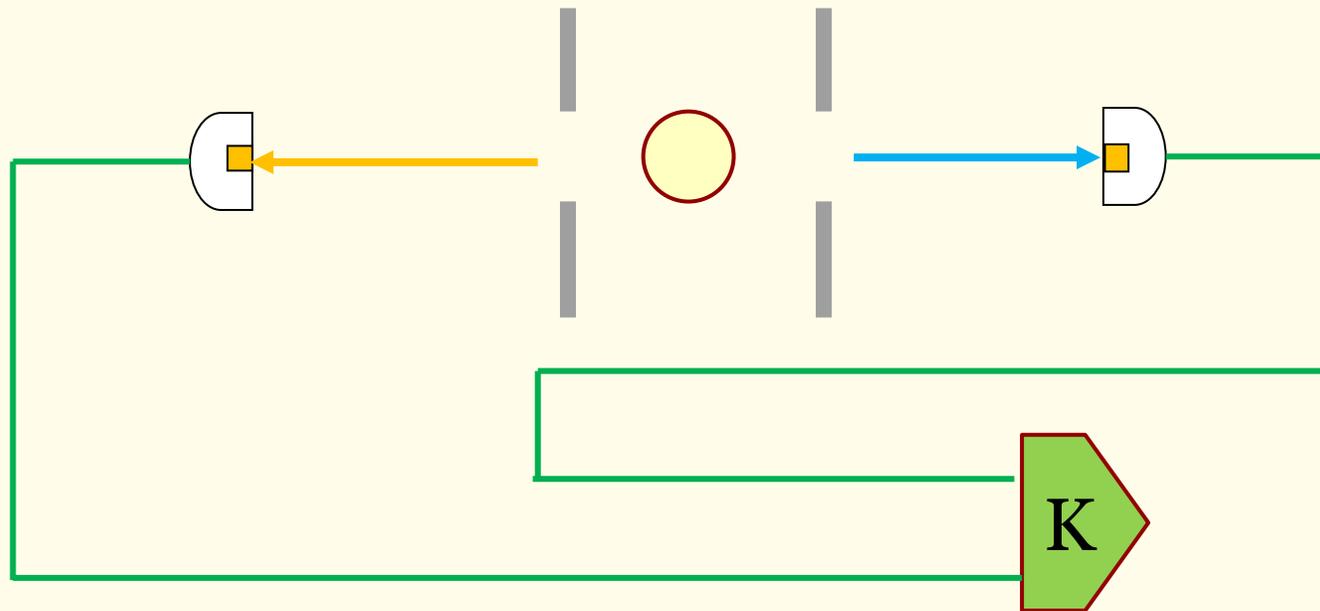
- Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren
- Antikoinzidenz beim Strahlteiler und Doppelspalt

Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

Kaskadenprozess beim Calciumatom



Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

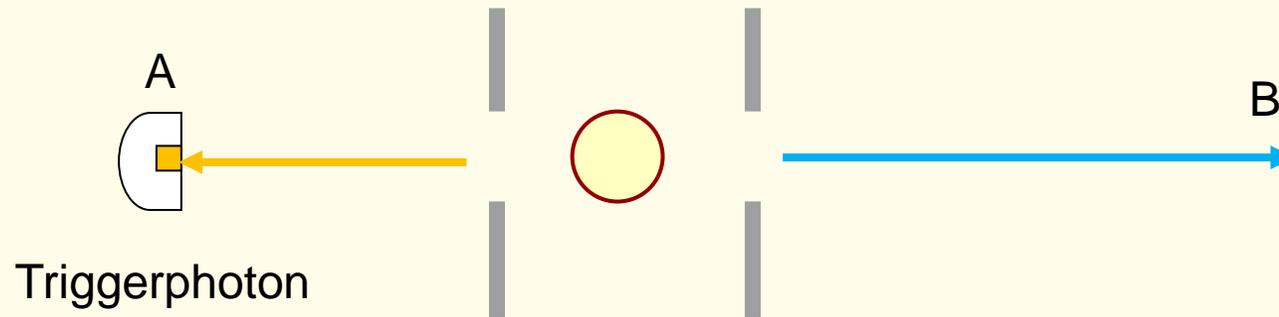


Beispiel 1
(Eines dieser Beispiele wird empfohlen, damit man anschließend von „Einzelphotonen“ in Quanten-Experimenten reden kann.)

Beide Detektoren weisen stets gleichzeitig ein Photon nach.

Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

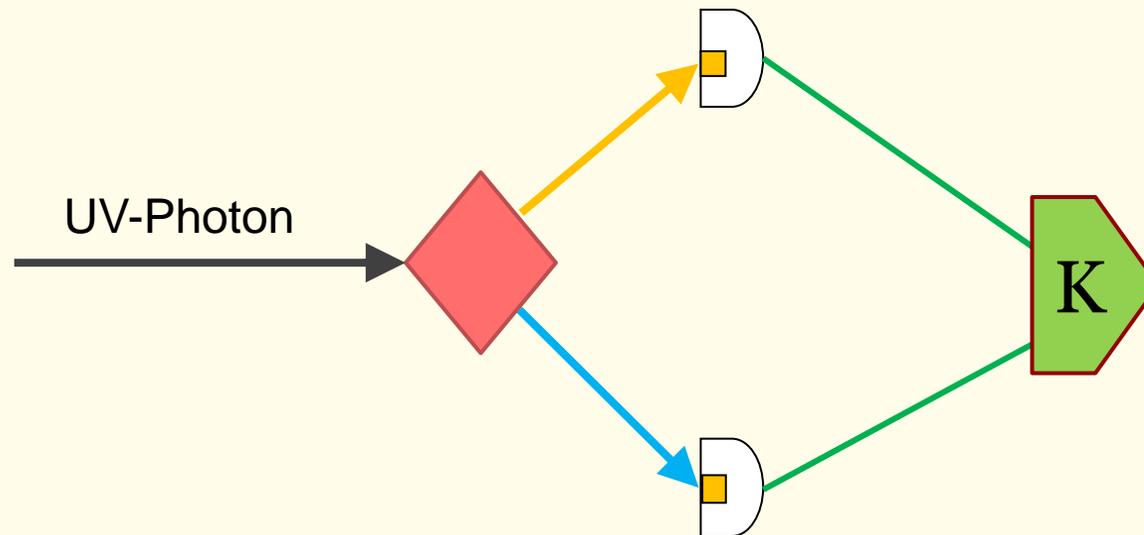
→ Erzeugung von Einzelphotonen:



Immer wenn der Detektor A ein Photon nachweist,
ist in Richtung B ein Photon unterwegs.

Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

Paarweise Erzeugung von Photonen in sogenanntem nichtlinearem Kristall:

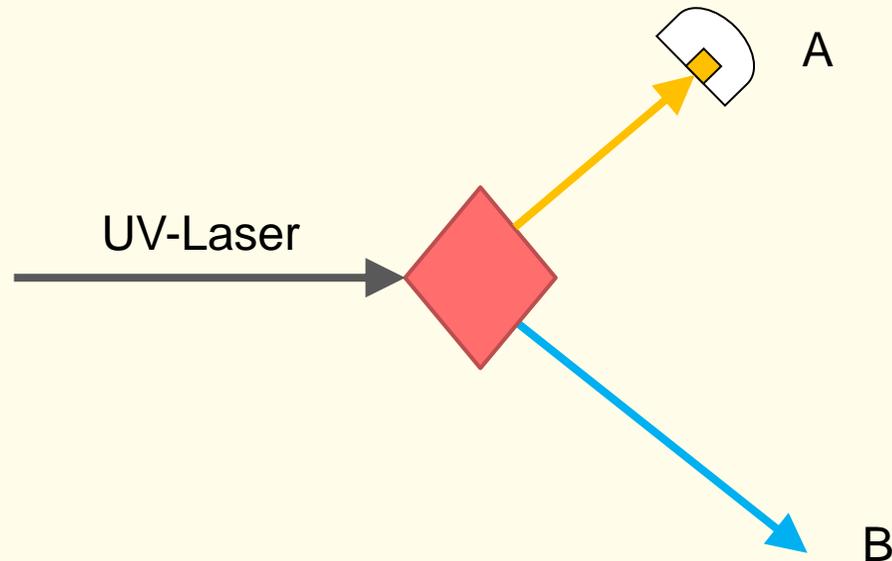


Beispiel 2
(Eines dieser Beispiele wird empfohlen, damit man anschließend von „Einzelphotonen“ in Quanten-Experimenten reden kann.)

Beide Detektoren weisen stets gleichzeitig ein Photon nach.

Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

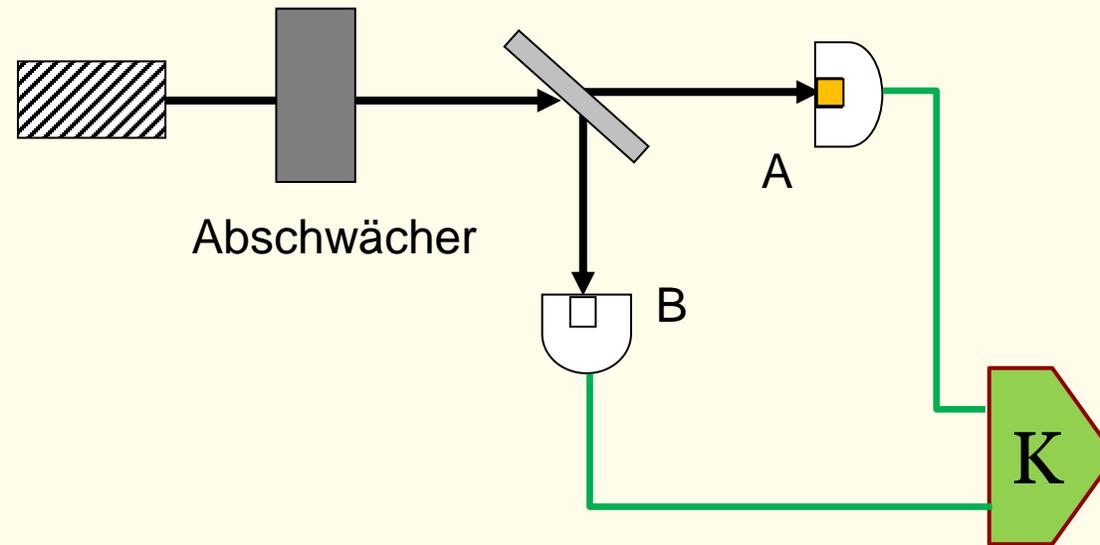
→ Erzeugung von Einzelphotonen:



Immer wenn der Detektor A ein Photon nachweist, ist in Richtung B ein Photon unterwegs.

Antikoinzidenz beim Strahlteiler?

Diese Beispiele sind nicht verpflichtend



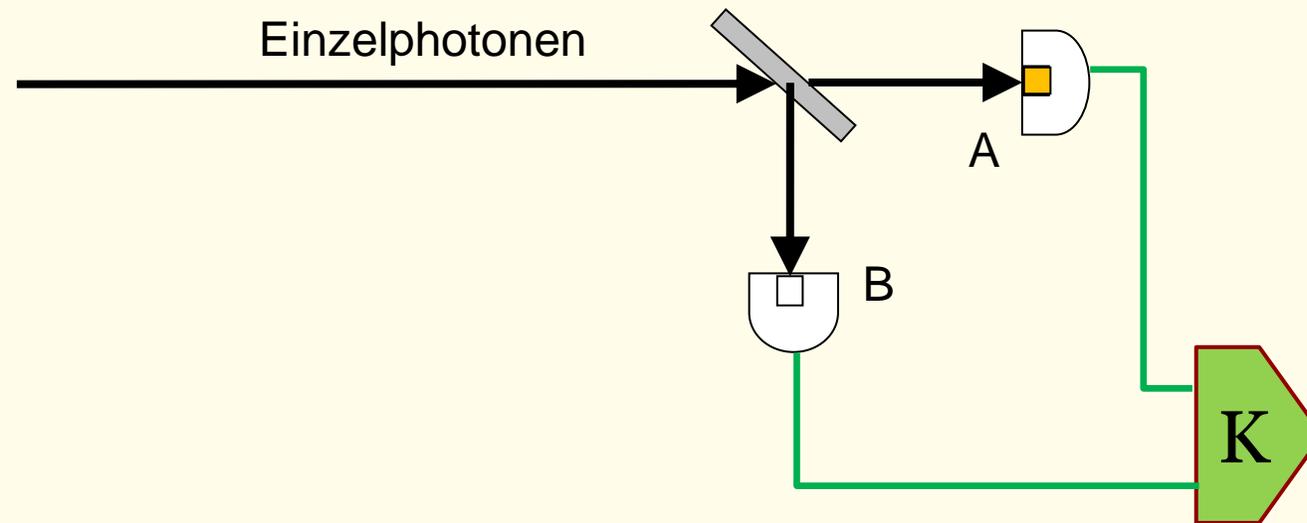
Abgeschwächtes Licht:

Antikoinzidenz wird nicht beobachtet, sondern das Gegenteil: vermehrte Koinzidenz!

Grund: Bunching der Photonen

Antikoinzidenz beim Strahlteiler?

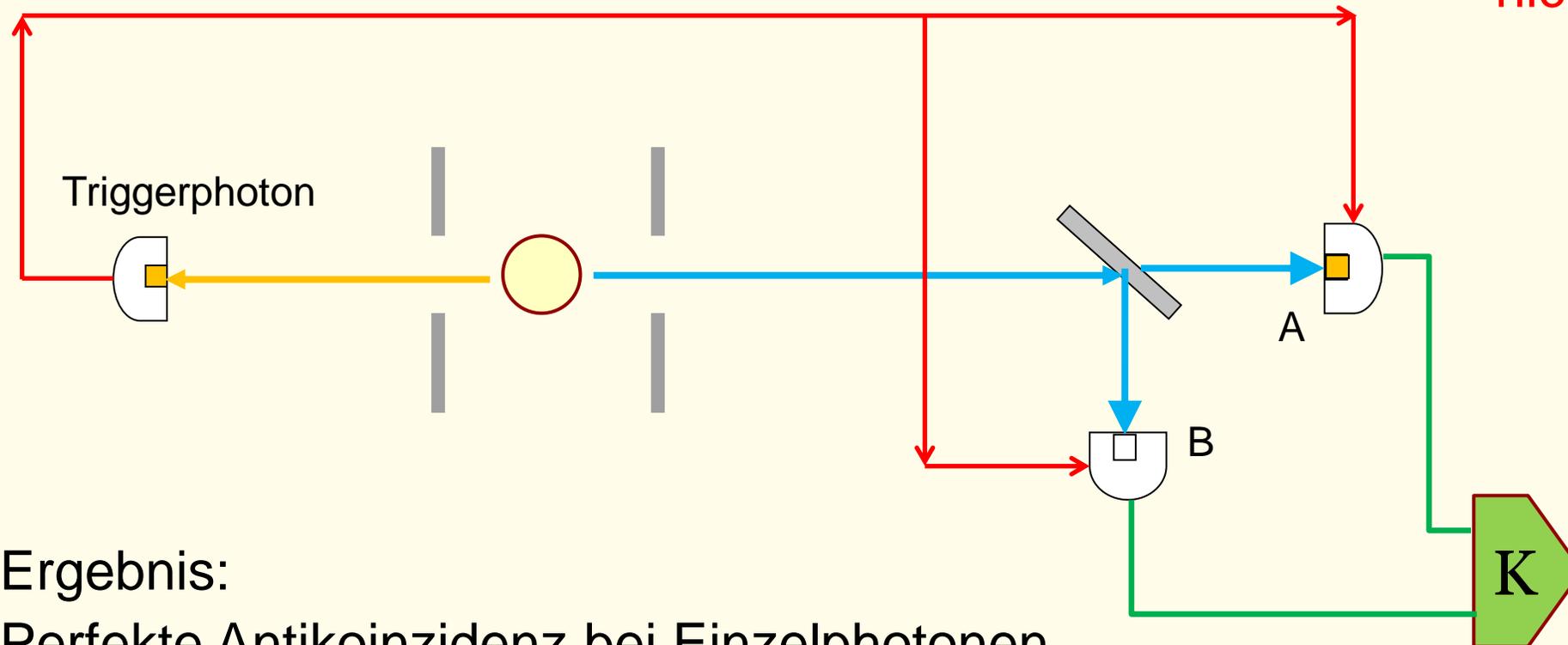
Diese Beispiele sind nicht verpflichtend



Ergebnis:
Perfekte Antikoinzidenz bei Einzelphotonen

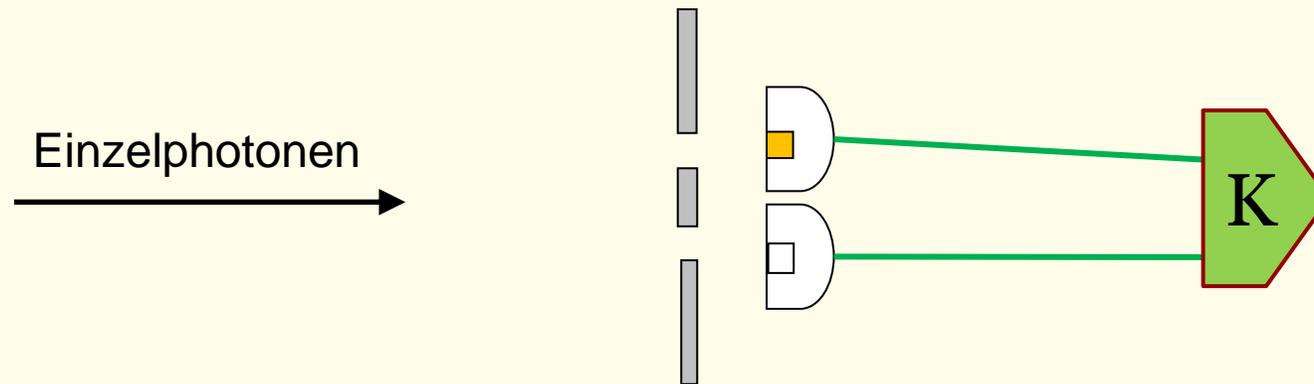
Antikoinzidenz beim Strahlteiler?

Diese Beispiele sind nicht verpflichtend



Ergebnis:
Perfekte Antikoinzidenz bei Einzelphotonen

Antikoinzidenz beim Doppelspalt



Diese Beispiele sind nicht verpflichtend

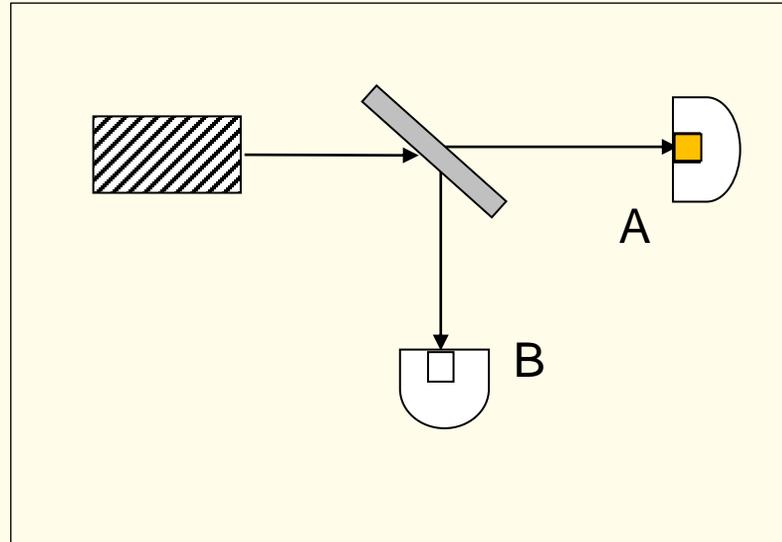
Antikoinzidenz bei Einzelphotonen

Inhalt

1. **Koinzidenzmethode:** (Nur LF) ✓
2. **Delayed-Choice-Experimente:** (Nur LF)
Wegunbestimmtheit auch vor der Ortsmessung
3. **Komplementarität:** (LF und BF)
Welcher-Weg-Markierung,
Welcher-Weg-Information

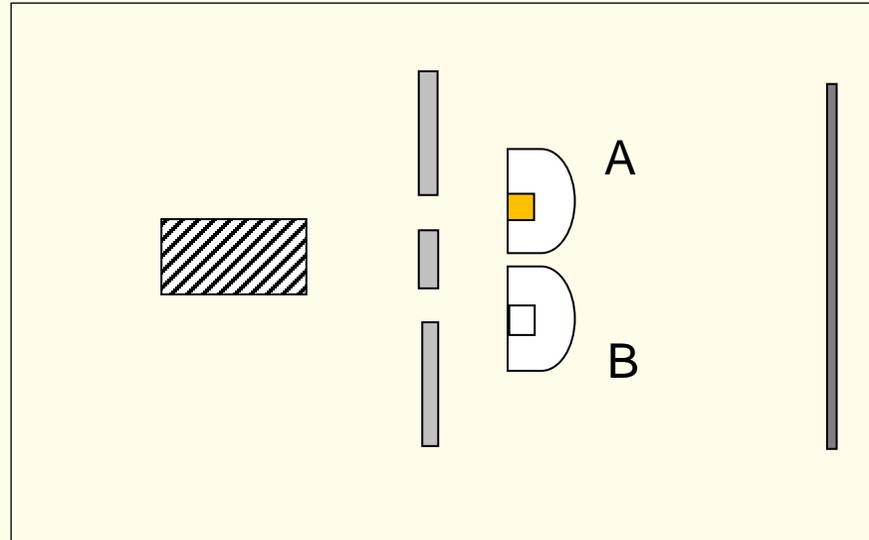
2. Delayed-Choice-Experiment (nur LF)

Warum Delayed-Choice?



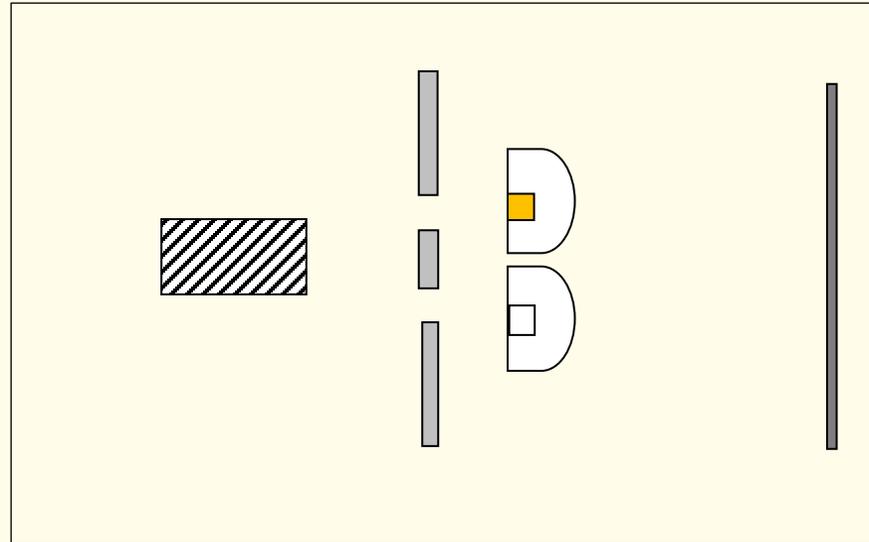
Was kann man über das Quantenobjekt sagen, wenn es vom Detektor A nachgewiesen wird?

Warum Delayed-Choice?



Was kann man über das Quantenobjekt sagen, wenn es von Detektor A nachgewiesen wird?

Warum Delayed-Choice?



Falsche Vorstellung:

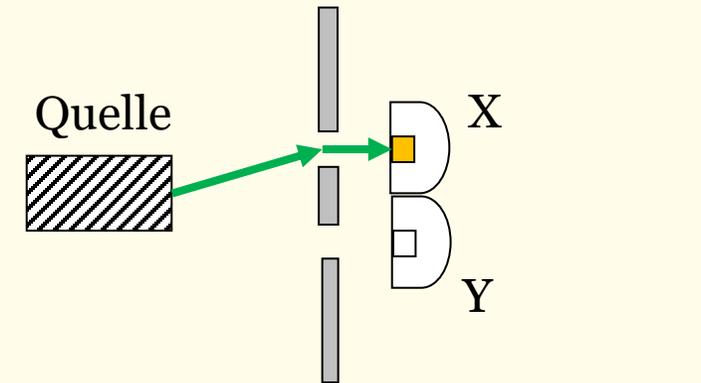
„Wenn man Ortsmessungen auf den beiden Wegen macht, dann geht das Quantenobjekt nur einen Weg.“

**Leider
falsch!**

Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

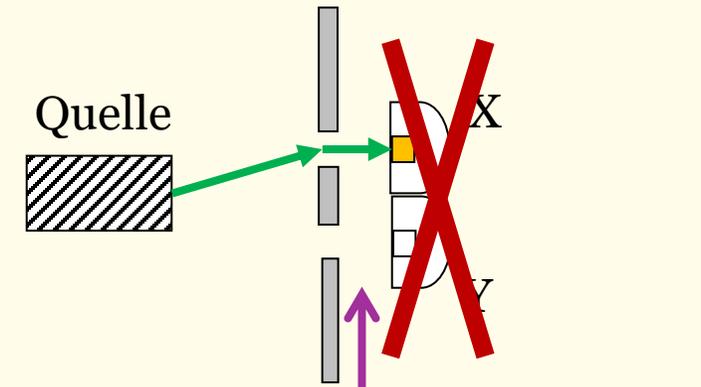
- **Annahme:** Das Quantenobjekt wählt bei vorhandener Messapparatur genau einen Weg (choice).



Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

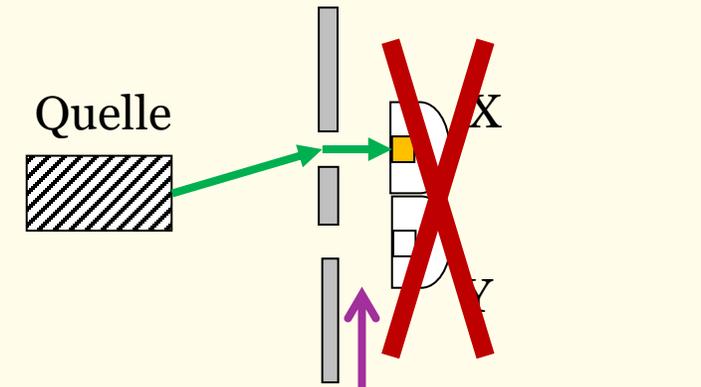
- **Annahme:** Das Quantenobjekt wählt bei vorhandener Messapparatur genau einen Weg (choice).
- **Delayed:** Etwas später: Wenn das Quantenobjekt etwa auf der Höhe des lila Pfeils ist, wird die Messapparatur entfernt.



Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

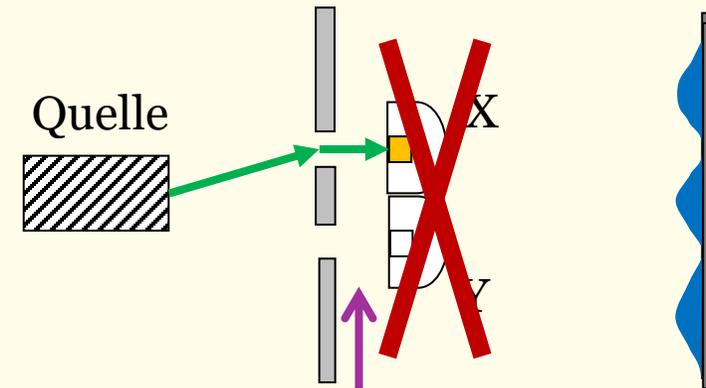
- **Annahme:** Das Quantenobjekt wählt bei vorhandener Messapparatur genau einen Weg (choice).
- **Delayed:** Etwas später: Wenn das Quantenobjekt etwa auf der Höhe des lila Pfeils ist, wird die Messapparatur entfernt.
- Erwartet man Interferenz?
Nein!



Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

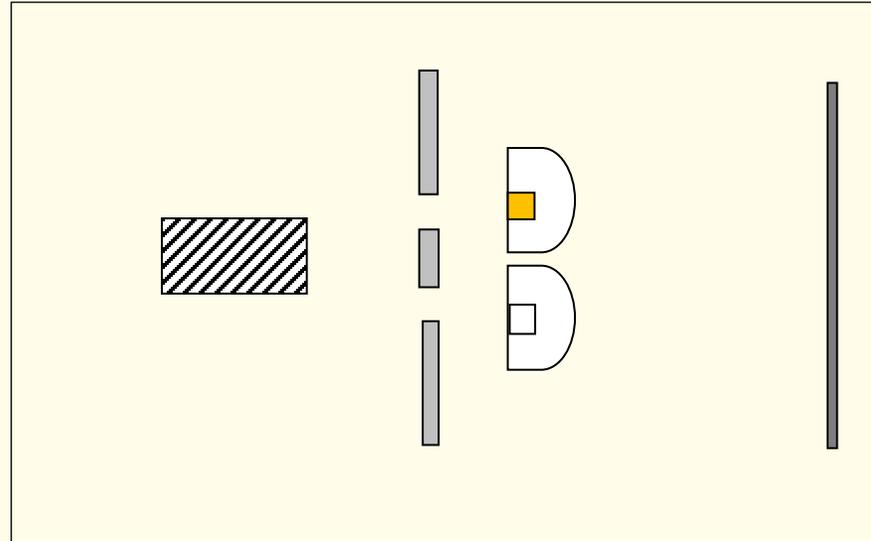
- **Annahme** wählt b...
genau e...
Annahme falsch! ...



- **Delayed:** Etwas später:
Wenn das Quantenobjekt etwa auf der Höhe des lila Pfeils ist, wird die Messapparatur entfernt.
- Wenn **Interferenz** auftritt, war die **Annahme falsch**.

Konsequenz

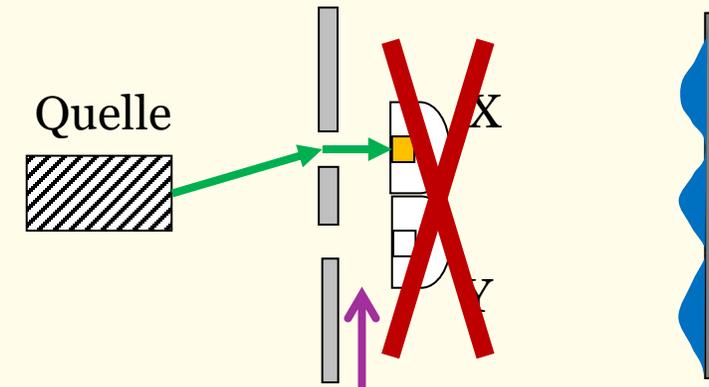
Pflicht



- Jegliche Modellvorstellung, bei der sich das Quantenobjekt am Doppelspalt für einen Weg entscheidet, ist falsch.
- Man kann nicht vom Messergebnis auf den Zustand schließen: Zwar erhält man bei der Ortsmessung ein bestimmtes Ergebnis, der Zustand vorher war dennoch unbestimmt.

Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht



**Am Doppelspaltexperiment
nicht experimentell durchgeführt!**

Delayed-Choice-Experimente

- **Pflicht:** Delayed Choice am Doppelspalt
(nicht durchgeführt!)
- **Kür:** Delayed Choice am Interferometer

Vertiefung 1: Das Prinzip

Vertiefung 2: Das Experiment (Walther et al. 1987)

Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

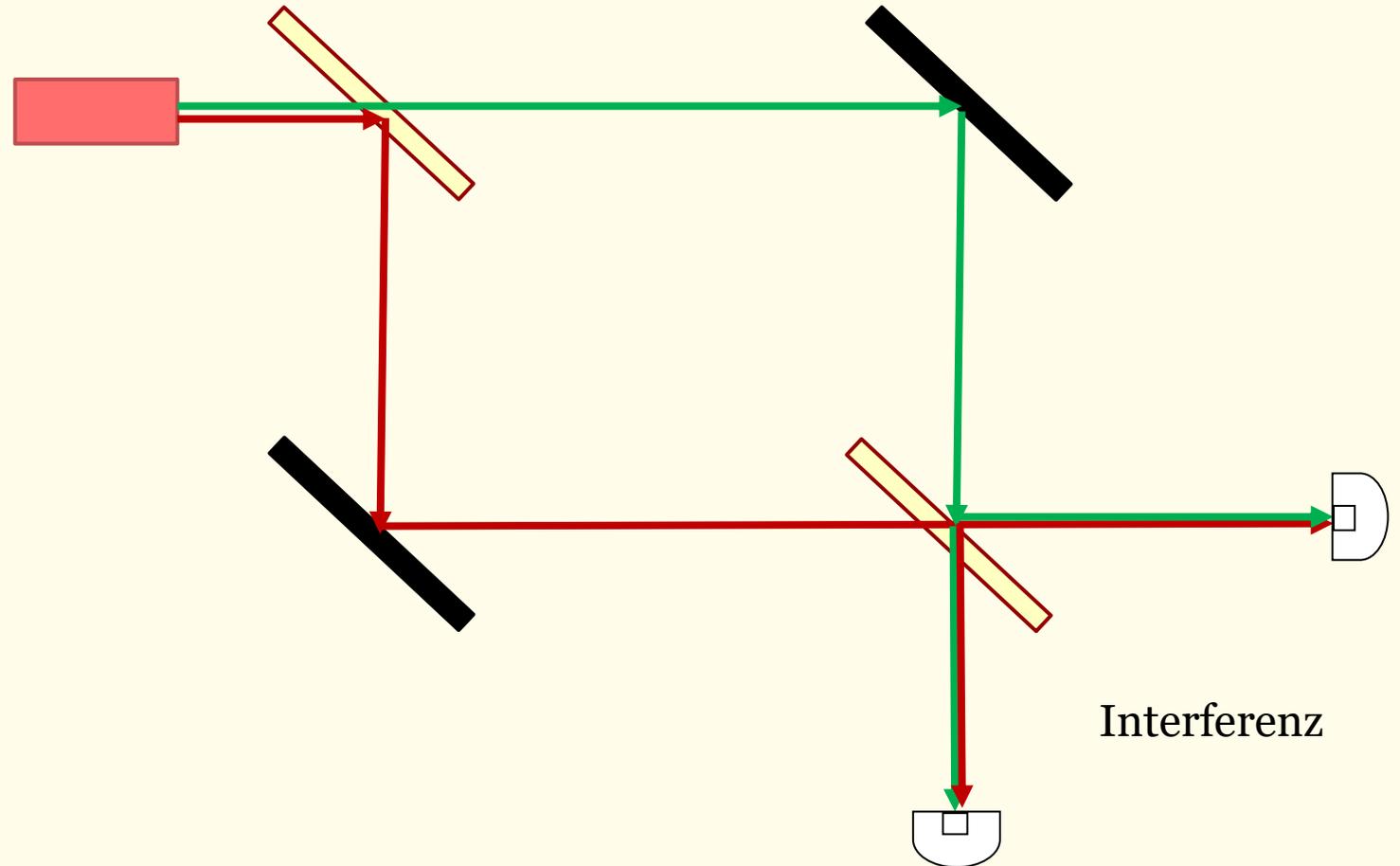
Kür

- Vertiefung 1

Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

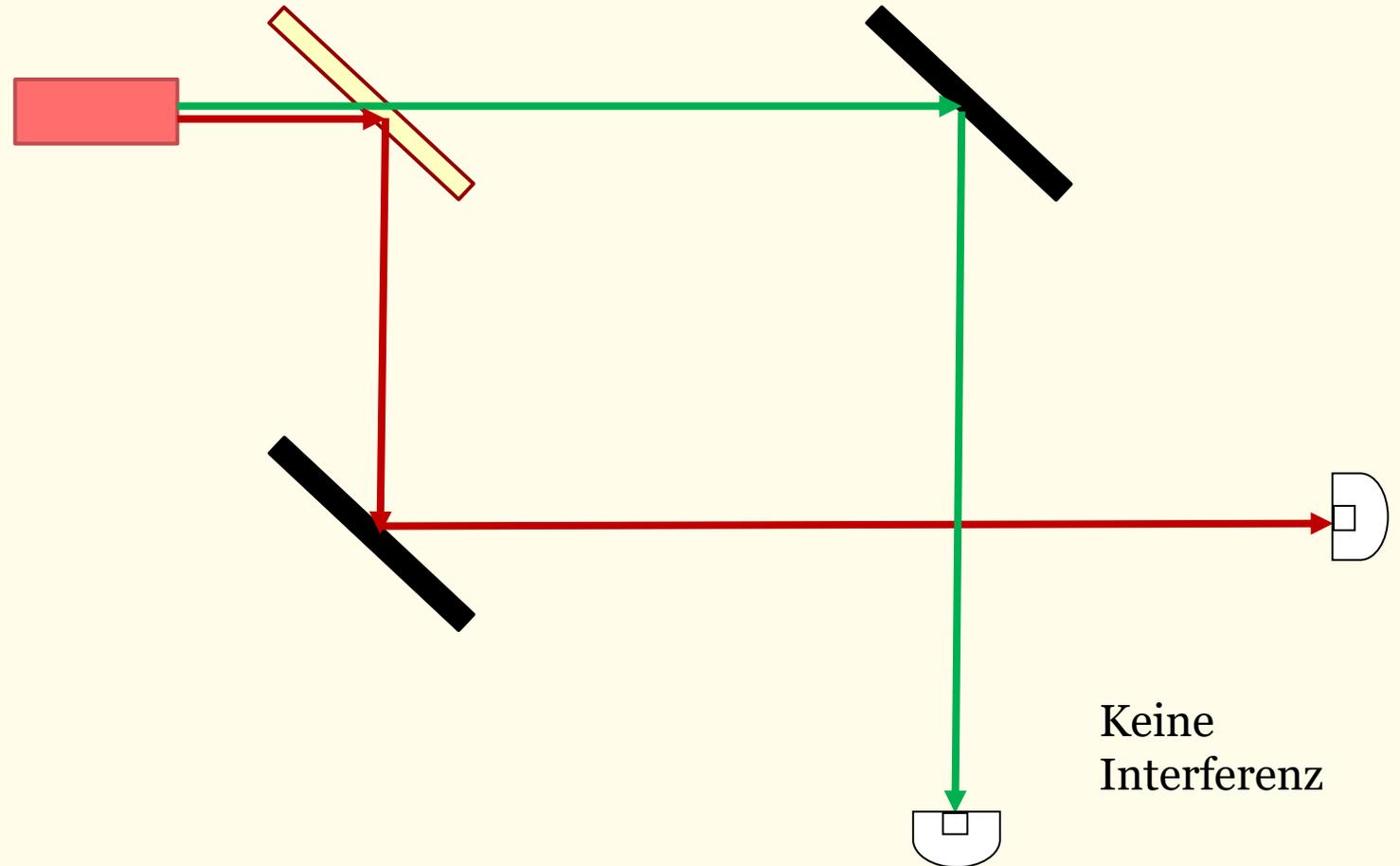
Interferometer



Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

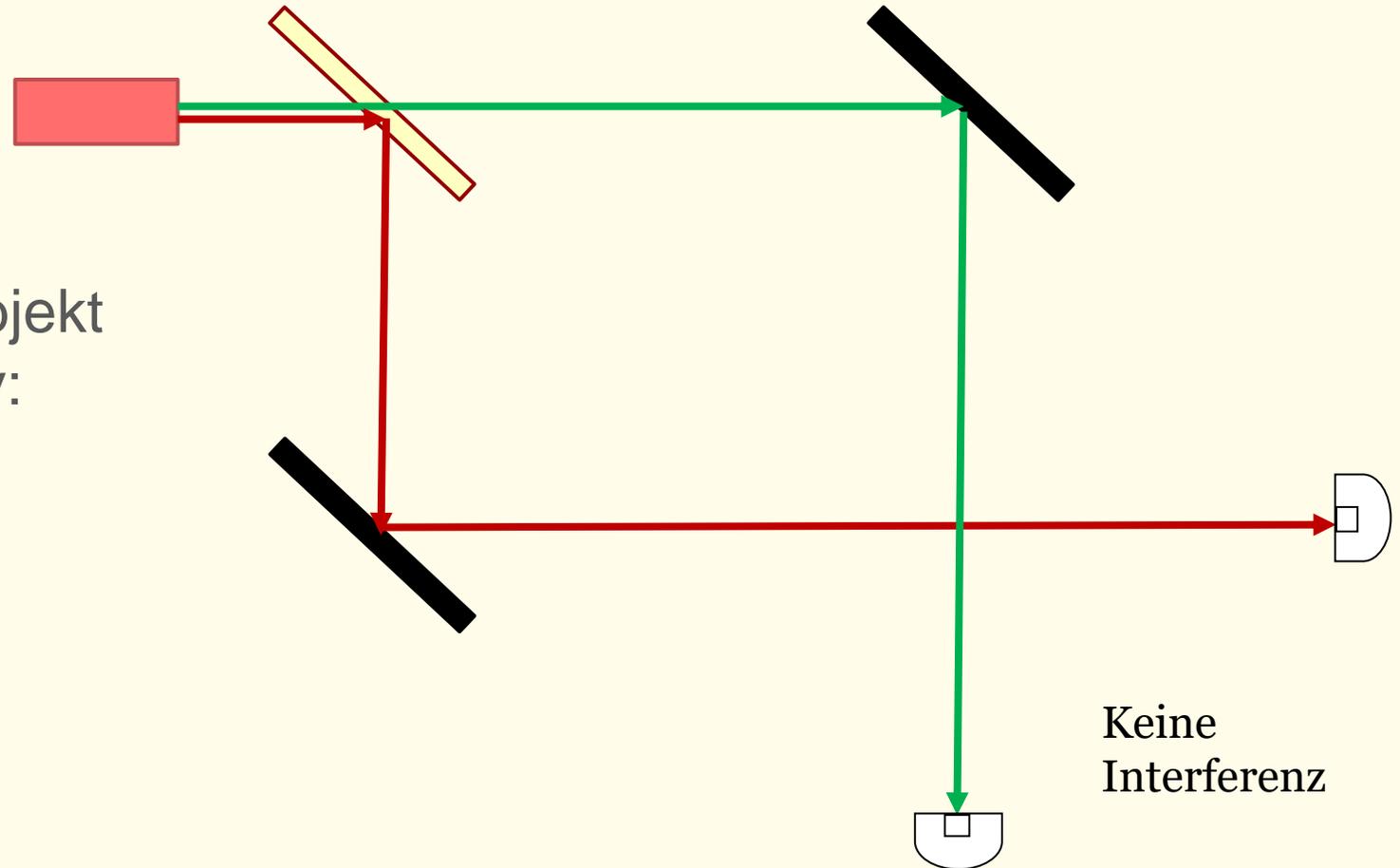
Nur ein Strahlteiler



Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

Annahme: Das Quantenobjekt wurde reflektiert (alternativ: durchgelassen)

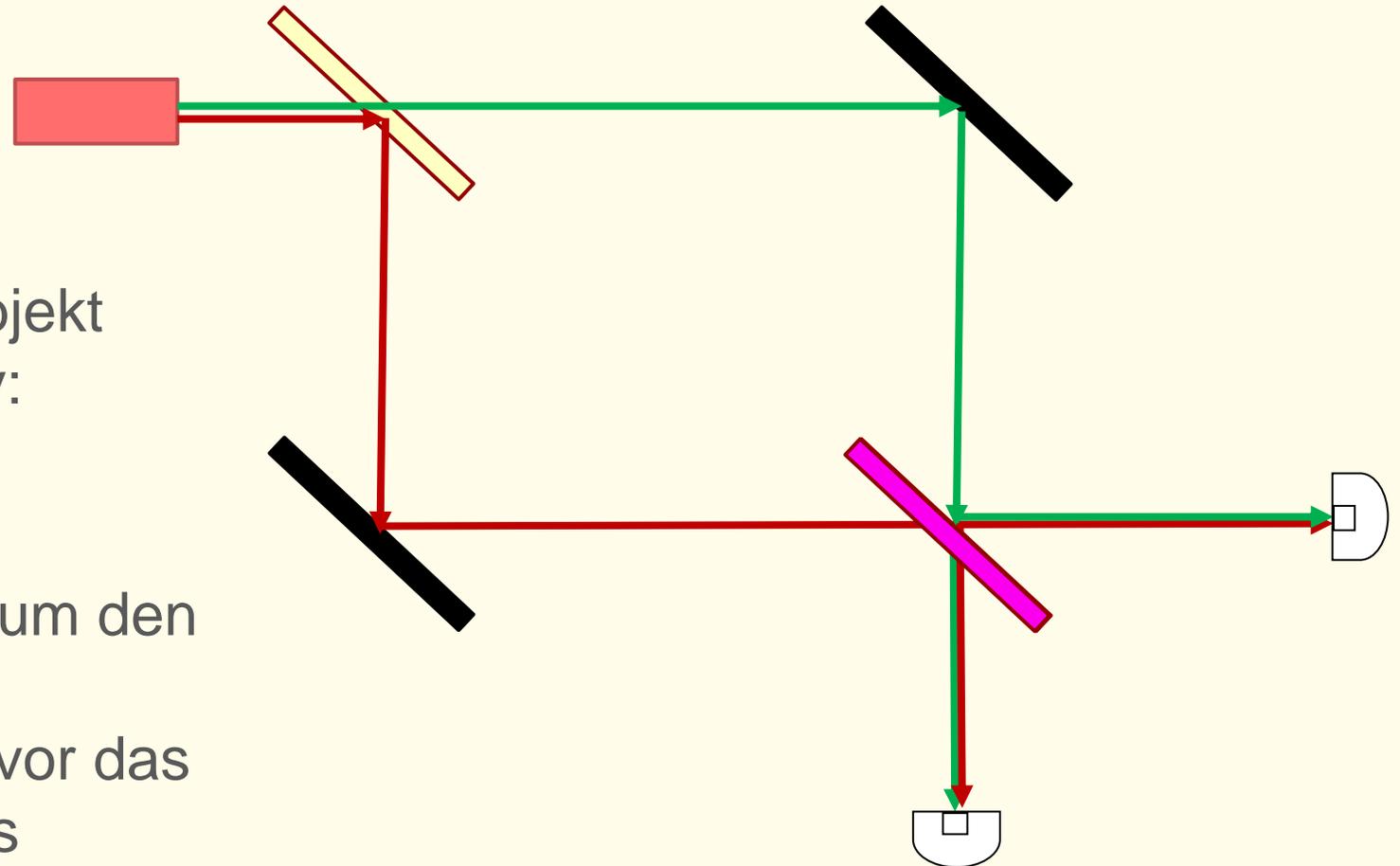


Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

Annahme: Das Quantenobjekt wurde reflektiert (alternativ: durchgelassen)

Delayed: Der Aufbau wird um den zweiten Strahlteiler zum Interferometer ergänzt, bevor das Quantenobjekt den Ort des zweiten Strahlteilers erreicht.



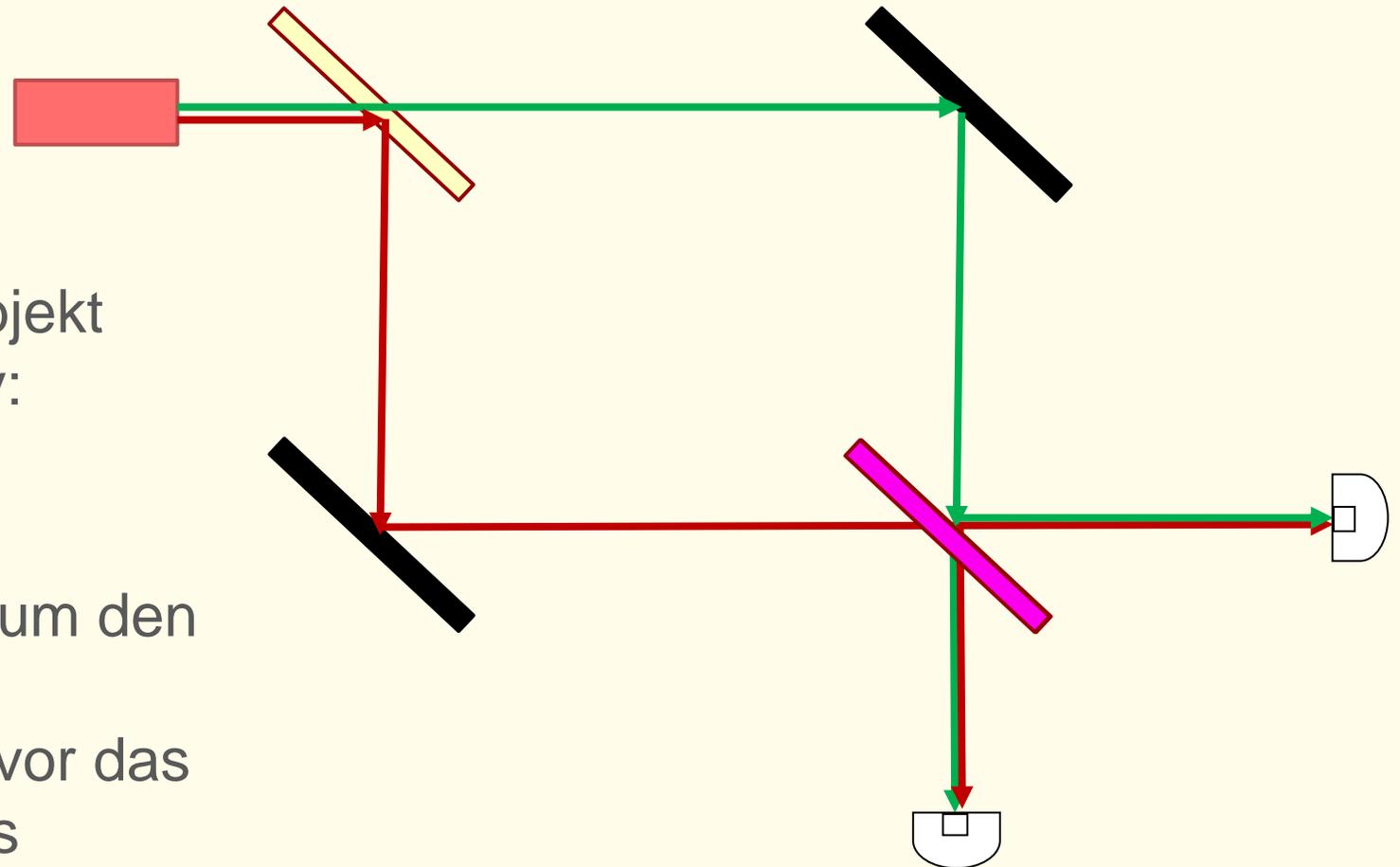
Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

Annahme
wurde
durch
objekt
tiv:

**Annahme
falsch!**

Delayed: Der Aufbau wird um den zweiten Strahlteiler zum Interferometer ergänzt, bevor das Quantenobjekt den Ort des zweiten Strahlteilers erreicht.



Interferenz

Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

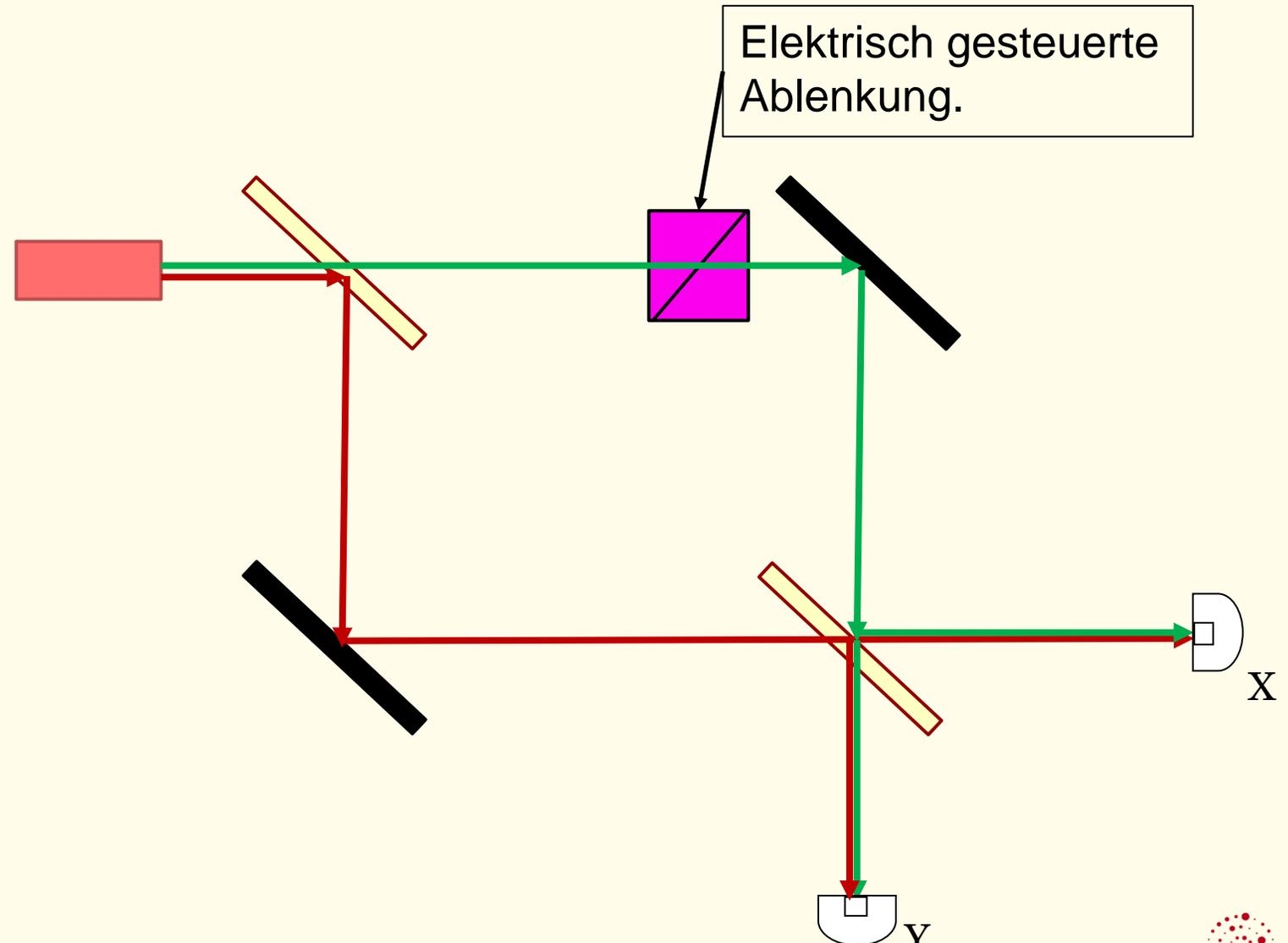
Kür

- Vertiefung 2

Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

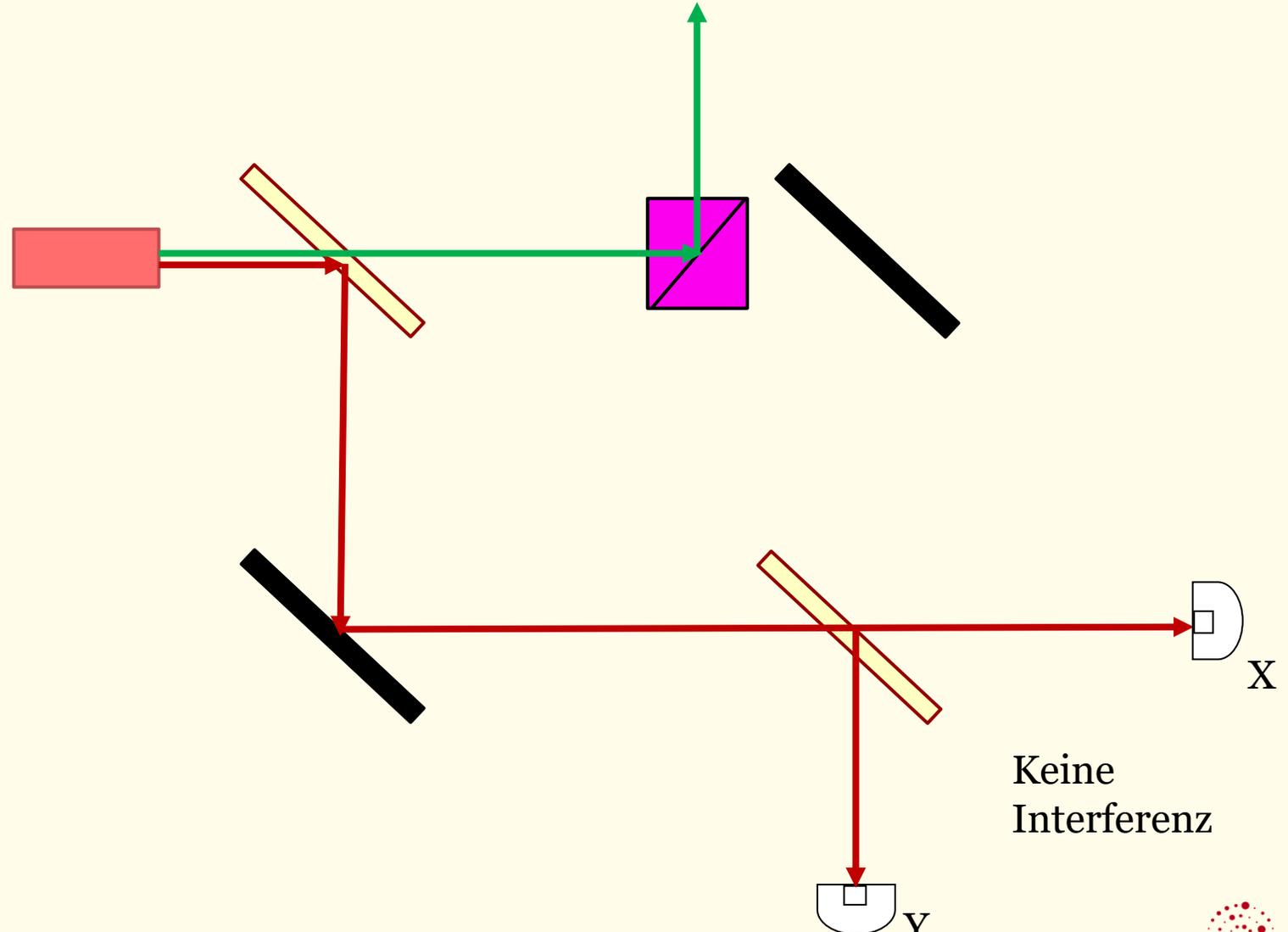
Umsetzung im Experiment:
(Walther et al. 1987)



Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

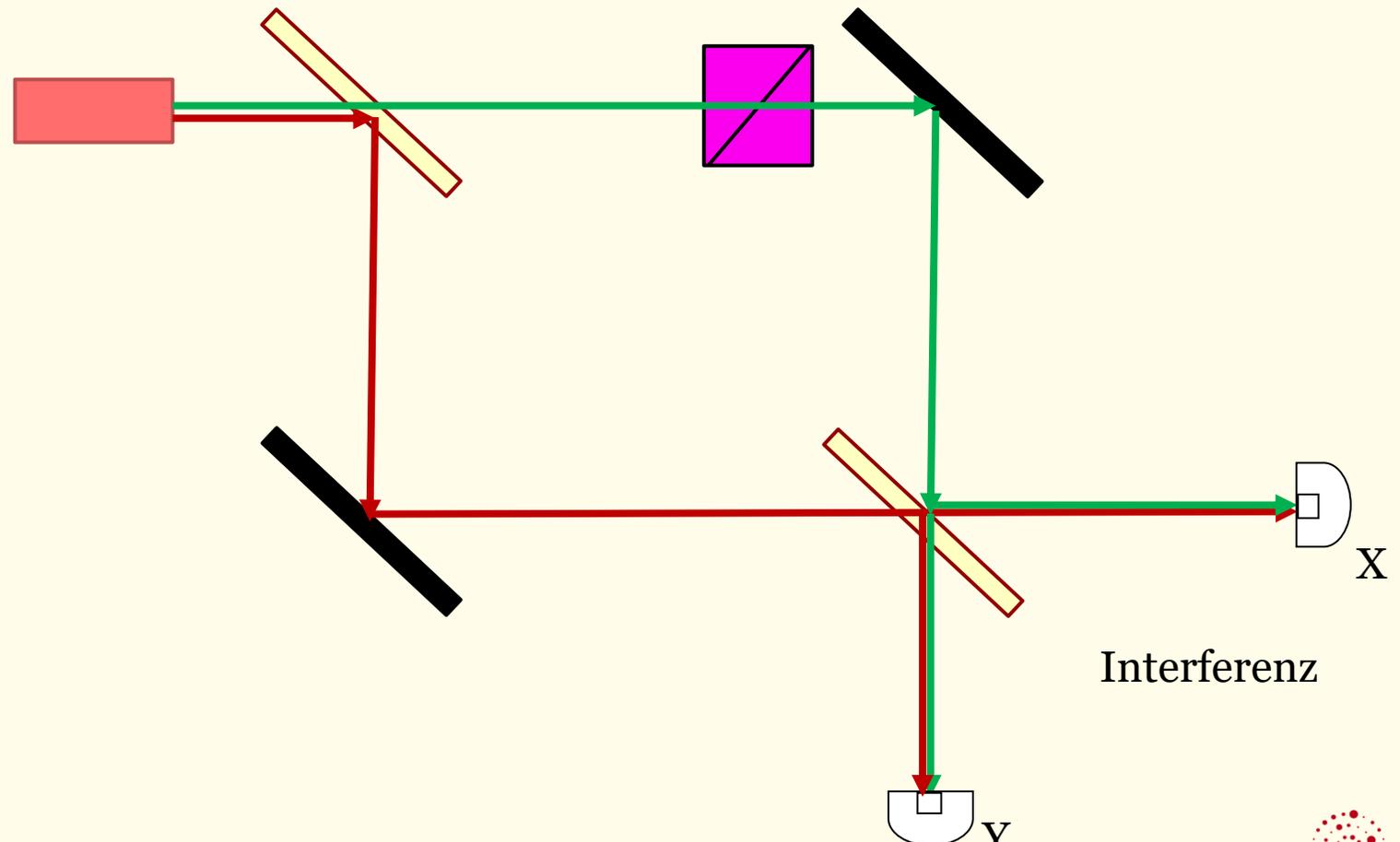
Ablenkung
eingeschaltet:



Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

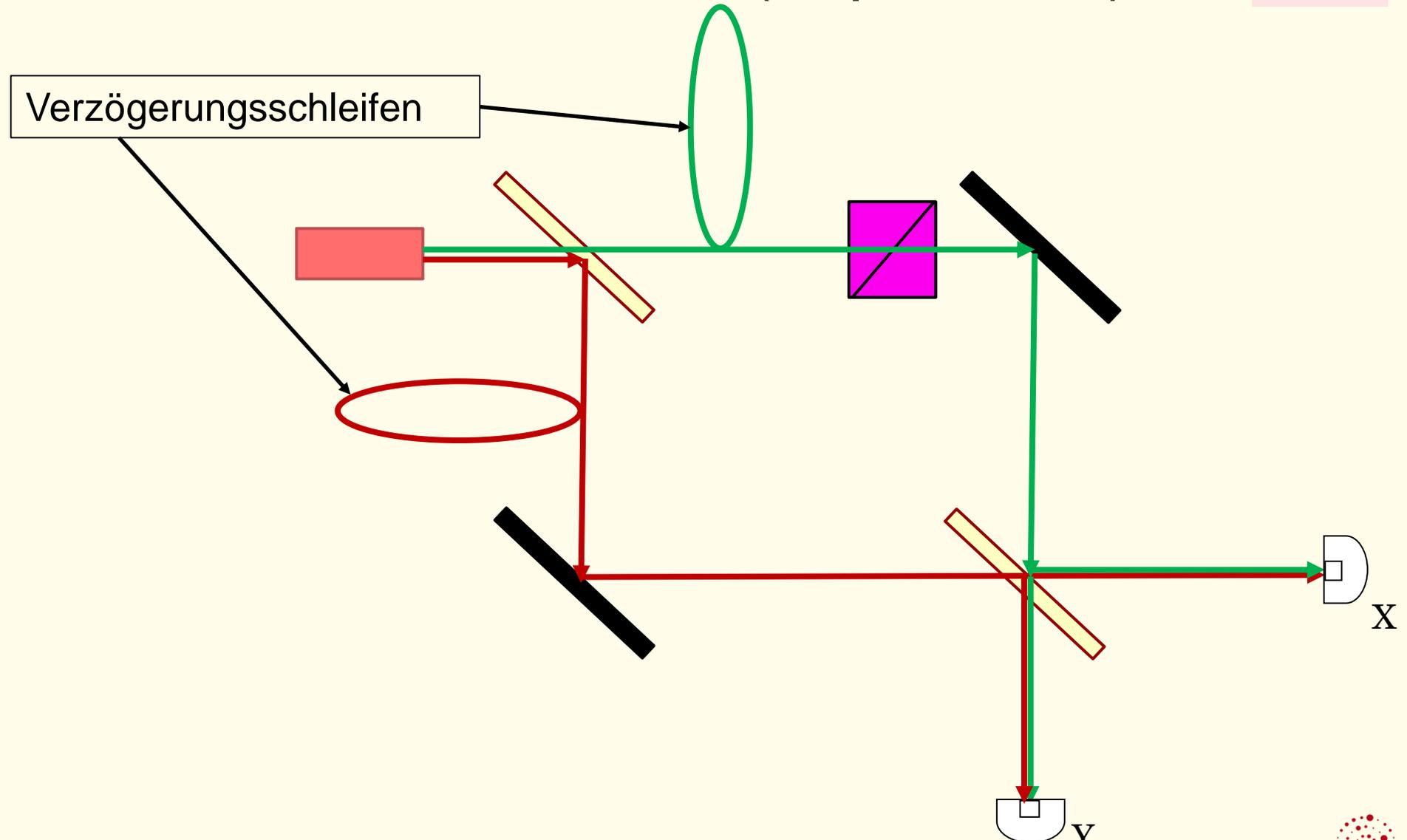
Kür

Ablenkung
ausgeschaltet:



Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

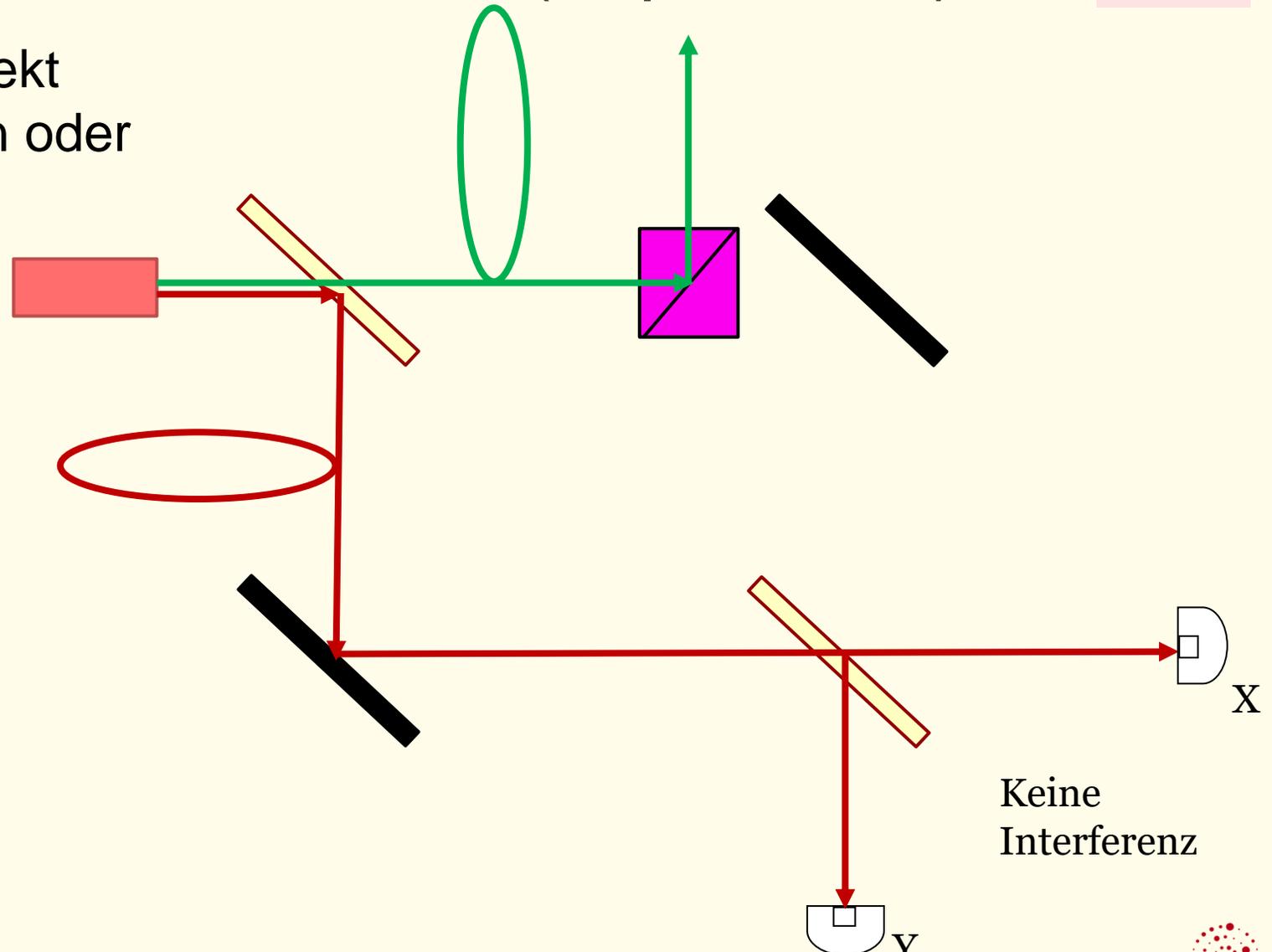
Kür



Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

Annahme: Das Quantenobjekt nimmt entweder den grünen oder einen roten Weg.

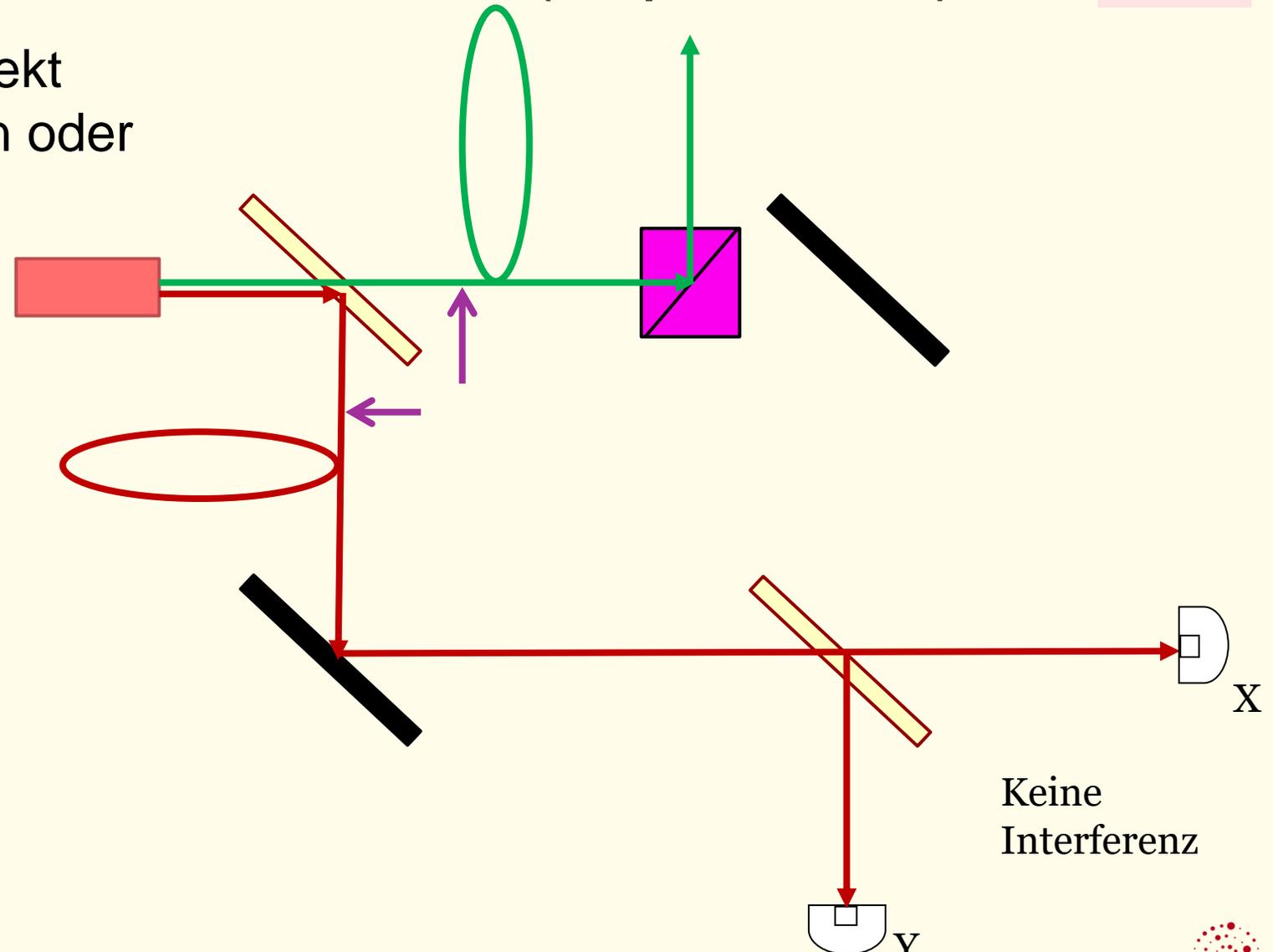


Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

Annahme: Das Quantenobjekt nimmt entweder den grünen oder einen roten Weg.

Delayed: Wenn das Quantenobjekt hinter dem 1. Strahlteiler ist,

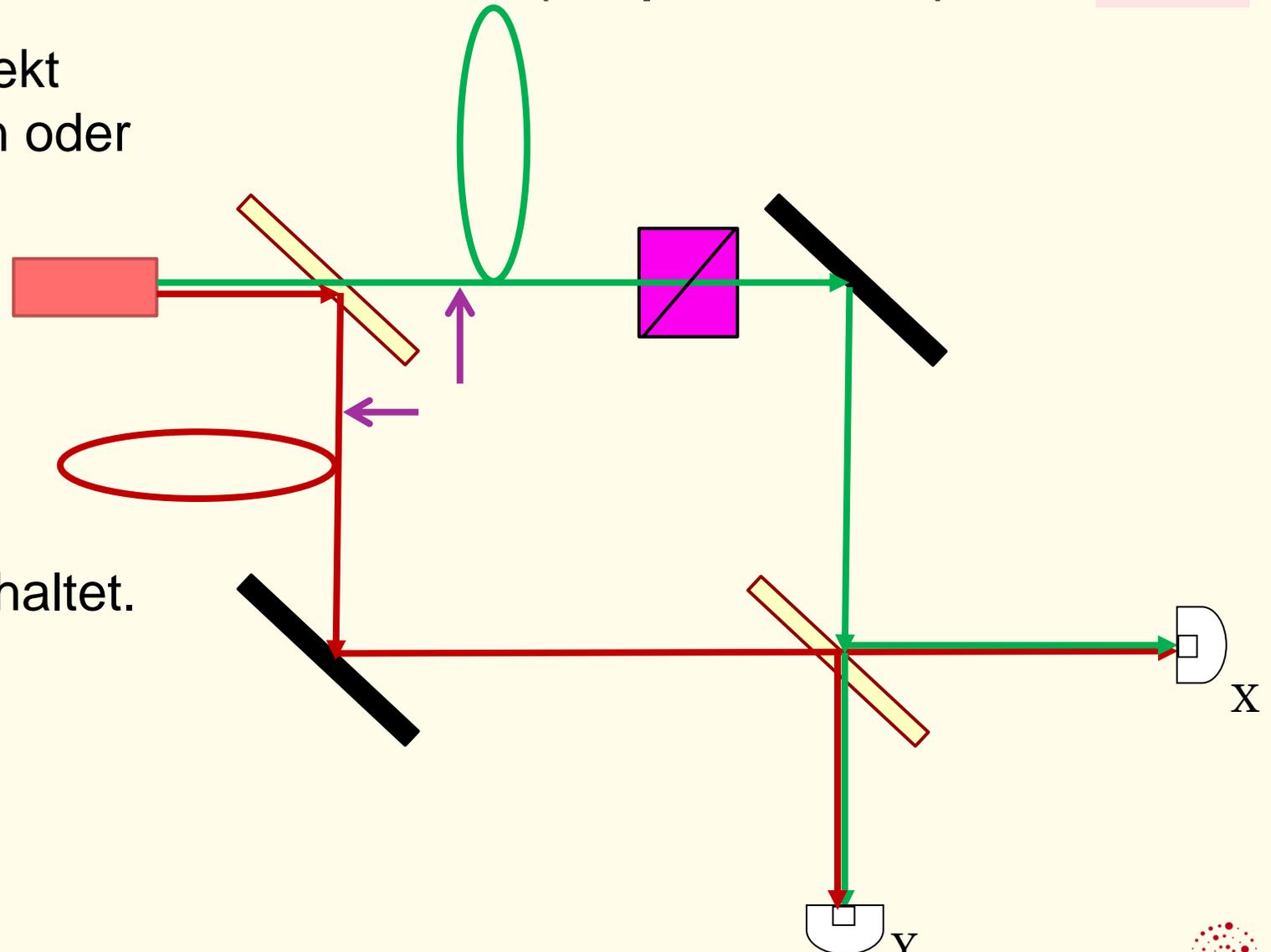


Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

Annahme: Das Quantenobjekt nimmt entweder den grünen oder einen roten Weg.

Delayed: Wenn das Quantenobjekt hinter dem 1. Strahlteiler ist, wird die Ablenkung schnell ausgeschaltet.



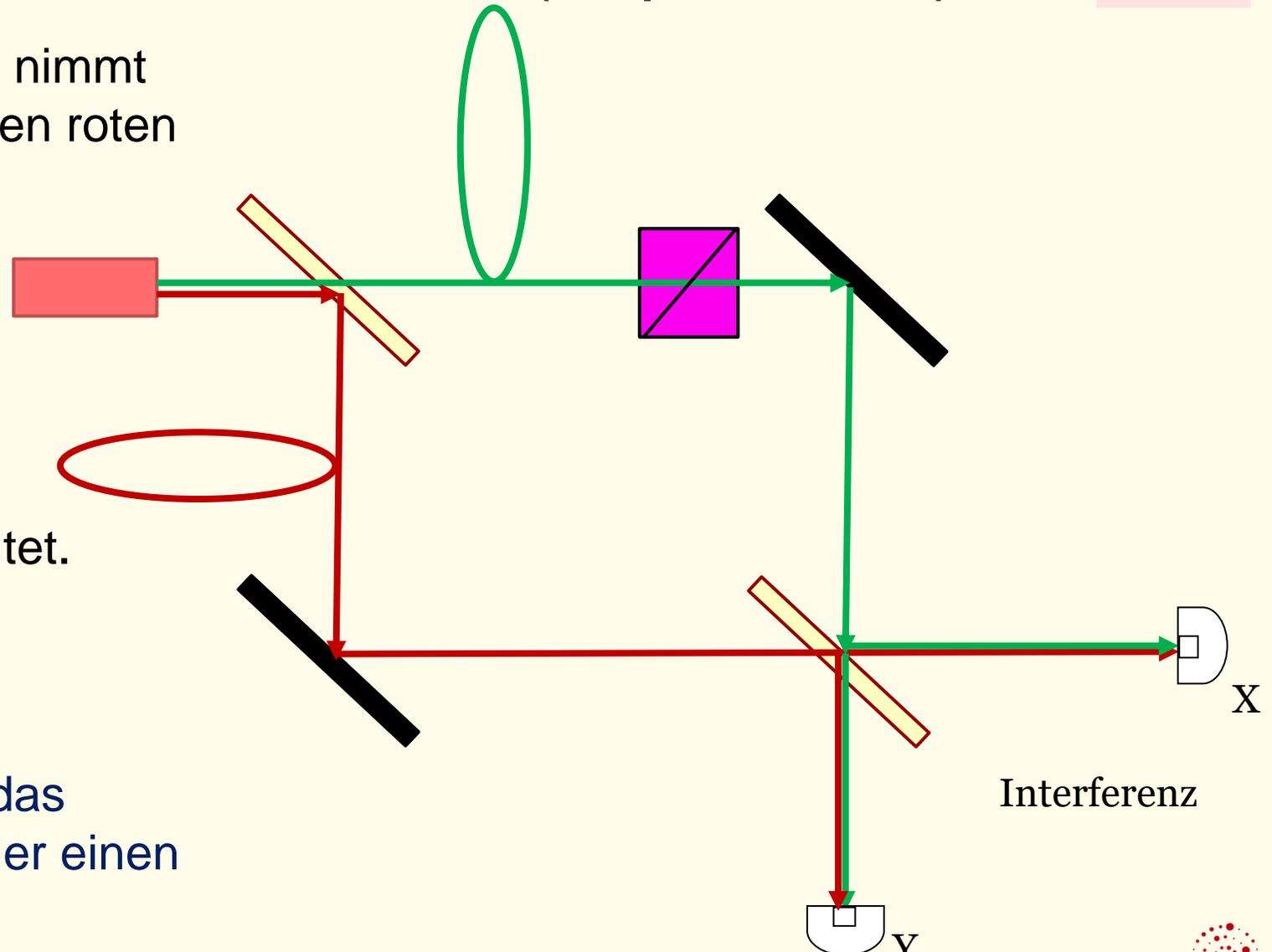
Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

Annahme: Das Quantenobjekt nimmt entweder den grünen oder einen roten Weg.

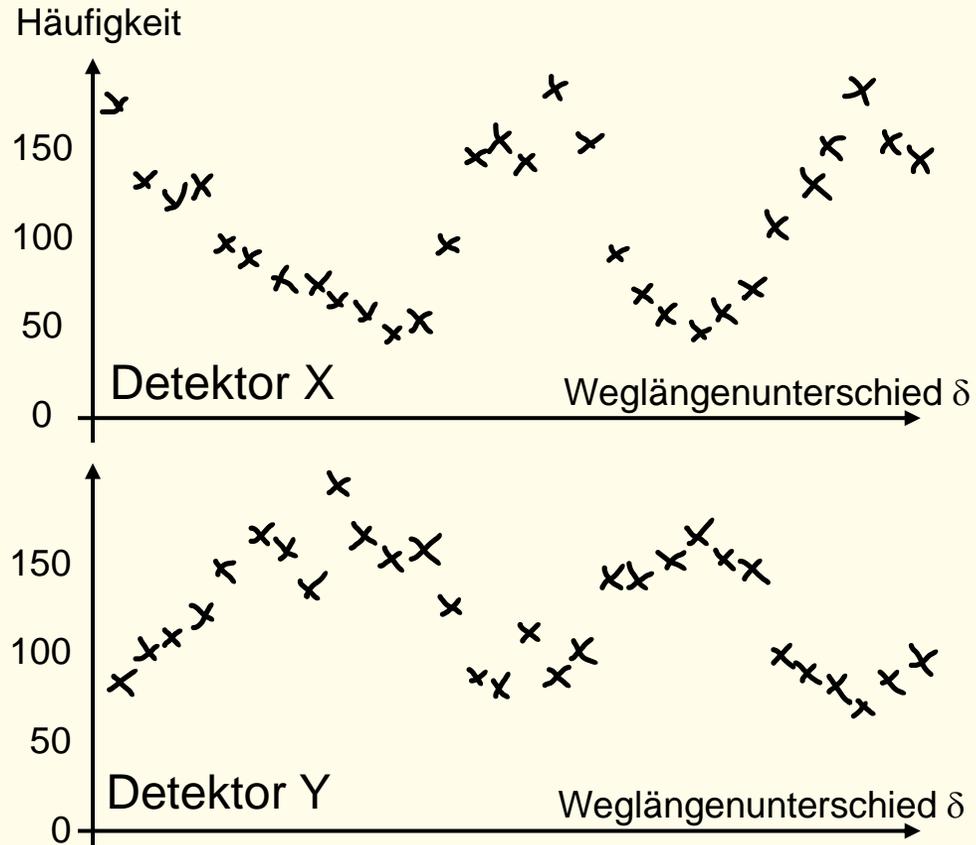
Delayed: Wenn das Quantenobjekt hinter dem 1. Strahlteiler ist, wird die Ablenkung schnell ausgeschaltet.

Ergebnis: Interferenz!
Die Annahme ist falsch, dass das Quantenobjekt am 1. Strahlteiler einen der Wege genommen hat.

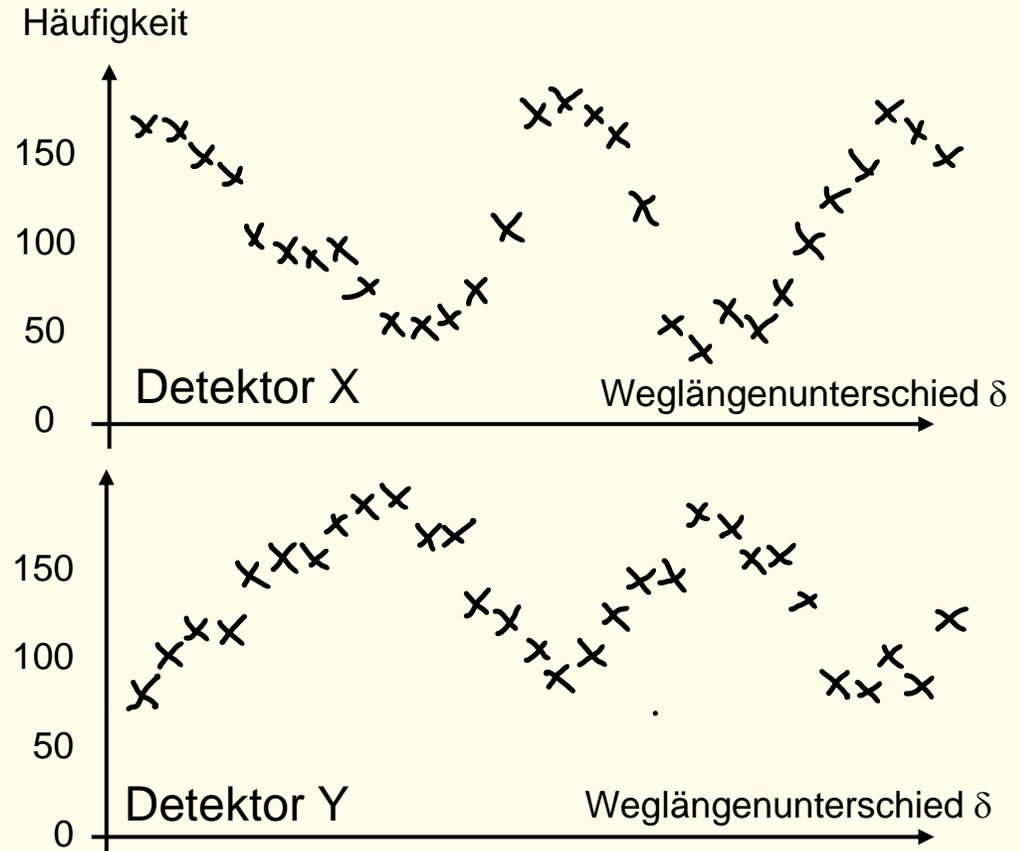


Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür



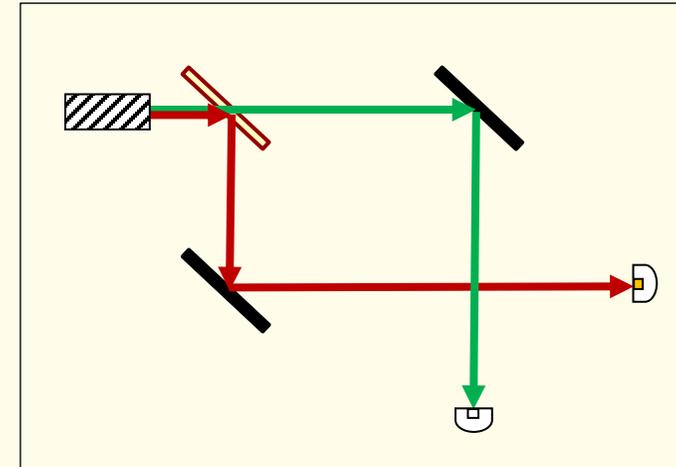
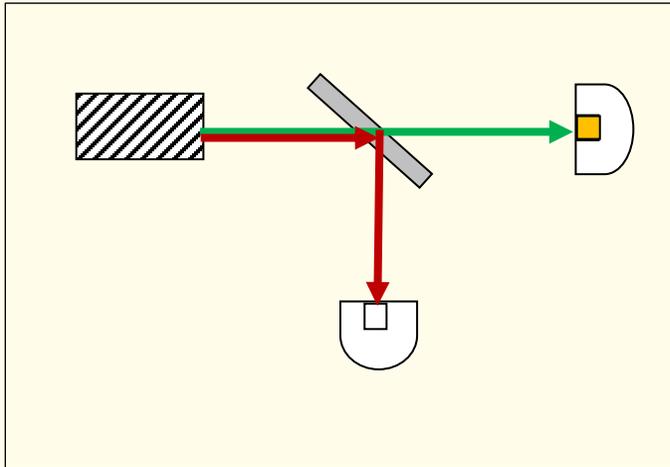
Ergebnis bei normaler Interferenz



Ergebnis mit delayed choice

Konsequenz

Kür



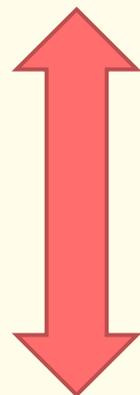
- Jegliche Modellvorstellung, dass sich das Quantenobjekt an einem Strahlteiler für einen Weg entscheidet, ist falsch.
- Man kann nicht vom Messergebnis auf den Zustand schließen: Zwar erhält man bei der Ortsmessung ein bestimmtes Ergebnis, der Zustand vorher war dennoch unbestimmt.

Inhalt

1. **Koinzidenzmethode:** (Nur LF) ✓
2. **Delayed-Choice-Experimente:** (Nur LF) ✓
Wegunbestimmtheit auch vor der Ortsmessung
3. **Komplementarität:** (LF und BF)
Welcher-Weg-Markierung,
Welcher-Weg-Information

3. Komplementarität (LF und BF)

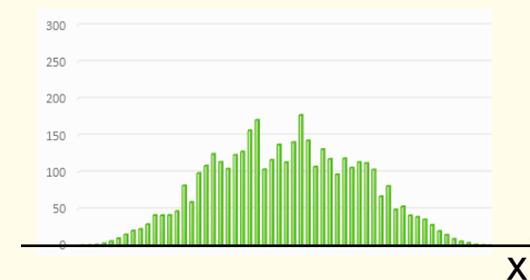
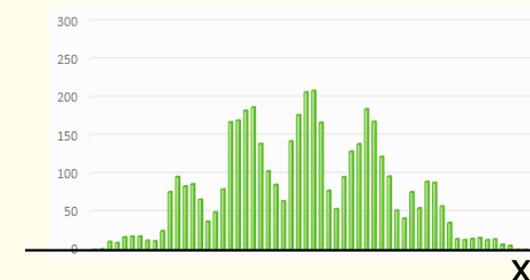
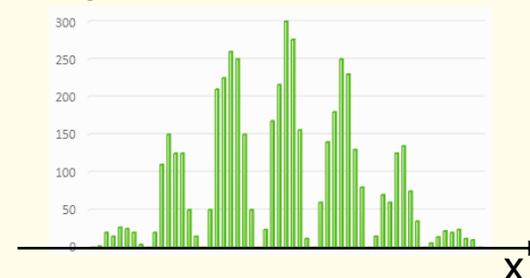
Sichtbarkeit des Interferenzmusters



Je mehr man vom
einen haben will,
desto weniger ist
vom anderen
möglich.

Zuverlässigkeit der
Welcher-Weg-Information

Häufigkeit



Offene Fragen

1. Bedeutet *Welcher-Weg-Information*, dass man weiß, welchen Weg das Quantenobjekt gegangen ist?
(Spoiler: nein!)
2. Was bedeutet *Welcher-Weg-Information* dann?
3. Wie realisiert man *Welcher-Weg-Information* im Experiment?

Wann hat man *Welcher-Weg-Information*?

Welcher-Weg-Information hat man, ...

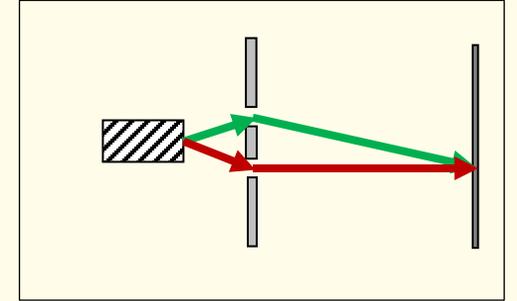
genau genommen:

... wenn das Experiment eine Messung erlaubt,
dessen Ergebnis man einem der beiden Wege **zuordnen** kann,

oft verwendete Formulierungen:

... wenn die Wege (durch eine Messung) **unterscheidbar** sind,

... wenn man den Weg markiert hat.



Wie gewinnt man eine *Welcher-Weg-Information*?

Durch eine Markierung,
die man durch eine Messung auslesen kann.

Möglichkeiten:

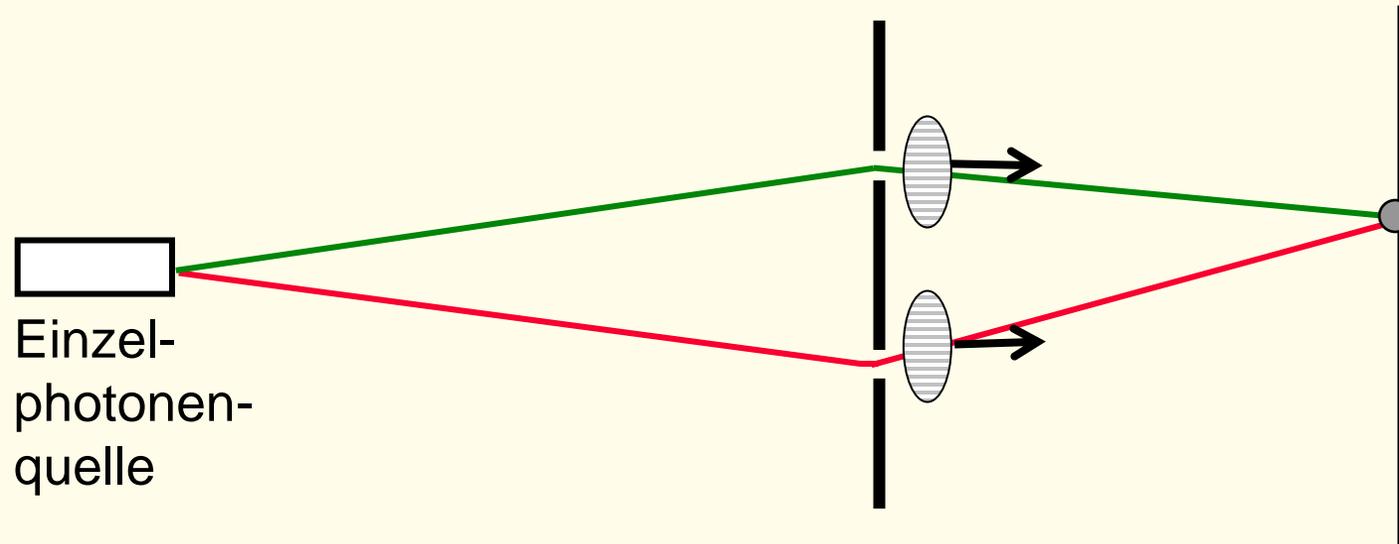
- Bei einem Atom: Energiezustand
- Bei einem Atom: Kernspin
- **Bei einem Photon: Polarisation**

- Zweites Quantenobjekt

**Alle anderen:
s. Material**

Wegmarkierung durch Polarisation

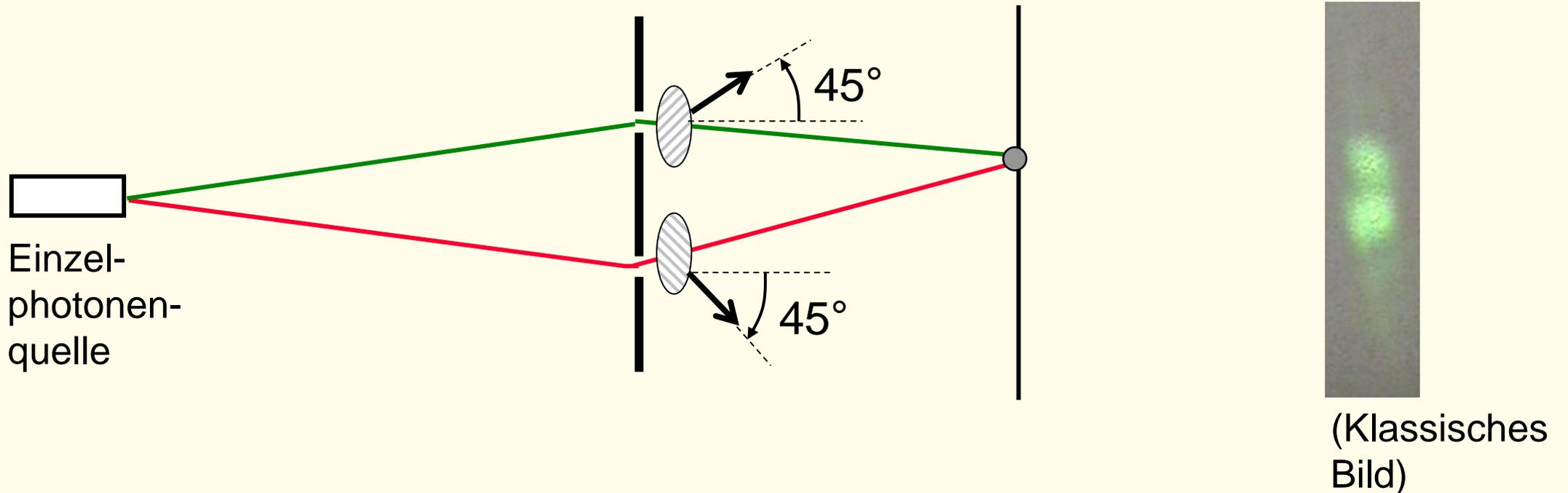
- Keine *Welcher-Weg-Information*:



(Klassisches Bild)

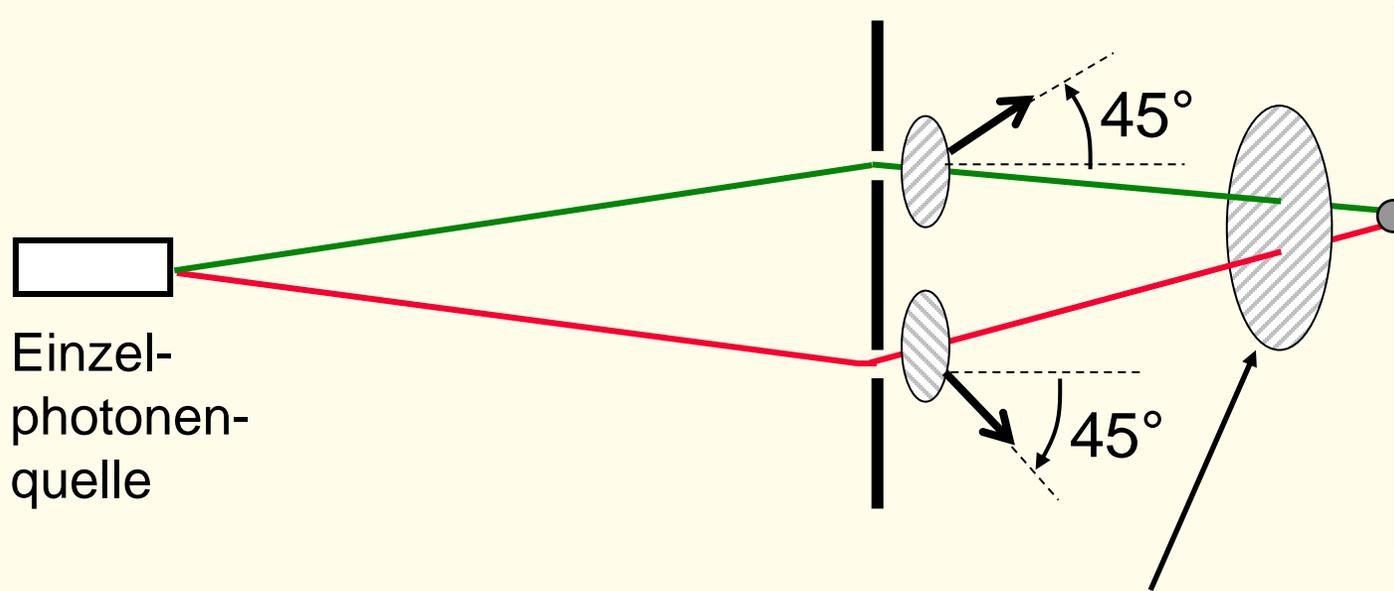
Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Wegmarkierung durch Polarisation

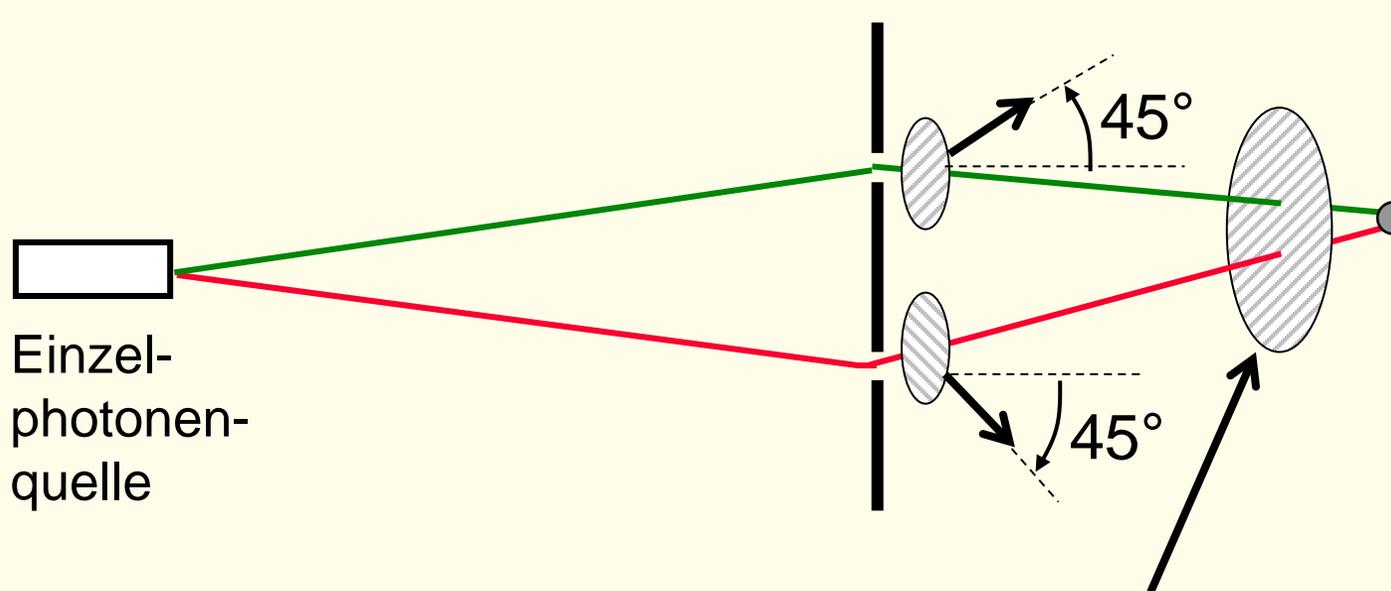
- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Die mögliche
unterscheidende Messung

Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Zuordnung:

Photon wird durchgelassen:

Grüner Weg

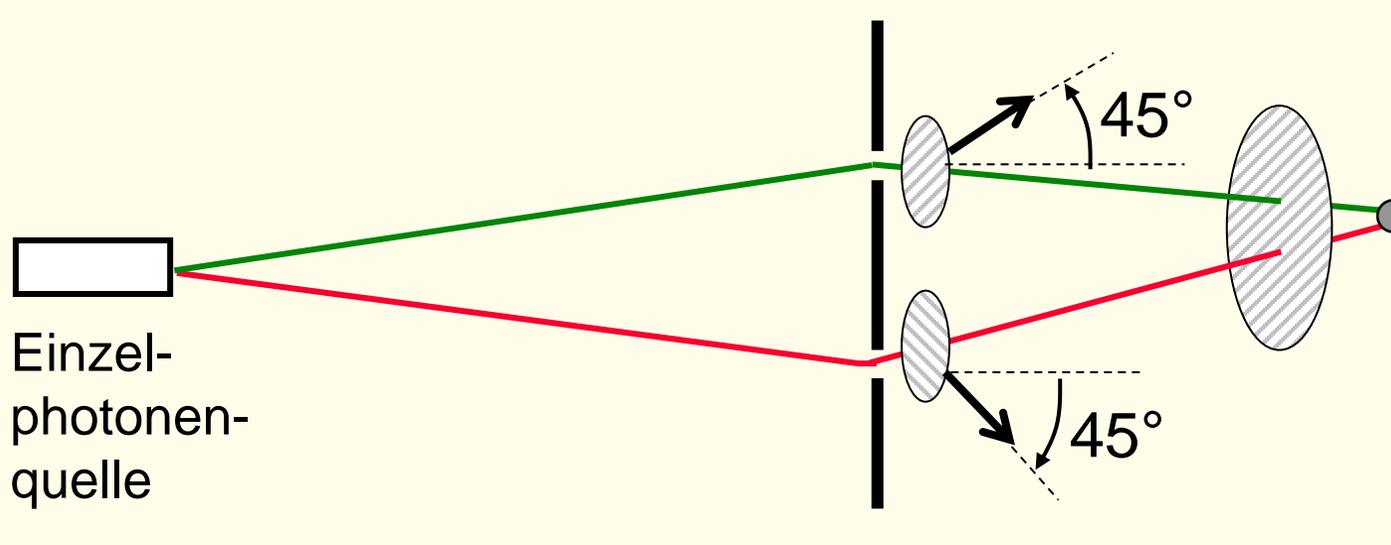
Photon wird absorbiert:

Roter Weg

Die mögliche
unterscheidende Messung

Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Zuordnung:

Photon wird durchgelassen:

Grüner Weg

Photon wird absorbiert:

Roter Weg

Wenn das Photon durchgelassen wird: Ist es dann nur den grünen Weg gegangen?

Nein! Bis zur Messung war es in einem Überlagerungszustand.

Folgerungen

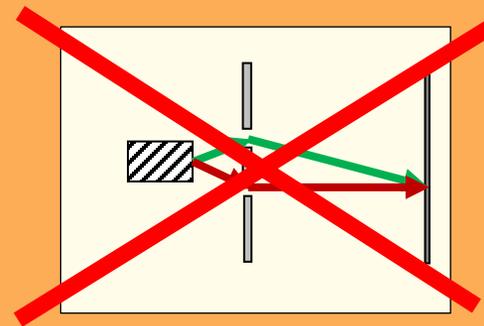
- Eine Welcher-Weg-Markierung ist keine Markierung im klassischen Sinn.
- Erst bei Messung wird die Markierung eindeutig. Ab dann ist auch der Weg bestimmt.
- Bis zur Messung waren die Markierung und der Weg unbestimmt.
- Also ist die *Welcher-Weg-Information* keine Information, welcher Weg genommen wurde,
- sondern:
eine unbestimmte Markierung, die die Interferenz verhindert.

Antworten

1. Bedeutet *Welcher-Weg-Information*, dass man weiß, welchen Weg das Quantenobjekt gegangen ist?
→ Nein!
2. Was bedeutet *Welcher-Weg-Information* dann?
→ Unterscheidbarkeit durch eine mögliche Messung
(bei gleichzeitiger Unbestimmtheit bis zur Messung)
3. Wie realisiert man *Welcher-Weg-Information* im Experiment?
→ Z.B. durch Polarisation eines Photons, Kernspin oder Energiezustand eines Atoms oder einen Streupartner

Warnung!

„Der Versuch der Wegmarkierung wird mit Entzug der Interferenz bestraft.“



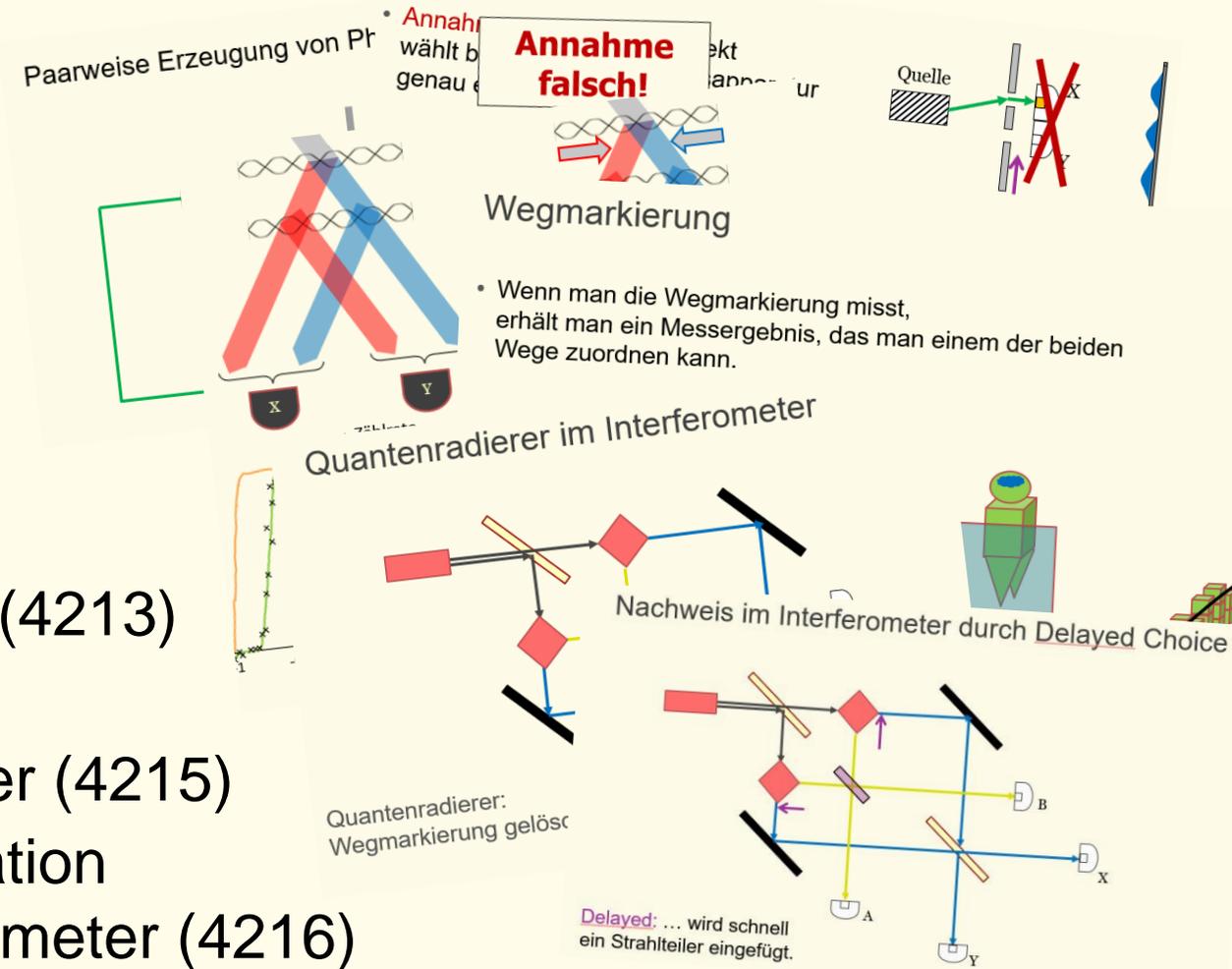
Inhalt

1. **Koinzidenzmethode:** (Nur LF) ✓
2. **Delayed-Choice-Experimente:** (Nur LF) ✓
Wegunbestimmtheit auch vor der Ortsmessung
3. **Komplementarität:** (LF und BF) ✓
Welcher-Weg-Markierung,
Welcher-Weg-Information

Überblick über das Material

1. Powerpoints

- Aus diesem Vortrag:
 - Koinzidenzmethode (4211)
 - Prinzip Delayed Choice (4212)
- Zusätzliche Folien:
 - Experimente zur Komplementarität (4213)
 - Analogie: 2 Türen (4214)
 - Quantenradierer beim Interferometer (4215)
 - Delayed Choice: Keine Weginformation trotz Wegmarkierung beim Interferometer (4216)



Überblick über das Material

- 4211_up_koinzidenzmethode: Unterrichtspräsentation mit Anwendungen der Koinzidenzmethode
- 4212_up_delayed_choice: Unterrichtspräsentation zu Delayed-Choice-Experimenten (Pflicht und Kür)
- 4213_up_experimete_komplementaritaet: Unterrichtspräsentation zu real durchgeführten Experimenten zur Komplementarität
- 4214_up_analogie_2_tueren: Unterrichtspräsentation mit einer Analogie zur Wegmarkierung
- 4215_up_quantenradierer_interferometer: Unterrichtspräsentation zum Quantenradierer im Interferometer mit Einzelphotonen
- 4216_up_delayed_choice_bei_wegmarkierung: Unterrichtspräsentation zur Delayed-Choice-Variante eines Experiments mit Wegmarkierung
- 4221_ab_delayed_choice_mit_loesung: Arbeitsblatt zu Delayed-Choice-Experimenten
- 4222_ab_unbestimmtheit_messung_mit_loesung: Arbeitsblatt zu Unbestimmtheit und Messprozess
- 4223_ab_weg_unterscheidung_mit_loesung: Arbeitsblatt zu Wegmarkierung/Welcher-Weg-Information