

# 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*

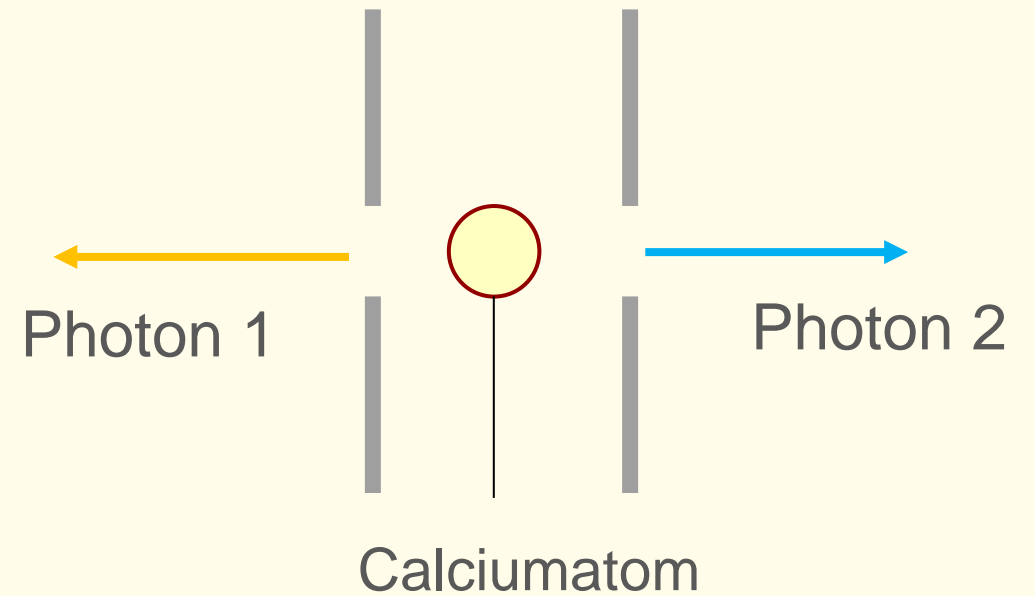
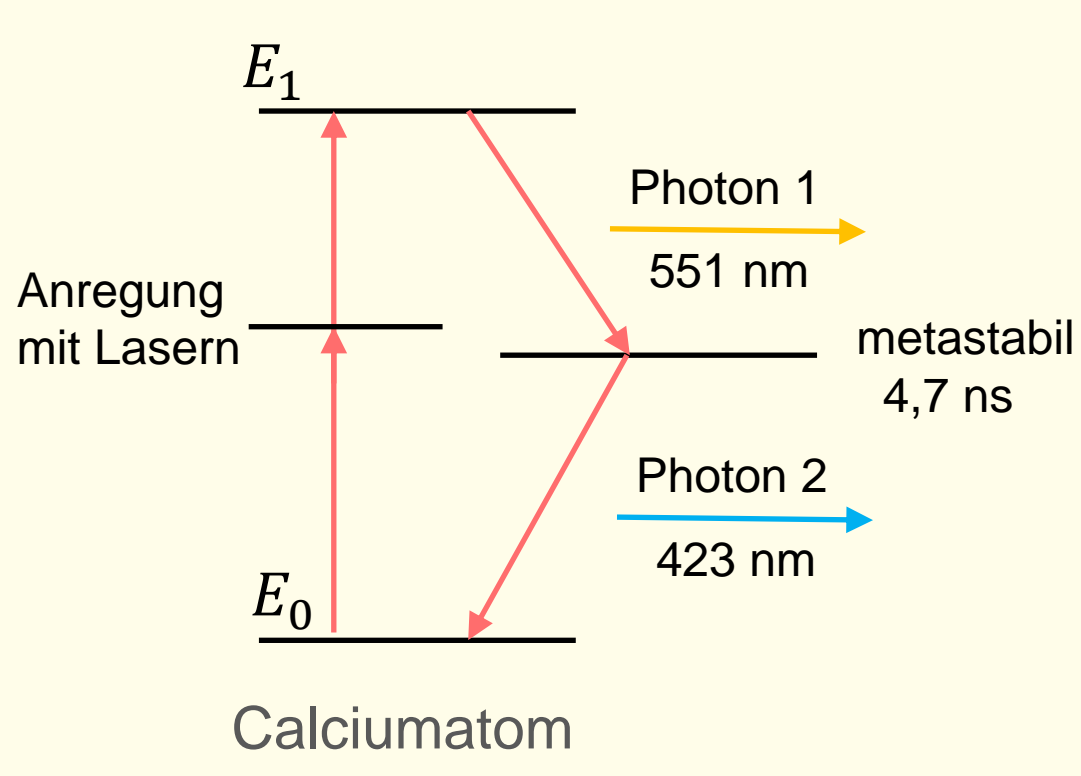
„**Komplementarität**“ steht zwar neu im Bildungsplan, wurde aber wohl häufig schon zusammen mit der *Welcher-Weg-Information* unterrichtet.

# 1. Koinzidenzmethode (nur LF)

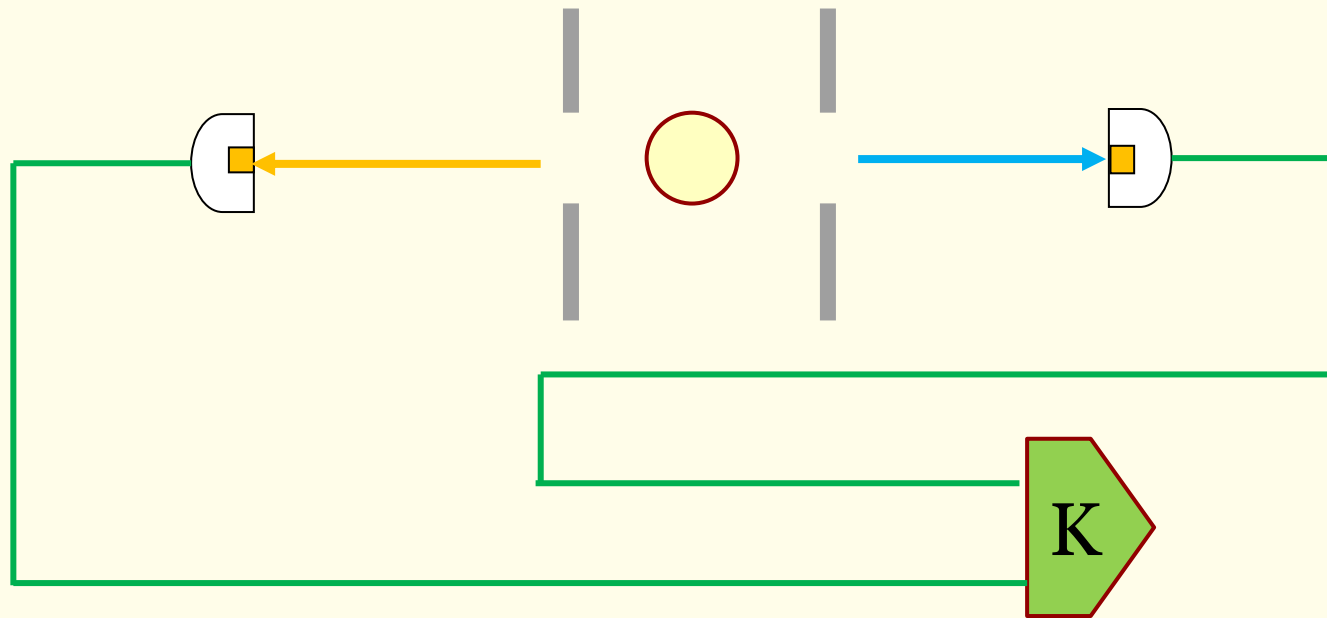
- Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren
- Antikoinzidenz beim Strahlteiler und Doppelspalt

# Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

## Kaskadenprozess beim Calciumatom



# Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

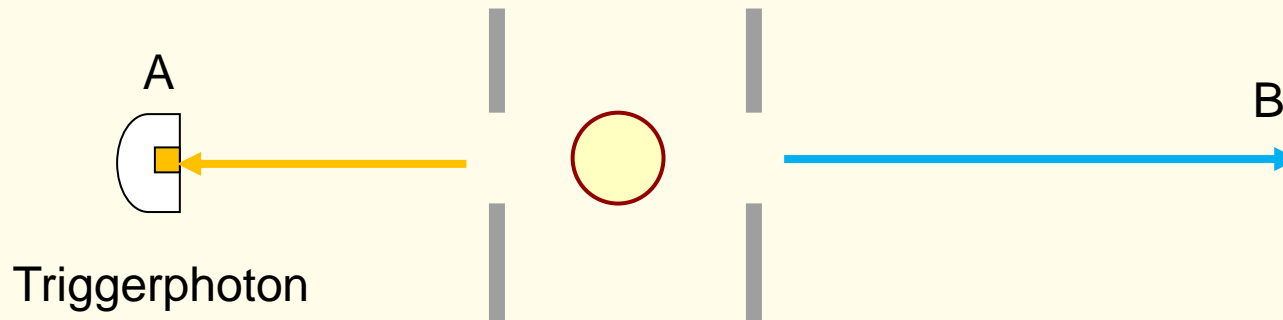


Beispiel 1  
(Eines dieser Beispiele wird empfohlen, damit man anschließend von „Einzelphotonen“ in Quanten-Experimenten reden kann.)

Beide Detektoren weisen stets gleichzeitig ein Photon nach.

# Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

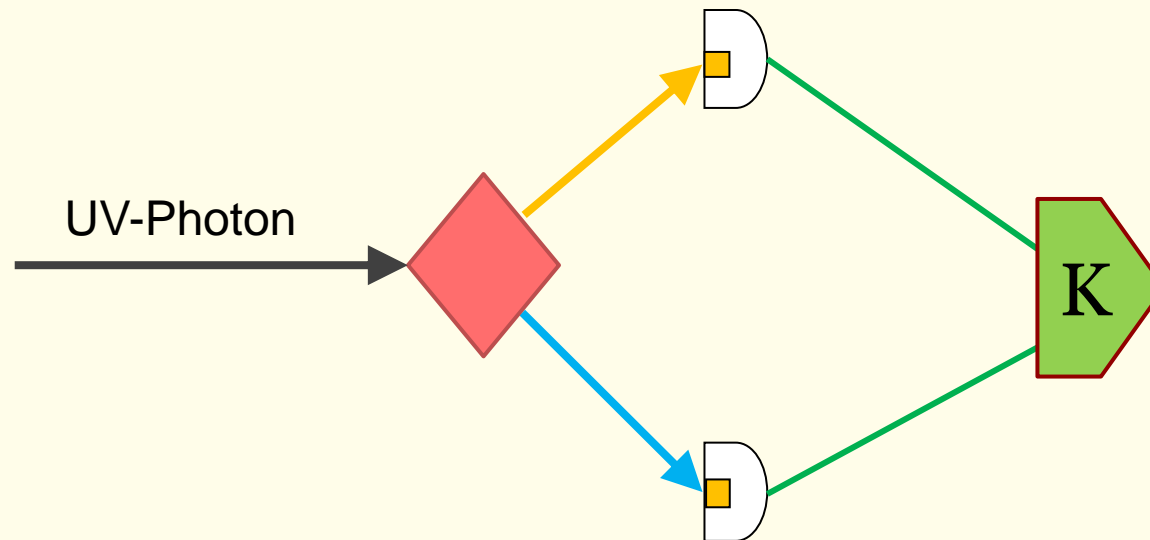
→ Erzeugung von Einzelphotonen:



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:



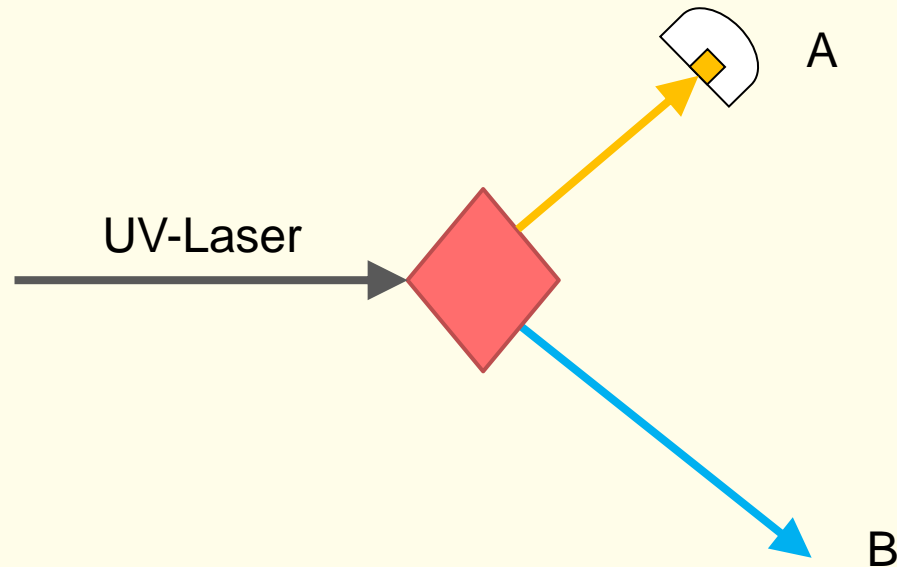
Beispiel 2  
(Eines dieser Beispiele wird empfohlen, damit man anschließend von „Einzelphotonen“ in Quanten-Experimenten reden kann.)

Beide Detektoren weisen stets gleichzeitig ein Photon nach.



# Koinzidenz bei der Erzeugung von Photonenpaaren

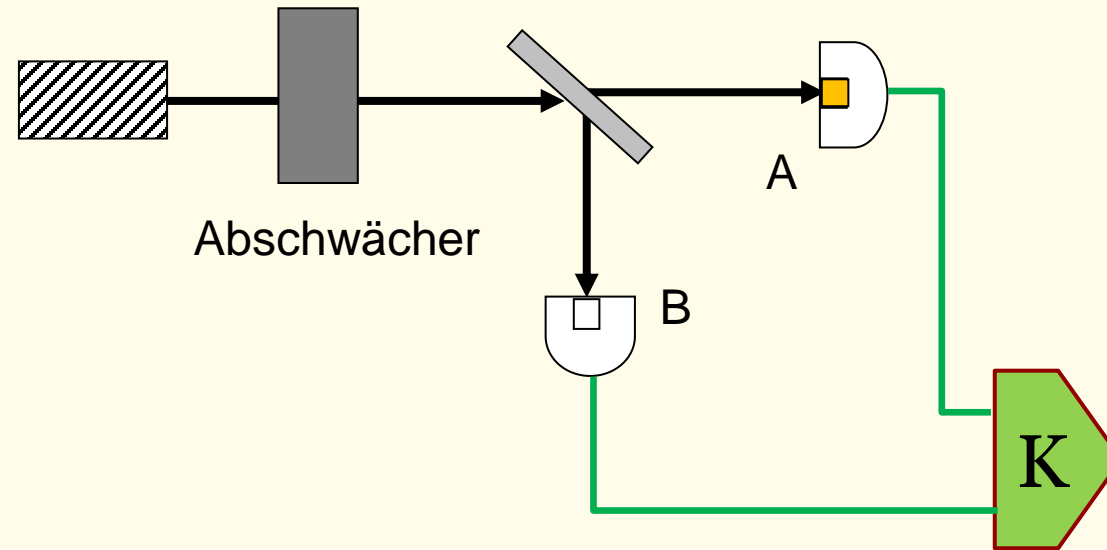
→ Erzeugung von Einzelphotonen:



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

# Antikoinzidenz beim Strahlteiler?

Diese Beispiele sind nicht verpflichtend



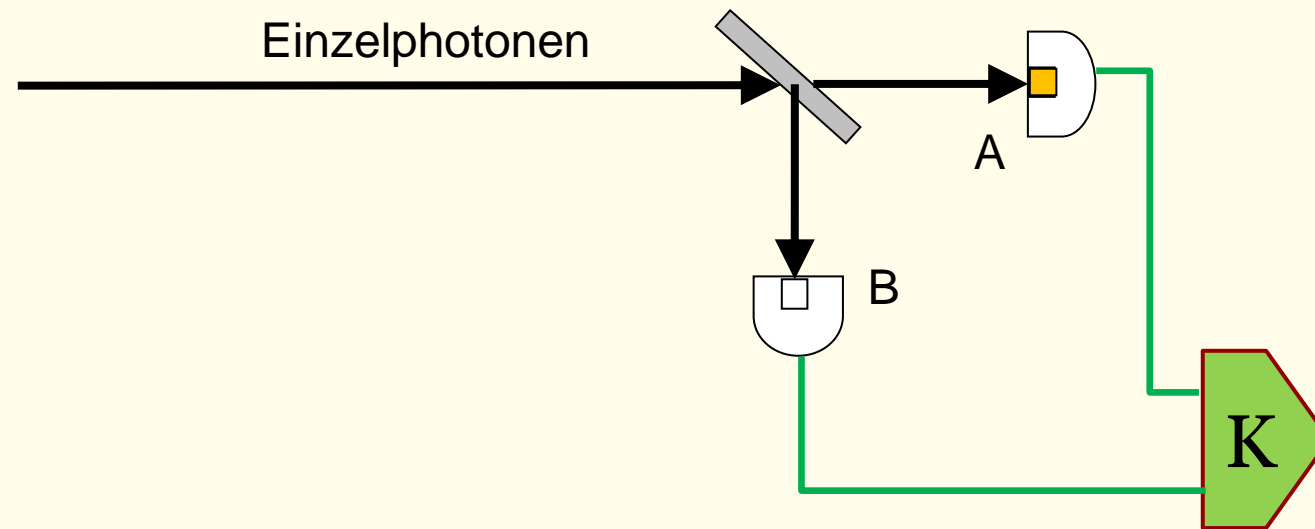
Abgeschwächtes Licht:

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

Grund: Bunching der Photonen

# Antikoinzidenz beim Strahlteiler?

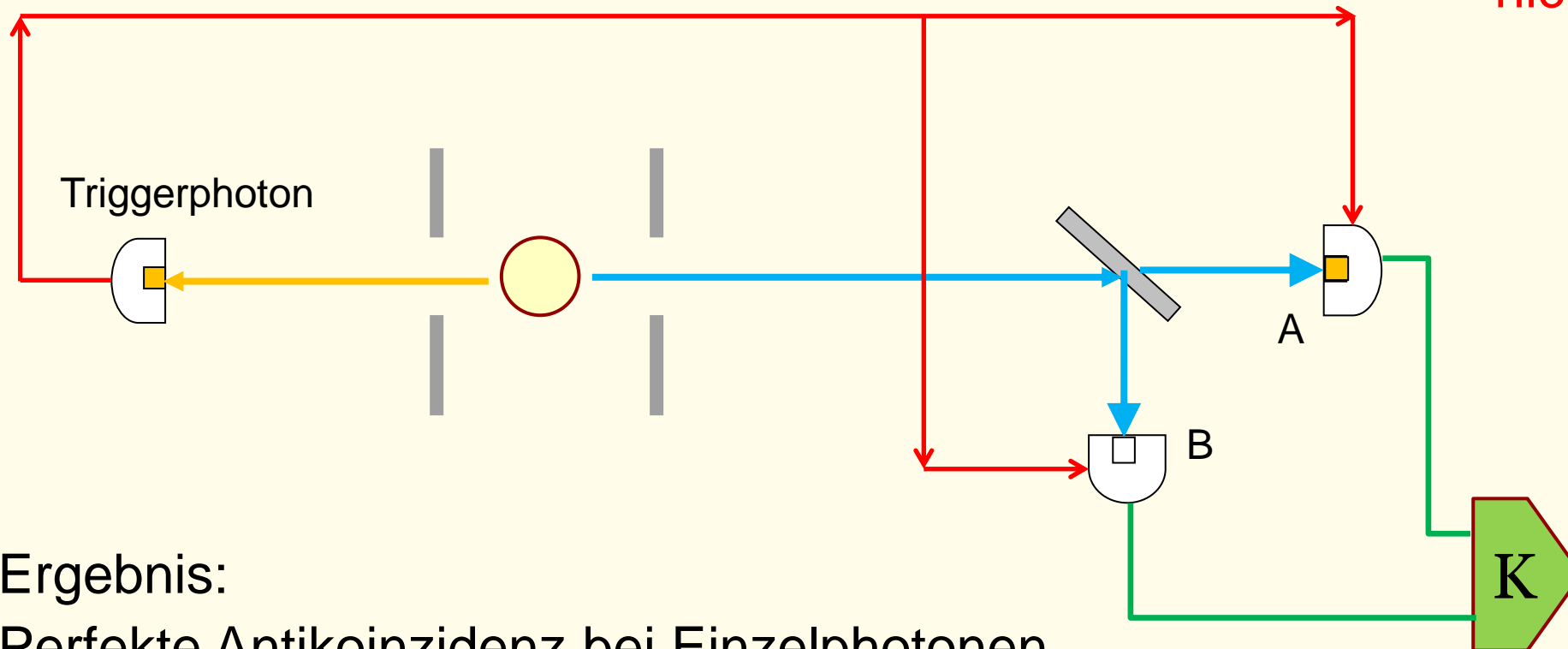
Diese Beispiele sind nicht verpflichtend



Ergebnis:  
Perfekte Antikoinzidenz bei Einzelphotonen

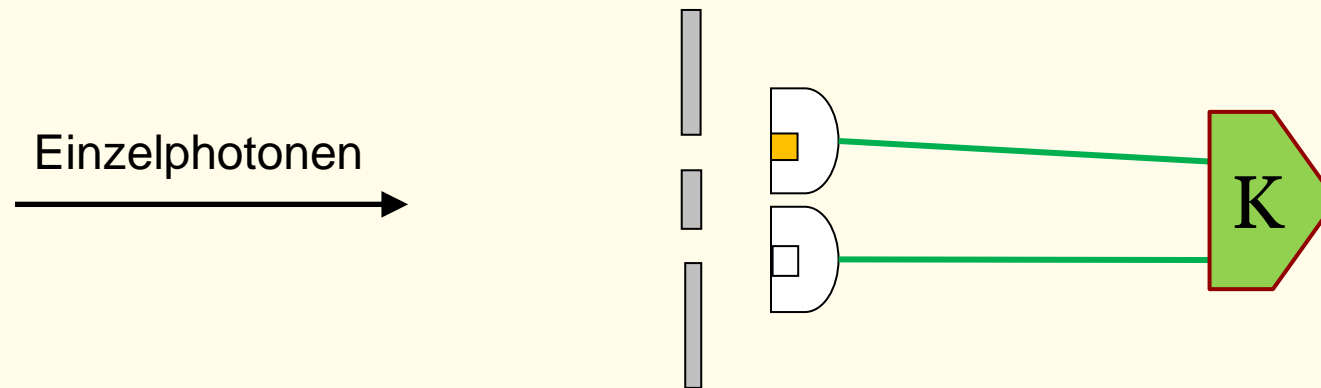
# Antikoinzidenz beim Strahlteiler?

Diese Beispiele sind nicht verpflichtend



Ergebnis:  
Perfekte Antikoinzidenz bei Einzelphotonen

# Antikoinzidenz beim Doppelspalt



Diese Beispiele sind nicht verpflichtend

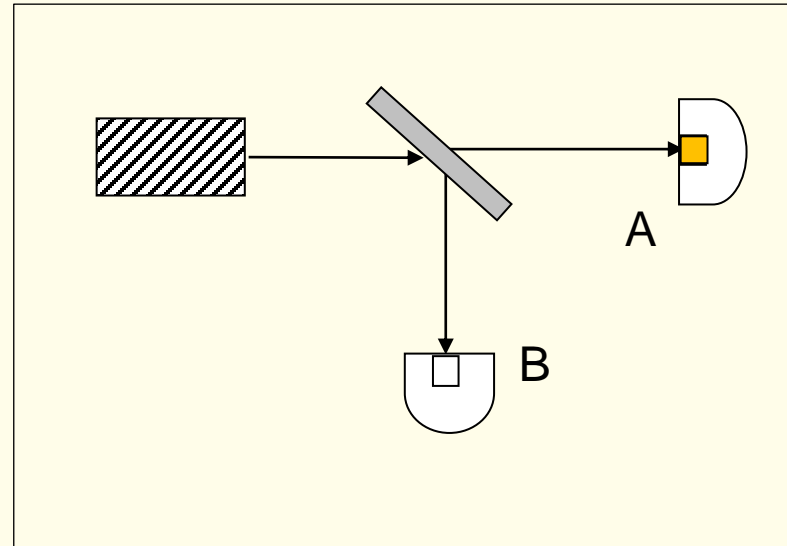
## Antikoinzidenz bei Einzelphotonen

# 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)

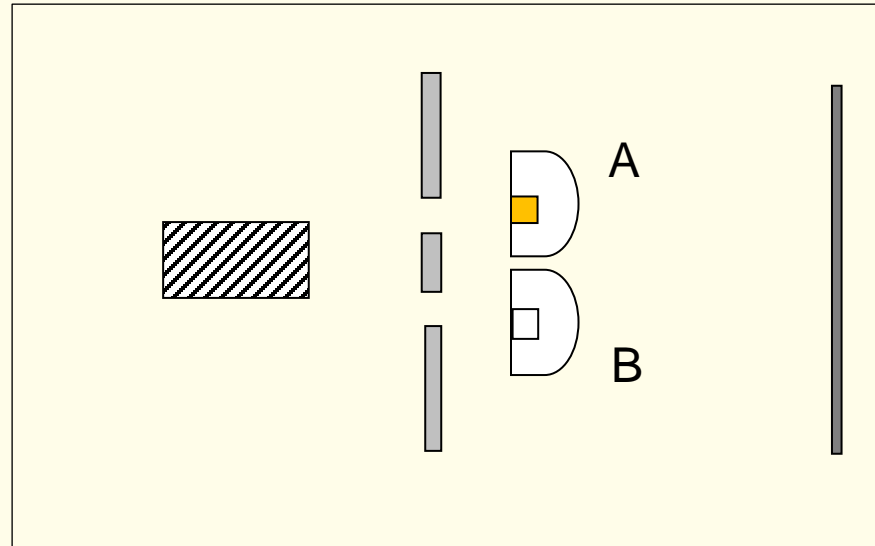
# Warum Delayed-Choice?



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

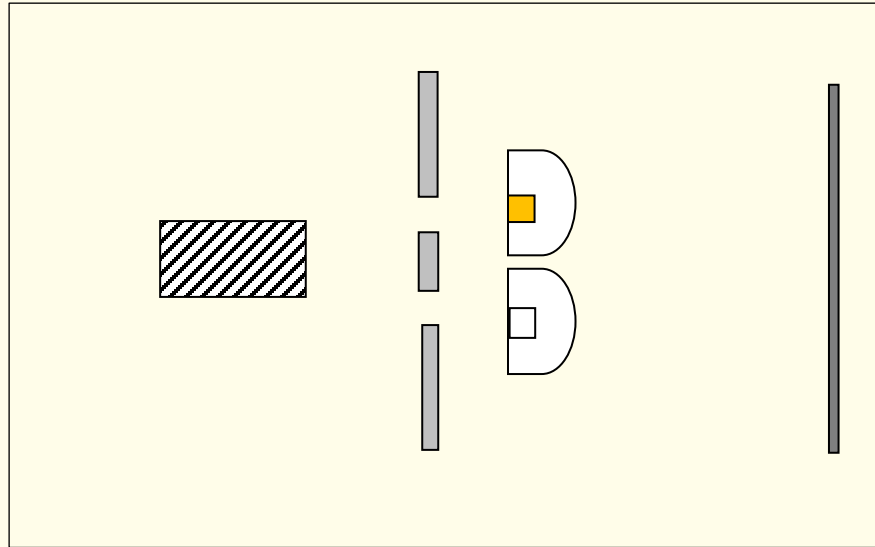


# Warum Delayed-Choice?



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

# Warum Delayed-Choice?



## Falsche Vorstellung:

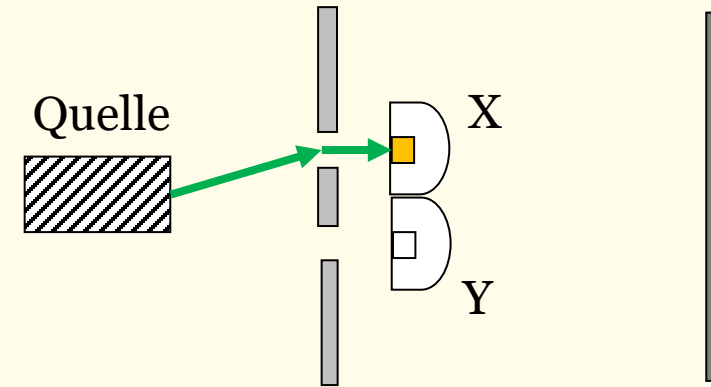
„Wenn man Ortsmessungen auf den beiden Wegen macht, dann geht das Quantenobjekt nur einen Weg.“

**Leider  
falsch!**

# Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

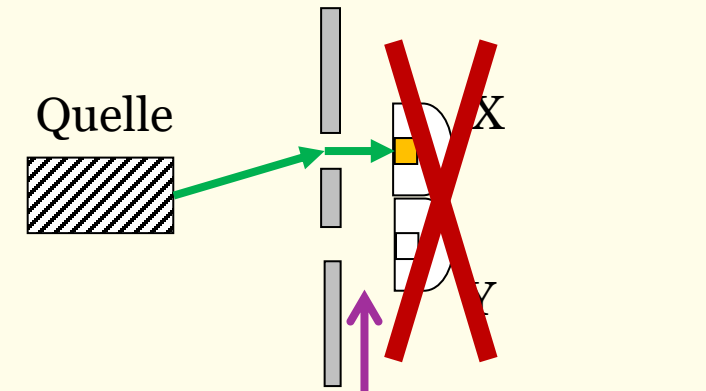
- **Annahme:** Das Quantenobjekt wählt bei vorhandener Messapparatur genau einen Weg (choice).



# Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

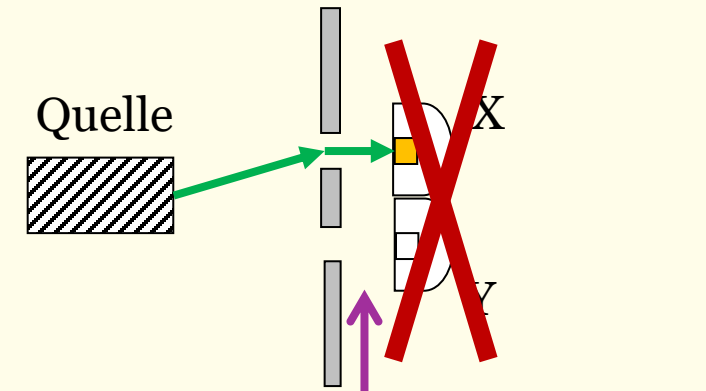
- **Annahme:** Das Quantenobjekt wählt bei vorhandener Messapparatur genau einen Weg (choice).
- **Delayed:** Etwas später: Wenn das Quantenobjekt etwa auf der Höhe des lila Pfeils ist, wird die Messapparatur entfernt.



# Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

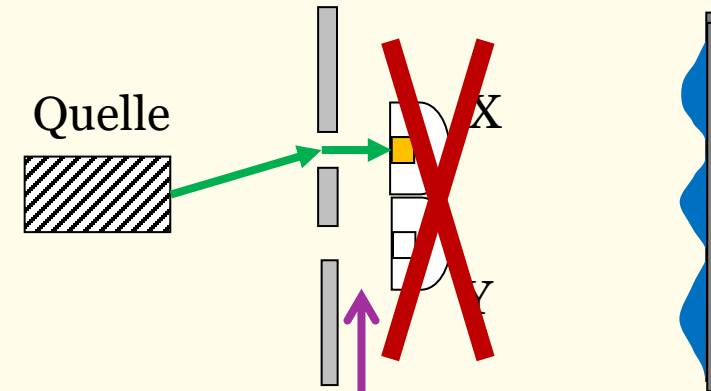
- **Annahme:** Das Quantenobjekt wählt bei vorhandener Messapparatur genau einen Weg (choice).
- **Delayed:** Etwas später: Wenn das Quantenobjekt etwa auf der Höhe des lila Pfeils ist, wird die Messapparatur entfernt.
- Erwartet man Interferenz?  
Nein!



# Prinzip der Delayed-Choice-Experimente

Pflicht

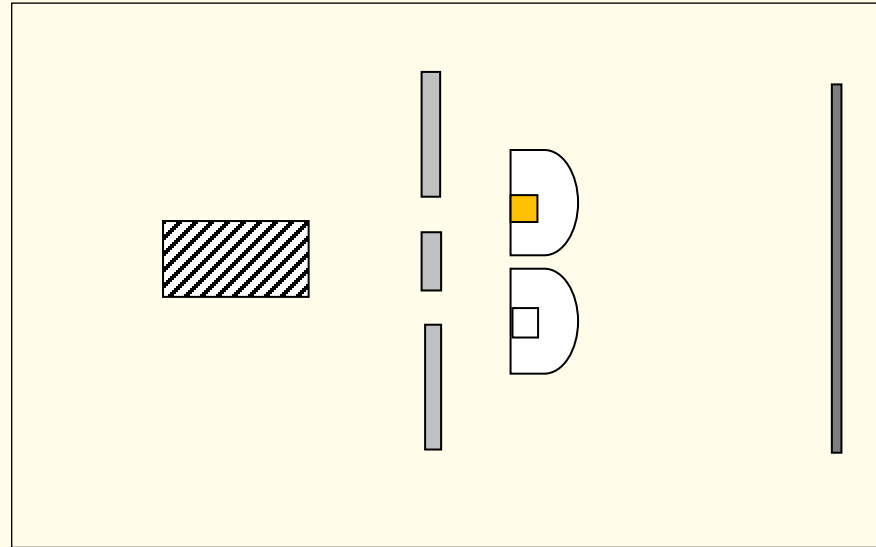
- **Annahme** wählt b...  
genau e...  
**Annahme falsch!** ...



- **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

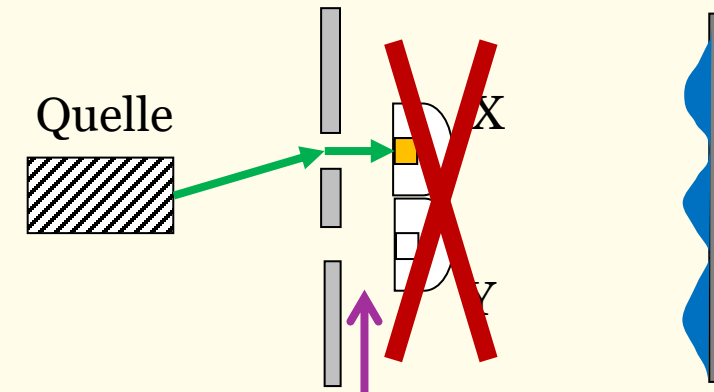
Pflicht



- 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)

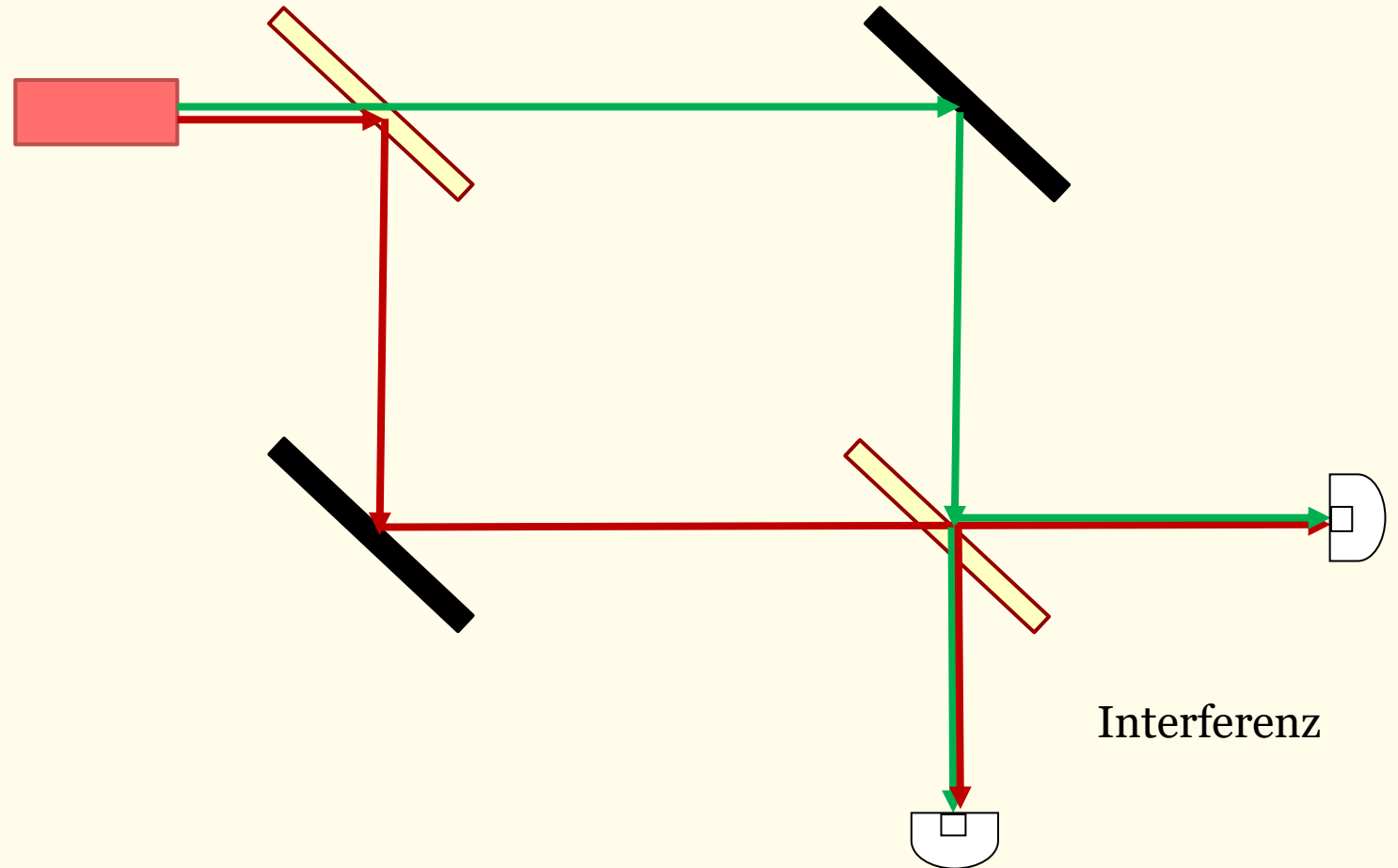
Kür

- Vertiefung 1

# Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

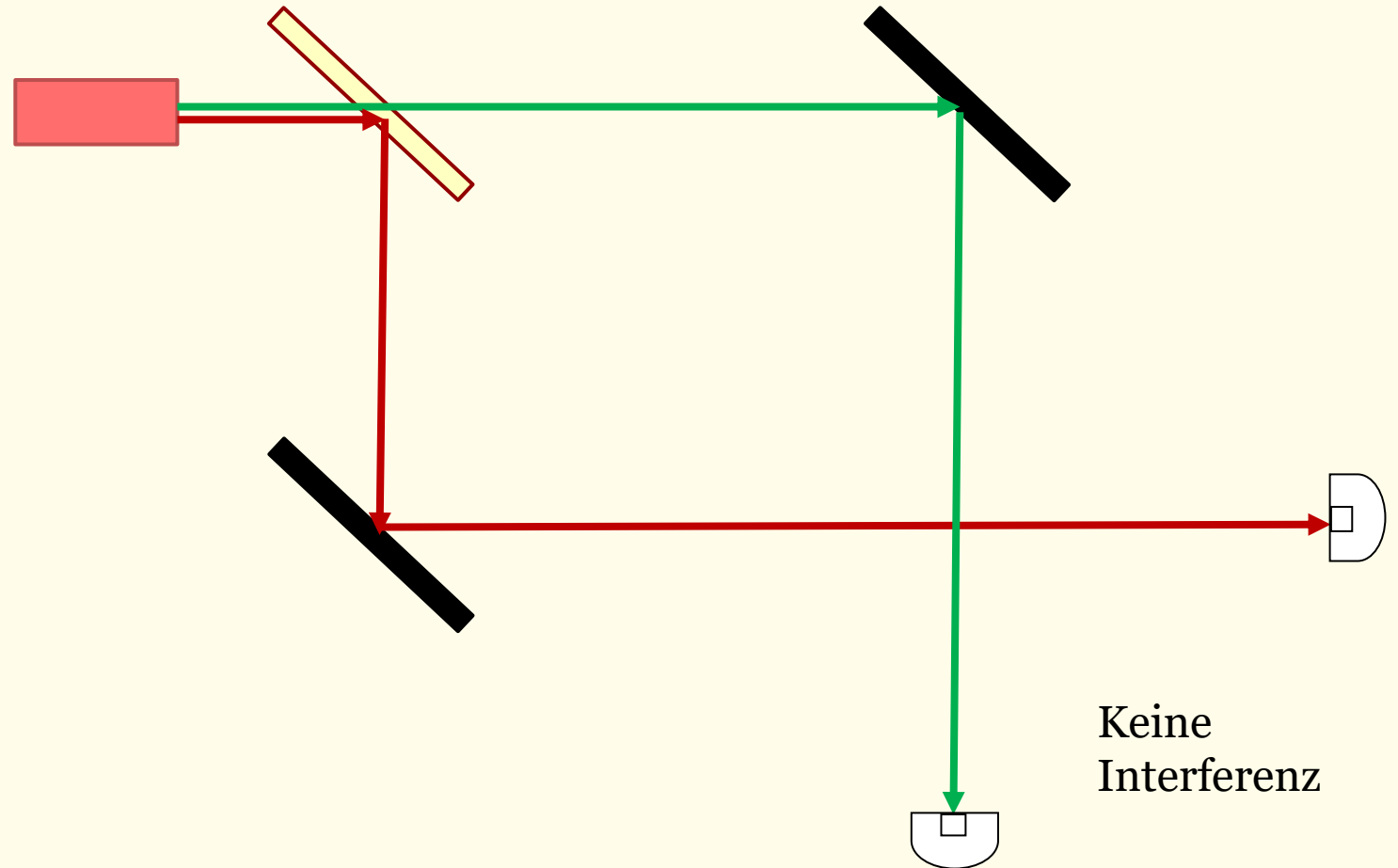
Interferometer



# Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

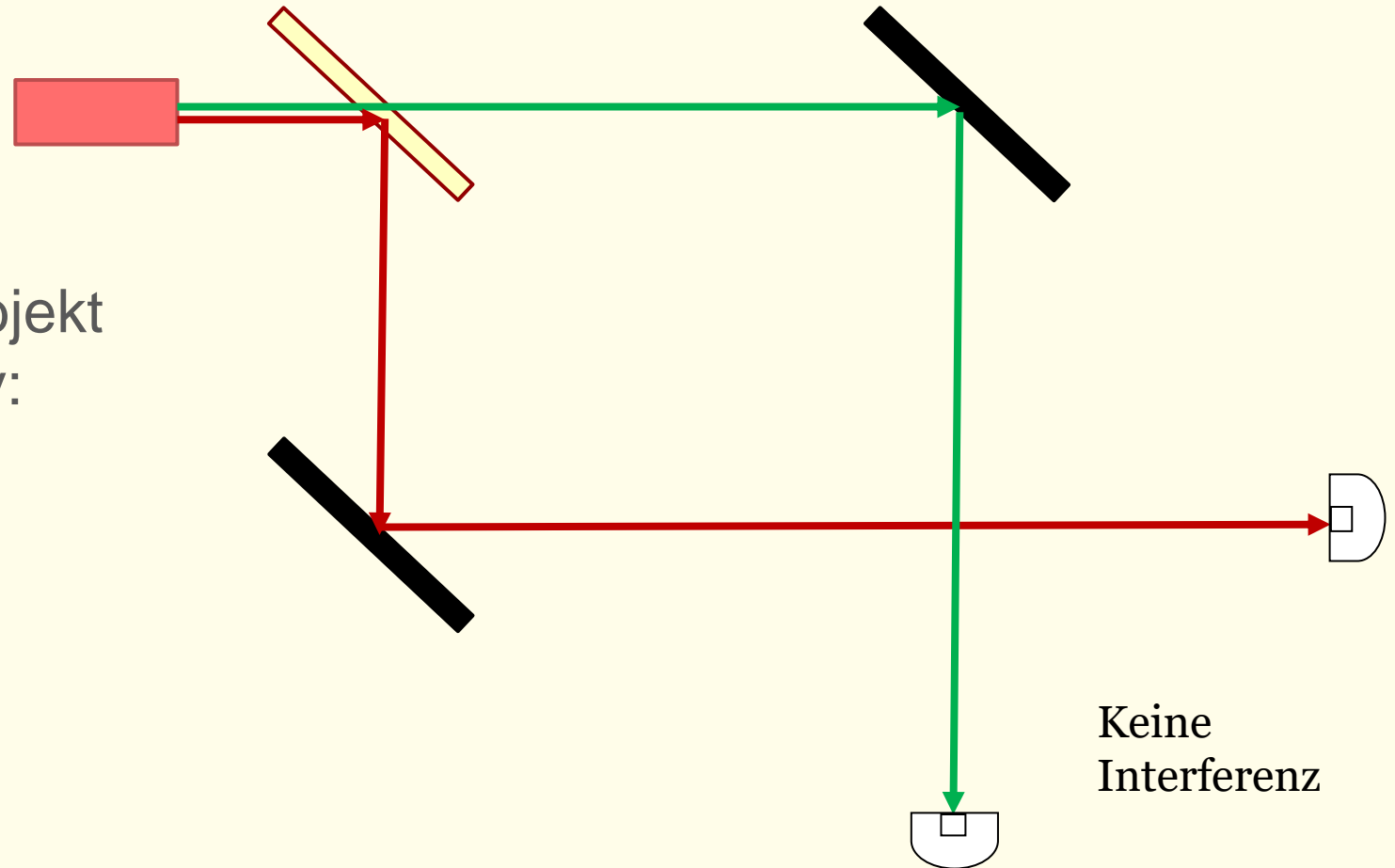
Nur ein Strahlteiler



# Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

Kür

**Annahme:** Das Quantenobjekt wurde reflektiert (alternativ: durchgelassen)

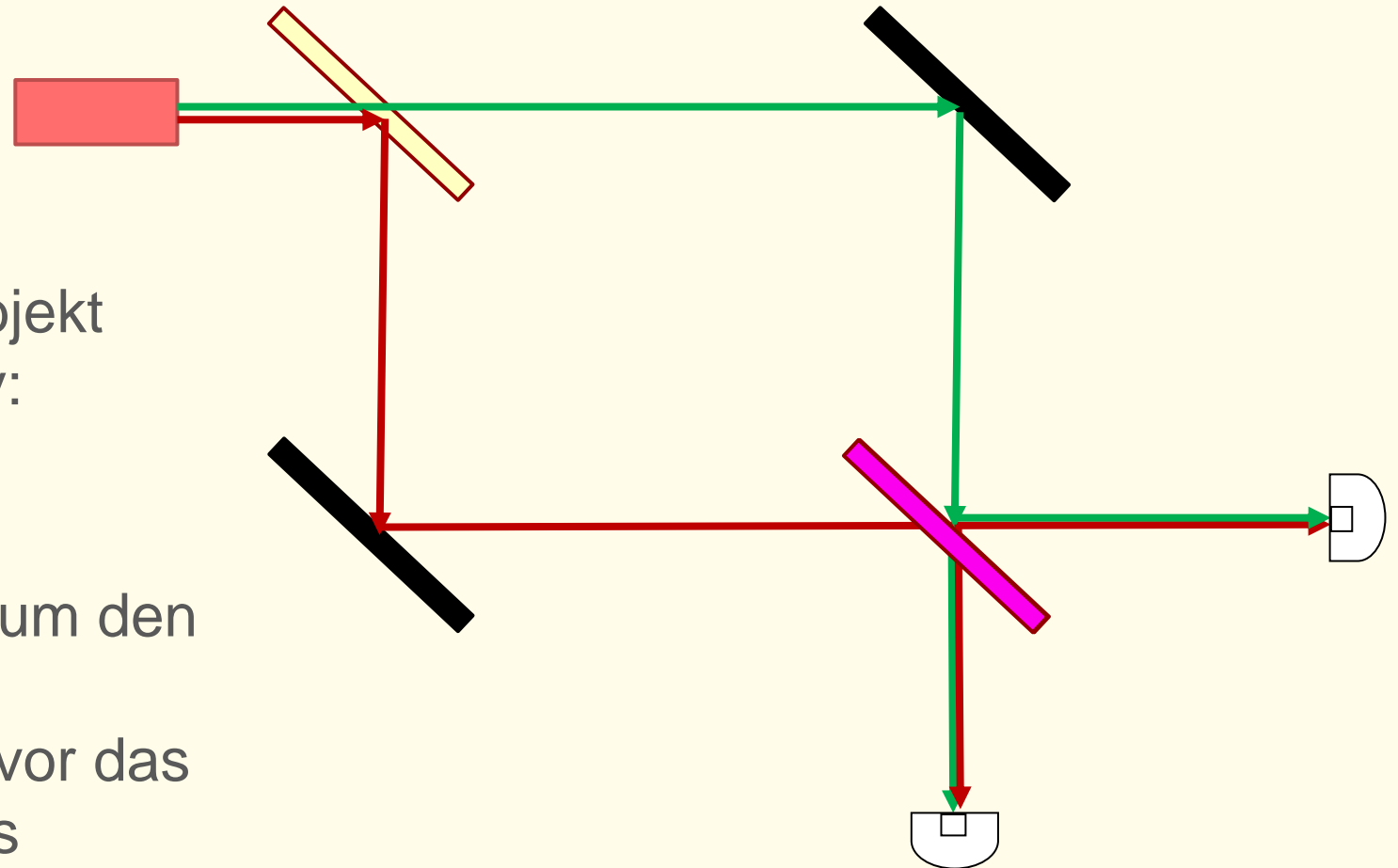


# Delayed-Choice am Interferometer (Prinzip)

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)

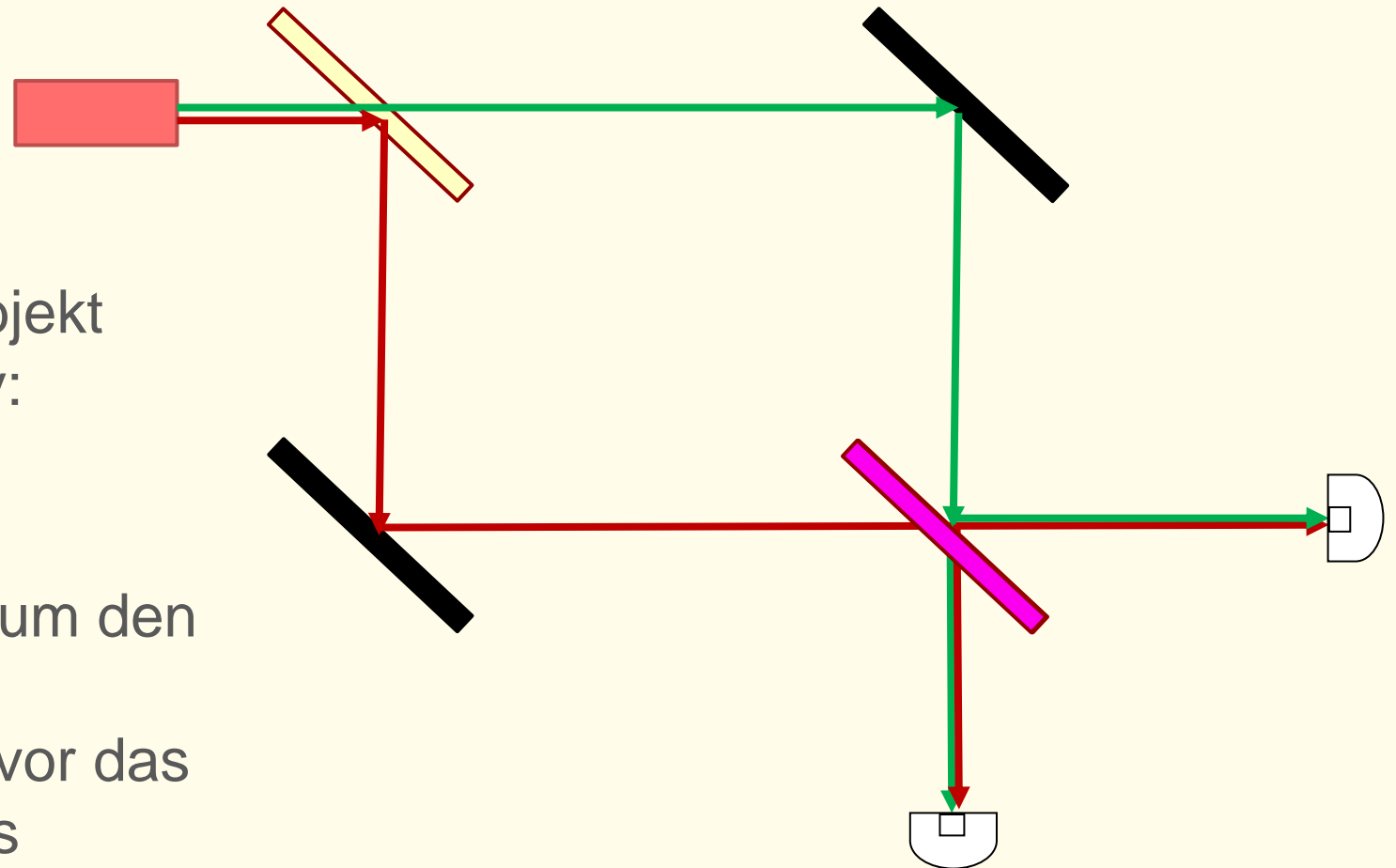
Kür

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

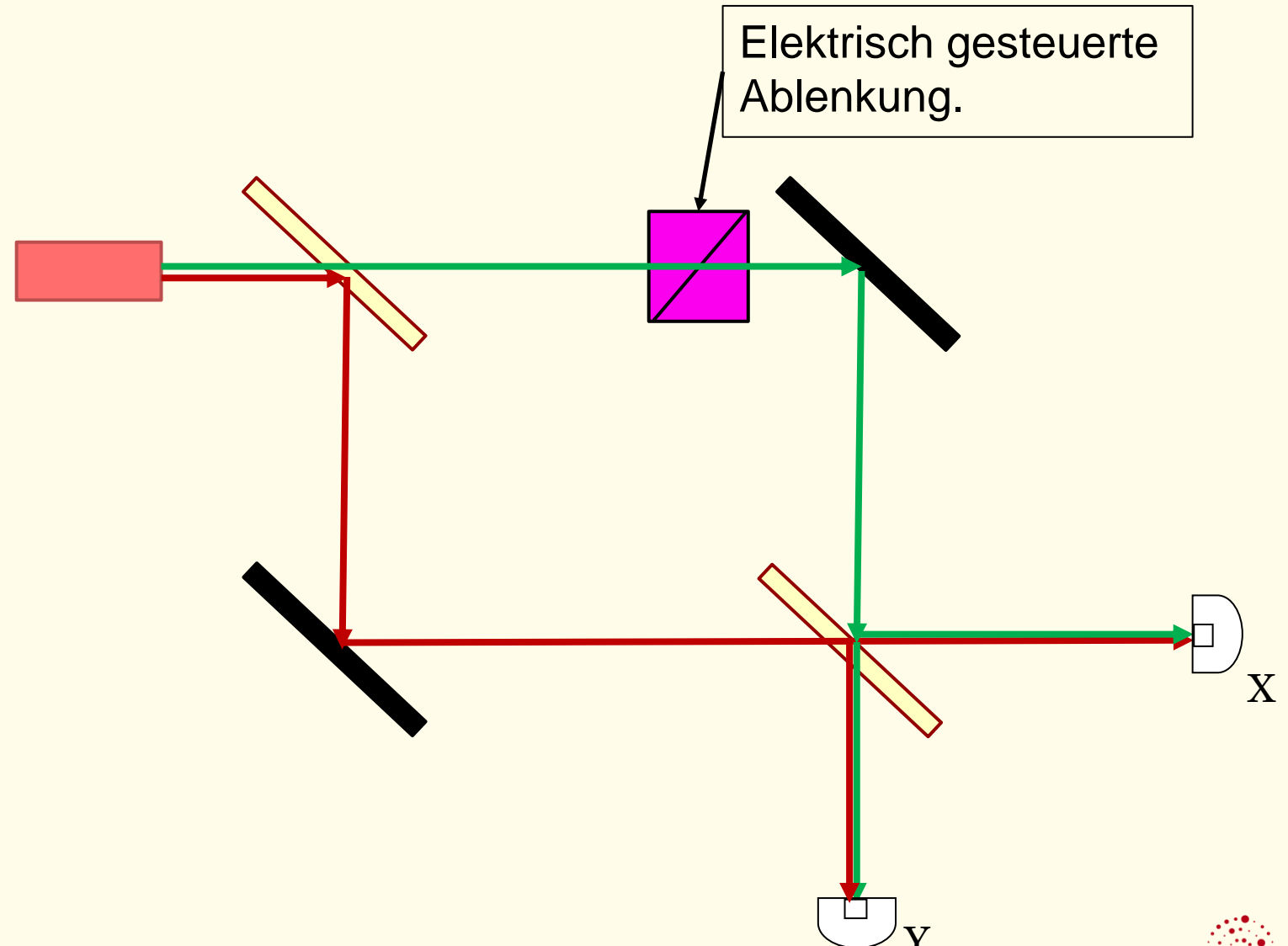
- Vertiefung 2



# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

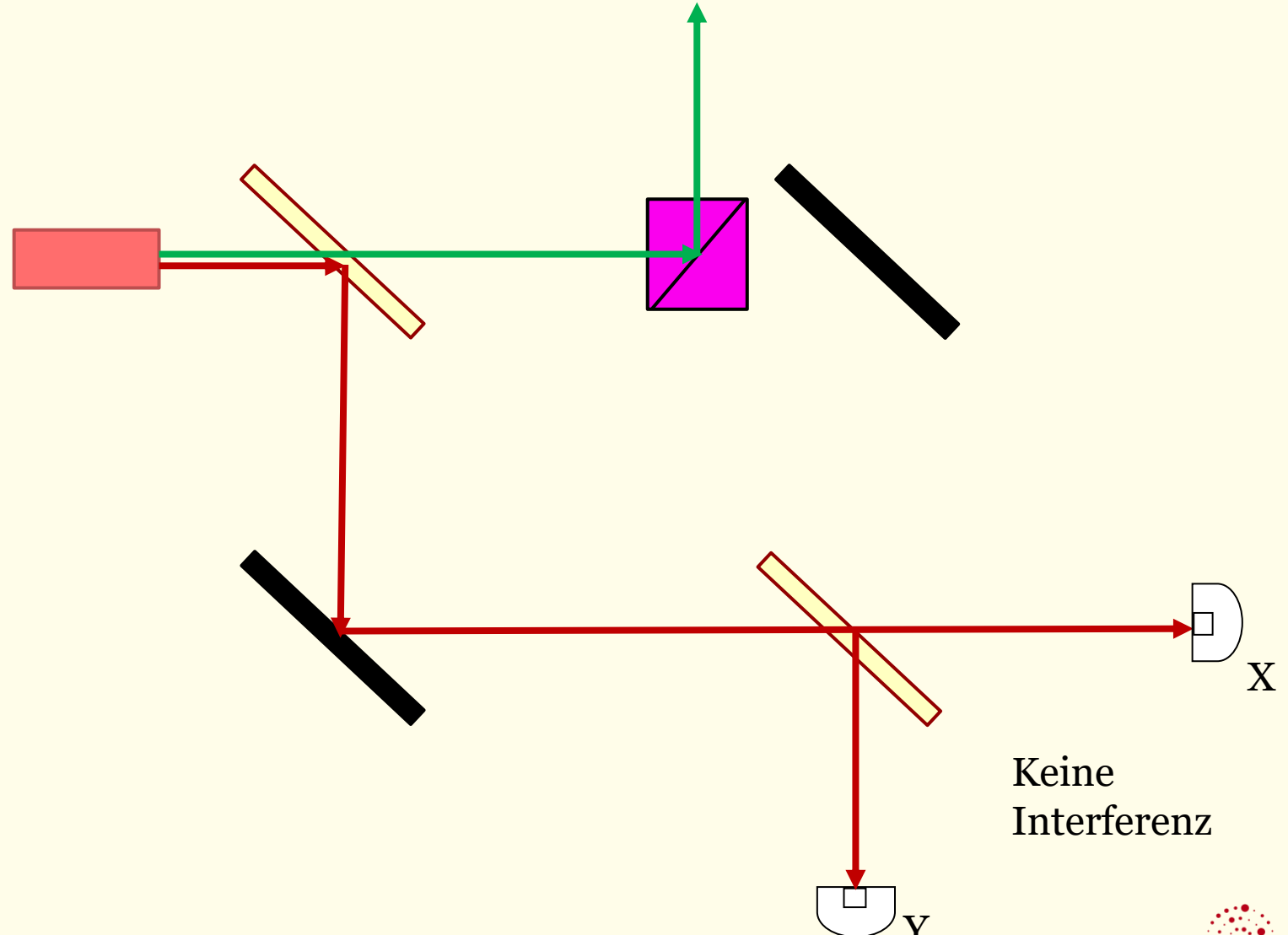
Umsetzung im Experiment:  
(Walther et al. 1987)



# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

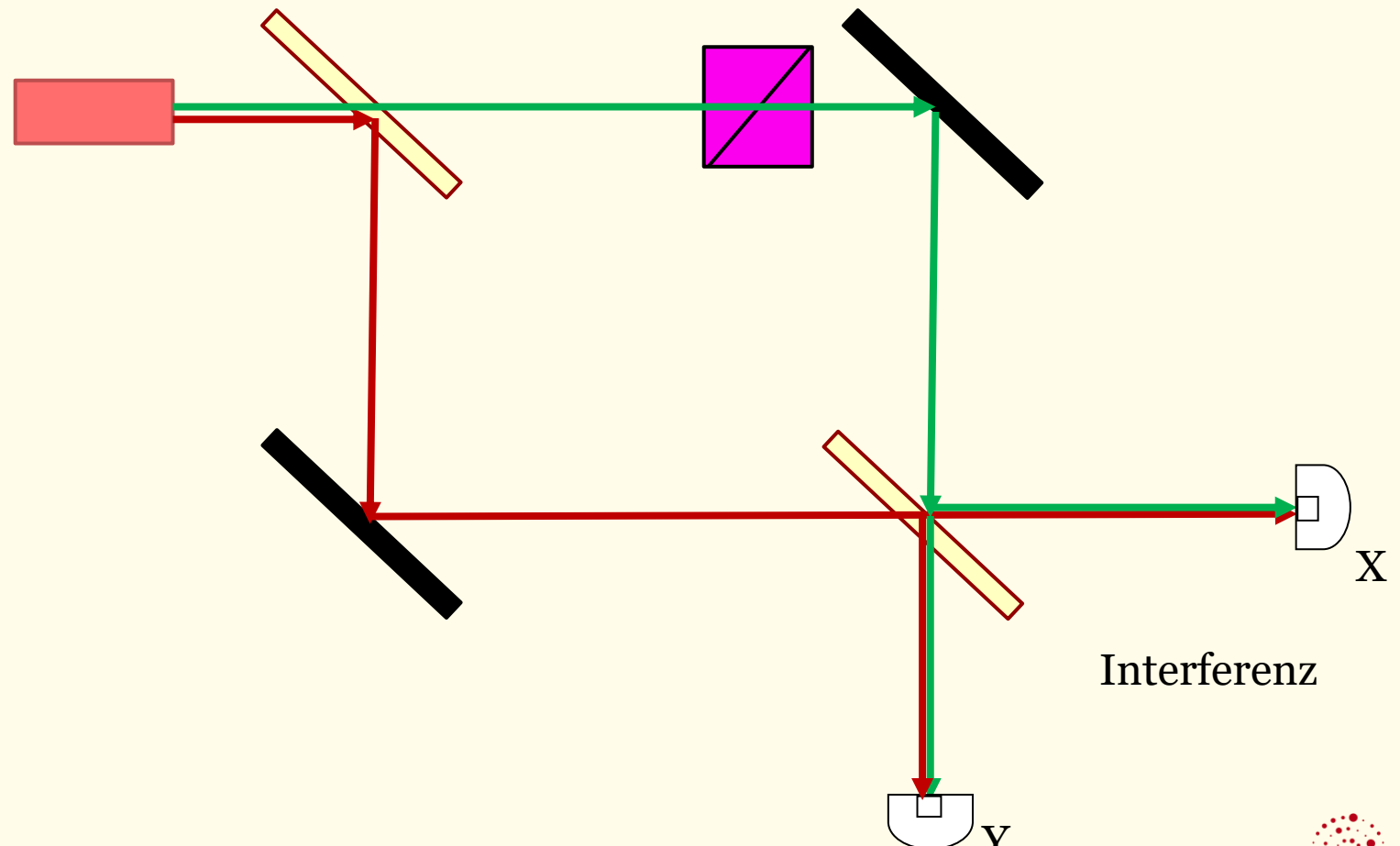
Ablenkung  
eingeschaltet:



# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

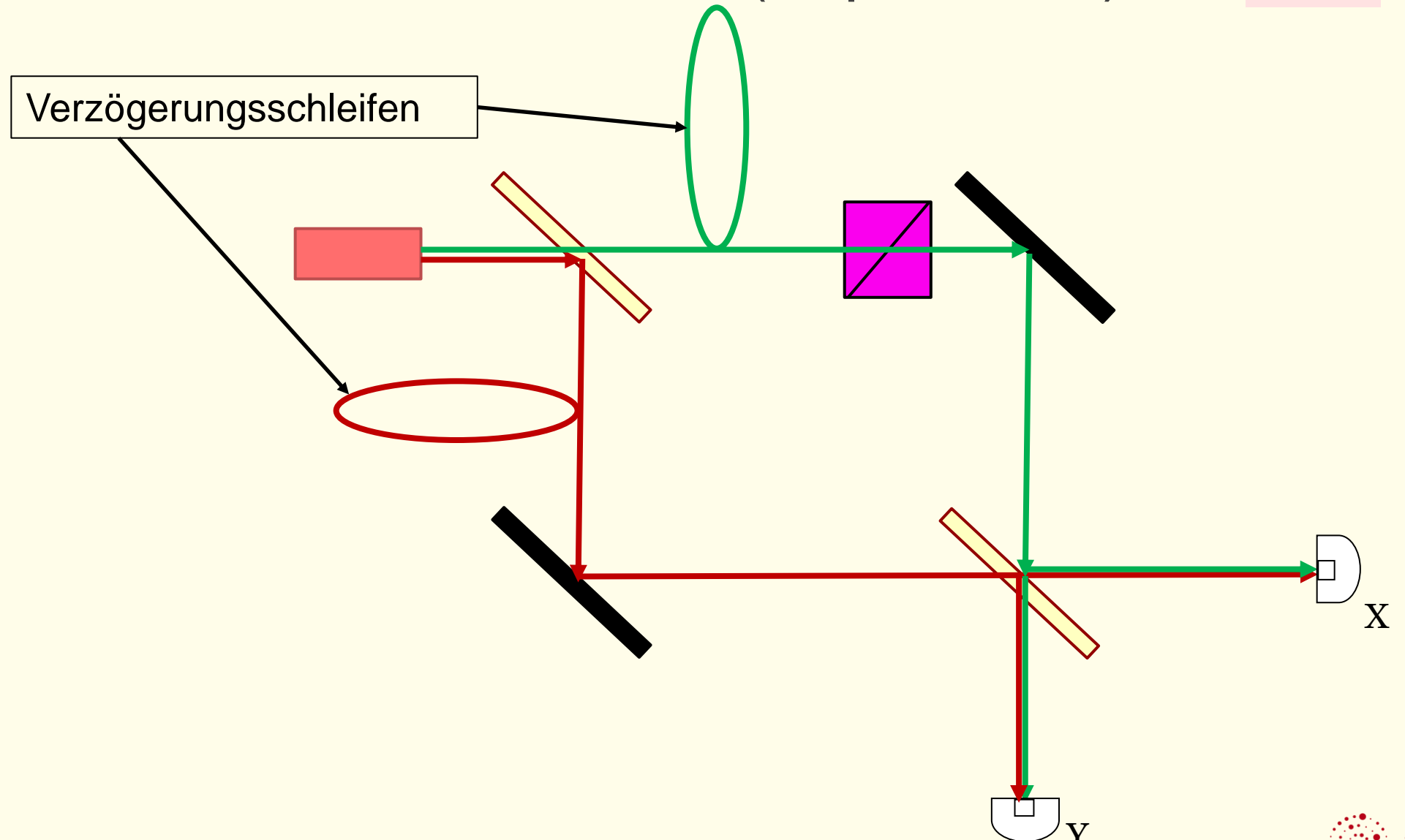
Kür

Ablenkung  
ausgeschaltet:



# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

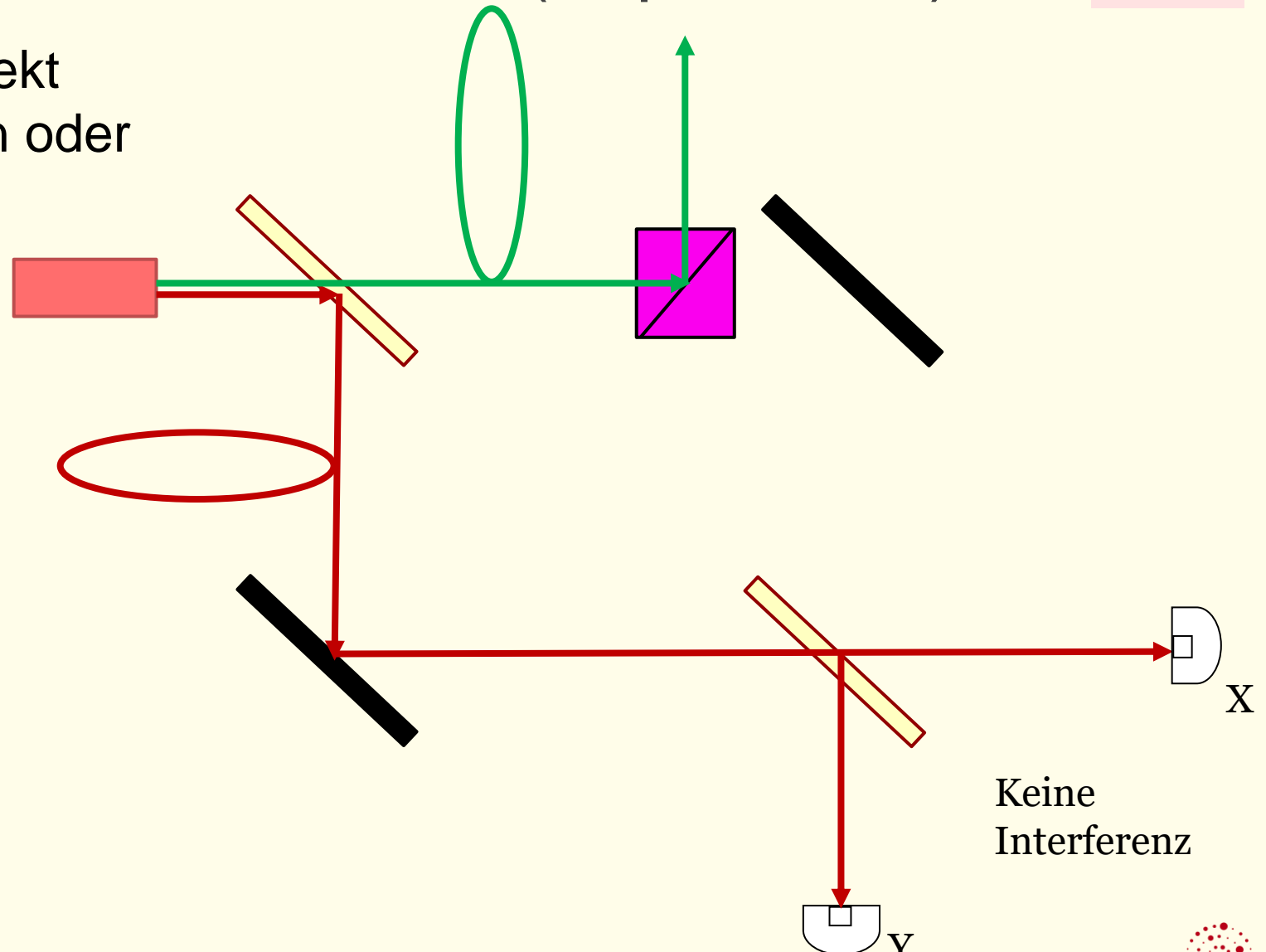
Kür



# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

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

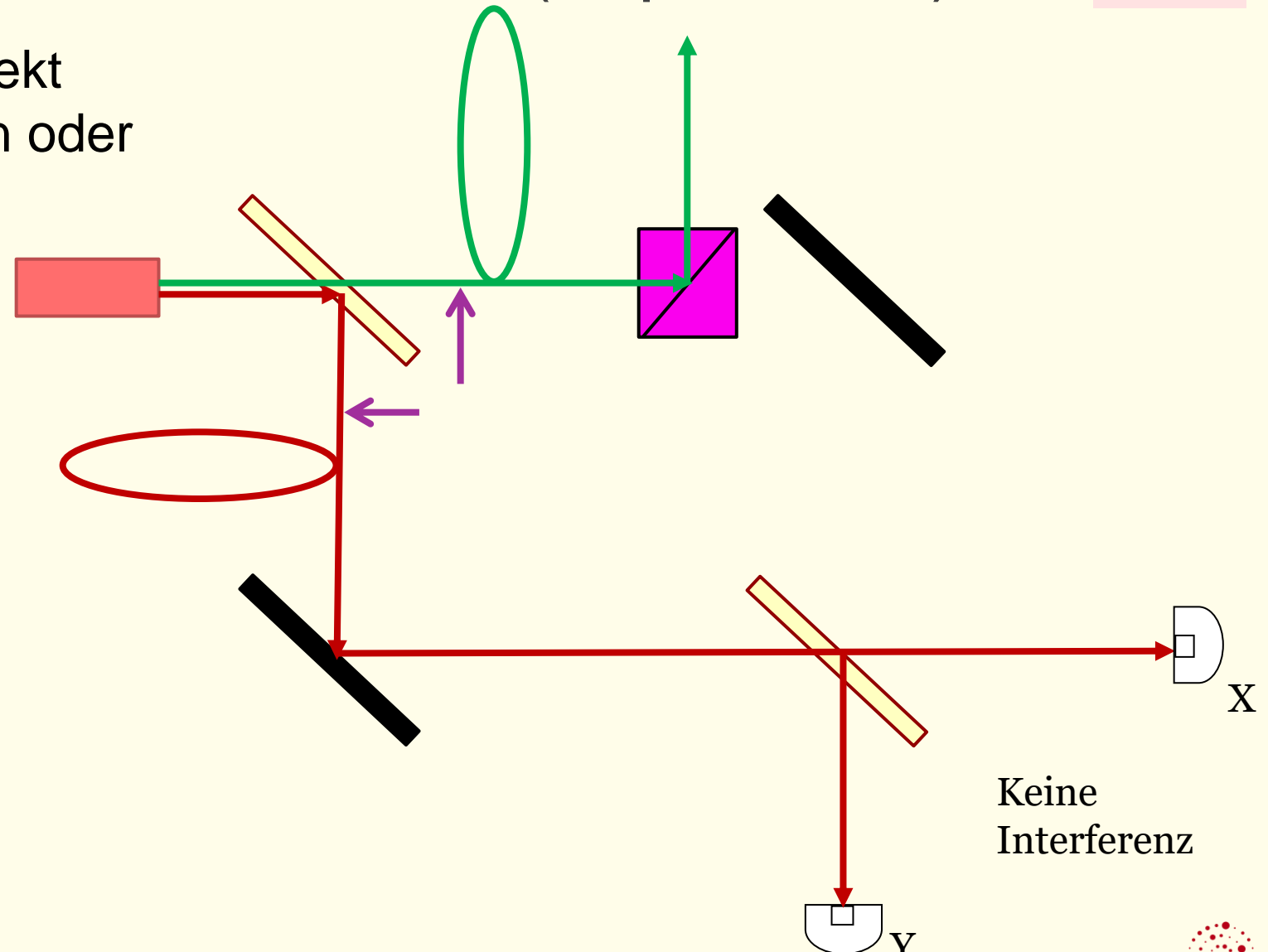


# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür

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

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

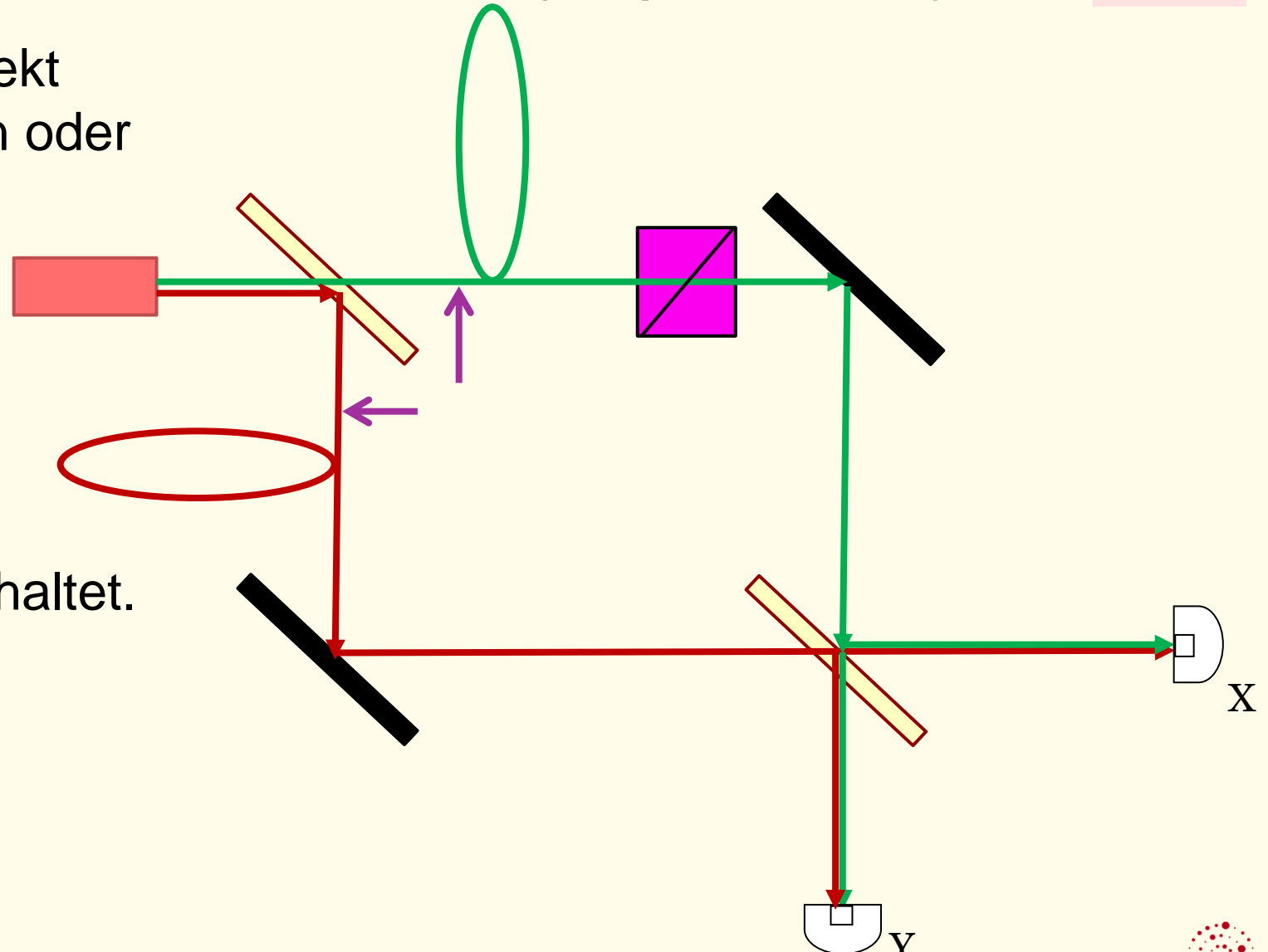


# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

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.



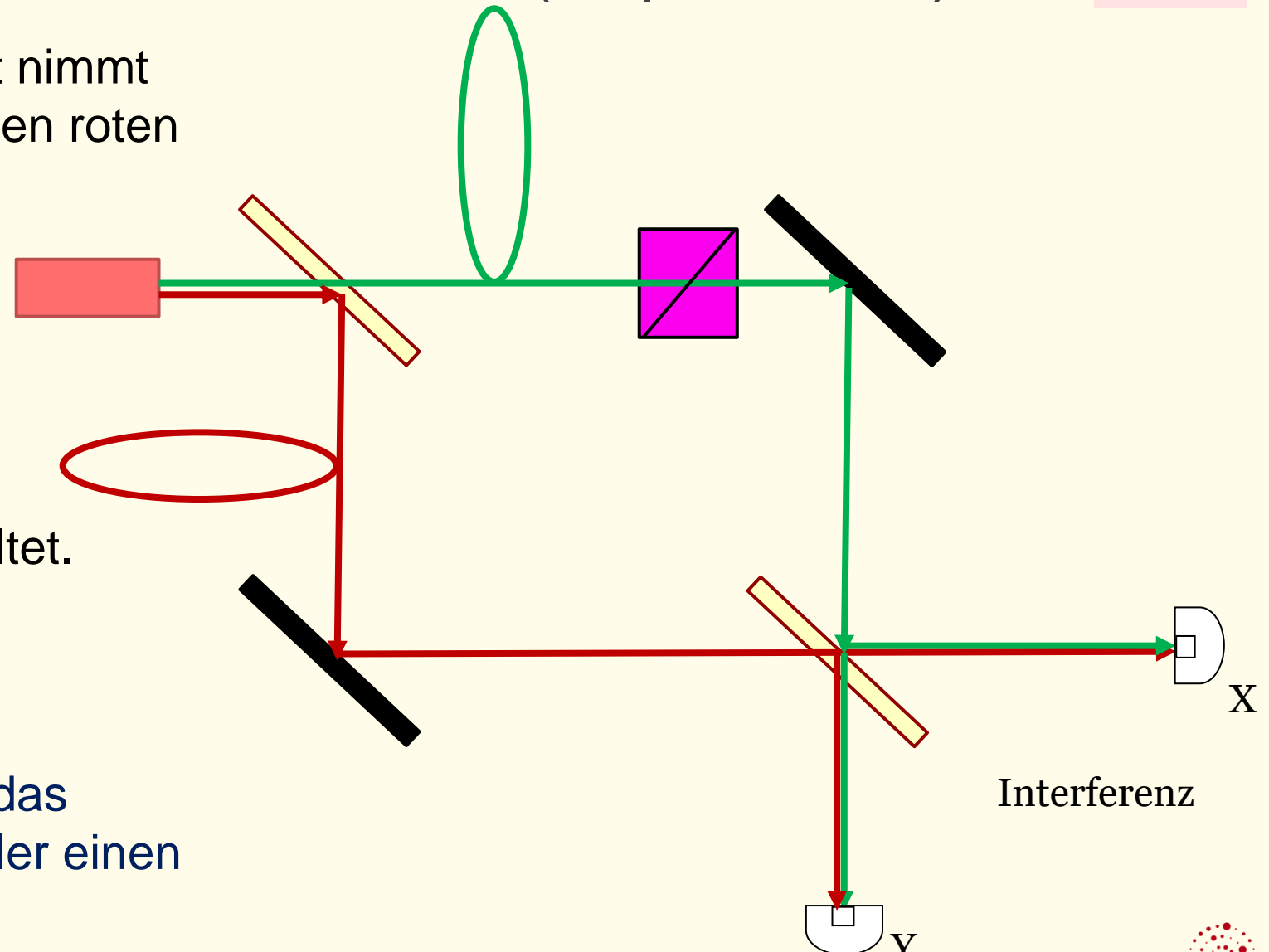
# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

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.

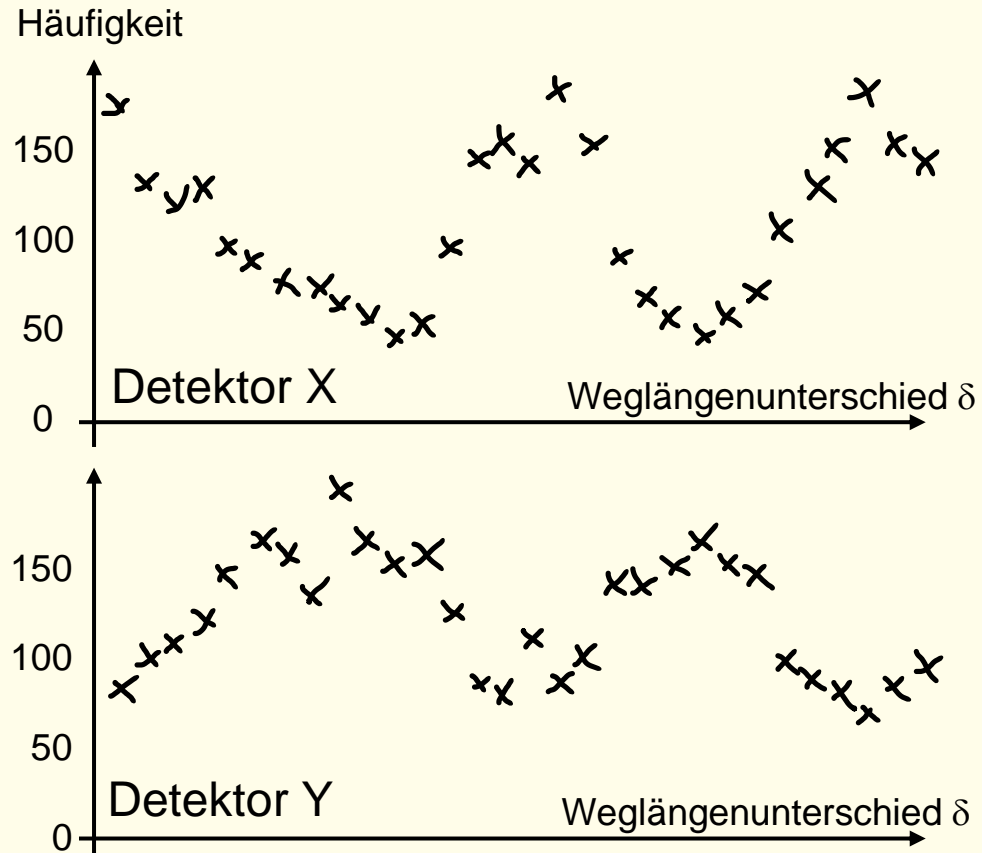
**Ergebnis: Interferenz!**  
Die Annahme ist falsch, dass das Quantenobjekt am 1. Strahlteiler einen der Wege genommen hat.



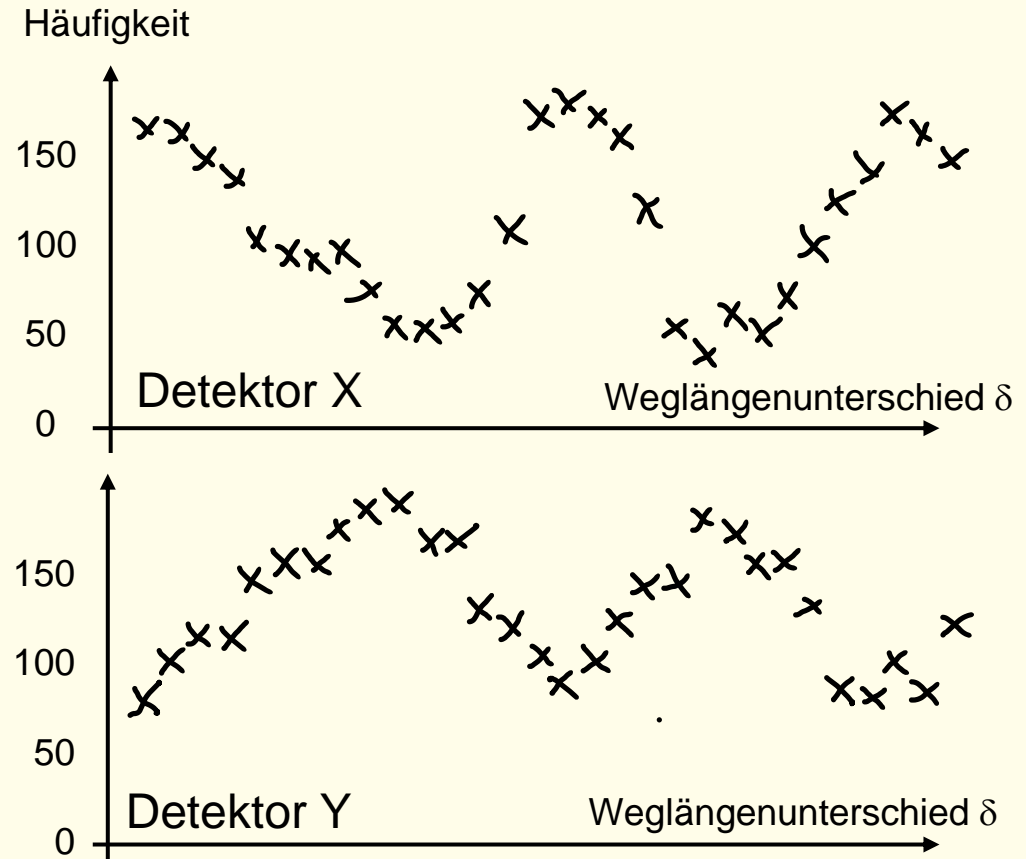


# Delayed-Choice am Interferometer (Experiment)

Kür



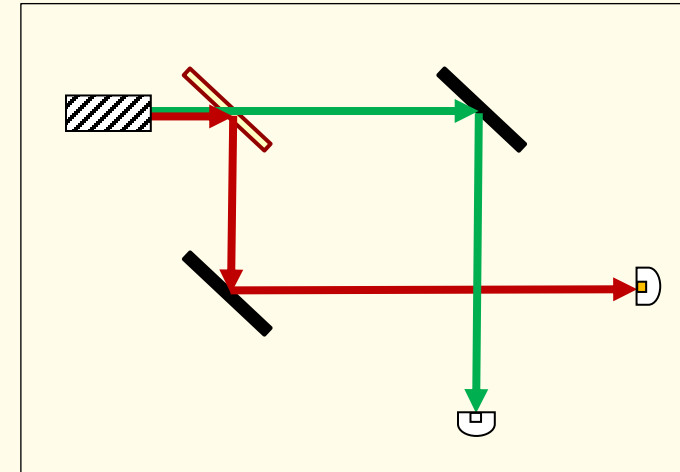
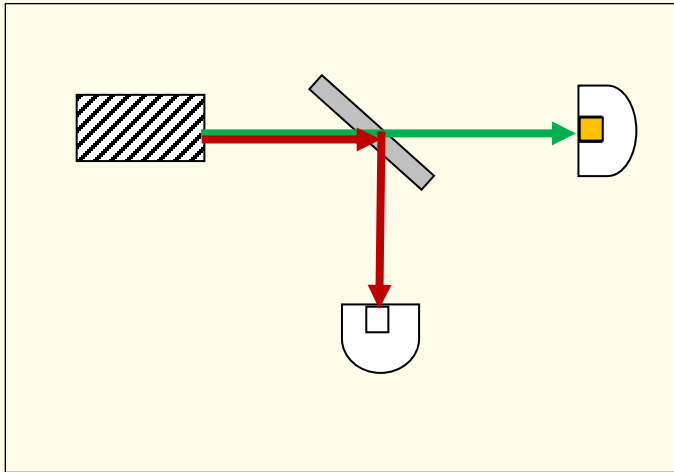
Ergebnis bei normaler Interferenz



Ergebnis mit delayed choice

# Konsequenz

Kür



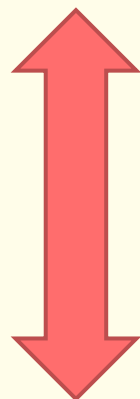
- Jegliche Modellvorstellung, dass sich das Quantenobjekt an einem Strahlteiler für einen Weg entscheidet, ist falsch.
- Man kann nicht vom Messergebnis auf den Zustand schließen: Zwar erhält man bei der Ortsmessung ein bestimmtes Ergebnis, der Zustand vorher war dennoch unbestimmt.

# 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)

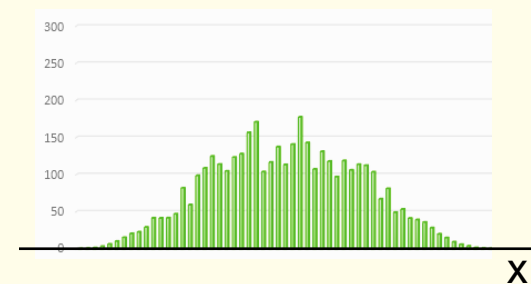
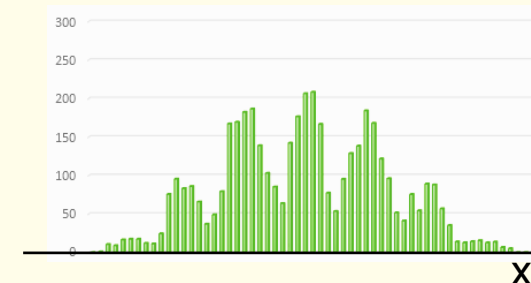
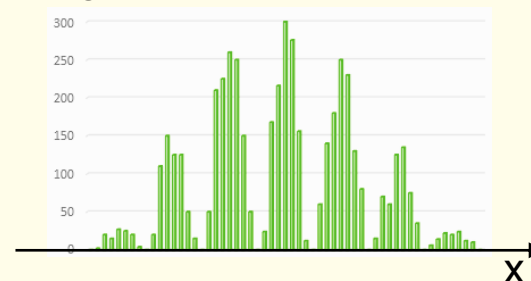
Sichtbarkeit des Interferenzmusters



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, ...

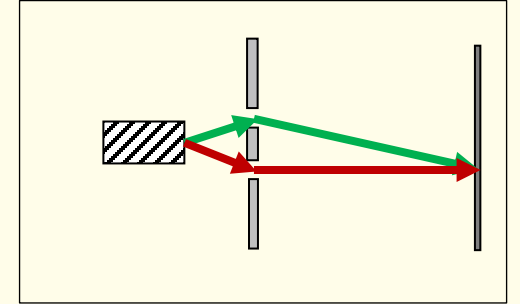
genau genommen:

... 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.

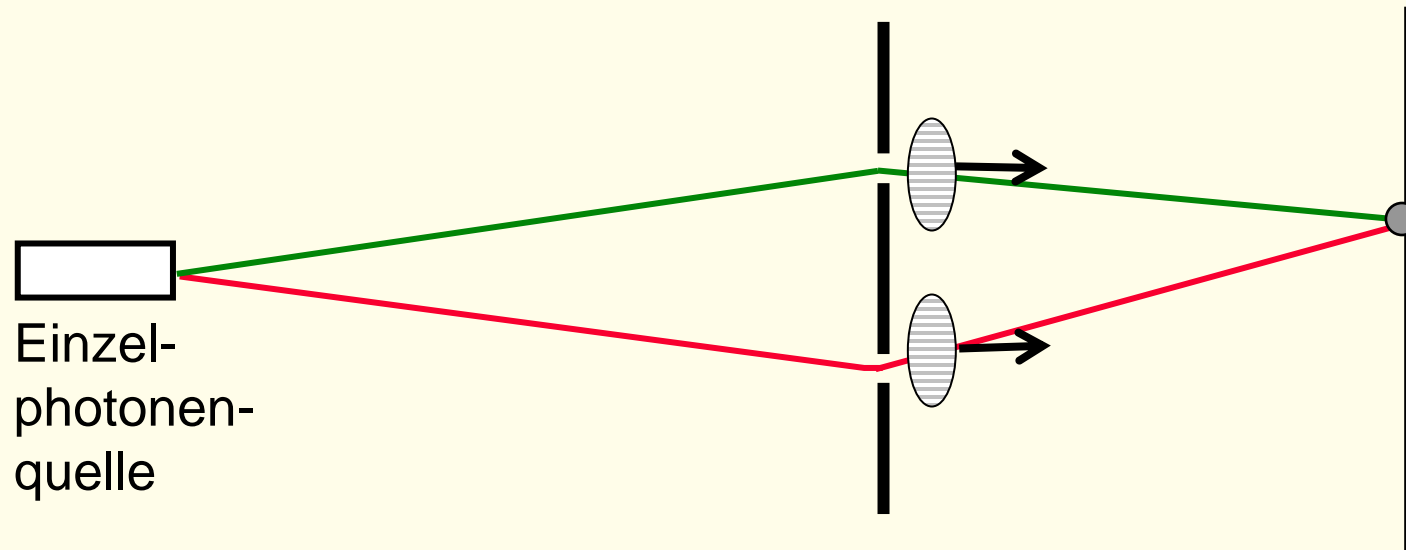
Möglichkeiten:

- 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*:

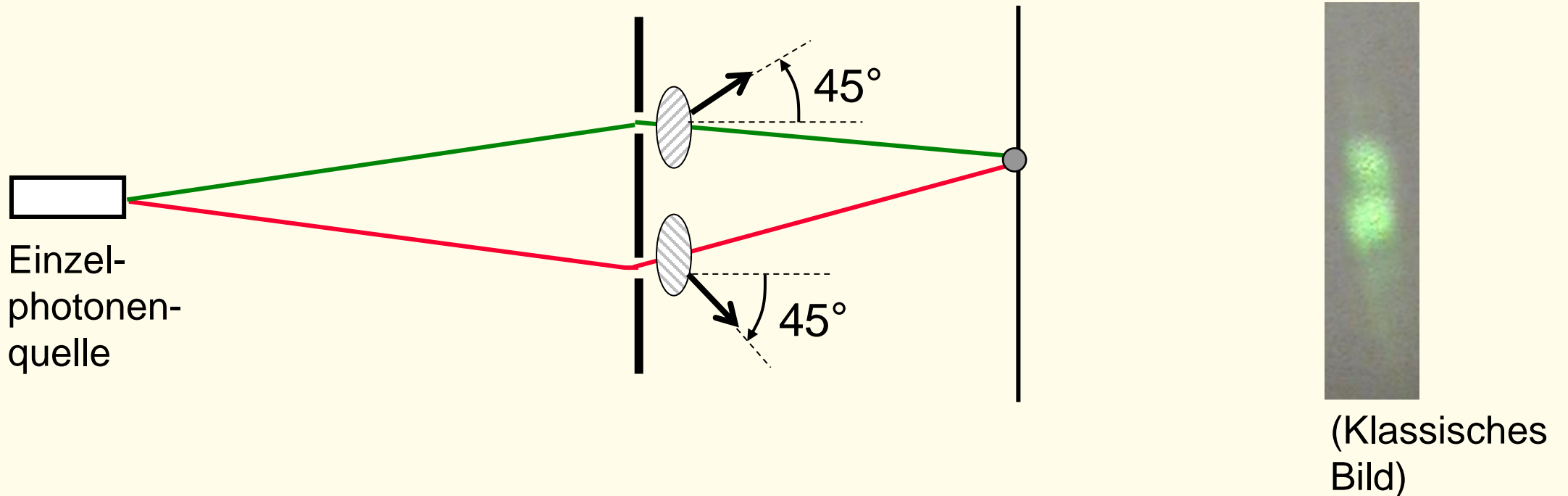


(Klassisches Bild)



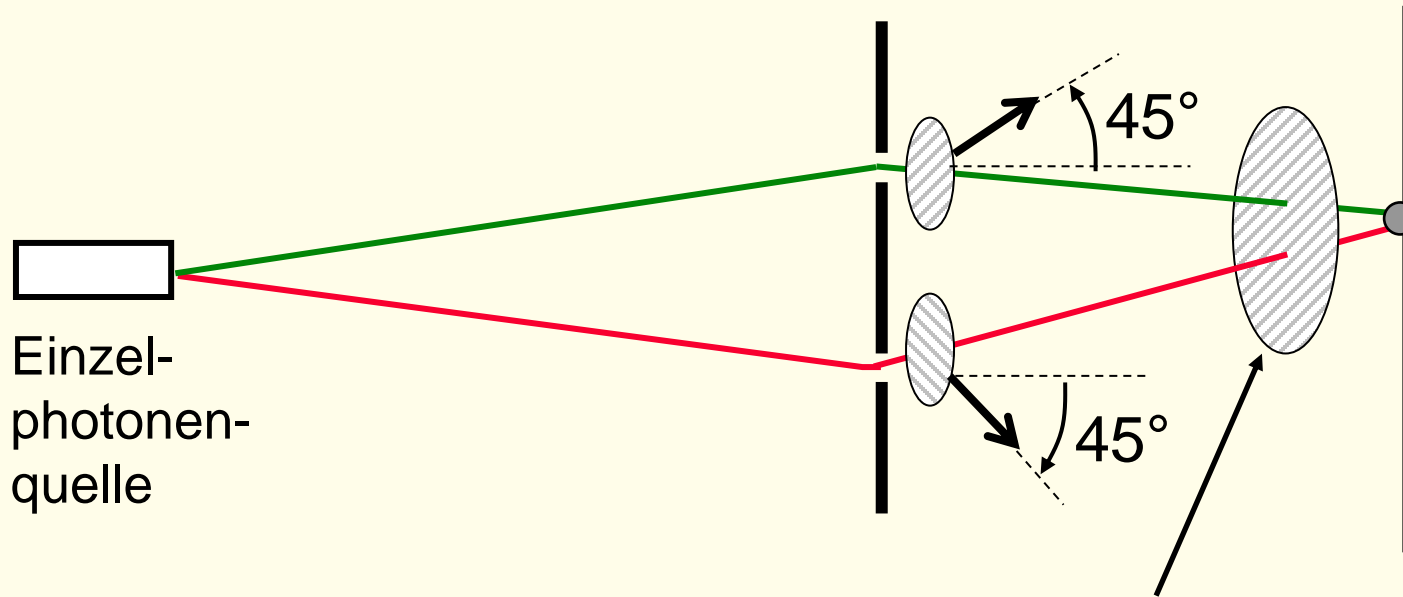
# Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



# Wegmarkierung durch Polarisation

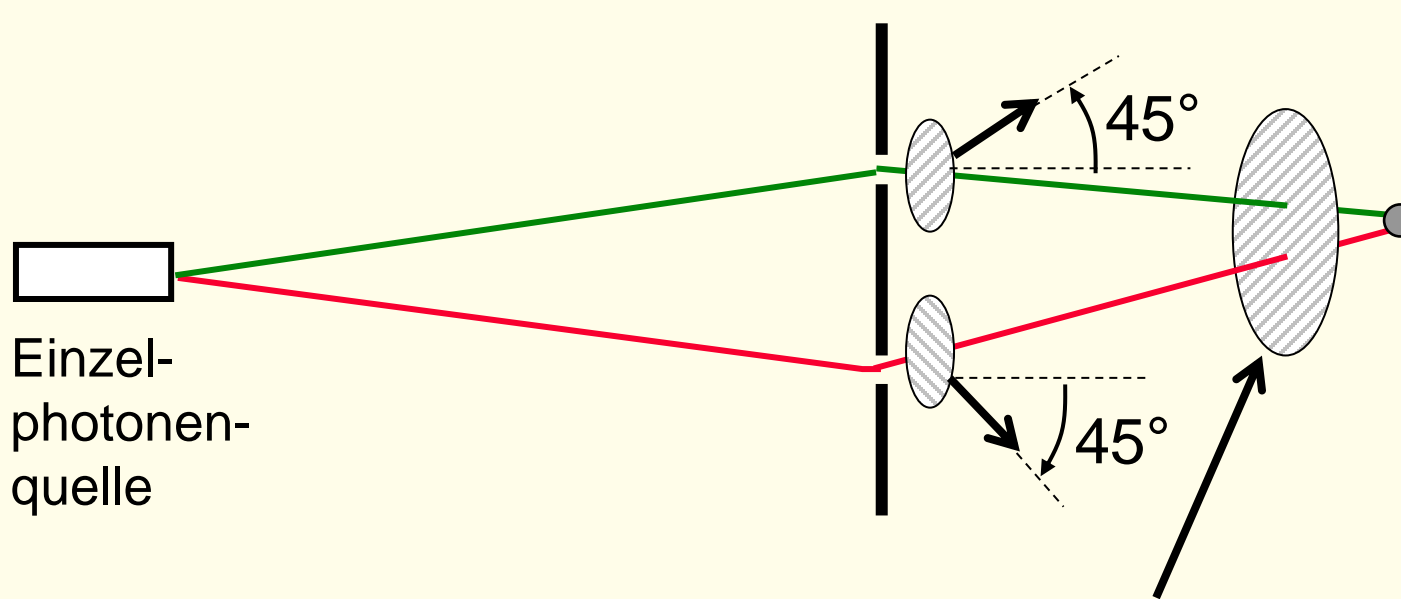
- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Die mögliche  
unterscheidende Messung

# Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Zuordnung:

Photon wird durchgelassen:

Grüner Weg

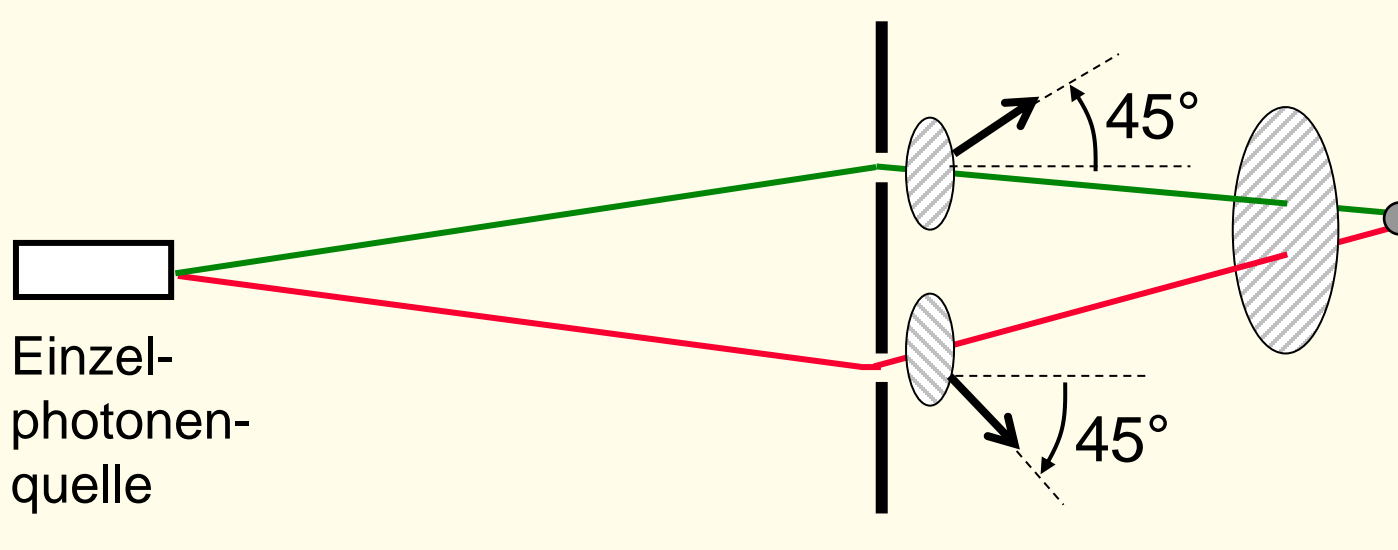
Photon wird absorbiert:

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

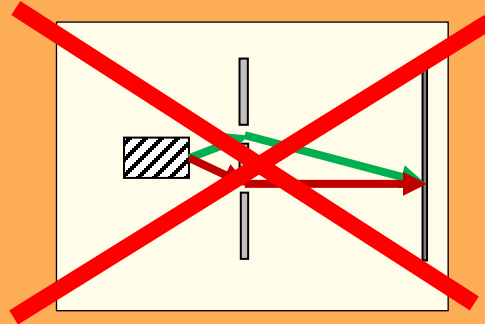
- Eine Welcher-Weg-Markierung ist keine Markierung im klassischen Sinn.
- Erst bei Messung wird die Markierung eindeutig. Ab dann ist auch der Weg bestimmt.
- Bis zur Messung waren die Markierung und der Weg unbestimmt.
- Also ist die *Welcher-Weg-Information* keine Information, welcher Weg genommen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

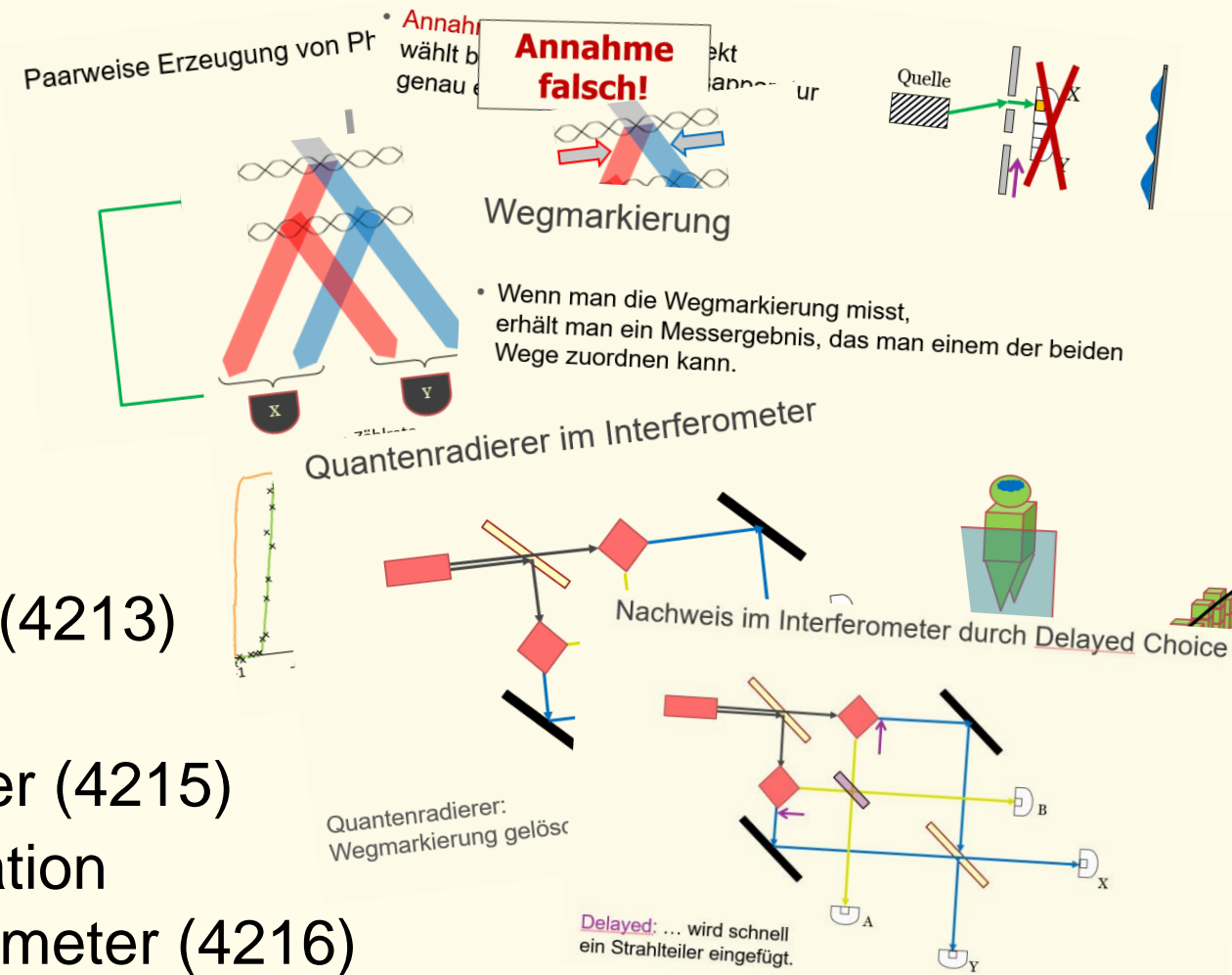
1. **Koinzidenzmethode:** (Nur LF) ✓
2. **Delayed-Choice-Experimente:** (Nur LF) ✓  
Wegunbestimmtheit auch vor der Ortsmessung
3. **Komplementarität:** (LF und BF) ✓  
Welcher-Weg-Markierung,  
*Welcher-Weg-Information*



# 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

## 2. Arbeitsblätter

- Delayed Choice am Doppelspalt mit Linse
- Unbestimmtheit, Realität und Messung
- Unterscheidbarkeit und Welcher-Weg-Messung

**Delayed Choice am Doppelspalt**

Ziel

**Unterscheidbarkeit und Welcher-Weg-Messung**

Lösungen

**Aufgabe 1:**

a) Im Doppelspaltexperiment ist unbestimmt, durch welchen Spalt das Quantenobjekt kommt, bei der Person ist nur unbekannt, durch welche Tür sie geht. Beim Doppelspaltexperiment beobachtet man Interferenz, im klassischen Fall mit Objekten/Personen nicht.

b) Man kann die Schwellen der zwei Türen mit unterschiedlicher Farbe bestreichen und anschließend die Schuhsohlen der Person betrachten. Man kann einen Ball Richtung Person werfen und aus der Richtung des abgelenkten Balls auf die durchlaufene Tür schließen. Man kann an der einen Tür traurige und an der anderen Tür heitere Musik spielen und vom Gesichtsausdruck auf die durchlaufene Tür schließen.

c) Ein Atom kann man in unterschiedliche Energie-Zustände bringen, diesen Zustand kann man anschließend auslesen. Ebenso kann ein Photon unterschiedliche Polarisationszustände haben, zu denen man Messungen machen kann. Man kann Photonen an Elektronen streuen. Vom gestreuten Photon kann man auf den Spalt des Elektrons schließen.

d) Die klassische Wegmarkierung ist eindeutig und real. Sie besteht unabhängig davon, ob das Licht im Raum an ist oder ob man sie auswertet. Die Quanten-Wegmarkierung befindet sich bis zu ihrer Messung in einem Überlagerungszustand. Außerdem wirkt sie sich so aus, dass sie die zugehörige Interferenz nicht mehr beobachtbar macht. Mit klassischen Objekten gibt es nichts Vergleichbares.

e)

Für klassische Objekte	Vor dem Markieren	Zwischen Markieren und Messung	Nach dem Messen der Markierung
Gibt es eine bestimmte Markierung?	nein	ja	ja
Ist bestimmt, welcher Weg das klassische Objekt nimmt/genommen hat?	ja	ja	ja
Trägt das klassische Objekt zu einem Interferenzmuster bei?	nein	nein	nein

Für Quantenobjekte	Vor dem Markieren	Zwischen Markieren und Messung	Nach dem Messen der Markierung
Gibt es eine bestimmte Markierung?	nein	nein	ja
Ist bestimmt, welcher Weg vom Quantenobjekt nimmt/genommen hat?	nein	nein	nein
Trägt das Quantenobjekt zu einem Interferenzmuster bei?	ja	nein	nein

J. Küblbeck [CC BY 4.0](#)

g und Situatio-  
\_\_\_\_\_  
riss der Ort  
\_\_\_\_\_  
lich des Or-  
\_\_\_\_\_  
te Frage.  
ieser Aus-  
\_\_\_\_\_  
ie das Quan-  
Summenver-  
\_\_\_\_\_  
tiert oder  
uster be-

# 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