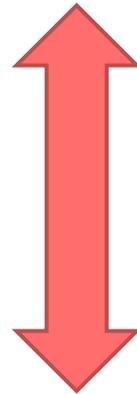


# Experimente zur Komplementarität

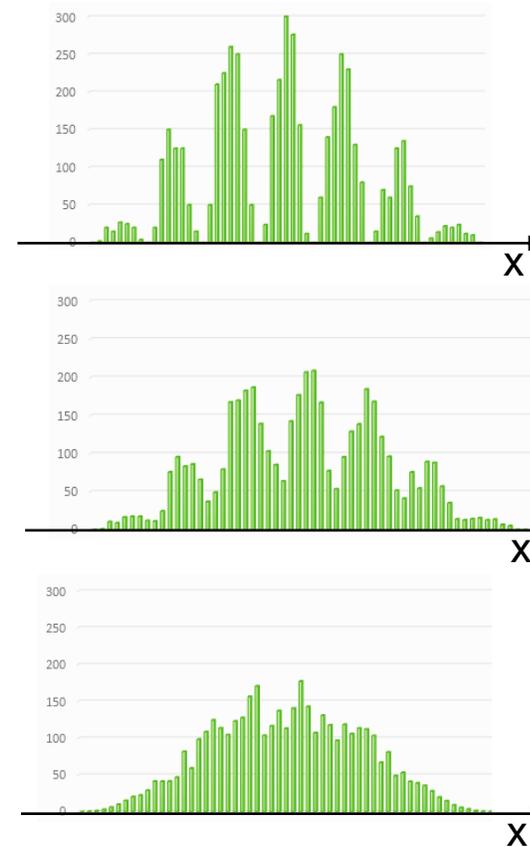
Sichtbarkeit des Interferenzmusters



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

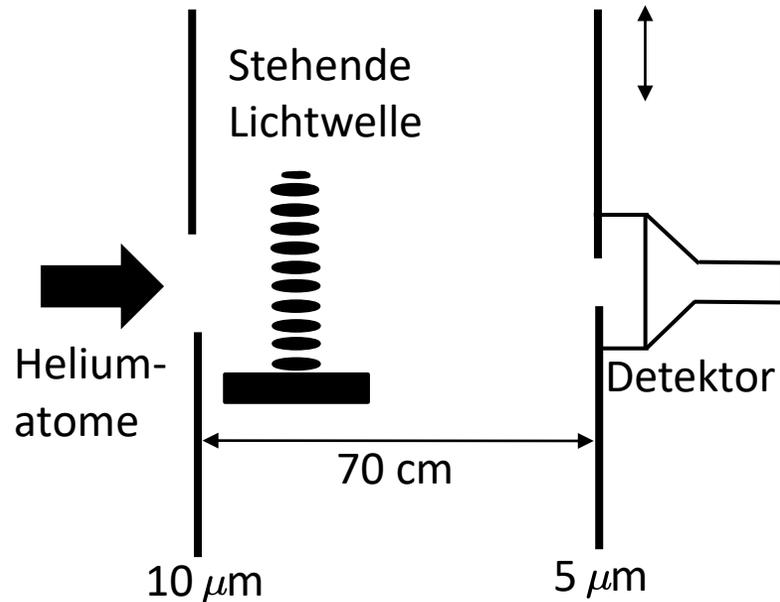
Zuverlässigkeit der  
*Welcher-Weg-Information*

Häufigkeit

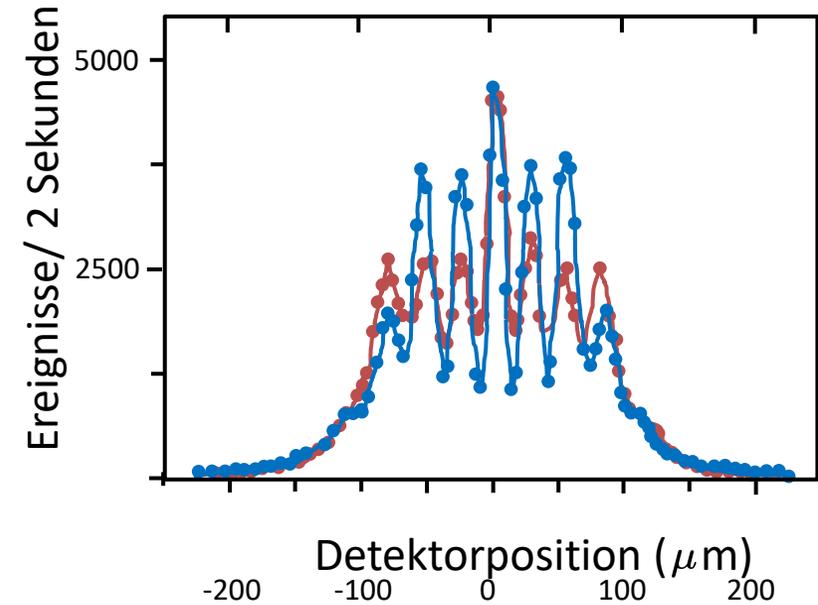


Bildquelle: J. Küblbeck  
([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/))

# Realexperiment zum Komplementaritätsprinzip



Pfau et al., Univ. Konstanz (1994)

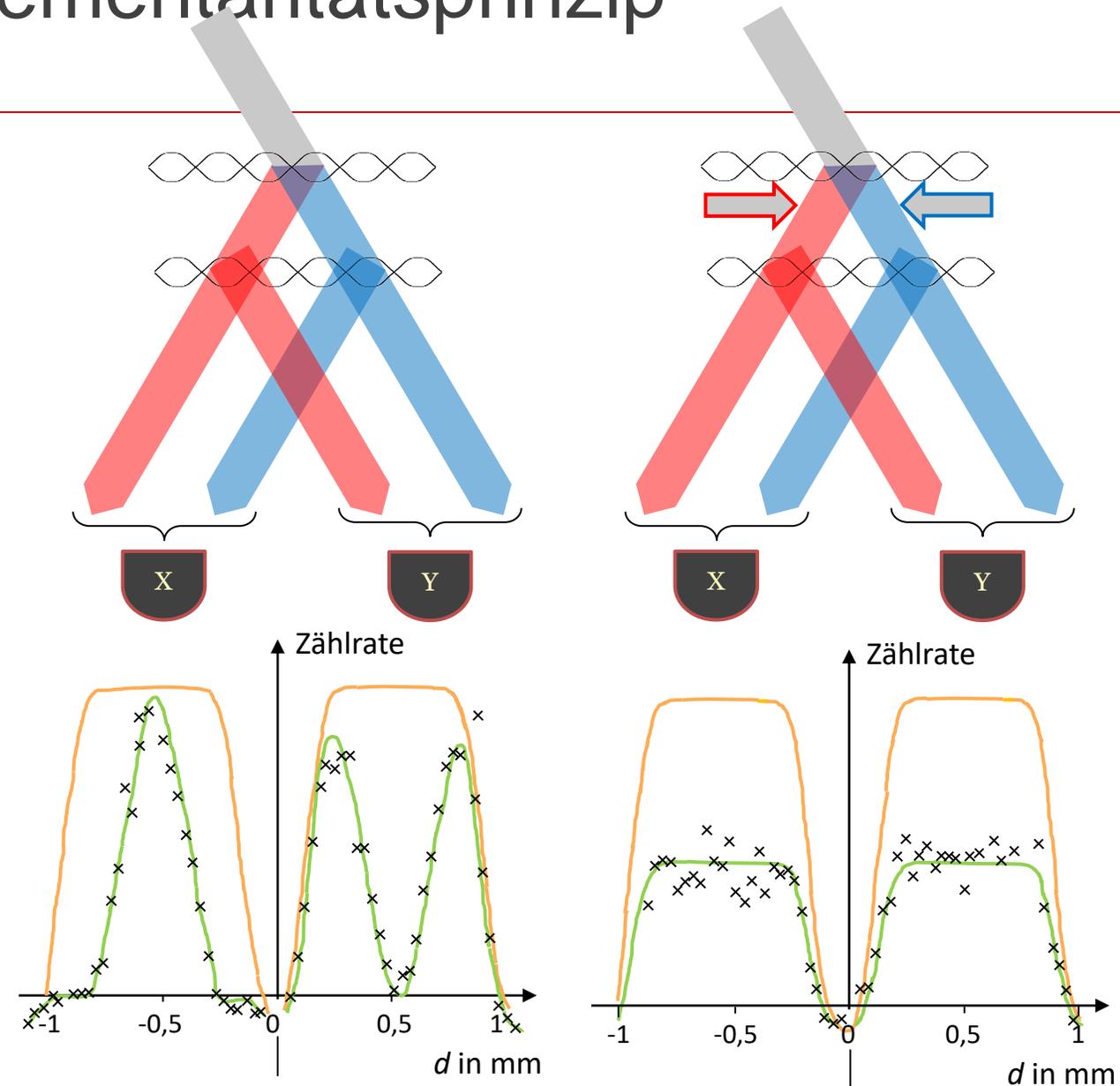


Unzuverlässige WWI

# Realexperiment zum Komplementaritätsprinzip

Atom-Interferometer

[Dürr, Nonn, Rempe 1998]



# Offene Fragen

---

1. Bedeutet *Welcher-Weg-Information*, dass man weiß, welchen Weg das Quantenobjekt gegangen ist?  
(Spoiler: nein!)
2. Wann hat man eine *Welcher-Weg-Information*?
3. Wie gewinnt man eine *Welcher-Weg-Information*?

# Wann hat man eine *Welcher-Weg-Information*?

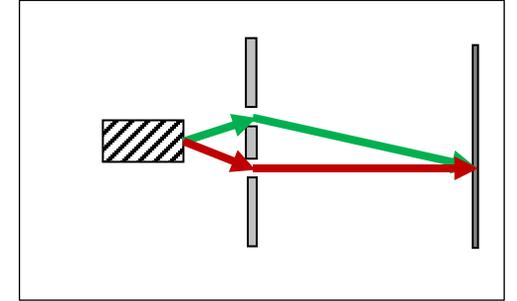
Welcher-Weg-Information hat man, ...

genau genommen:

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

oft verwendete Formulierung:

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



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

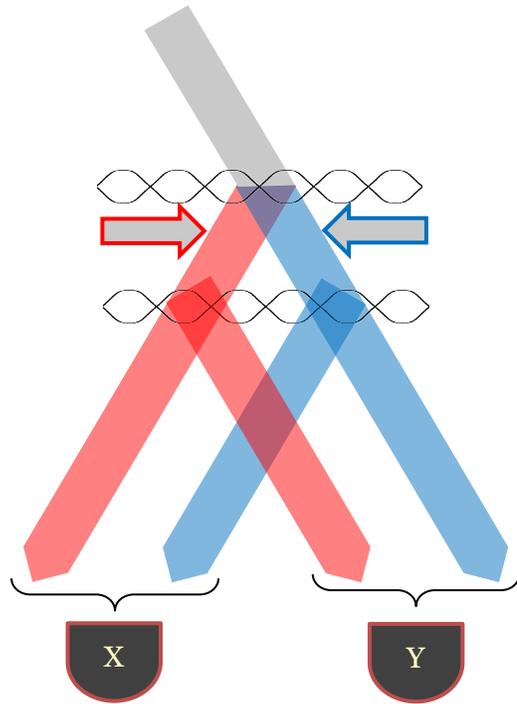
---

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

# Wegmarkierung am Kernspin



Prinzip:

Rote Seite: Spin bleibt up

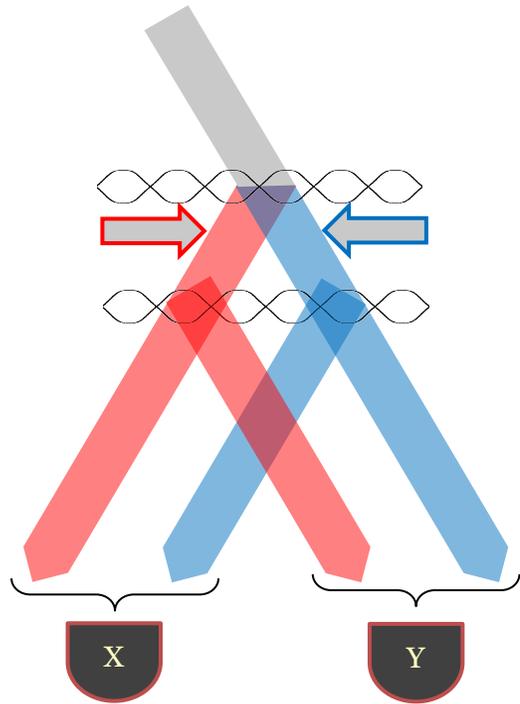
Blaue Seite: Spin wird auf down gedreht

Unterscheidende Messung:

Spin up gehört zum roten Weg

Spin down gehört zum blauen Weg

# Wegmarkierung am Kernspin



Was passiert:

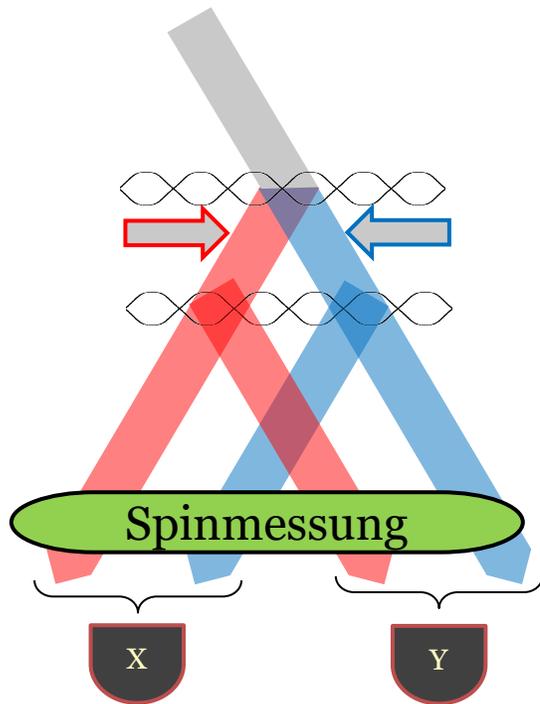
Keine Interferenz mehr ...

... auch wenn man die unterscheidende  
Messung gar nicht durchführt!

Das ist überraschend, weil die Wegmarkierung bis zu einer  
Messung unbestimmt ist. (Man hat also gar keine  
Wegmarkierung.)

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

# Wegmarkierung am Kernspin



Mathematische Beschreibung:

$\Psi_1 \cdot \Phi_{\text{up}} + \Psi_2 \cdot \Phi_{\text{down}}$  („verschränkter Zustand“)

ist ein Überlagerungszustand

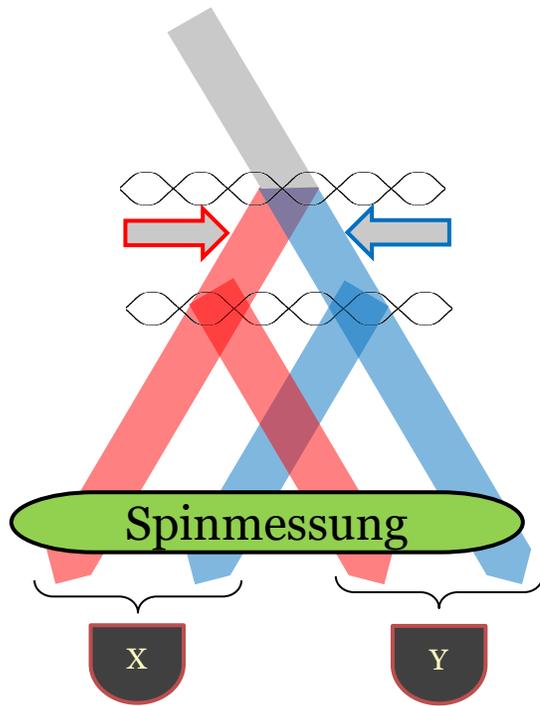
- bezüglich des Wegs
- bezüglich des Spins („Markierung in der Schwebe“)

Messung am Spin führt dazu, dass ein Zustand ausgewürfelt wird.

Z.B:  $\Psi_1 \cdot \Phi_{\text{up}}$

Man erhält also Spin up, gleichzeitig kollabiert  $\Psi$  auf den Weg 1.

# Wegmarkierung am Kernspin



Keine Markierung im klassischen Sinn.

Erst bei Messung wird die Markierung eindeutig.  
Dann wird auch der Weg bestimmt.

Bis zur Messung war der Weg unbestimmt.

Also ist die *Welcher-Weg-Information*  
keine Information, welcher Weg genommen wurde

Sondern:

Eine Markierung, die die Interferenz verhindert

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

---

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

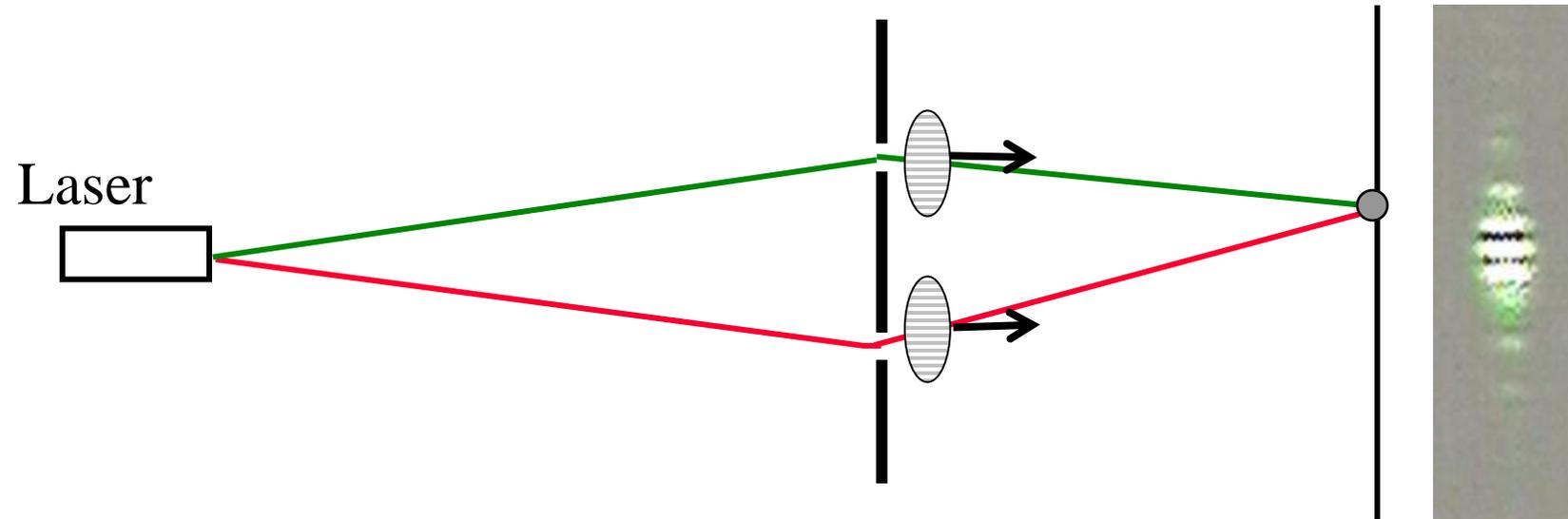
Möglichkeiten:

- Energiezustand eines Atoms
- Kernspin eines Atoms
- **Polarisation eines Photons**
  
- Zweites Quantenobjekt

Der stark unterschiedene Zustand des Partners  
auf den beiden Möglichkeiten verhindert die Interferenz.

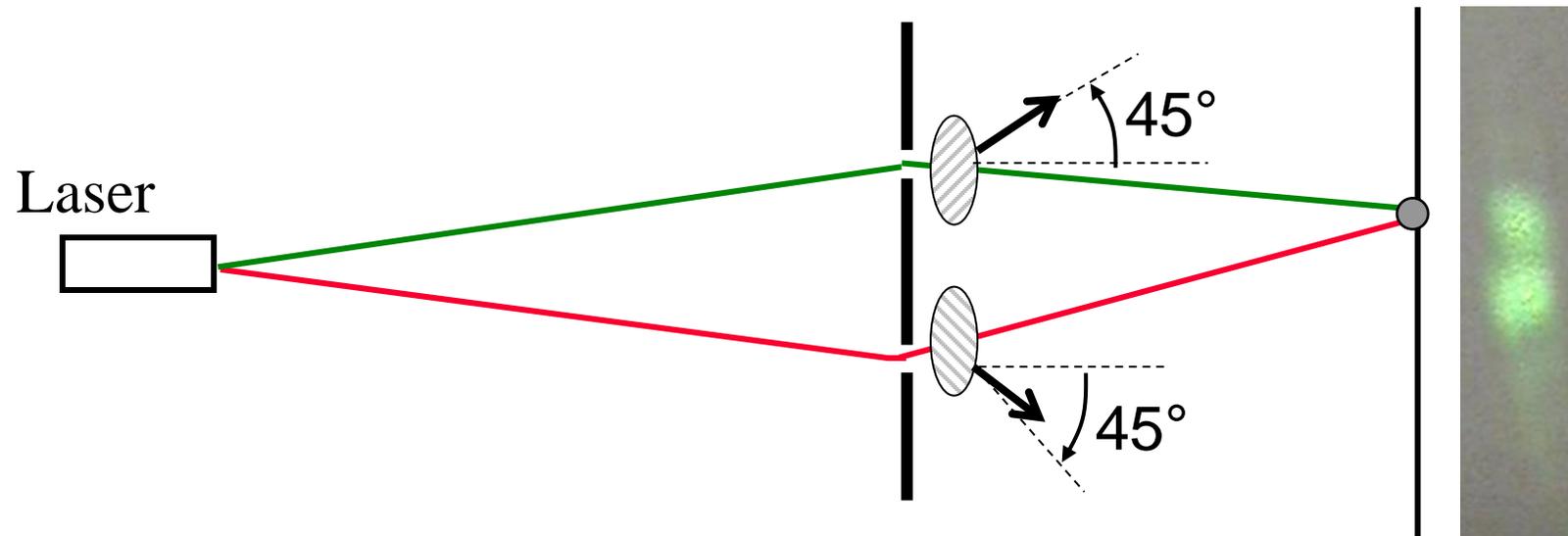
# Wegmarkierung durch Polarisation

- Keine *Welcher-Weg-Information*:



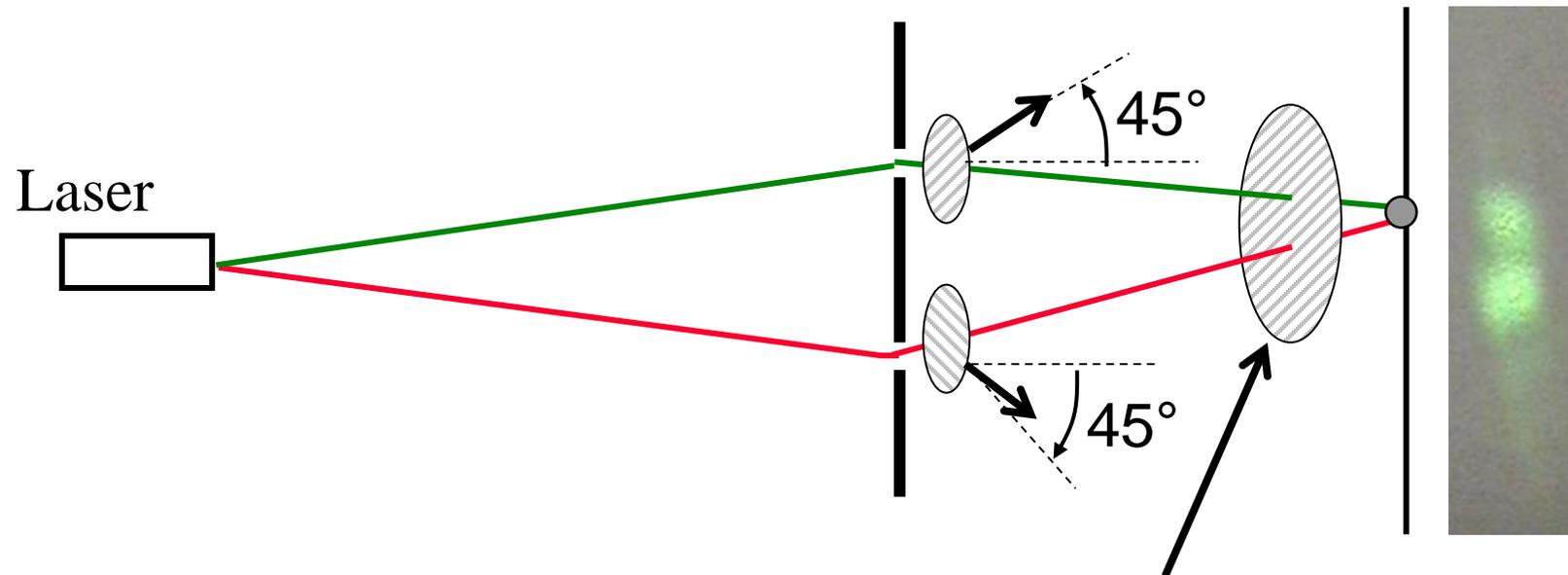
# Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



# Wegmarkierung durch Polarisation

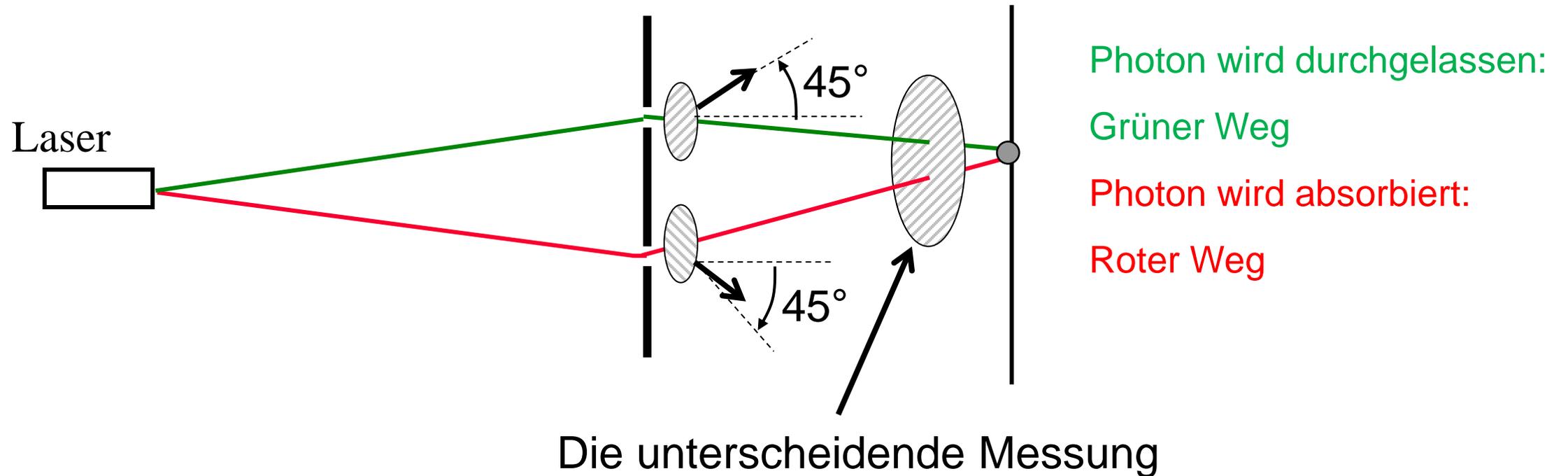
- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



Die unterscheidende Messung

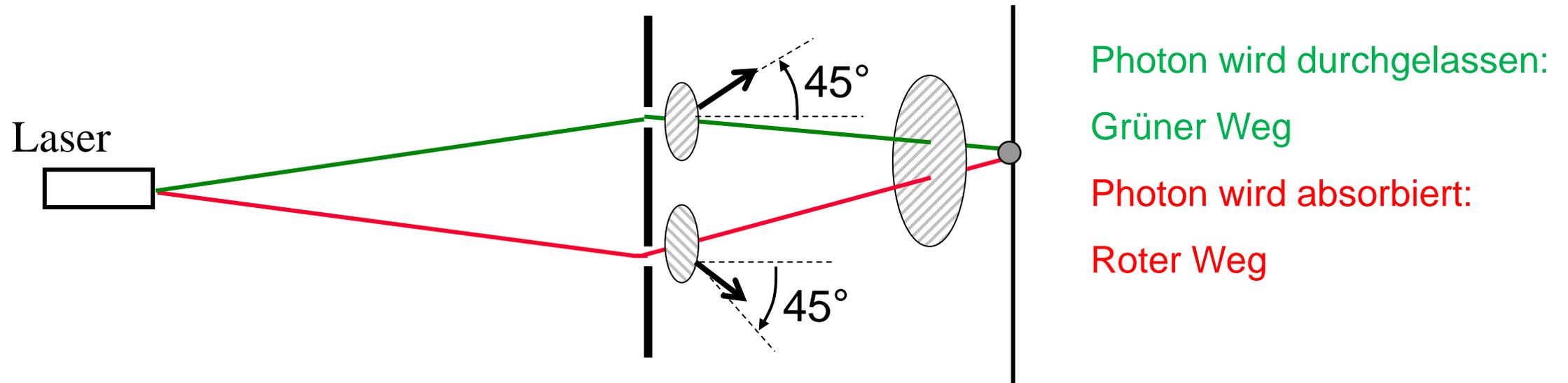
# Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



# Wegmarkierung durch Polarisation

- Zuverlässige *Welcher-Weg-Information*:



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

Nein! Bis zur Messung war es in einem Überlagerungszustand.

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

---

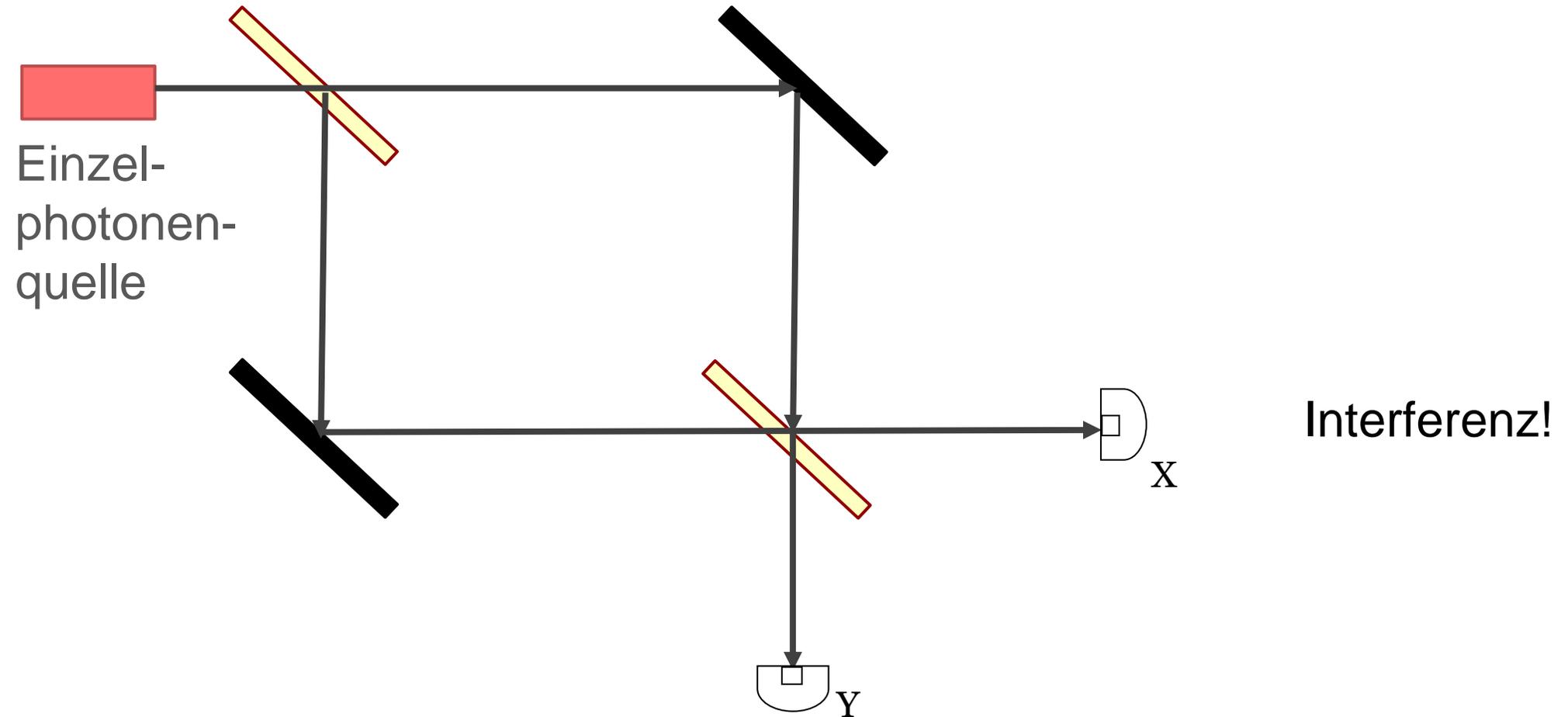
Durch eine Markierung am Quantenobjekt,  
die man durch eine Messung auslesen kann.

Möglichkeiten:

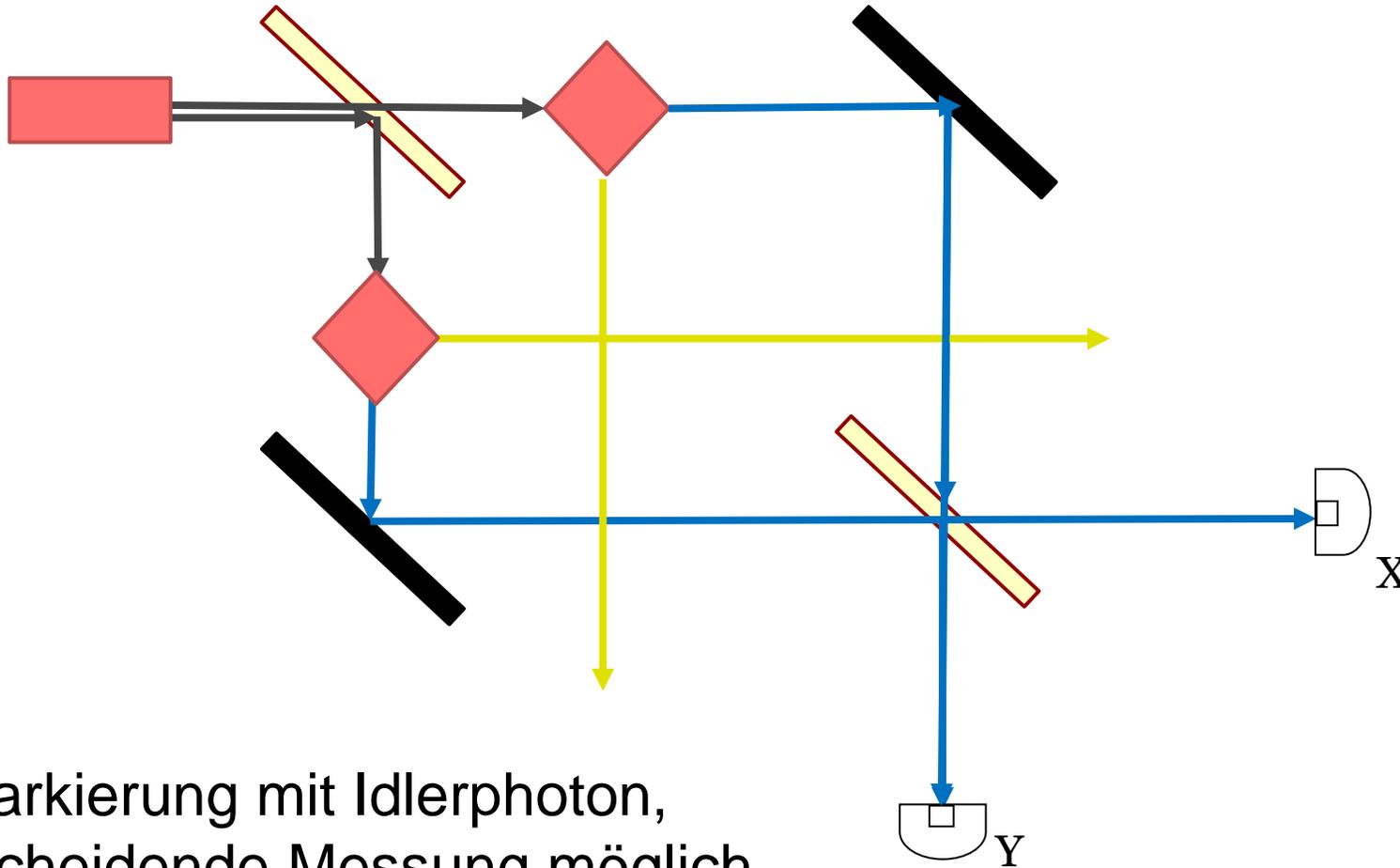
- Energiezustand eines Atoms
- Kernspin eines Atoms
- Polarisation eines Photons
  
- Zweites Quantenobjekt

Der stark unterschiedene Zustand des Partners  
auf den beiden Möglichkeiten verhindert die Interferenz.

# Wegmarkierung durch zweites Photon



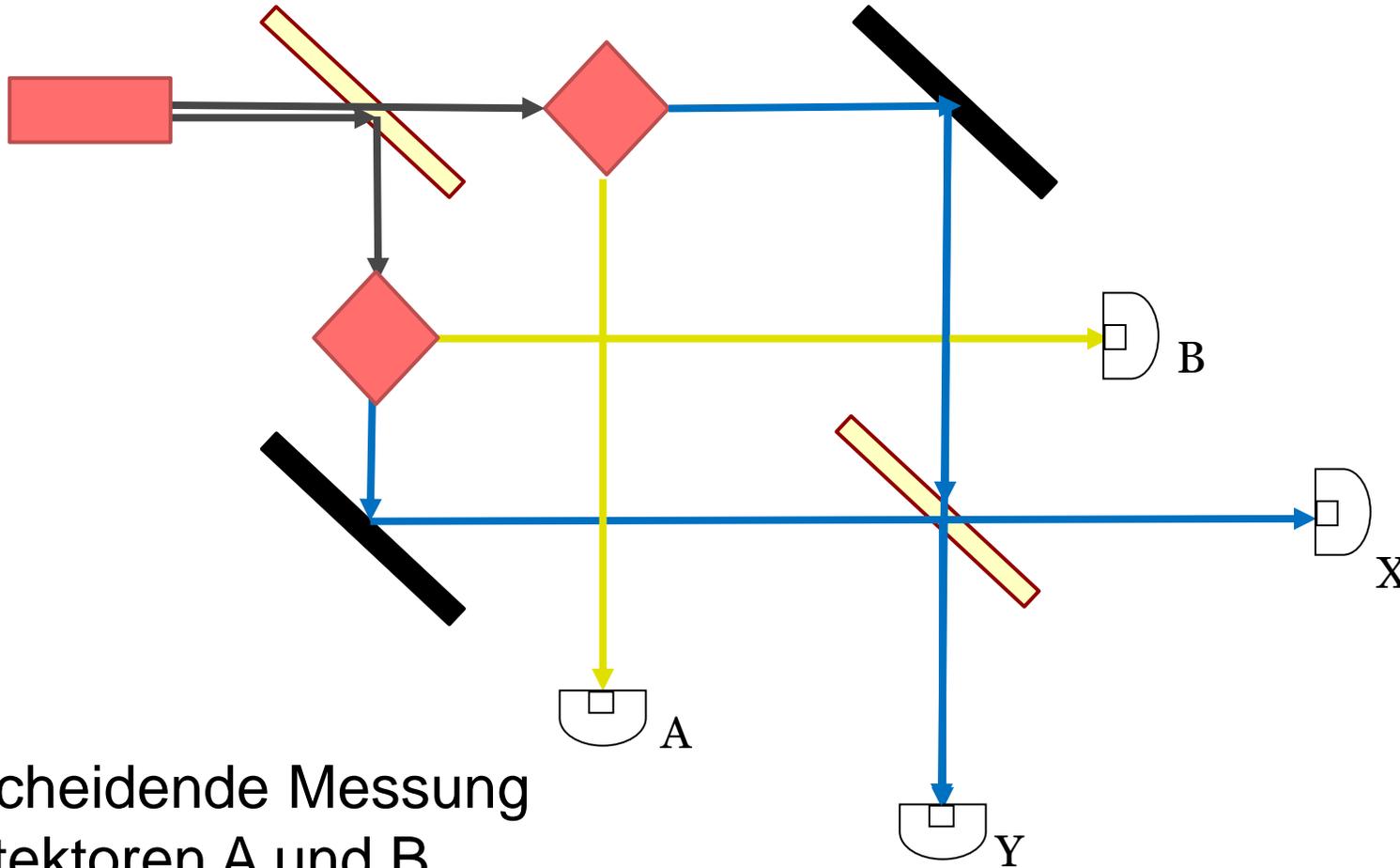
# Wegmarkierung durch zweites Photon



Keine  
Interferenz!

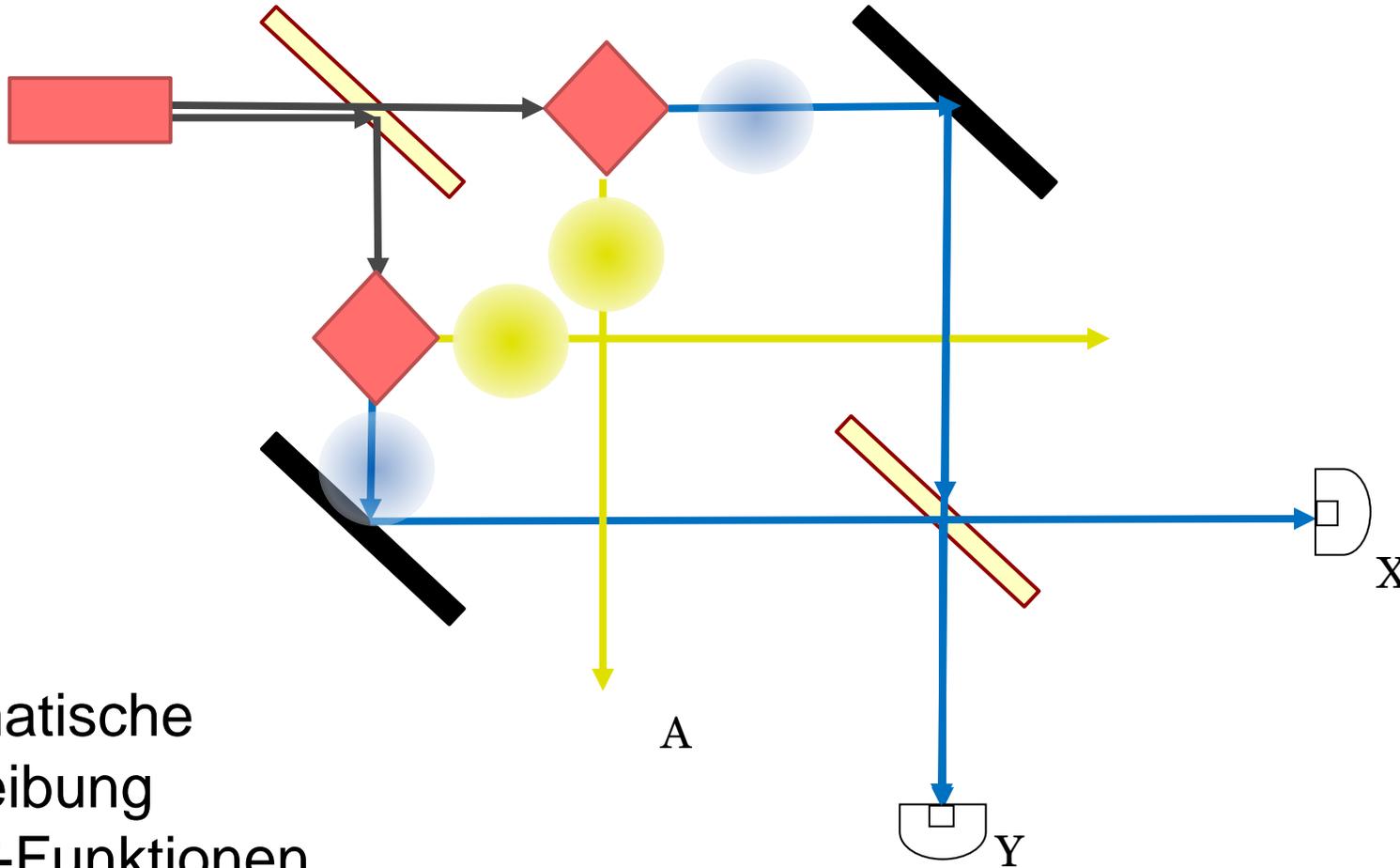
Wegmarkierung mit Idlerphoton,  
Unterscheidende Messung möglich

# Wegmarkierung durch zweites Photon



Unterscheidende Messung  
mit Detektoren A und B

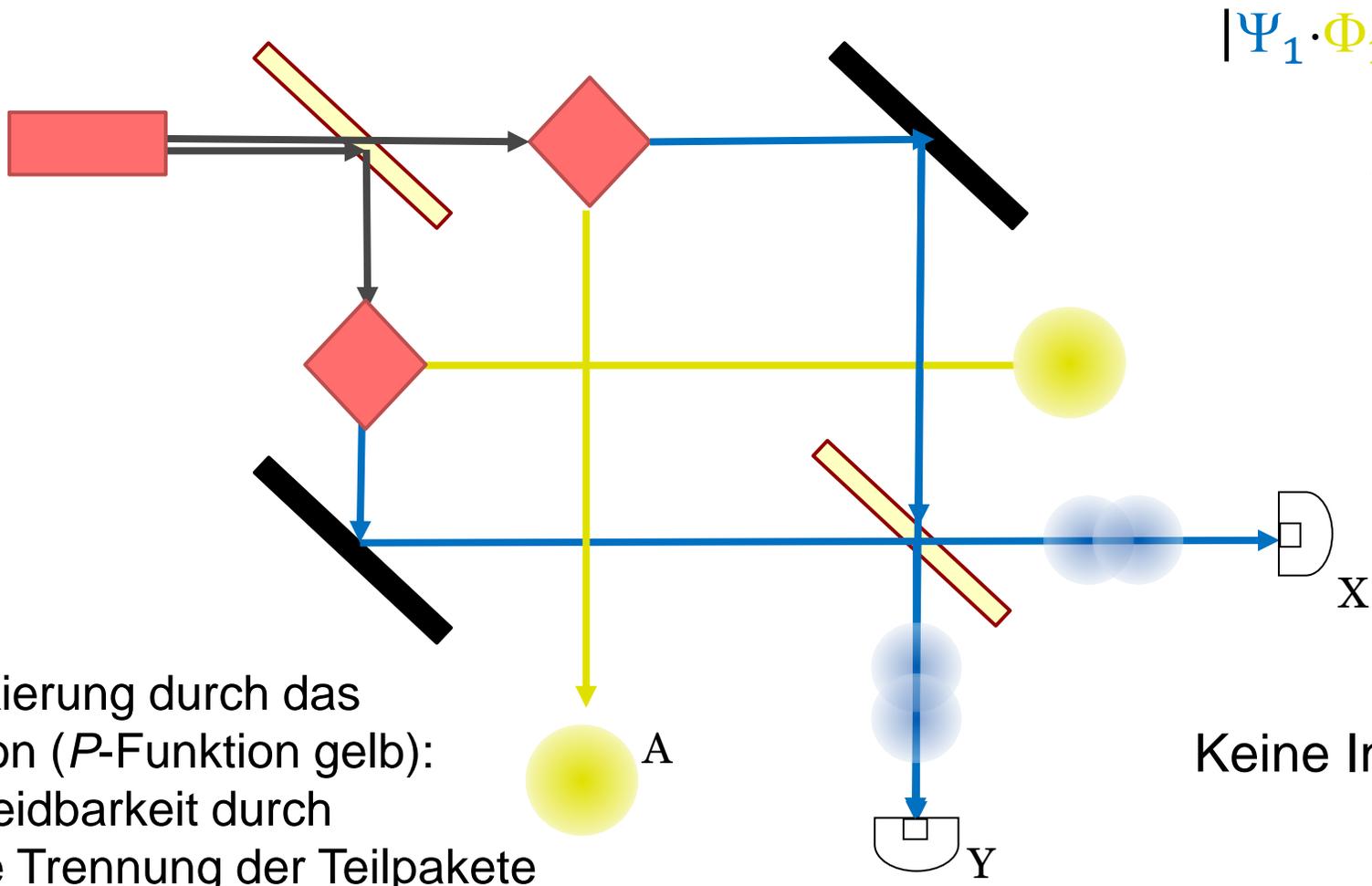
# Wegmarkierung durch zweites Photon



Keine Interferenz!

Mathematische  
Beschreibung  
durch  $P$ -Funktionen

# Wegmarkierung durch zweites Photon



$$|\Psi_1 \cdot \Phi_1 + \Psi_2 \cdot \Phi_2|^2$$

→ Interferenzterm:

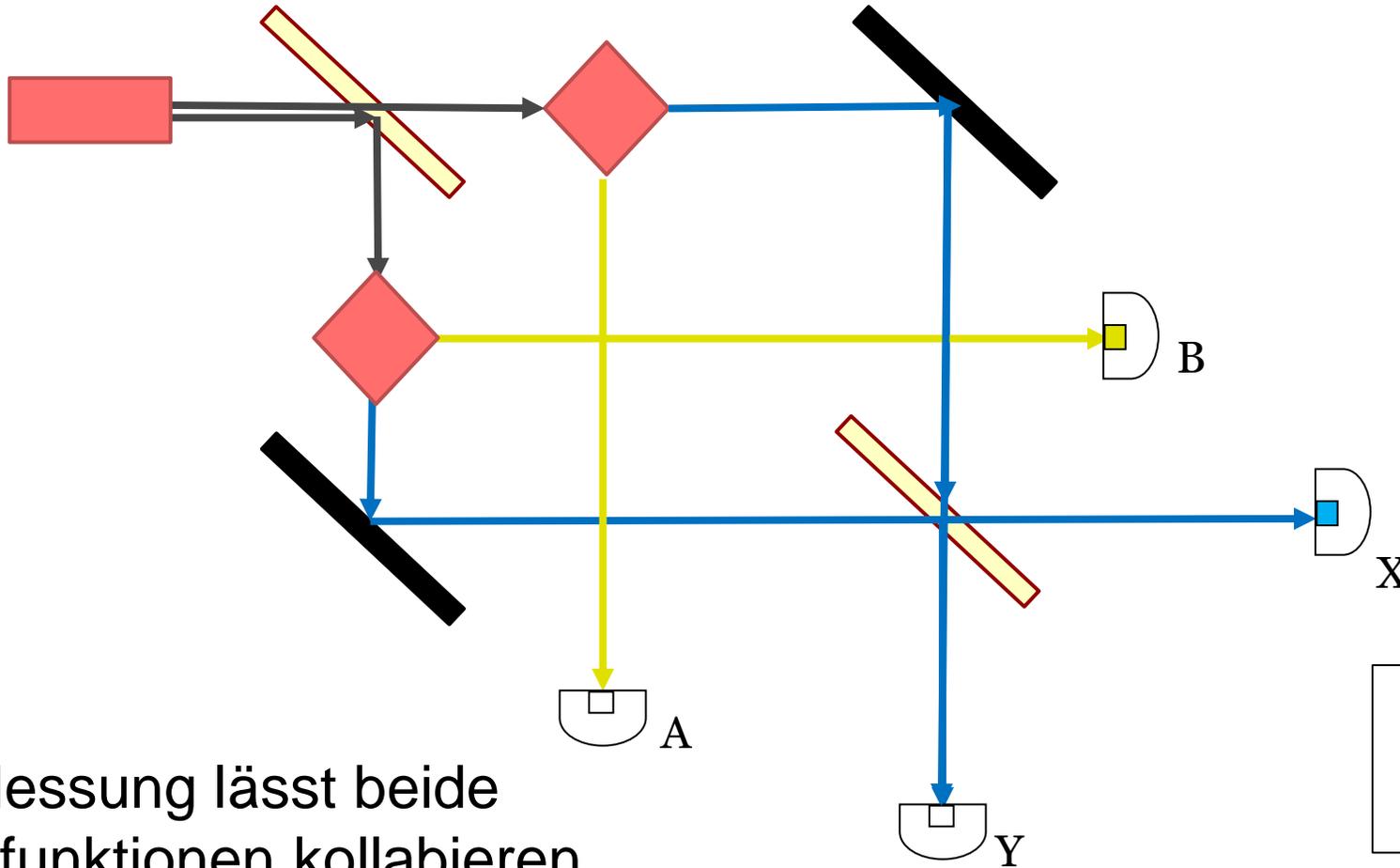
$$2 \Psi_1 \Psi_2 \cdot \Phi_1 \Phi_2$$

Beide müssen überlappen!

Keine Interferenz!

Wegmarkierung durch das Iderphoton ( $P$ -Funktion gelb): Unterscheidbarkeit durch räumliche Trennung der Teilpakete

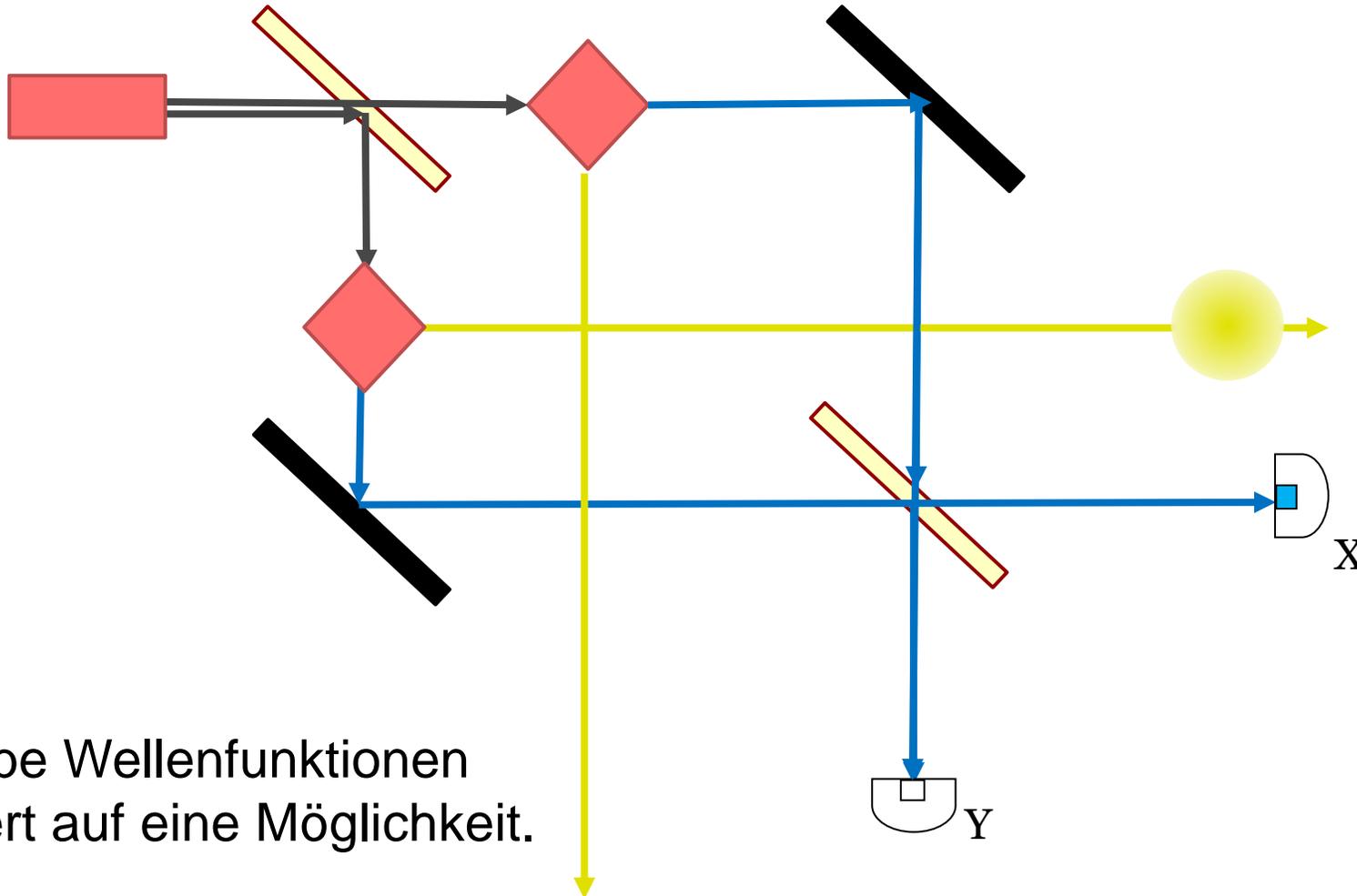
# Wegmarkierung durch zweites Photon



Eine Messung lässt beide Wellenfunktionen kollabieren.

Korrelation der Messergebnisse wegen Verschränkung

# Wegmarkierung durch zweites Photon



Die gelbe Wellenfunktionen kollabiert auf eine Möglichkeit.

# 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 war 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. Wann hat man eine *Welcher-Weg-Information*?  
→ Zuordnung / Unterscheidbarkeit
3. Wie gewinnt man eine *Welcher-Weg-Information*?  
→ Markierung / Streupartner

## Warnung!

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

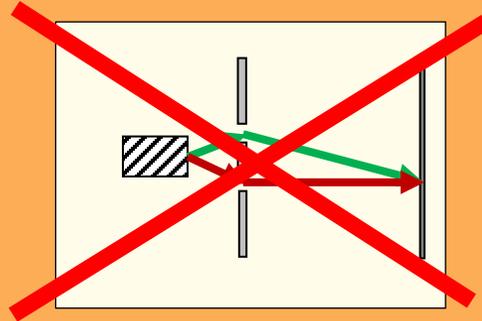


Bild : J. Küblbeck, [CC BY-SA 4.0](#)