

# Unterrichtshilfen für die Komplementarität



Dr. Josef Küblbeck  
Staatliches Seminar Stuttgart II  
Mörike-Gymnasium Ludwigsburg  
[j.kueblbeck@gmx.de](mailto:j.kueblbeck@gmx.de)

## Wieso gerade die Komplementarität?

Schwierige und teure Experimente

Kognitiv anspruchsvoll

Schwierig zu veranschaulichen



## Wieso gerade die Komplementarität?

Moderne Physik

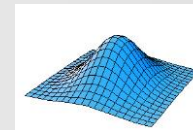
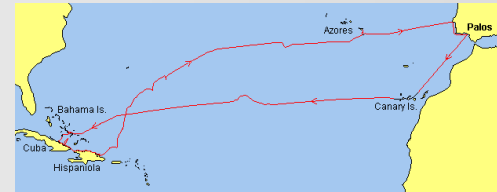
Wesentliche Eigenschaft der Quantenphysik

Überraschend, faszinierend



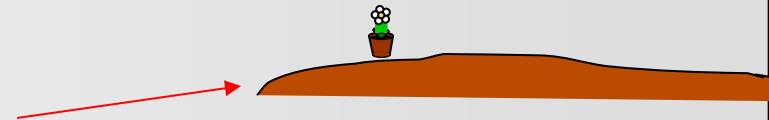
# Unterrichtshilfen für die Komplementarität

1. Die Blume (Verdeutlichung der Situation)
2. Das Experiment (bezahlbar und extrapolierbar)
3. Modellbildung (Reise)
4. Das Substanz-Modell
5. Das verbale Modell



# Die Quantenwelt ist eine fremde Welt

Einladung zu einer Entdeckungsreise



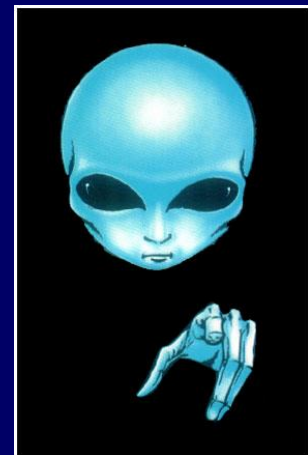
# 1. Der Zweck unserer Reise

Beobachten, kennen lernen, verstehen, erklären

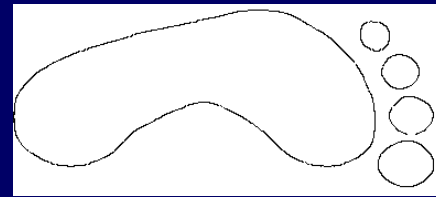
*Was unterscheidet die Quantenwelt  
von der uns vertrauten Welt?*

*Wer bevölkert die Quantenwelt?*

*Gibt es Überraschendes,  
Ungewohntes,  
Merkwürdiges?*

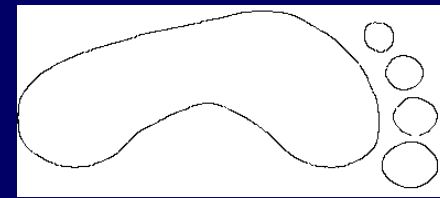


# Der Kontakt mit der fremden Welt



# Der Kontakt mit der fremden Welt

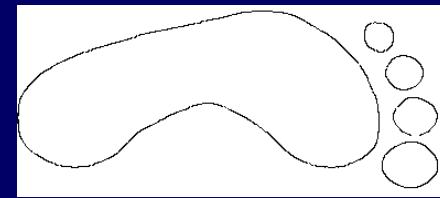
Man kann die Bewohner der Quantenwelt nicht sehen.  
Wir bekommen nur  
indirekt Informationen über sie.





# Der Kontakt mit der fremden Welt

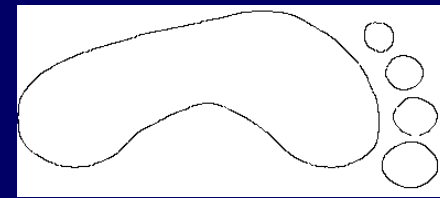
Man kann die Bewohner der Quantenwelt nicht sehen.  
Wir bekommen nur  
indirekt Informationen über sie.



Klick!

# Der Kontakt mit der fremden Welt

Man kann die Bewohner der Quantenwelt nicht sehen.  
Wir bekommen nur  
indirekt Informationen über sie.



Und zwar über Messungen,  
z.B. des Orts

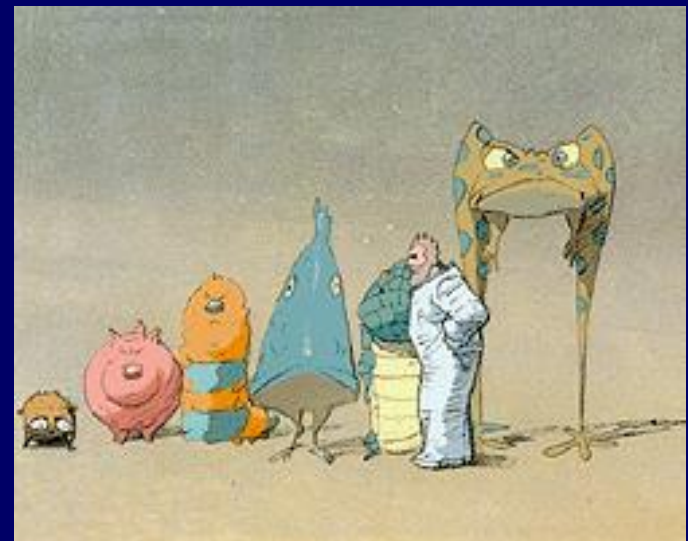


Klick!

# Die „Bewohner“

Wir nennen die Bewohner „Quantenobjekte“.  
Dazu gehören

- Elektronen,
- Photonen,
- Atome,
- Moleküle,
- magnetische Kristalle,
- supergekühlte Ringe,
- wir?



# Die „Bewohner“

*Wir wissen nicht,  
was Aliens „wirklich“ sind:  
Fische? Löwen? Saurier?*



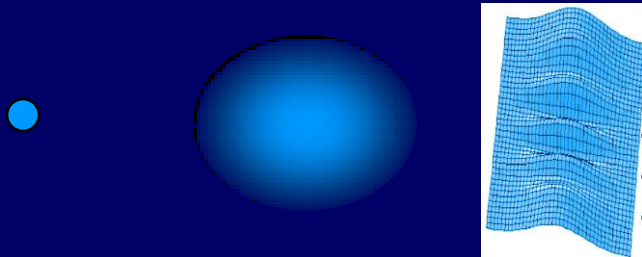
Wie stellen Sie sich Elektronen vor?

# Die „Bewohner“

*Wir wissen nicht,  
was Aliens „wirklich“ sind:  
Fische? Löwen? Saurier?*



Wir wissen nicht, was Elektronen wirklich sind:  
Teilchen? Wolken? Wellen?



# Was sind Elektronen?

Was ist Licht?

# Was sind Elektronen?

Es ist nicht die Aufgabe der Physik,  
zu klären, was etwas (wirklich) ist.

Was ist Licht wirklich?

Es bewährt sich, Licht so zu behandeln,  
als bestünde es aus

- Lichtstrahlen (Reflexion, Brechung)
- Wellen (Interferenz)
- Teilchen (Fotoeffekt)



Fische?

Löwen?

Saurier?

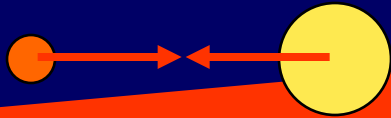
Was ist die Aufgabe der Physik?



# Was ist die Aufgabe der Physik?

- Vorhersagen
- Erklären

# Die physikalische Erkenntnisweise



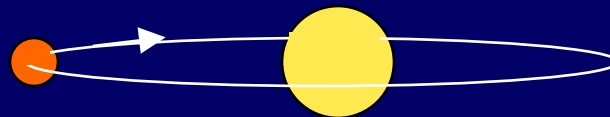
$$F_{grav} = G * \frac{m_1 * m_2}{r^2}$$

Vorstellungen, Gesetzmäßigkeiten

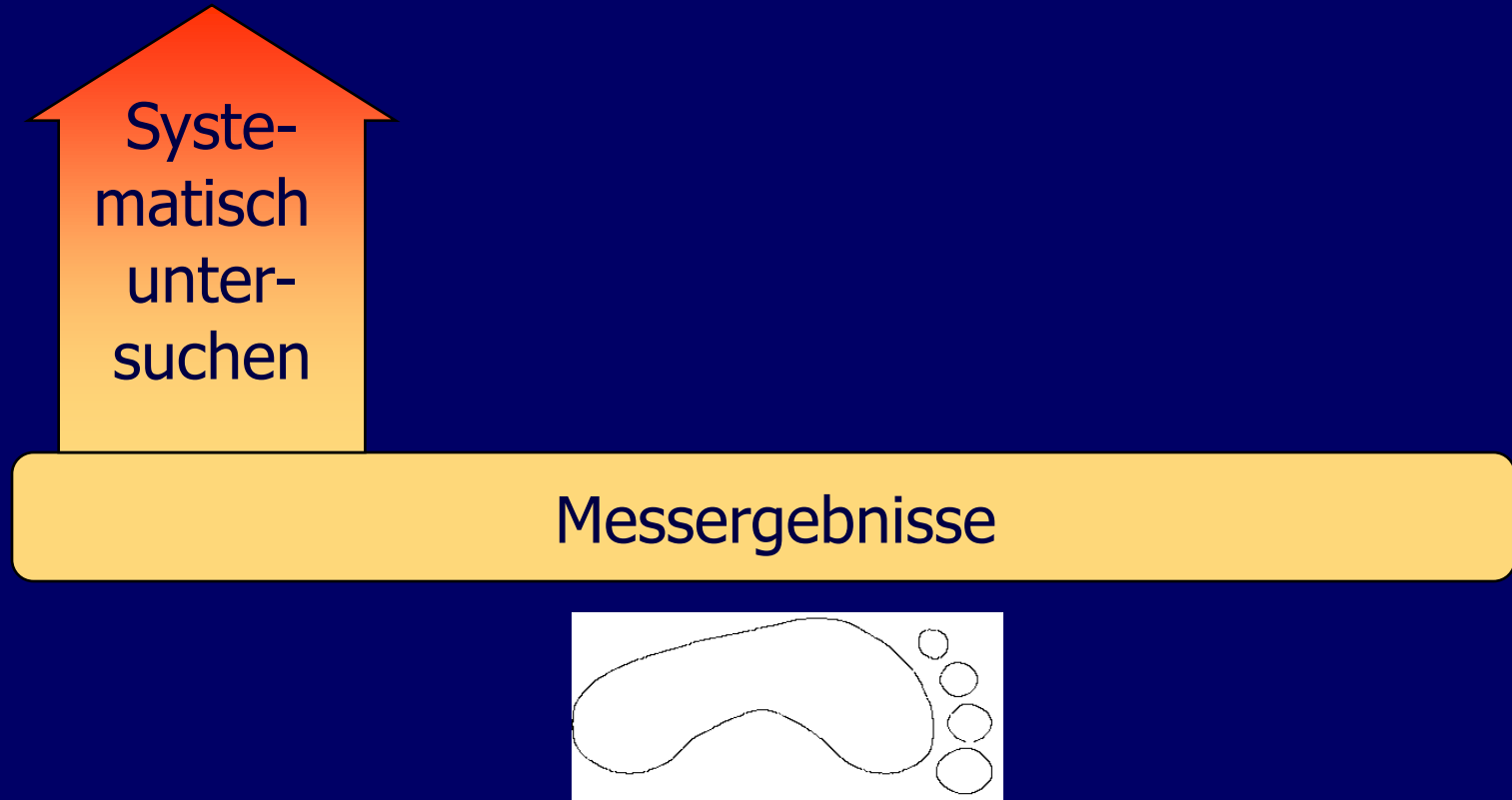
Systematisch  
untersuchen

Erklären  
und  
Vorhersagen

Beobachtungen und Messergebnisse



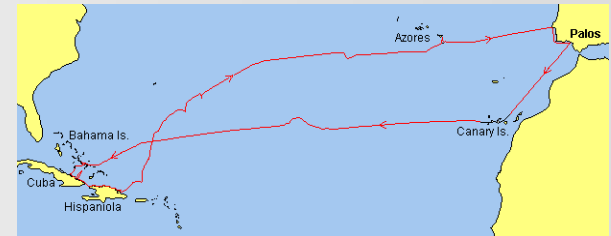
# Was beobachten wir in der Quantenphysik?



# Eine Reise in eine fremde Welt

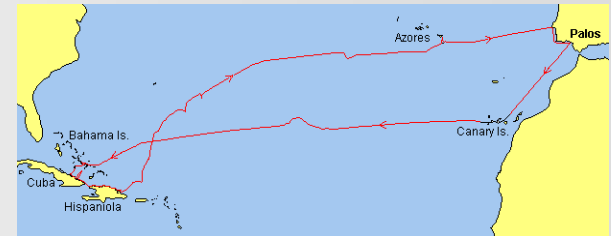
## 1. Der Zweck unserer Reise

???



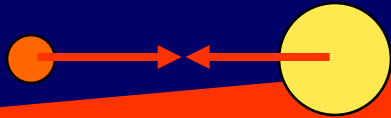
# Eine Reise in eine fremde Welt

## 1. Der Zweck unserer Reise



Ein Modell entwickeln, mit dem wir auf jeden Fall  
**Vorhersagen machen** können  
und wenn's gut läuft:  
auch **etwas erklären** können

# Die physikalische Erkenntnisweise



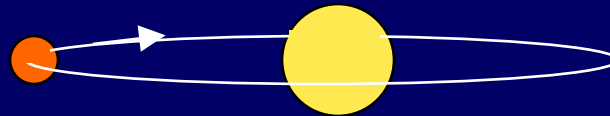
$$F_{grav} = G * \frac{m_1 * m_2}{r^2}$$

Vorstellungen, Gesetzmäßigkeiten

Systematisch  
untersuchen

Erklären  
und  
Vorhersagen

Beobachtungen und Messergebnisse



Warum fällt ein Stein auf die Erde?

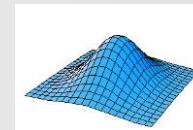
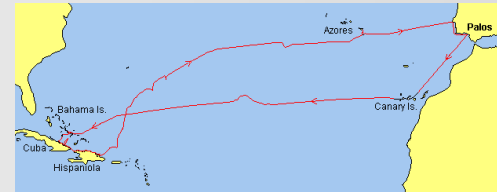
Weil sich zwei Körper stets anziehen.

(= „Erklärung“ durch allgemeine Gesetzmäßigkeit.)

Solche Gesetze suchen wir auch für die Quantenobjekte.

# Unterrichtshilfen für die Komplementarität

1. Die Blume (Verdeutlichung der Situation)
2. Das Experiment (bezahlbar und extrapolierbar)
3. Modellbildung (Reise)
4. Das Substanz-Modell
5. Das verbale Modell





# Ein Satz von Regeln

Für Licht: ???

Für die Mechanik: ???

Für die Quantenphysik: ???

# Ein Satz von Regeln

Für Licht: Strahlen, Reflexions-, Brechungsgesetz

Für die Mechanik:

Für die Quantenphysik:

# Ein Satz von Regeln

Für Licht: Strahlen, Reflexions-, Brechungsgesetz

Für die Mechanik: Impulserhaltung/Newton

Für die Quantenphysik:

# Ein Satz von Regeln

Für Licht: Strahlen, Reflexions-, Brechungsgesetz

Für die Mechanik: Impulserhaltung/Newton

Für die Quantenphysik: verbales Modell  
oder mathematisches:  
Schrödingergleichung usw.

Die mathematische Beschreibung gelingt mit der Schrödingergleichung.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi = -c \cdot i \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Diese hat eine ähnliche Form wie die Wellengleichung.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi = -c \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Deshalb sagt man oft, die Quantenobjekte haben etwas „Welliges“.

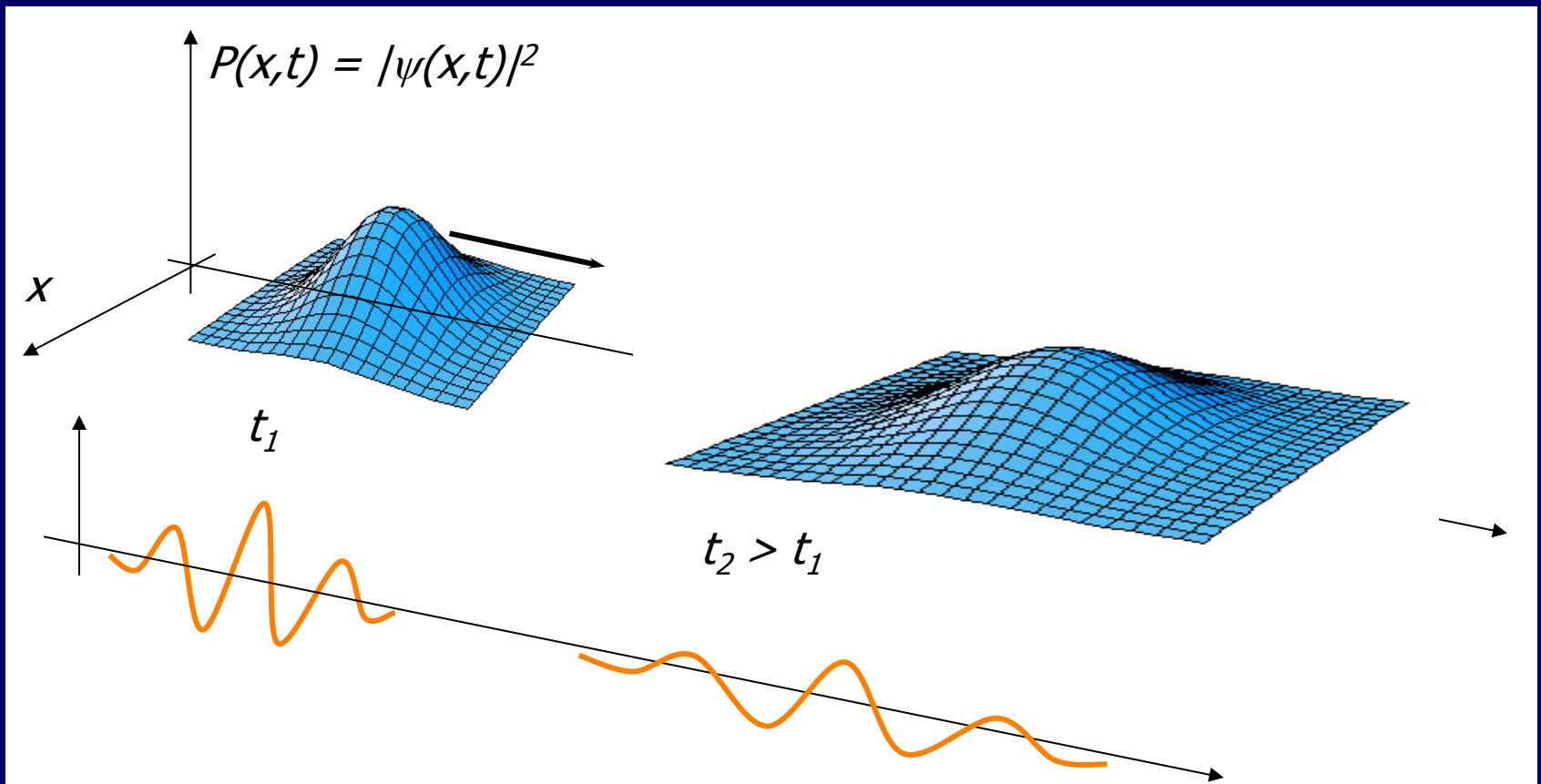
Alles was „in den Formeln schwingt“, ist jedoch nicht beobachtbar.

$$\psi(x, t)$$

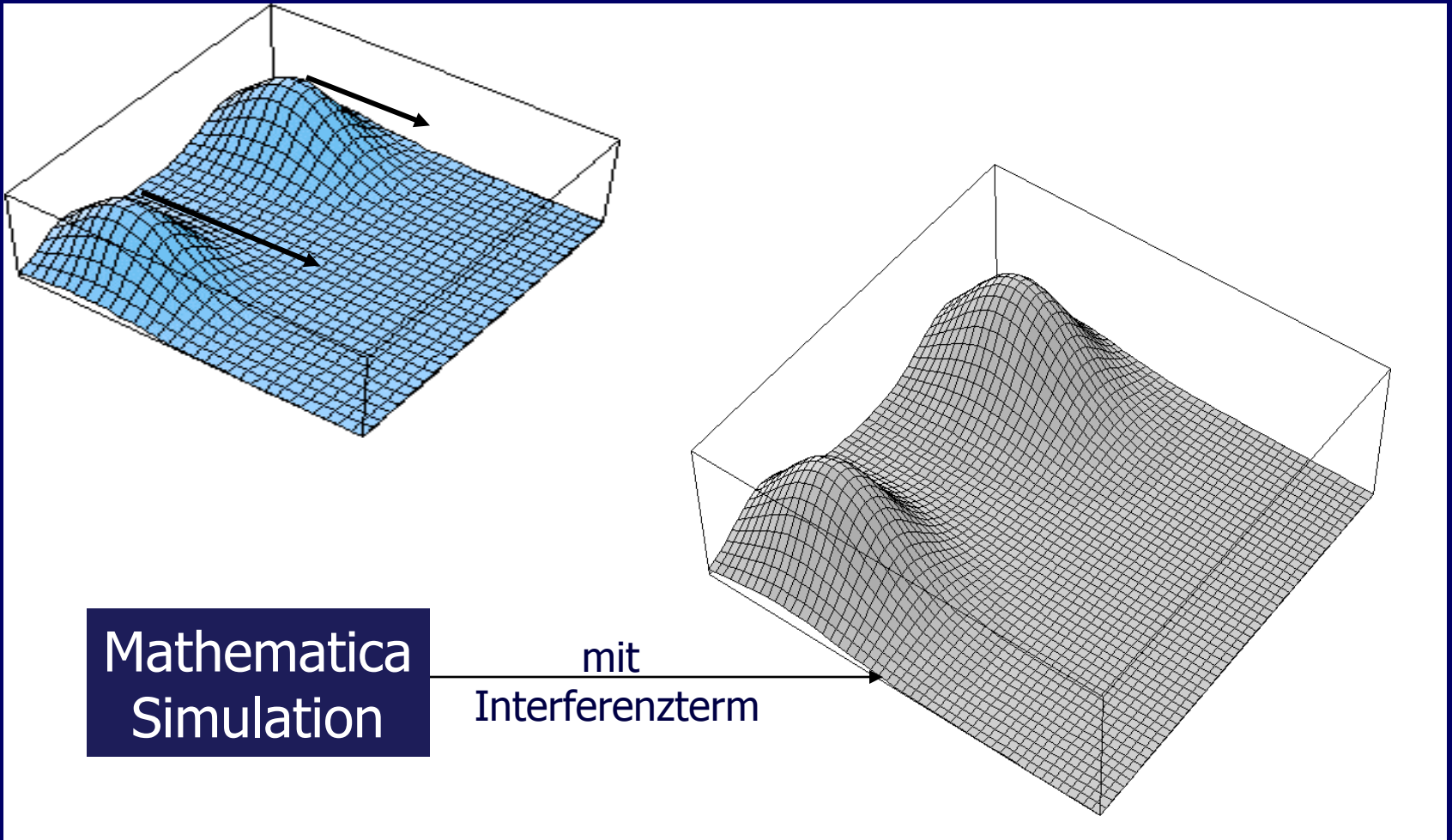
Beobachtbar ist allein das Betragsquadrat, und das schwingt nicht.

$$|\psi(x, t)|^2$$

# Beschreibung der Komplementarität mit Wahrscheinlichkeitspaketen



# Beschreibung der Komplementarität mit Wahrscheinlichkeitspaketen



# Beschreibung der Interferenz

Beschreibung der Interferenz:

$$\psi = \psi_{li}(x, t) + \psi_{re}(x, t)$$

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

⇒ Interferenzterm:  $2 \psi_{li}(x, t) \cdot \psi_{re}(x, t)$

Wenn die Pakete  
nicht überlappen,

⇒

verschwindet der  
Interferenzterm  
für alle  $x$



# Ein Satz von Regeln

Für die Pakete:

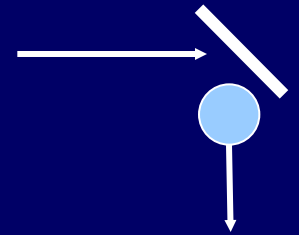
1. Ohne Hindernis laufen sie einfach weiter.



# Ein Satz von Regeln

Für die Pakete:

1. Ohne Hindernis laufen sie einfach weiter.
2. An Spiegeln werden sie reflektiert. (Wieso?)



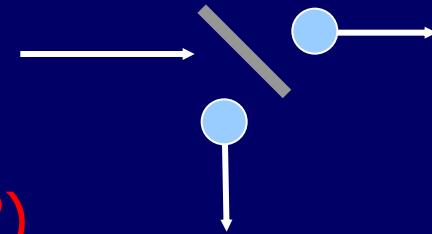
# Ein Satz von Regeln

Für die Pakete:

1. Ohne Hindernis laufen sie einfach weiter.

2. An Spiegeln werden sie reflektiert. (Wieso?)

3. An Strahlteilern werden sie aufgeteilt. (Wieso?)



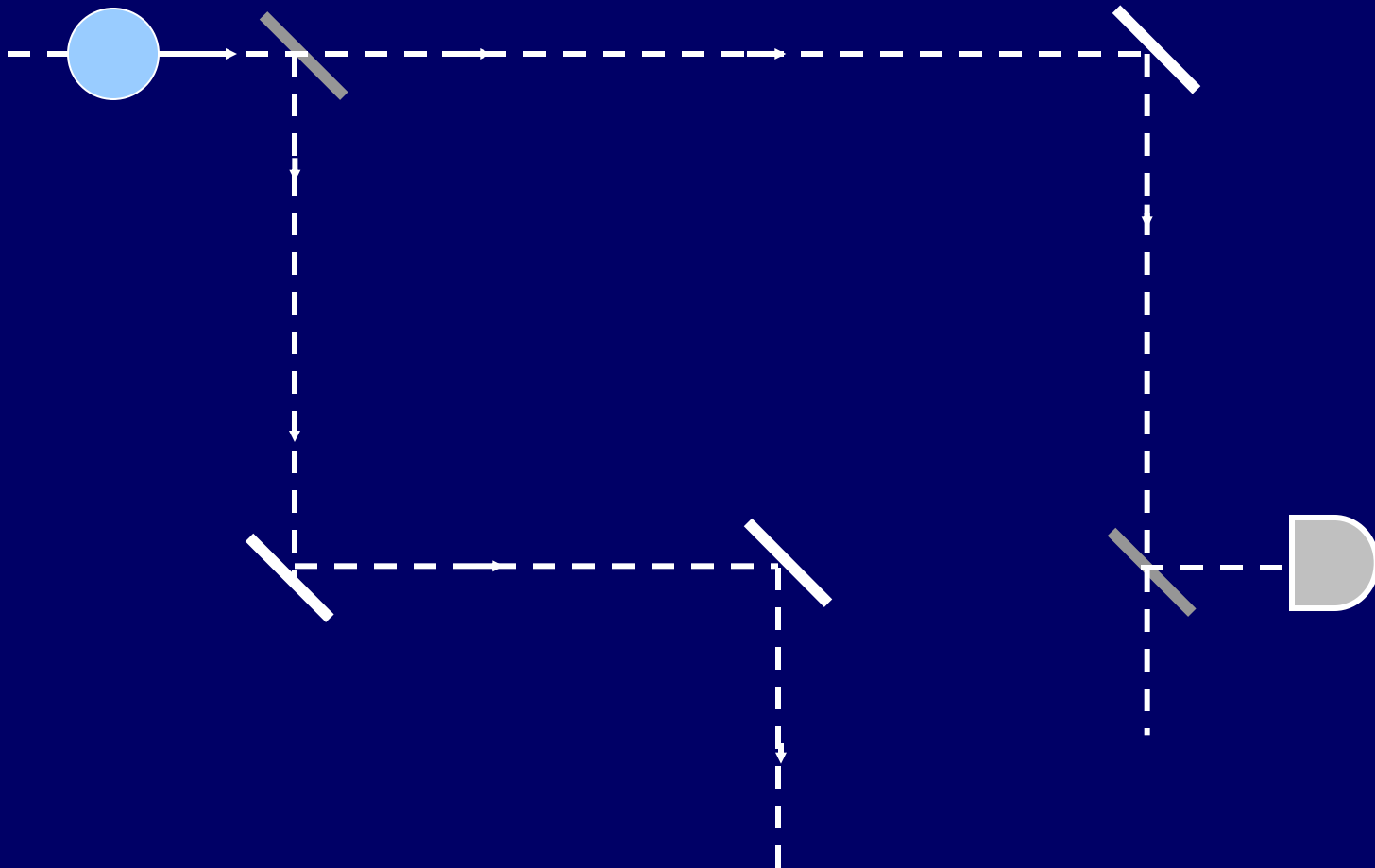
# Ein Satz von Regeln

Für die Pakete:

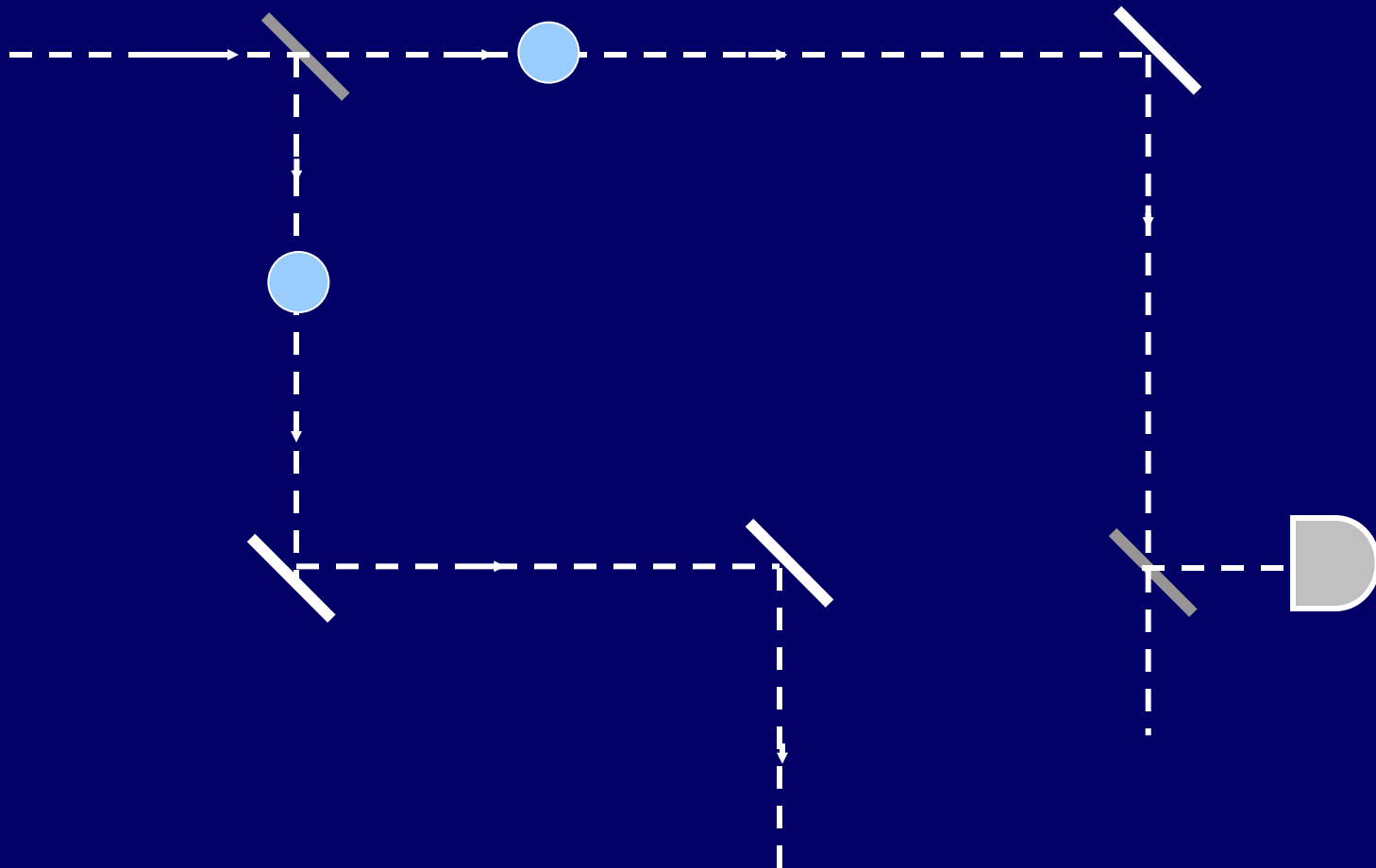
1. Ohne Hindernis laufen sie einfach weiter.
2. An Spiegeln werden sie reflektiert. (Wieso?)
3. An Strahlteilern werden sie aufgeteilt. (Wieso?)
4. Wenn sie überlappen, dann klumpen sie meistens.



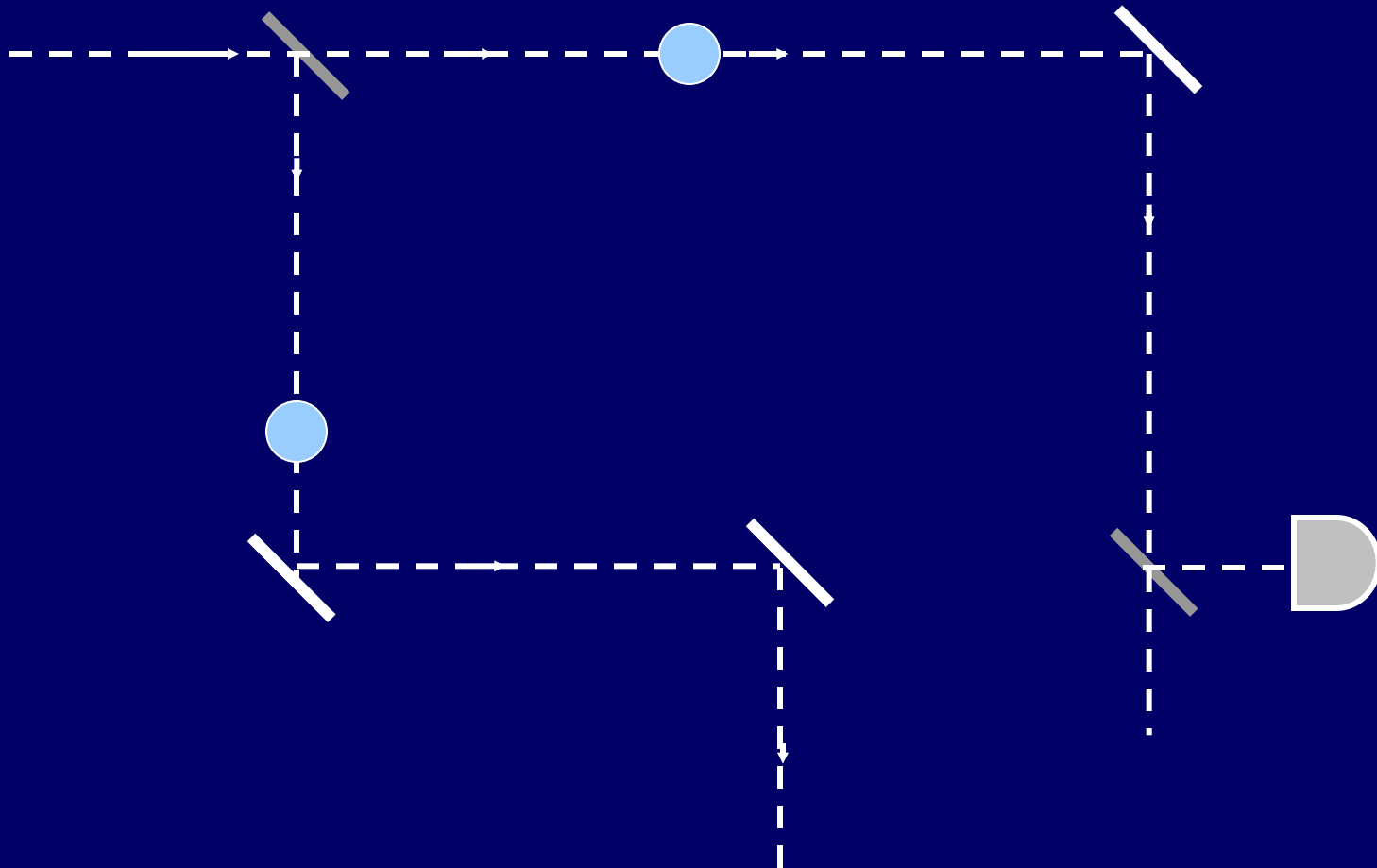
# Interferometer mit einem Arm



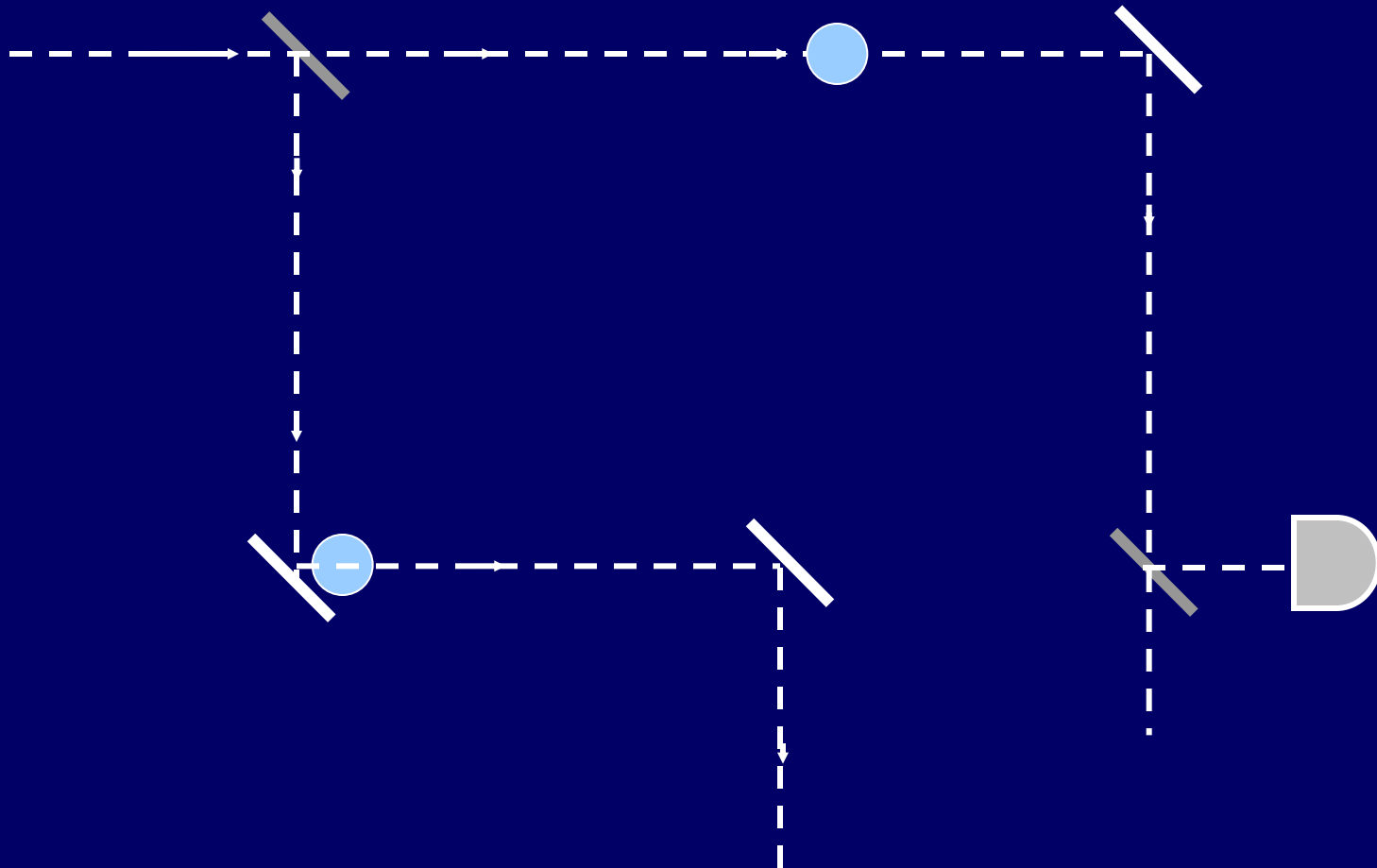
# Interferometer mit einem Arm



# Interferometer mit einem Arm

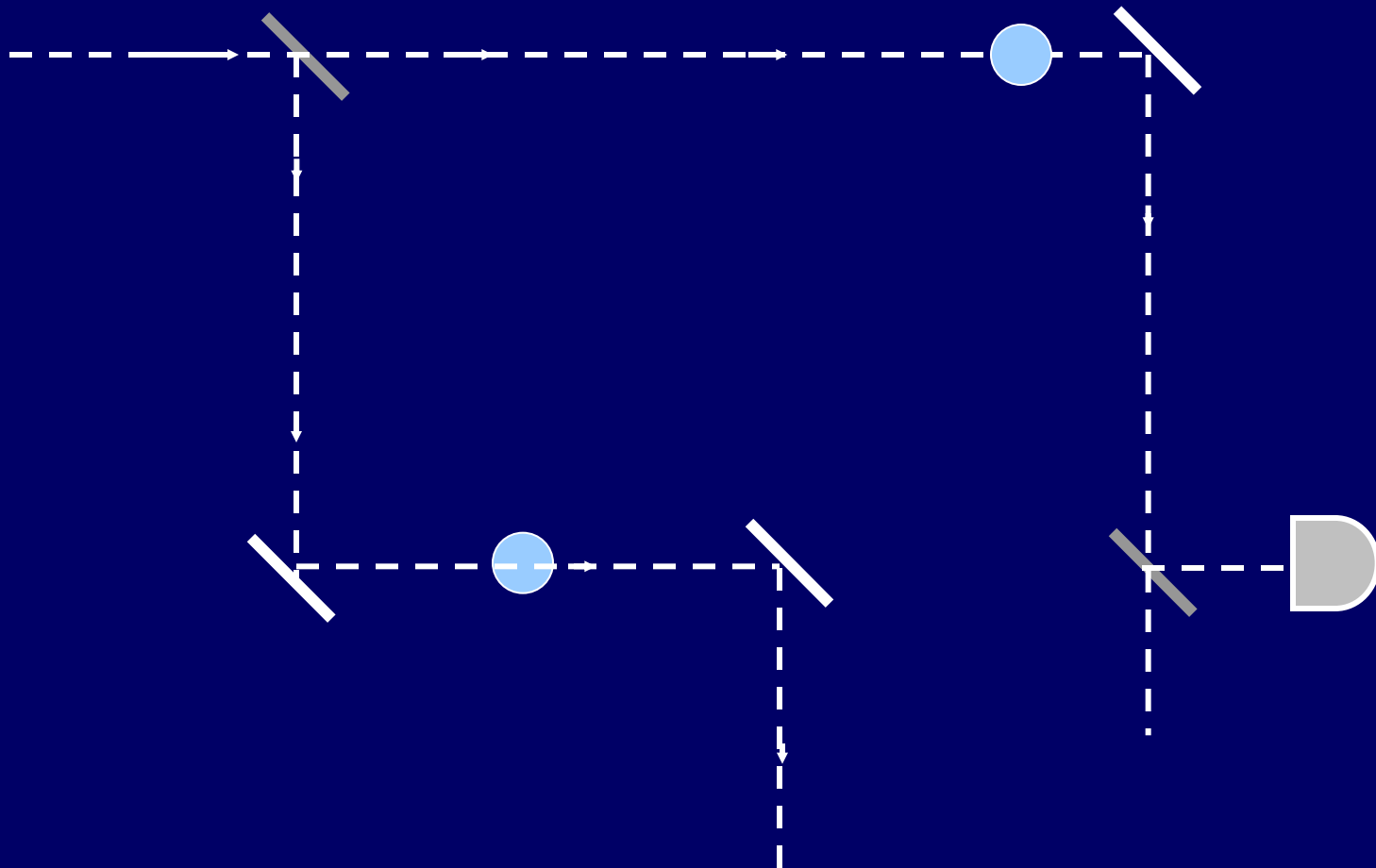


# Interferometer mit einem Arm

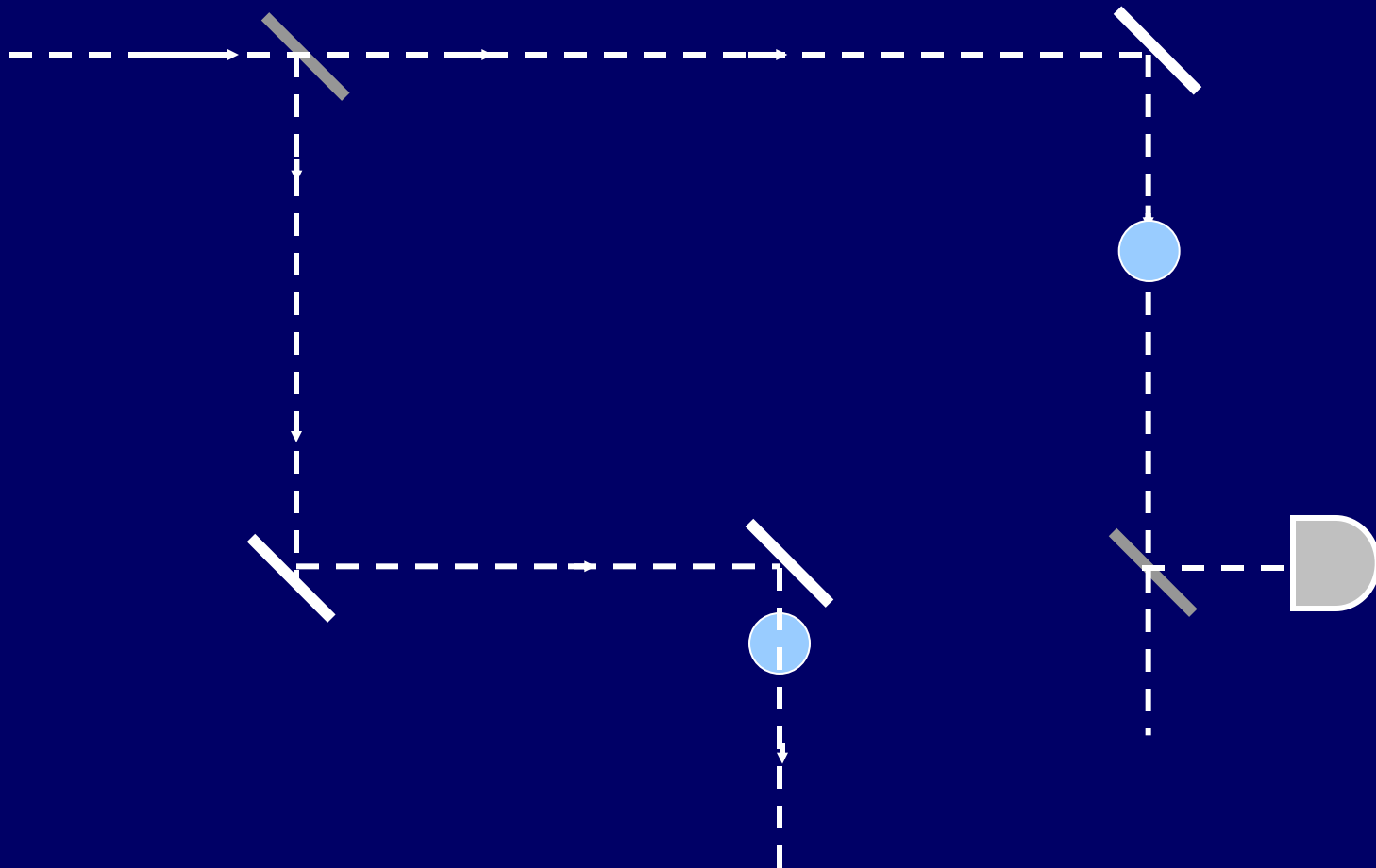




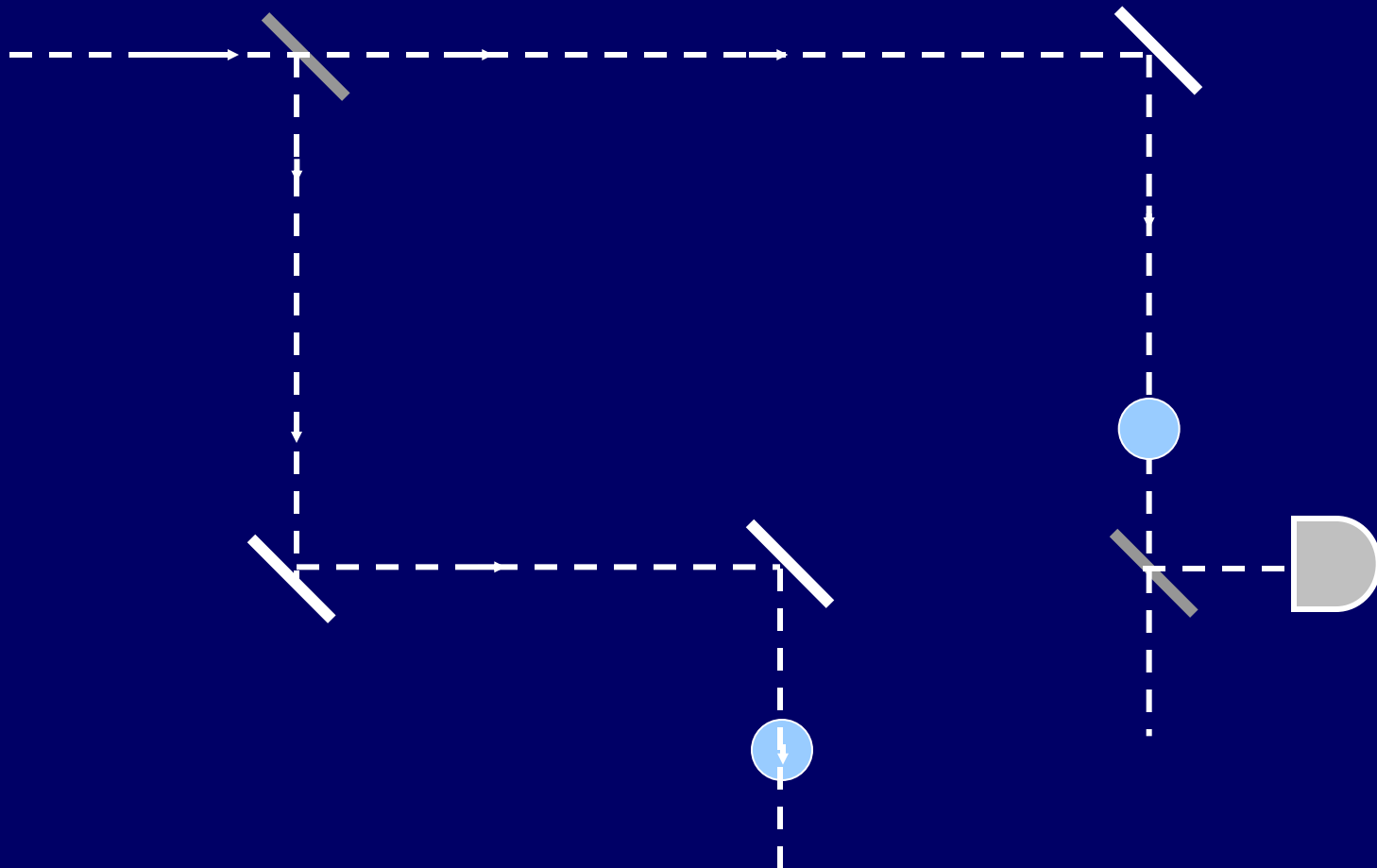
# Interferometer mit einem Arm



# Interferometer mit einem Arm

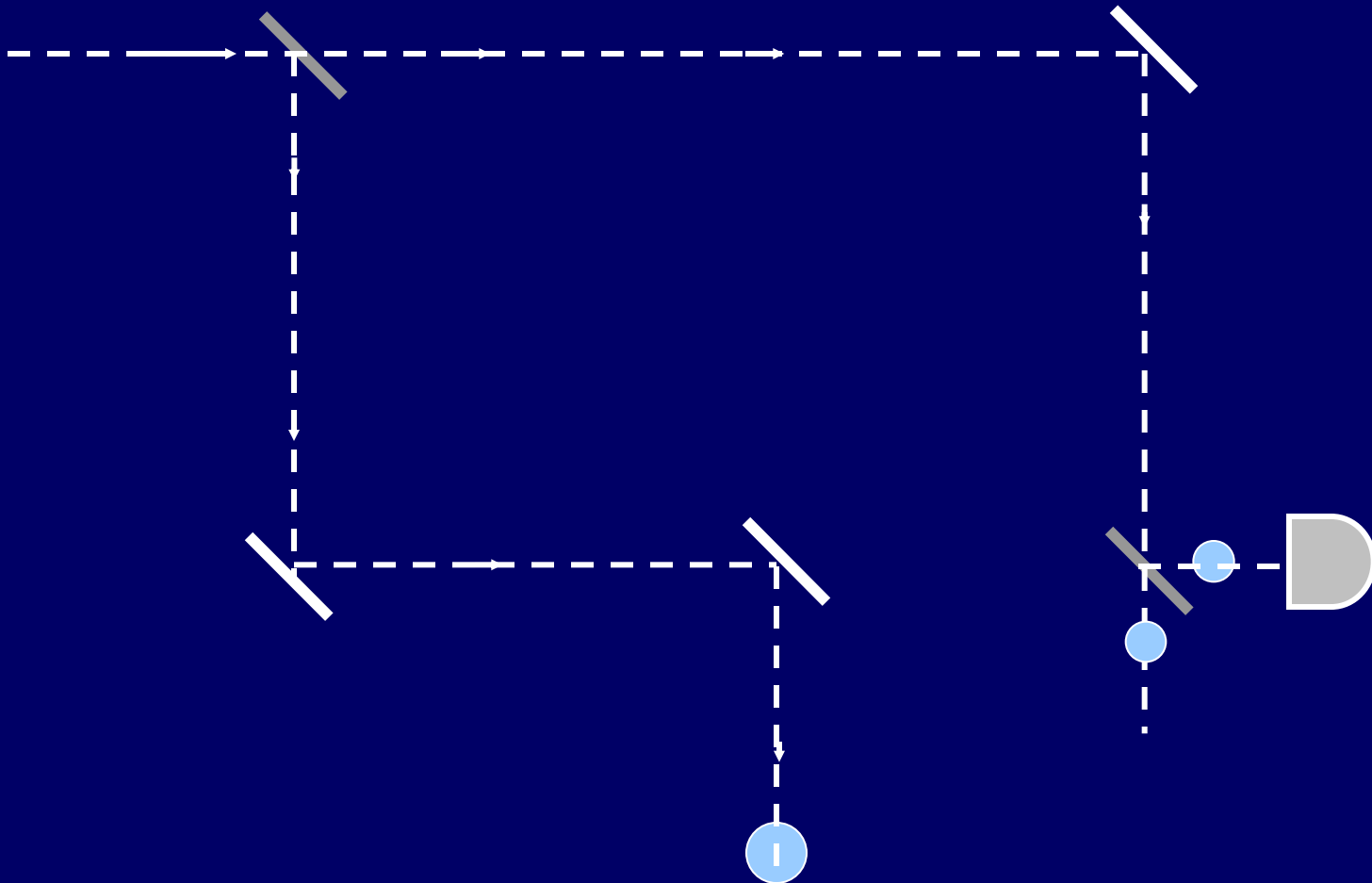


# Interferometer mit einem Arm



# Interferometer mit einem Arm

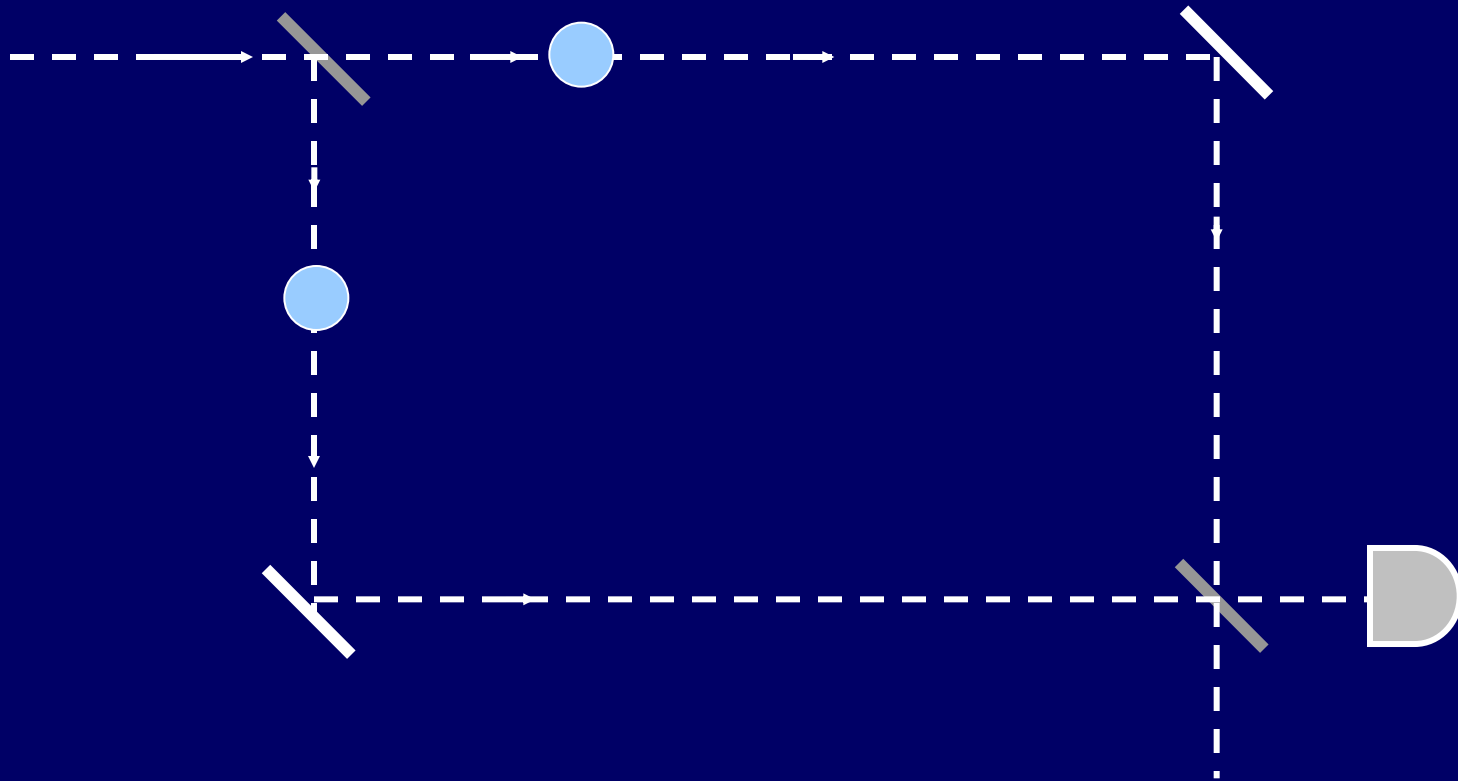
$$2 \psi_{li}^{atom}(x_{atom}, t) \cdot \psi_{re}^{atom}(x_{atom}, t)$$



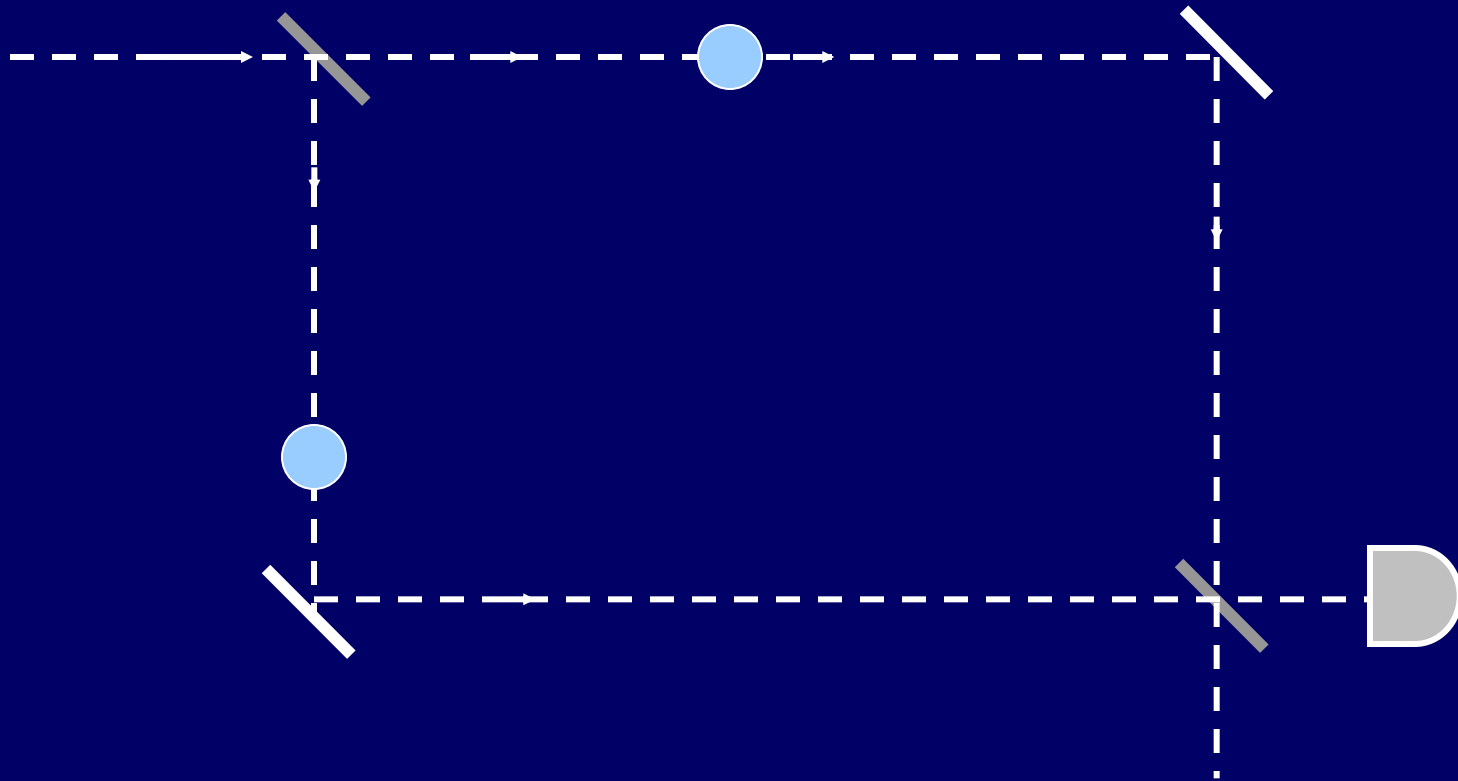
# Interferometer mit zwei Armen



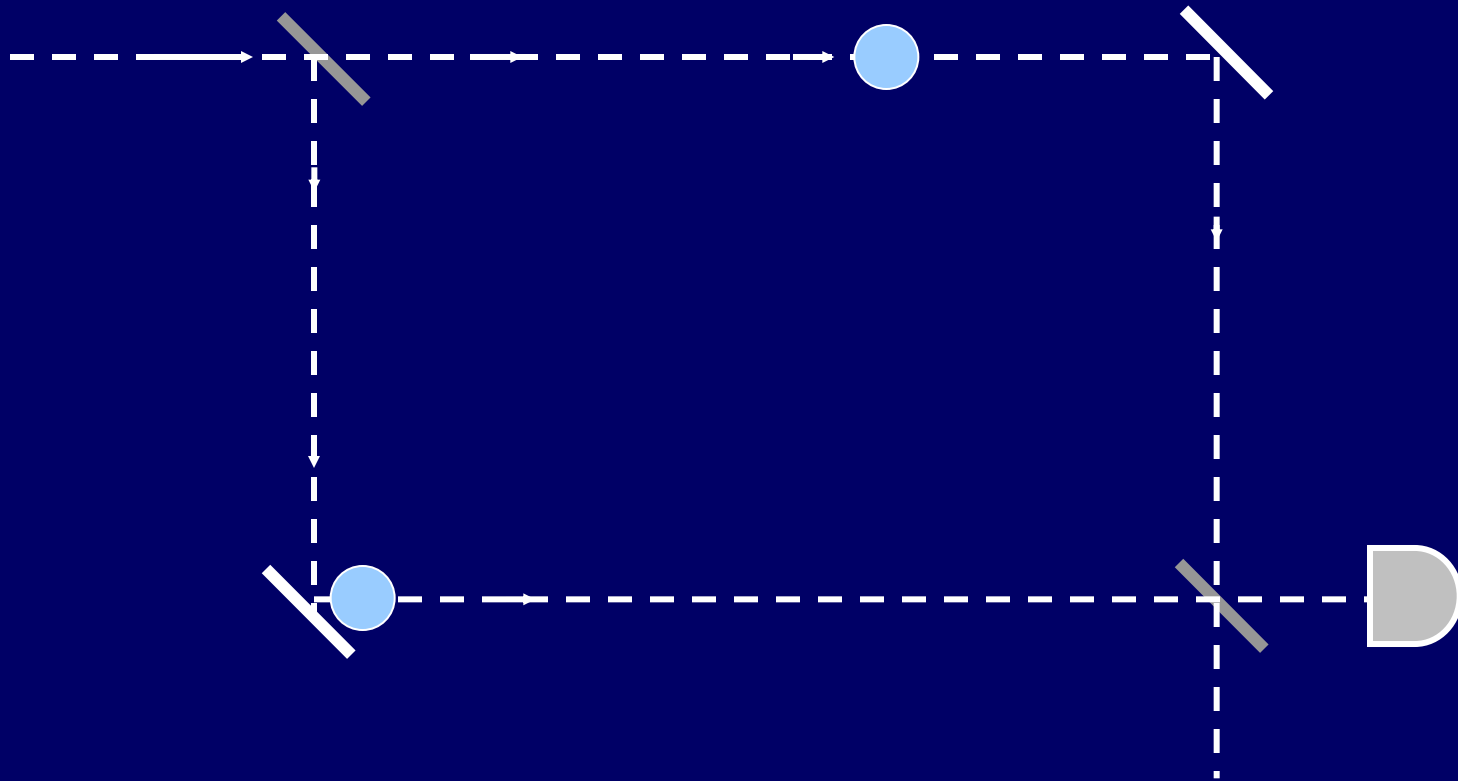
# Interferometer mit zwei Armen



# Interferometer mit zwei Armen

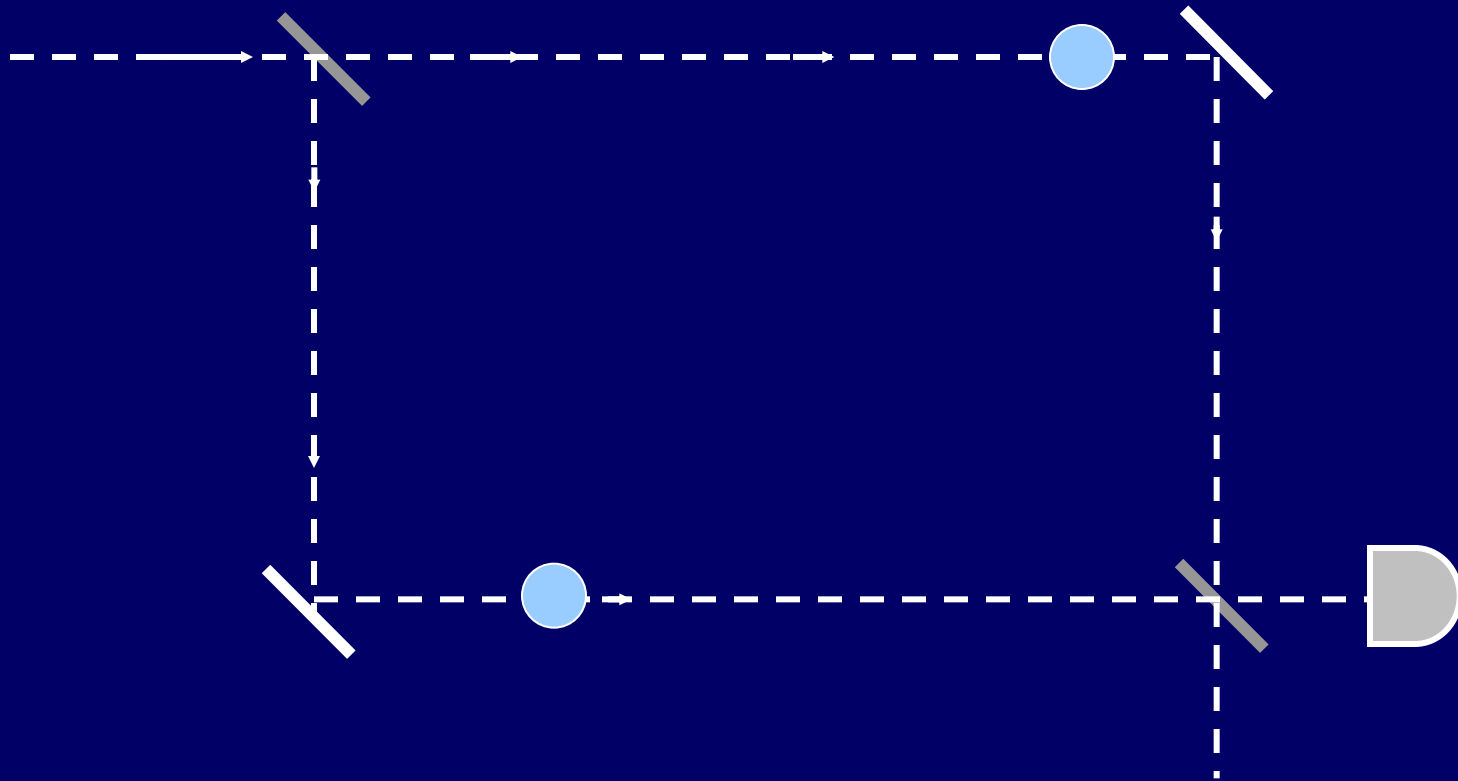


# Interferometer mit zwei Armen

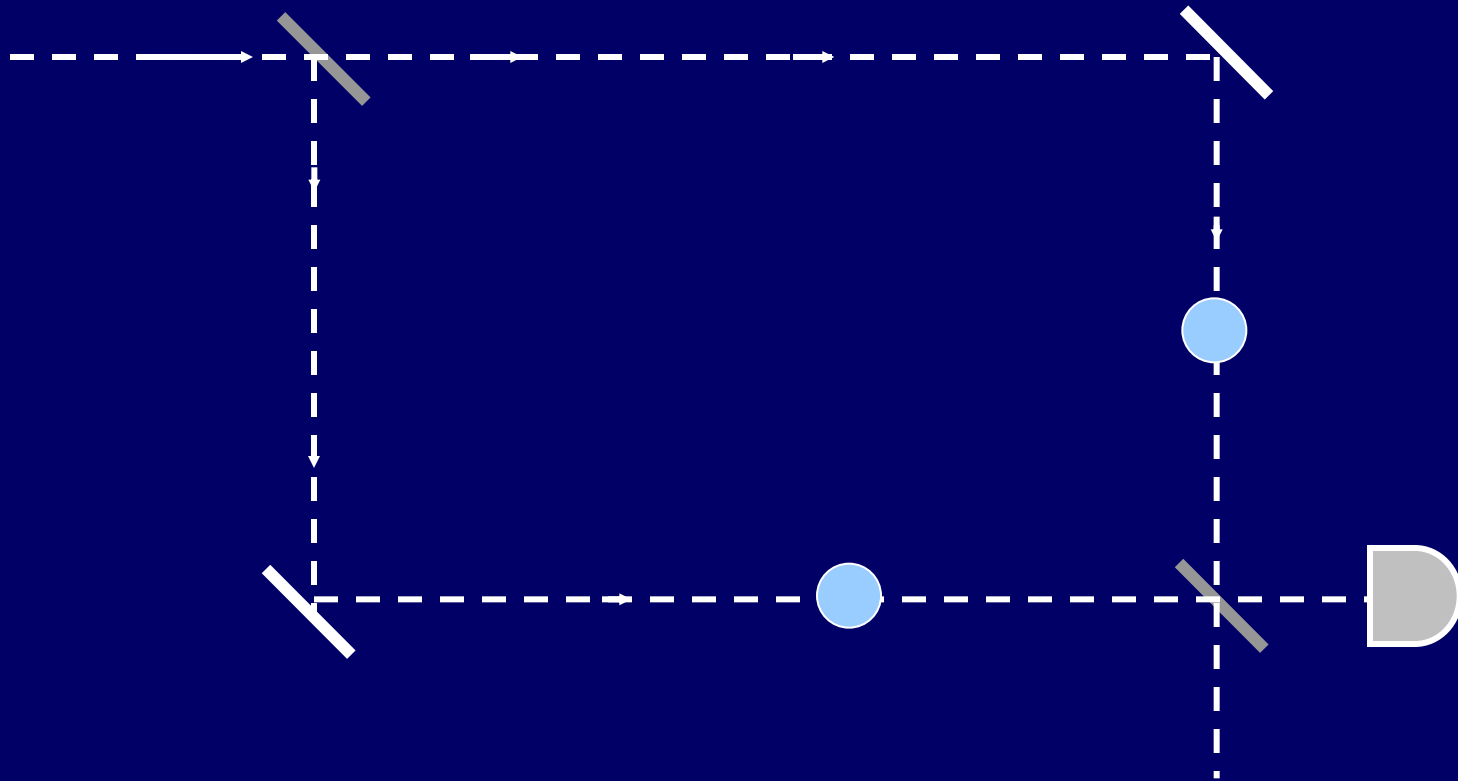




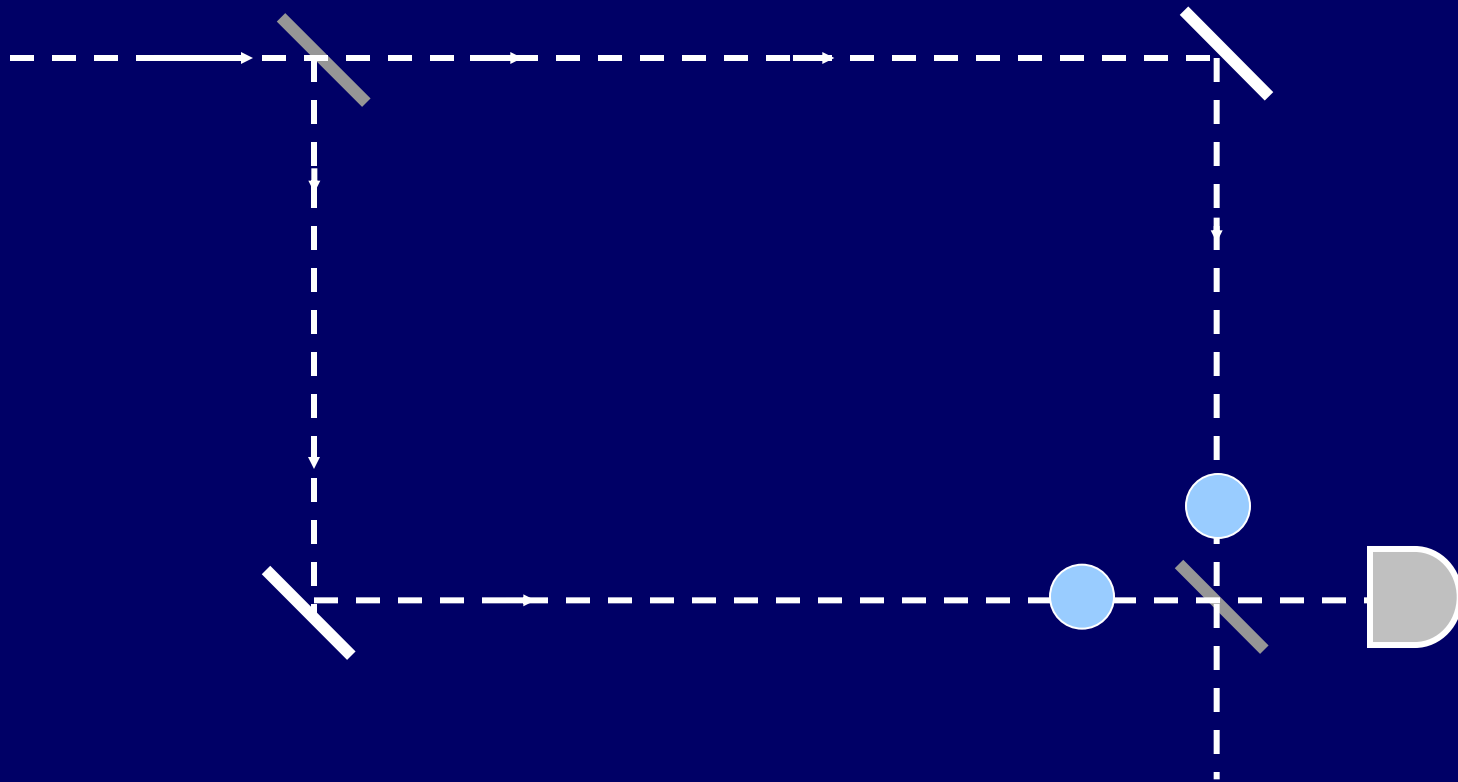
# Interferometer mit zwei Armen



# Interferometer mit zwei Armen



# Interferometer mit zwei Armen



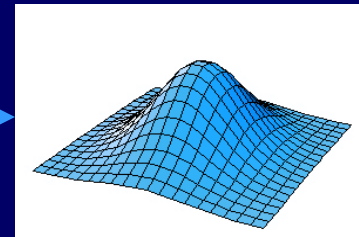
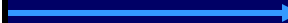
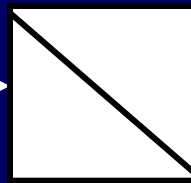
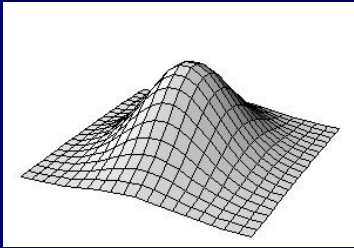
# Interferometer mit zwei Armen

$$2 \psi_{li}^{atom}(x_{atom}, t) \cdot \psi_{re}^{atom}(x_{atom}, t)$$



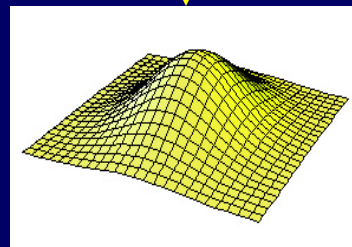
# Photonen-“Spaltung”

Nichtlinearer  
Kristall



Paket für das  
einlaufende Photon

Paket für das  
Signalphoton



Paket für das  
Idlerphoton

# Beschreibung der Komplementarität

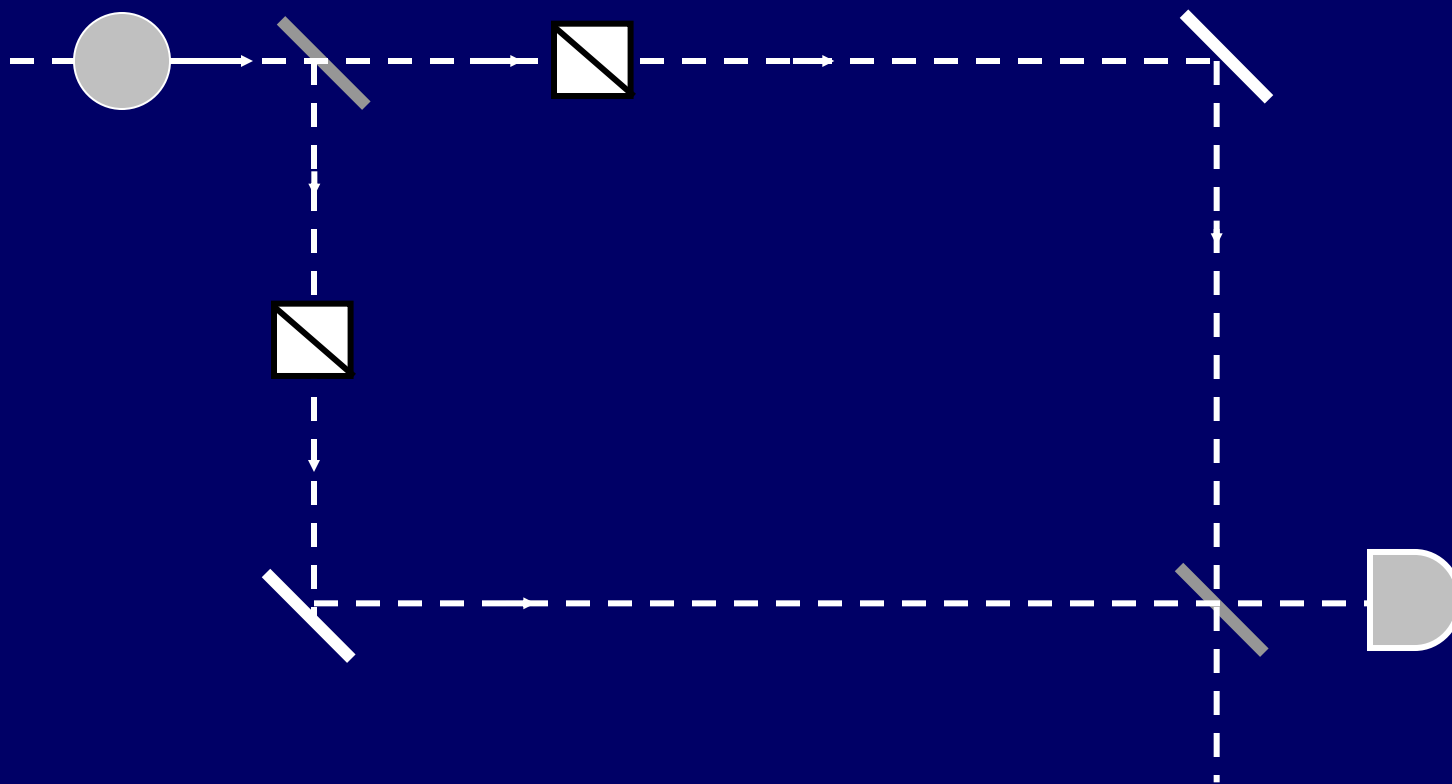
Beschreibung von zwei wechselwirkenden Q.O.

$$\begin{aligned}\psi^{\text{signal+idler}} &= \psi_{li}^{\text{signal}}(\mathbf{x}_{\text{signal}}, t) \cdot \psi_{li}^{\text{idler}}(\mathbf{x}_{\text{idler}}, t) \\ &+ \psi_{re}^{\text{signal}}(\mathbf{x}_{\text{signal}}, t) \cdot \psi_{re}^{\text{idler}}(\mathbf{x}_{\text{idler}}, t)\end{aligned}$$

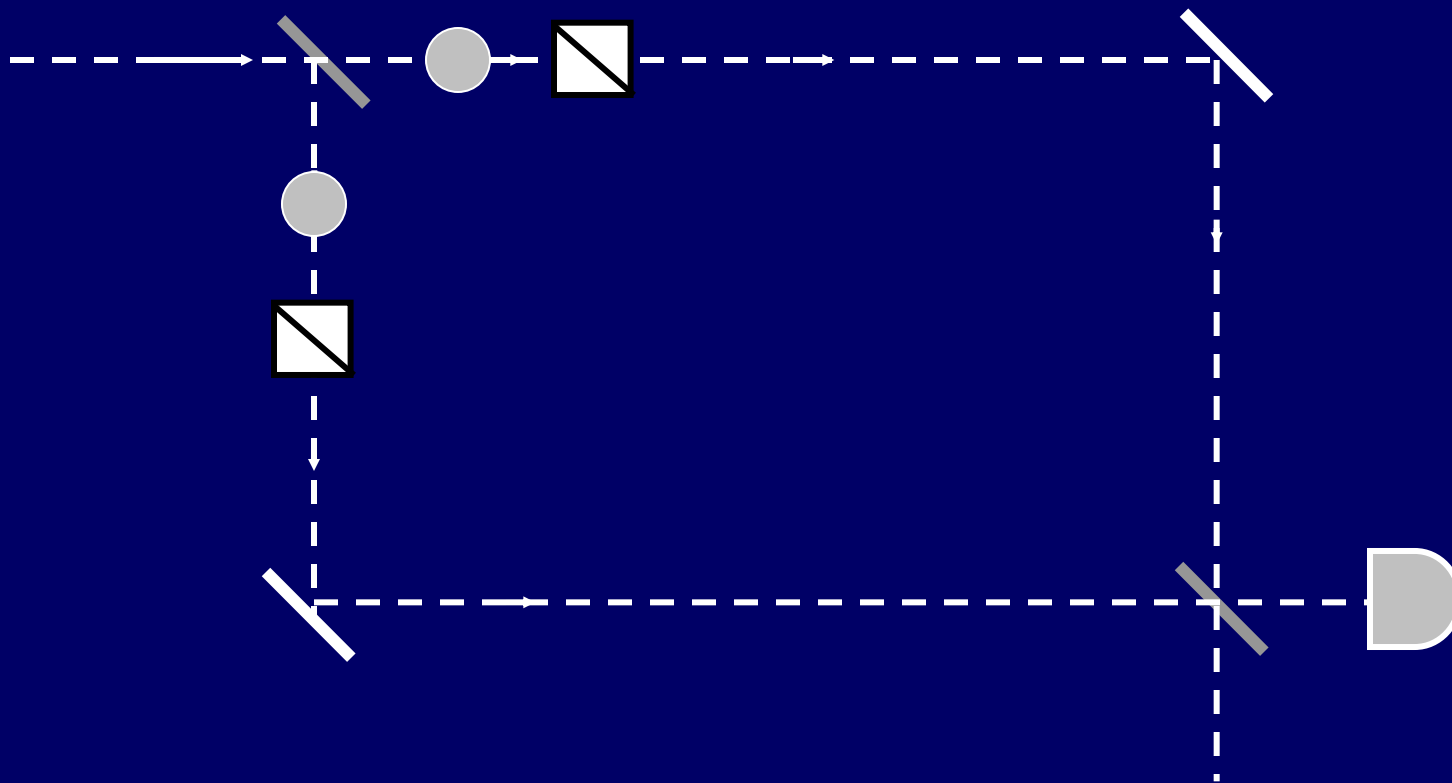
$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \text{Interferenzterm} &= 2 \psi_{li}^{\text{signal}}(\mathbf{x}_{\text{signal}}, t) \cdot \psi_{re}^{\text{signal}}(\mathbf{x}_{\text{signal}}, t) \\ &\cdot \psi_{li}^{\text{idler}}(\mathbf{x}_{\text{idler}}, t) \cdot \psi_{re}^{\text{idler}}(\mathbf{x}_{\text{idler}}, t)\end{aligned}$$

# Interferometer mit Photonen-„Spaltung“

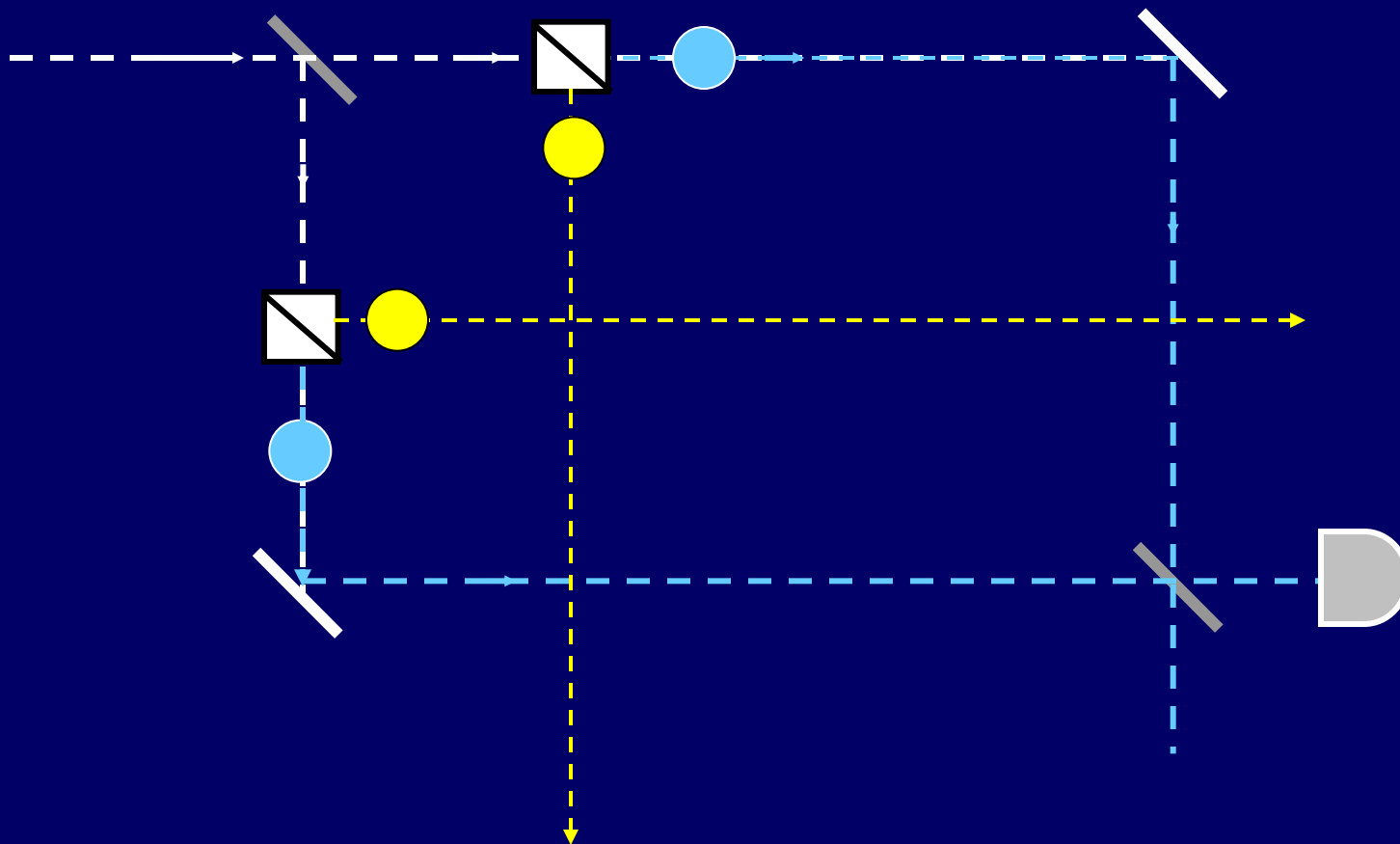


# Interferometer mit Photonen-"Spaltung"

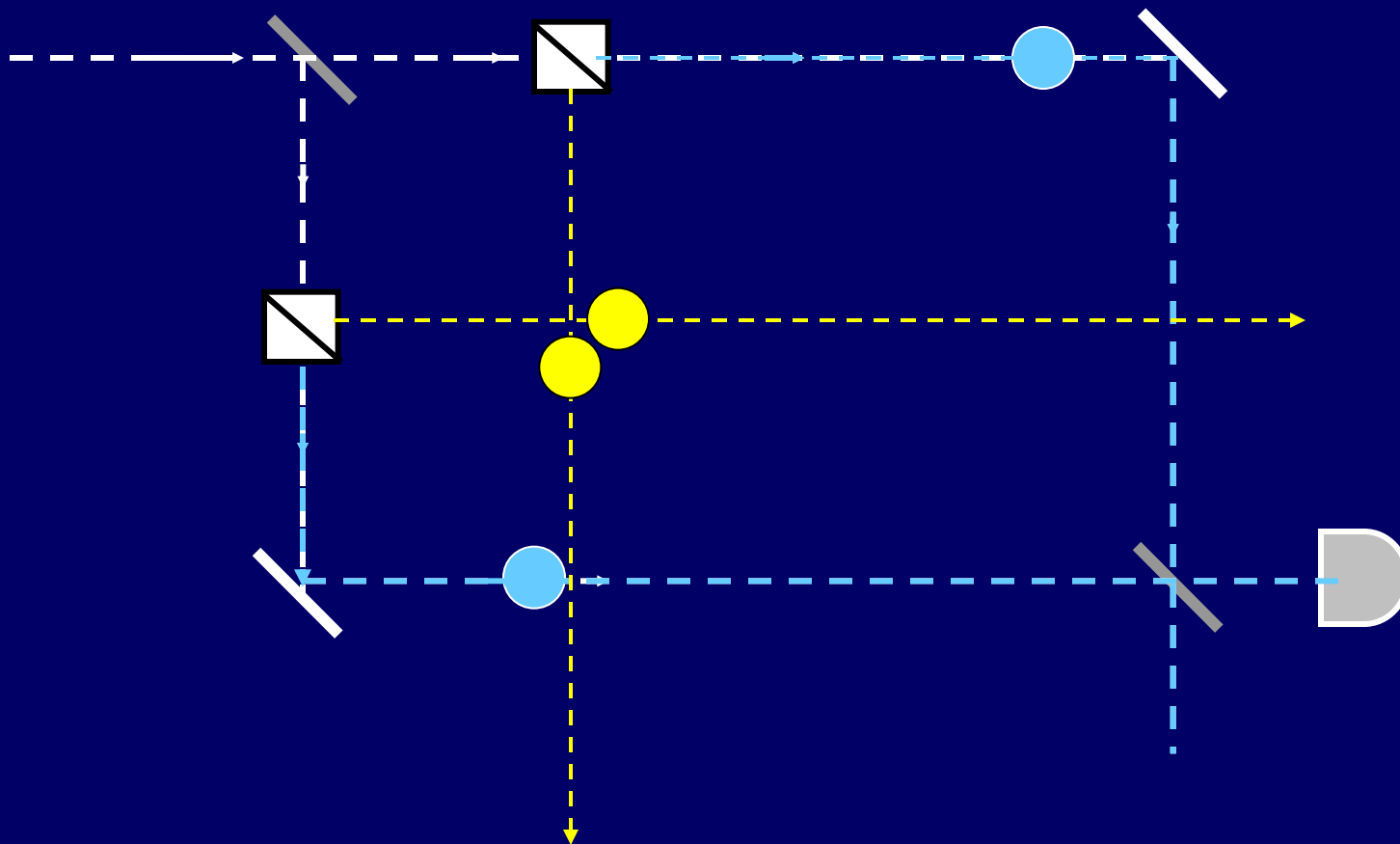




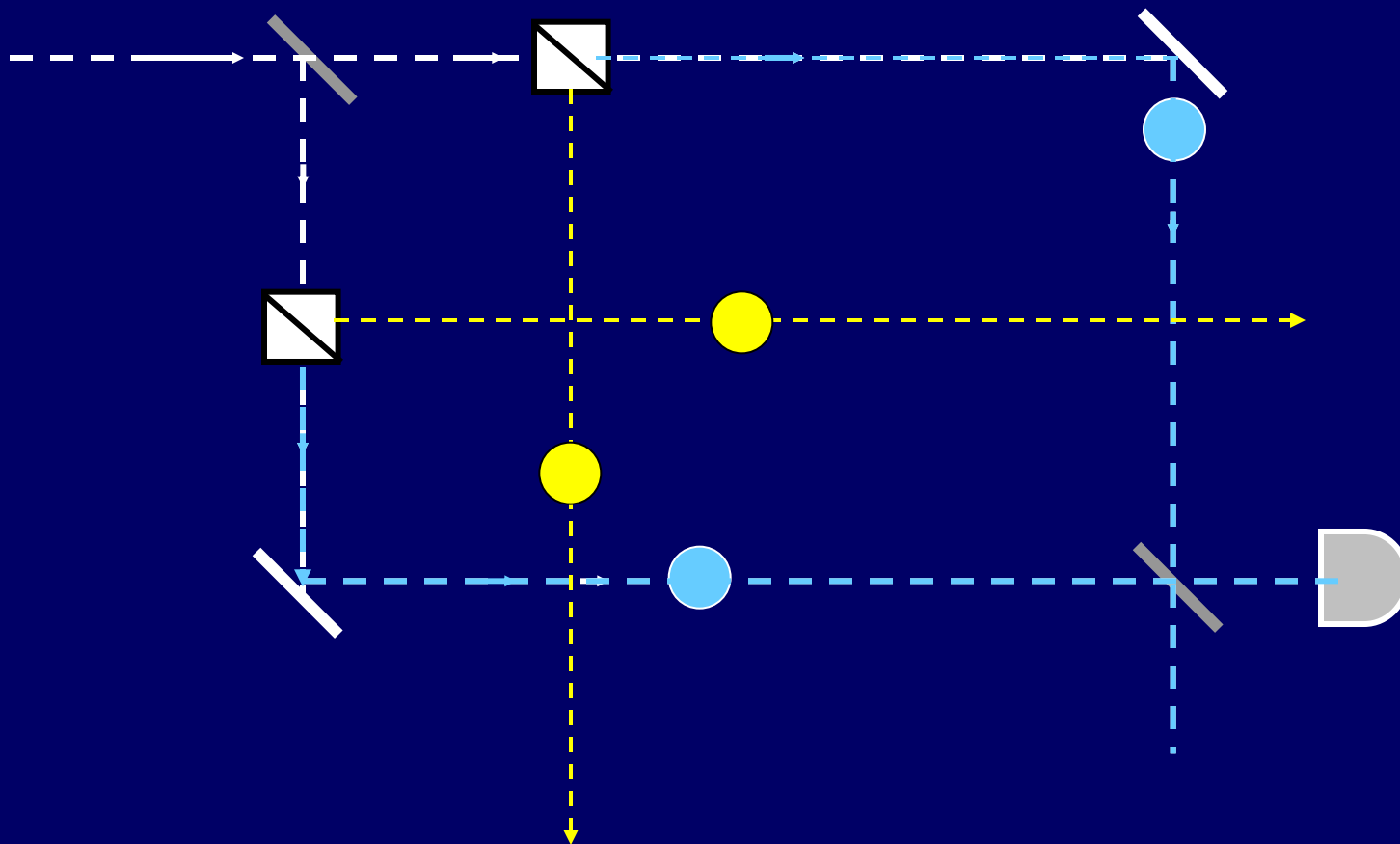
# Interferometer mit Photonen-„Spaltung“



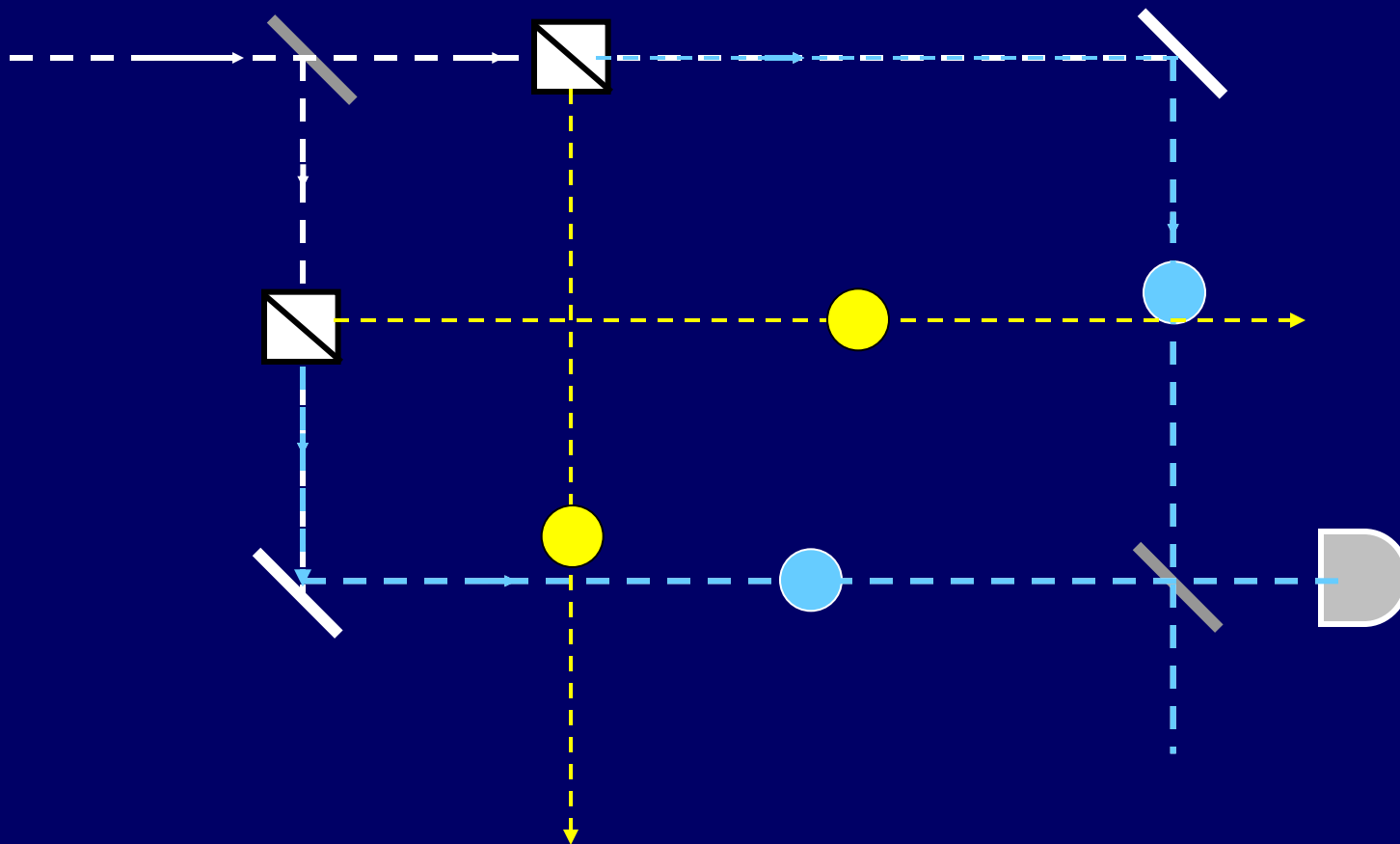
# Interferometer mit Photonen-„Spaltung“



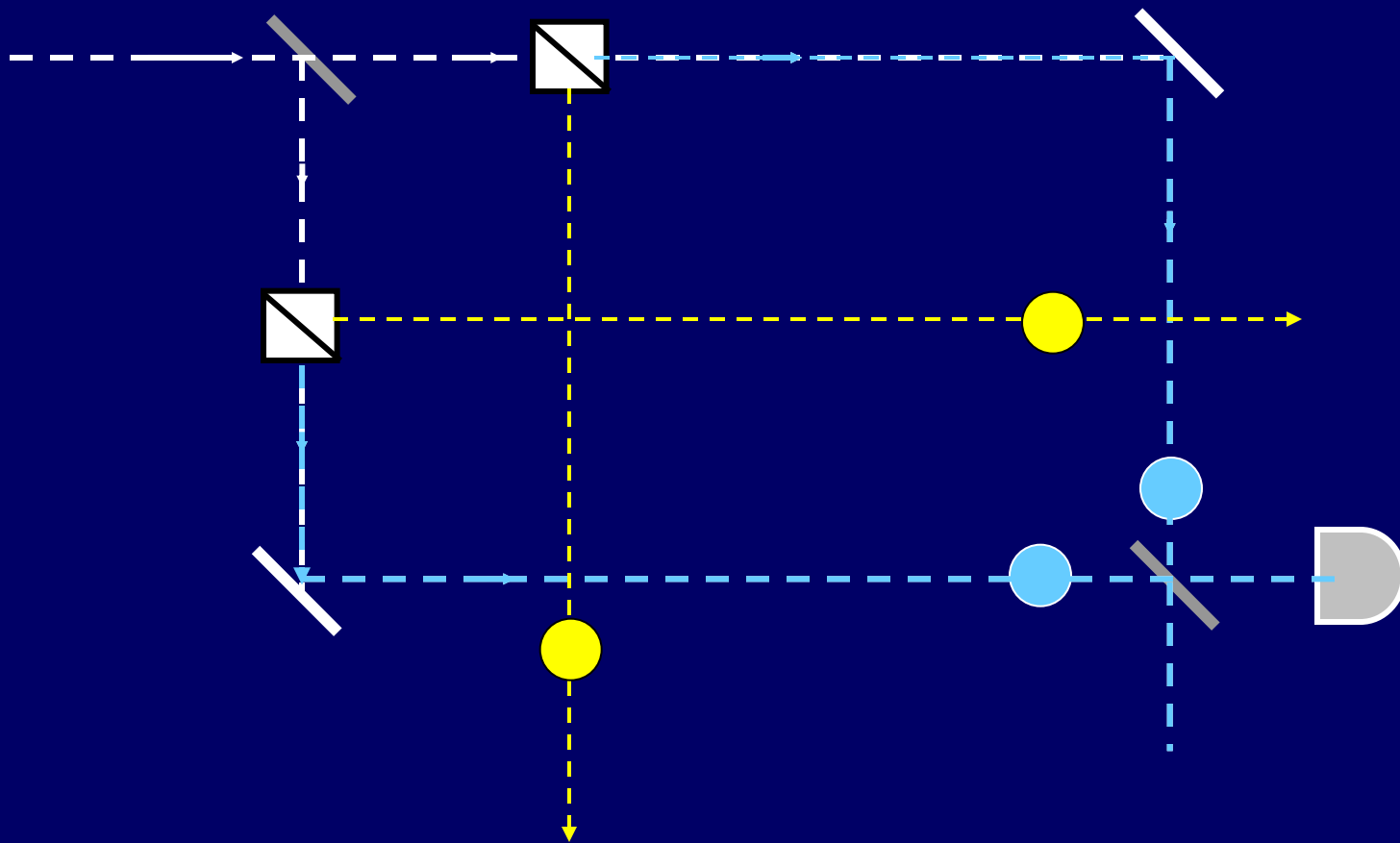
# Interferometer mit Photonen-„Spaltung“



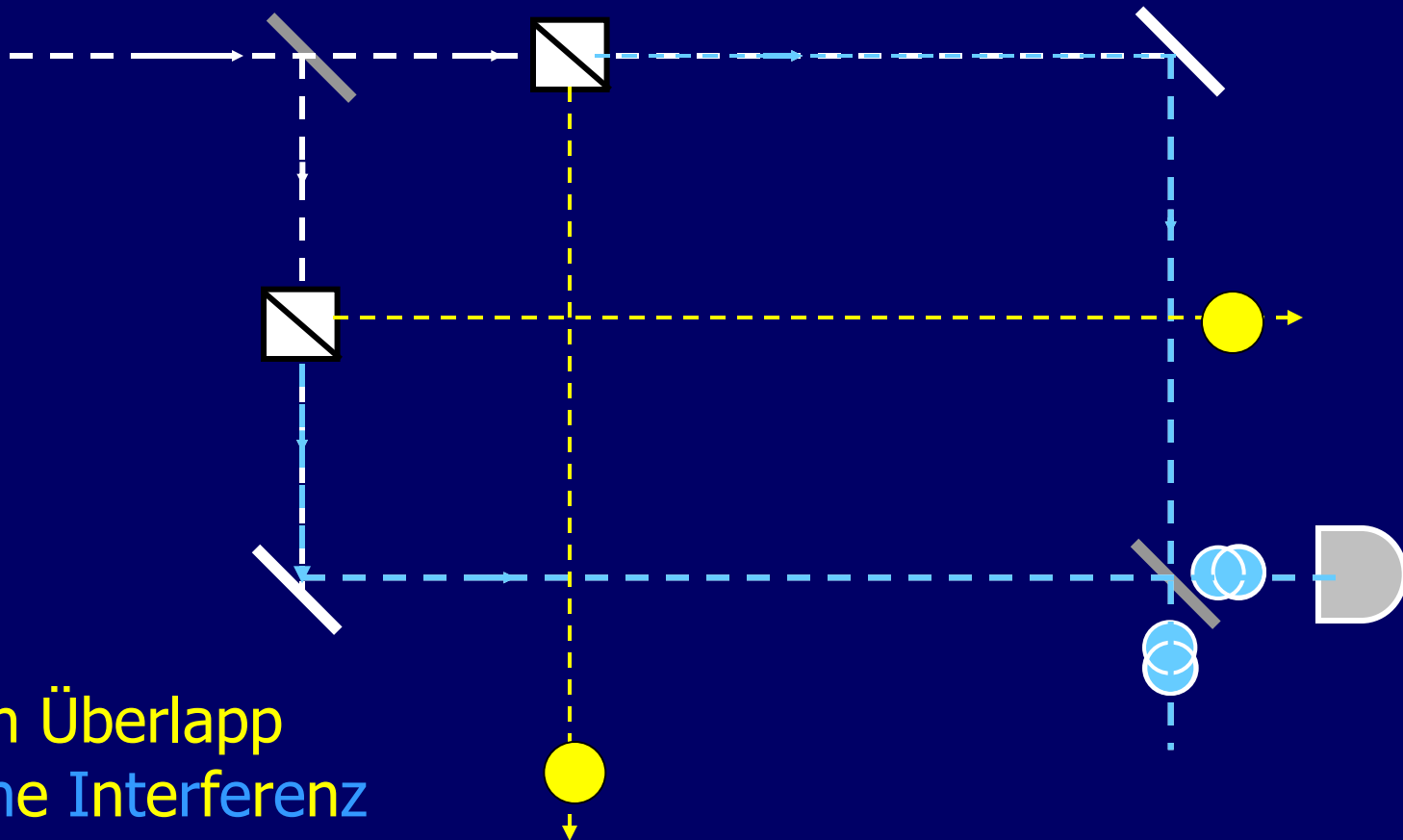
# Interferometer mit Photonen-"Spaltung"



# Interferometer mit Photonen-"Spaltung"

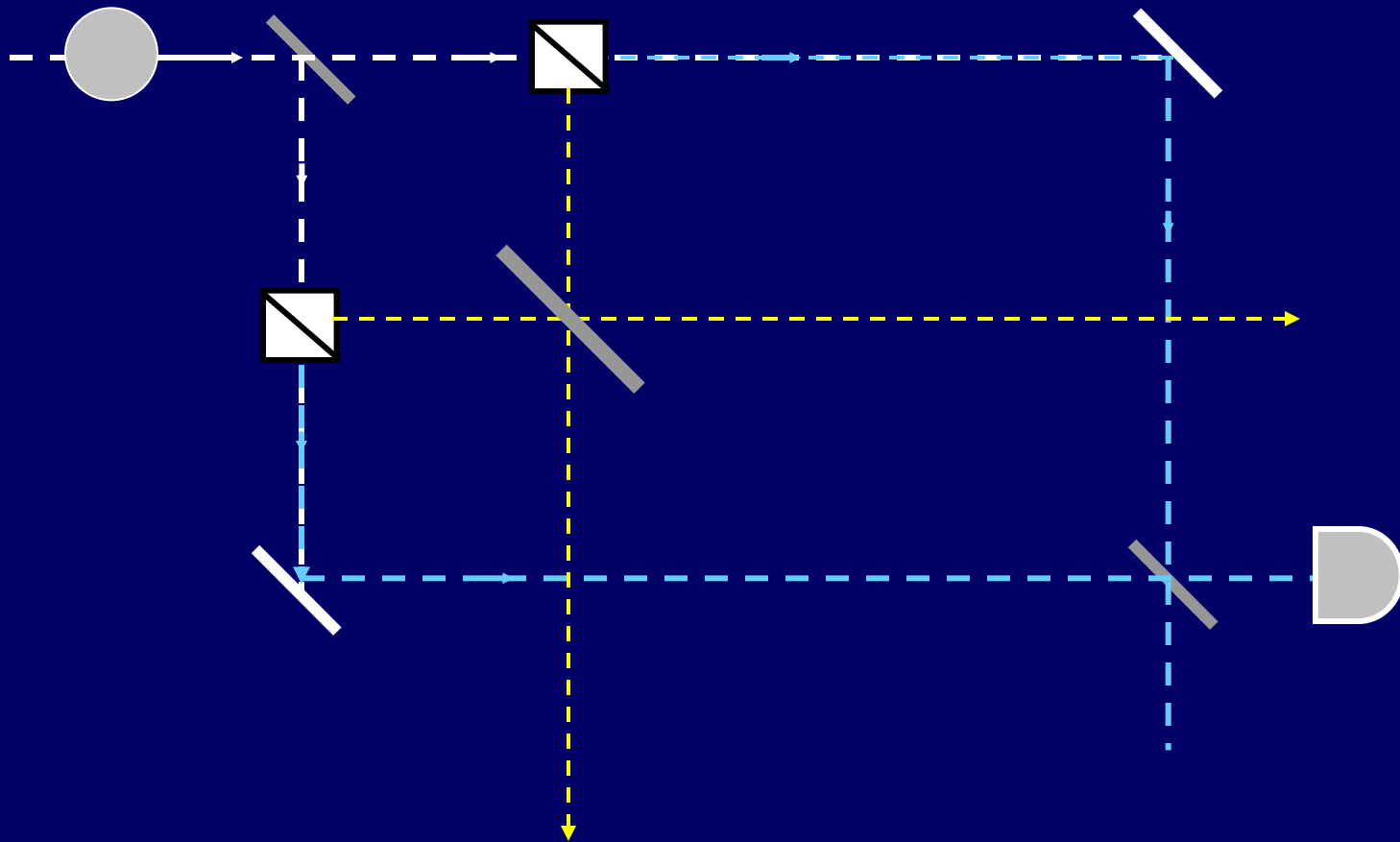


$$\begin{aligned}
 \text{Interferenzterm} = & 2 \psi_{li}^{\text{signal}}(x_{\text{signal}}, t) \cdot \psi_{re}^{\text{signal}}(x_{\text{signal}}, t) \\
 & \cdot \psi_{li}^{\text{idler}}(x_{\text{idler}}, t) \cdot \psi_{re}^{\text{idler}}(x_{\text{idler}}, t)
 \end{aligned}$$

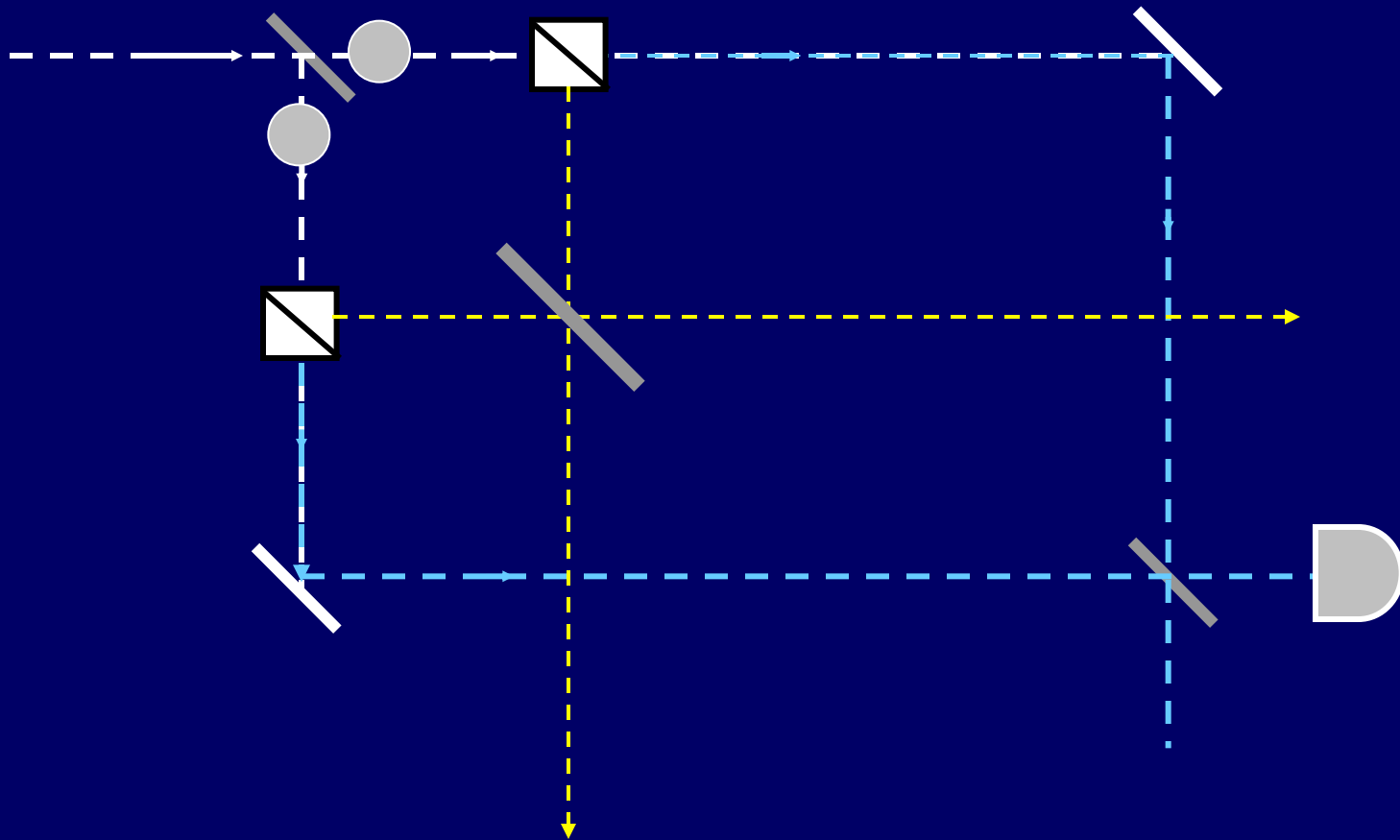


Kein Überlapp  
keine Interferenz

# Quantenradierer

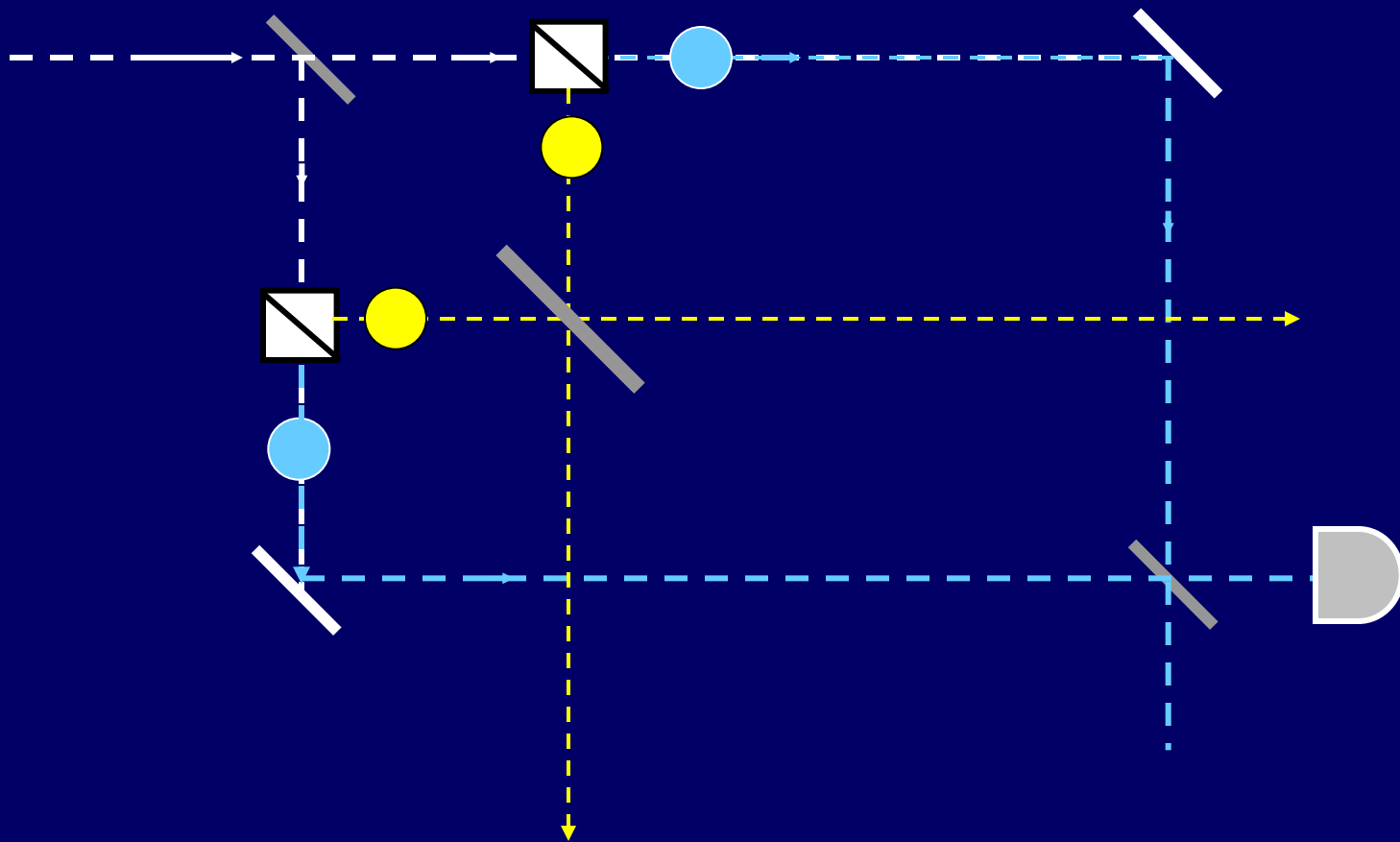


# Quantenradierer

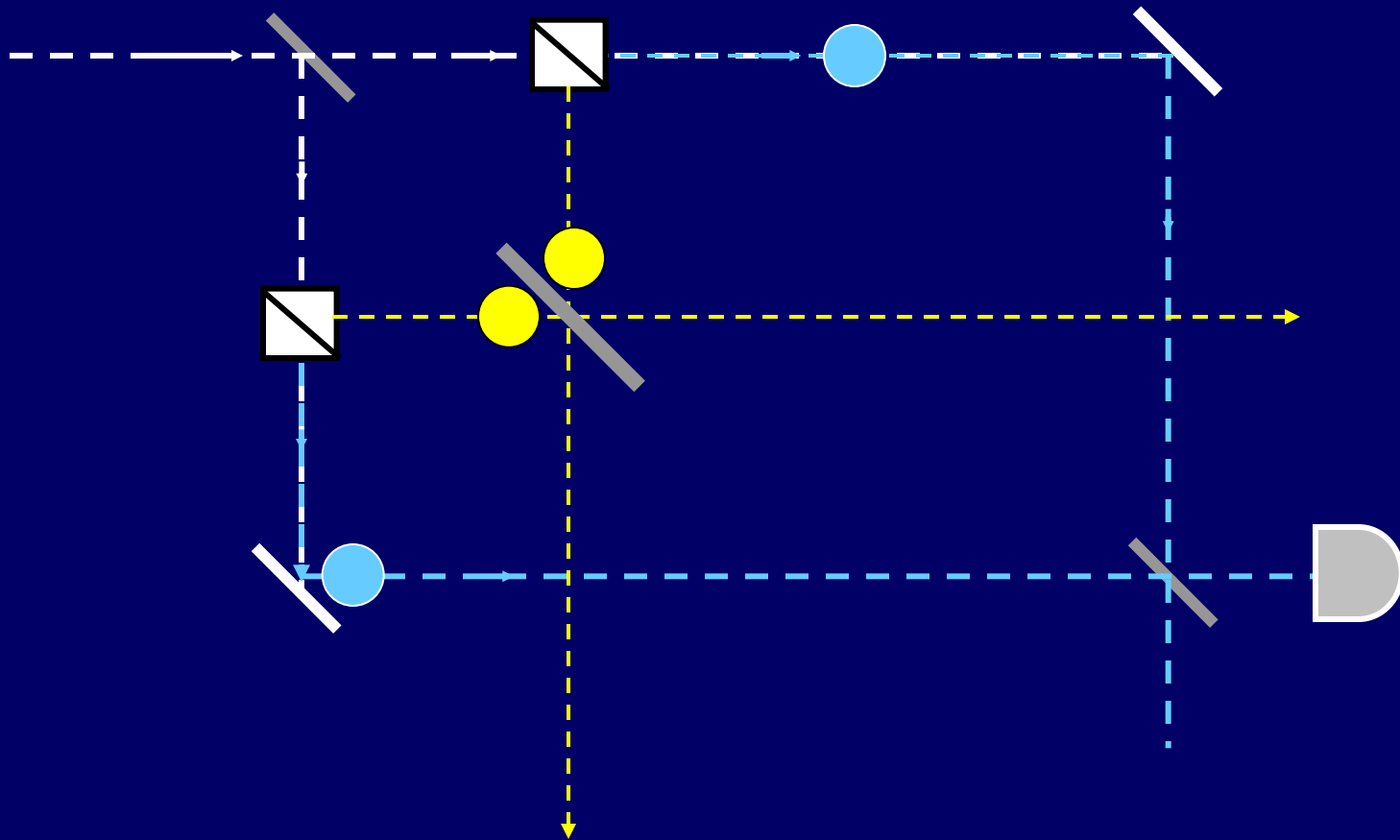




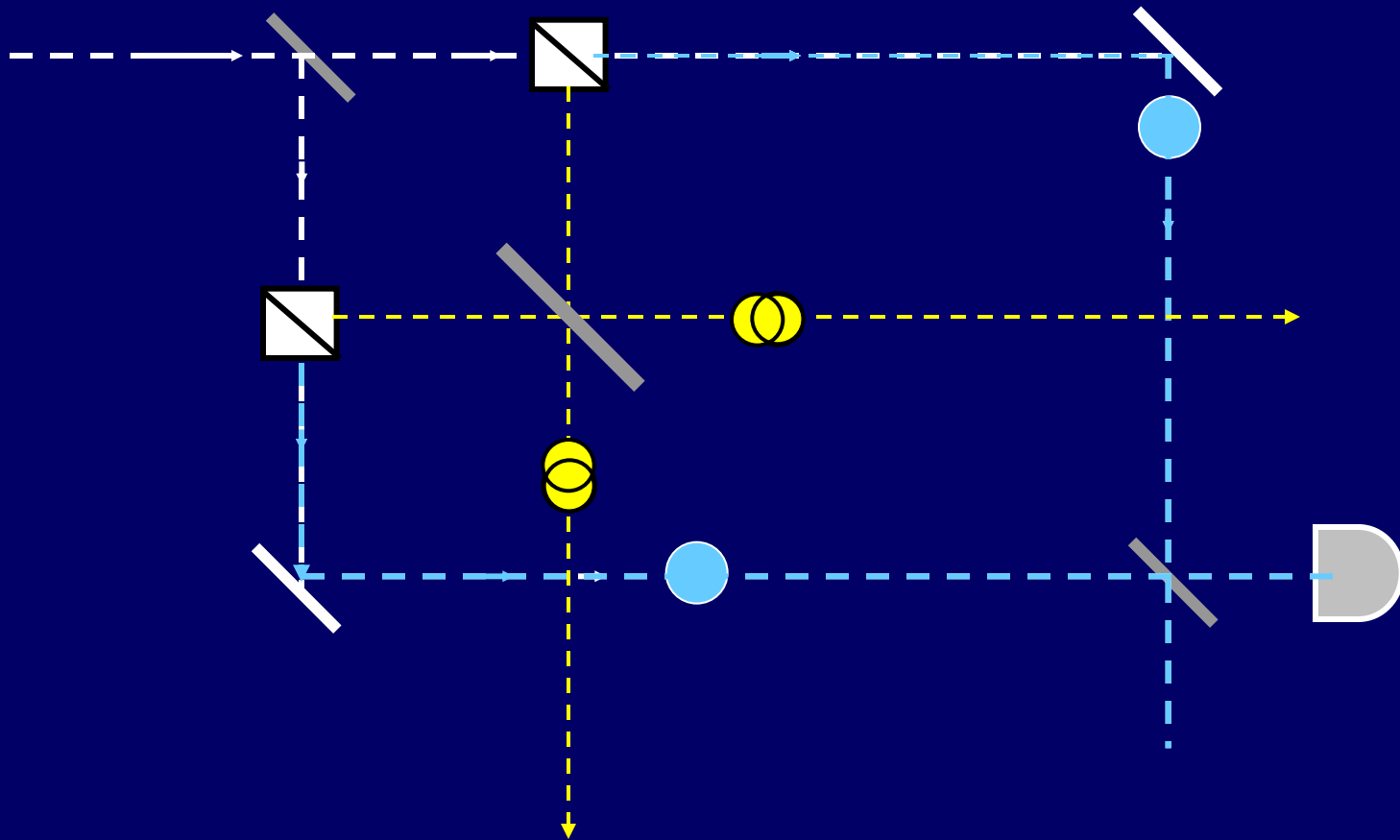
# Quantenradierer



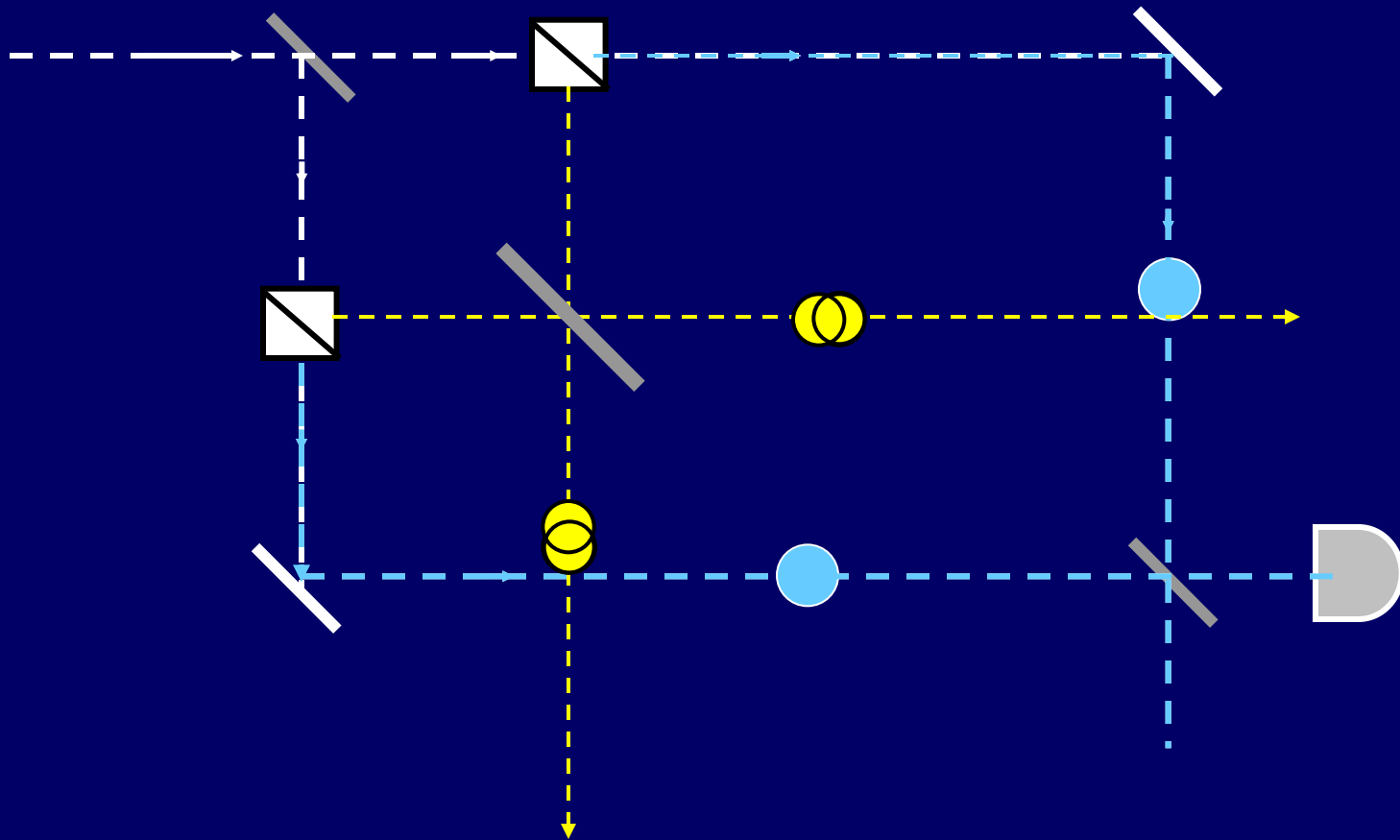
# Quantenradierer



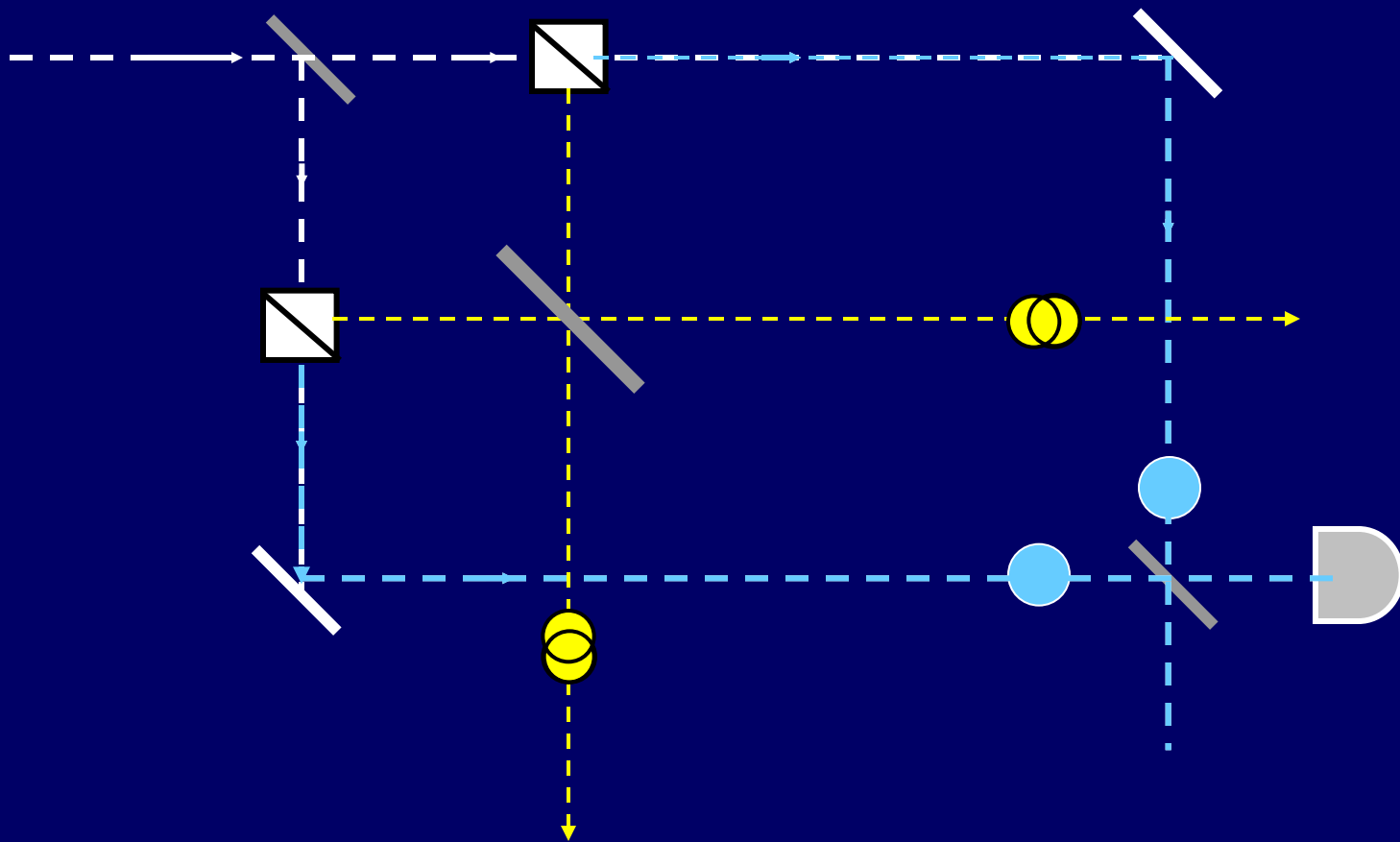
# Quantenradierer



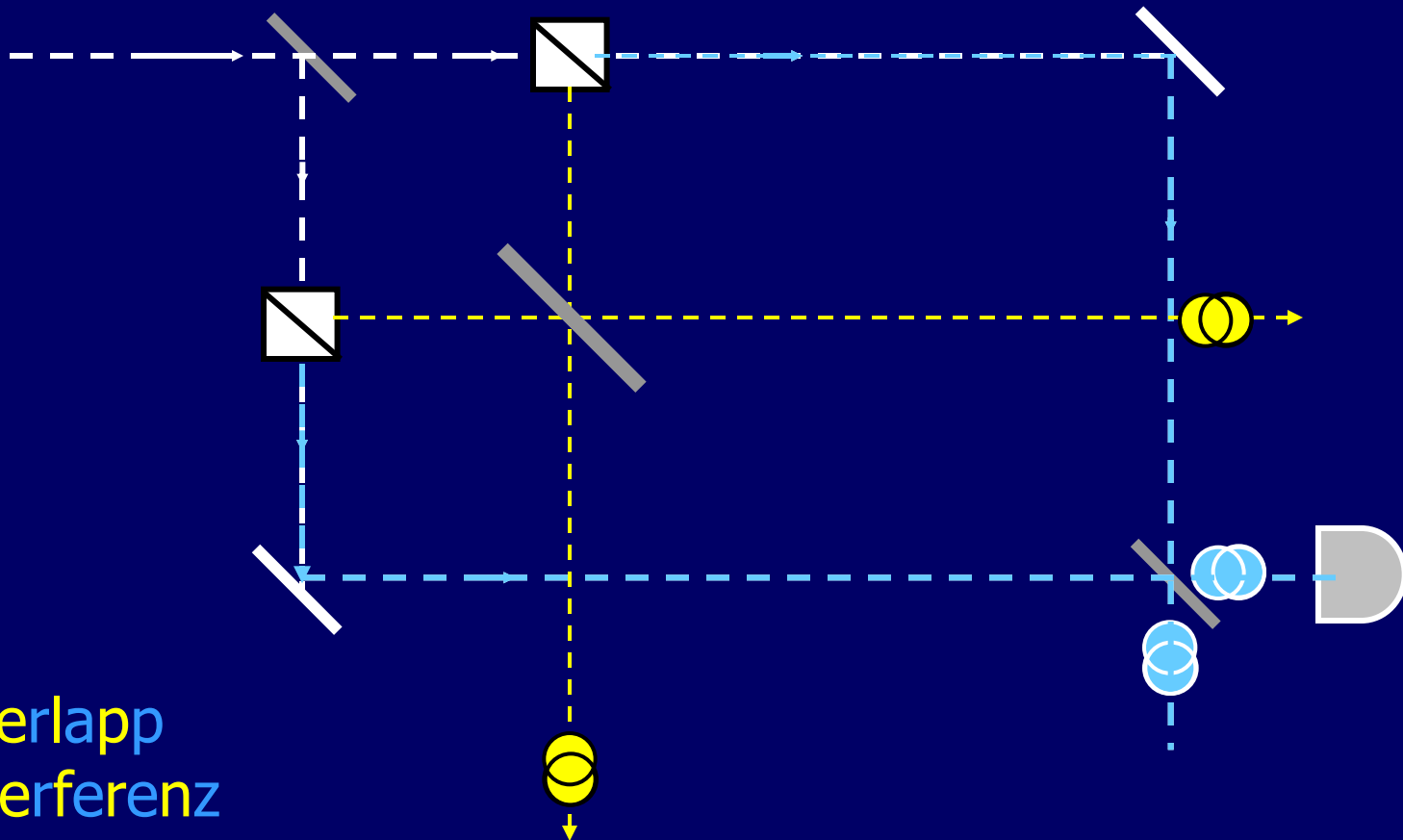
# Quantenradierer



# Quantenradierer



$$\text{Interferenzterm} = 2 \psi_{li}^{signal}(x_{signal}, t) \cdot \psi_{re}^{signal}(x_{signal}, t) \\ \cdot \psi_{li}^{idler}(x_{idler}, t) \cdot \psi_{re}^{idler}(x_{idler}, t)$$

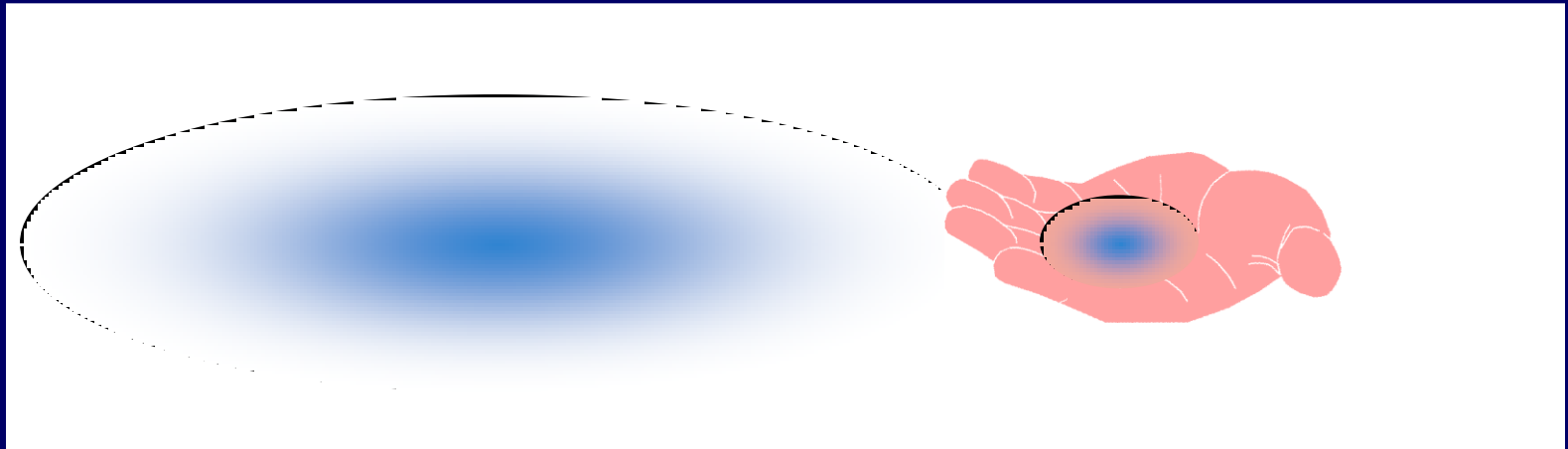


Überlapp  
Interferenz

# Das Stoff/Substanzmodell

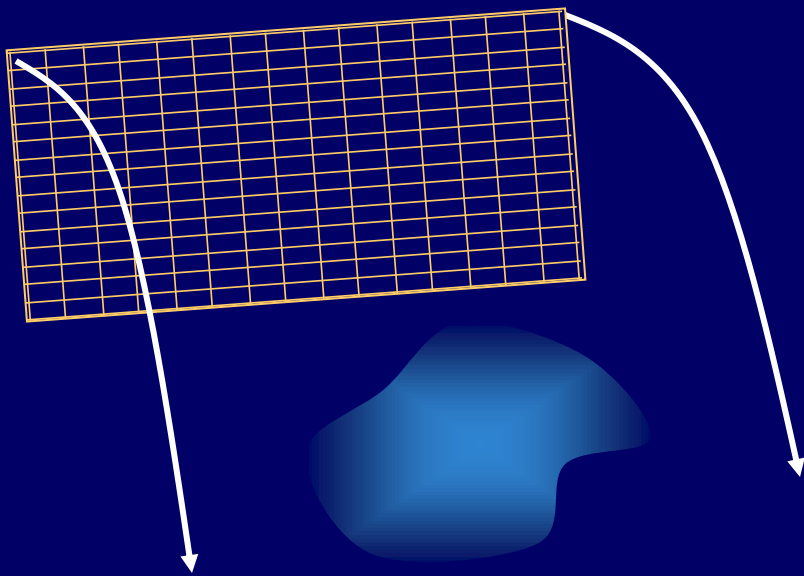
## 1. Eigenart der Substanz:

Wenn man etwas herausholt,  
dann immer nur Vielfache von  $m_e$  bzw.  $q_e$

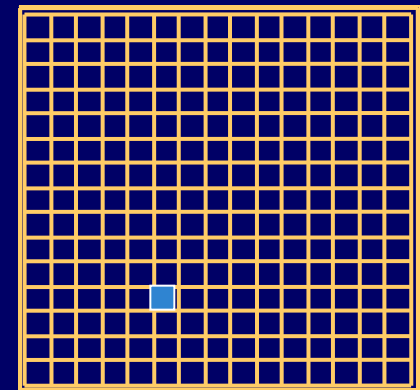


# Das Stoff/Substanzmodell

## 2. Eigenart der Substanz: „Fussabstreifer“



Elementarportion  
lässt sich nicht teilen.

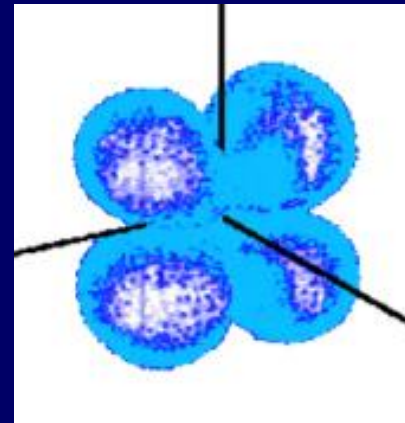
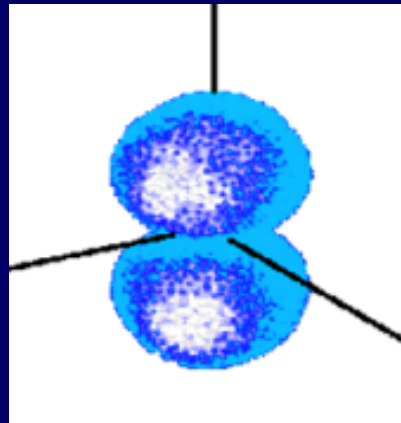
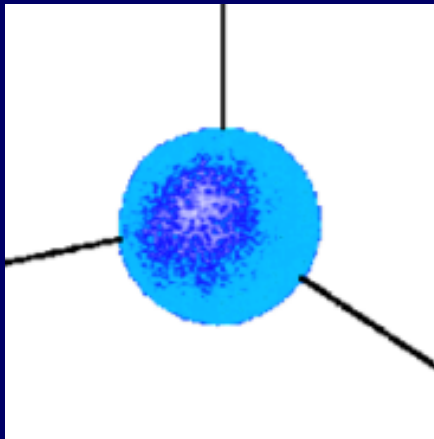




# Das Stoff/Substanzmodell

## 3. Eigenart der Substanz:

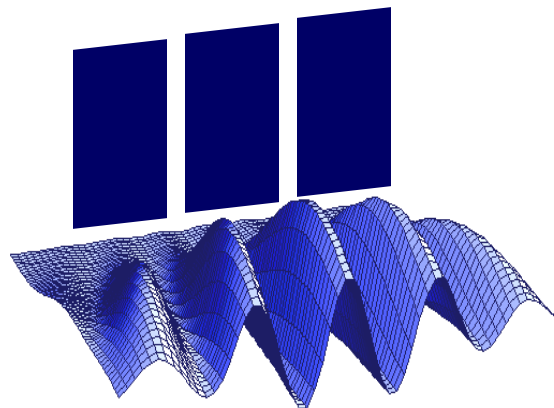
Manche Verformungen werden von den Atomen „längere Zeit“ beibehalten.



# Das Stoff/Substanzmodell

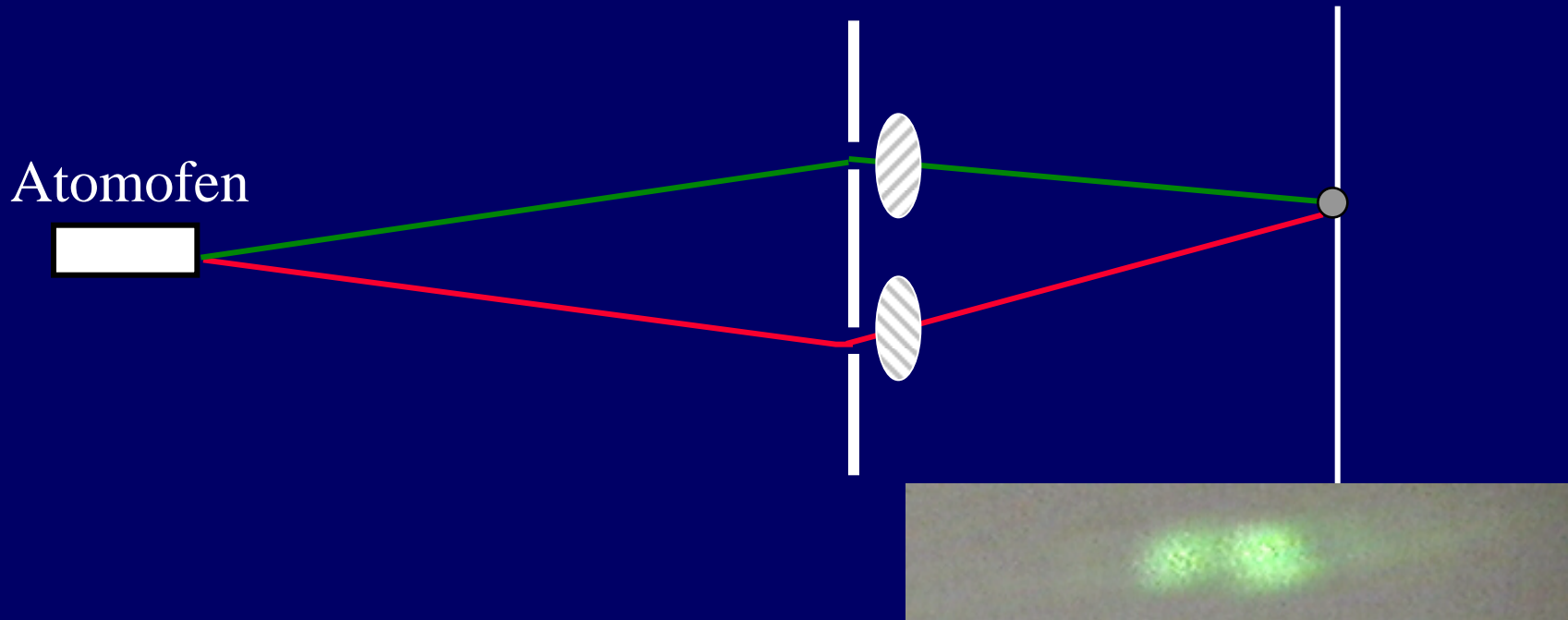
## 4. Eigenart der Substanz:

Kann starke Dichteschwankungen (Zusammenballungen) bekommen, wenn mehrere Möglichkeiten erlaubt sind.



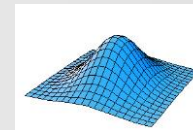
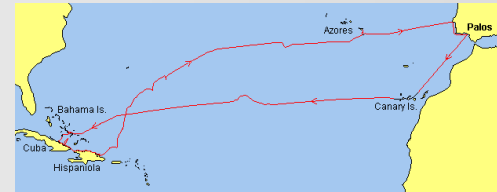
# Das Stoff/Substanzmodell

Der Doppelspalt mit Polarisatoren kann damit nicht erklärt werden.



# Unterrichtshilfen für die Komplementarität

1. Die Blume (Verdeutlichung der Situation)
2. Das Experiment (bezahlbar und extrapolierbar)
3. Modellbildung (Reise)
4. Das Substanz-Modell
5. Das verbale Modell

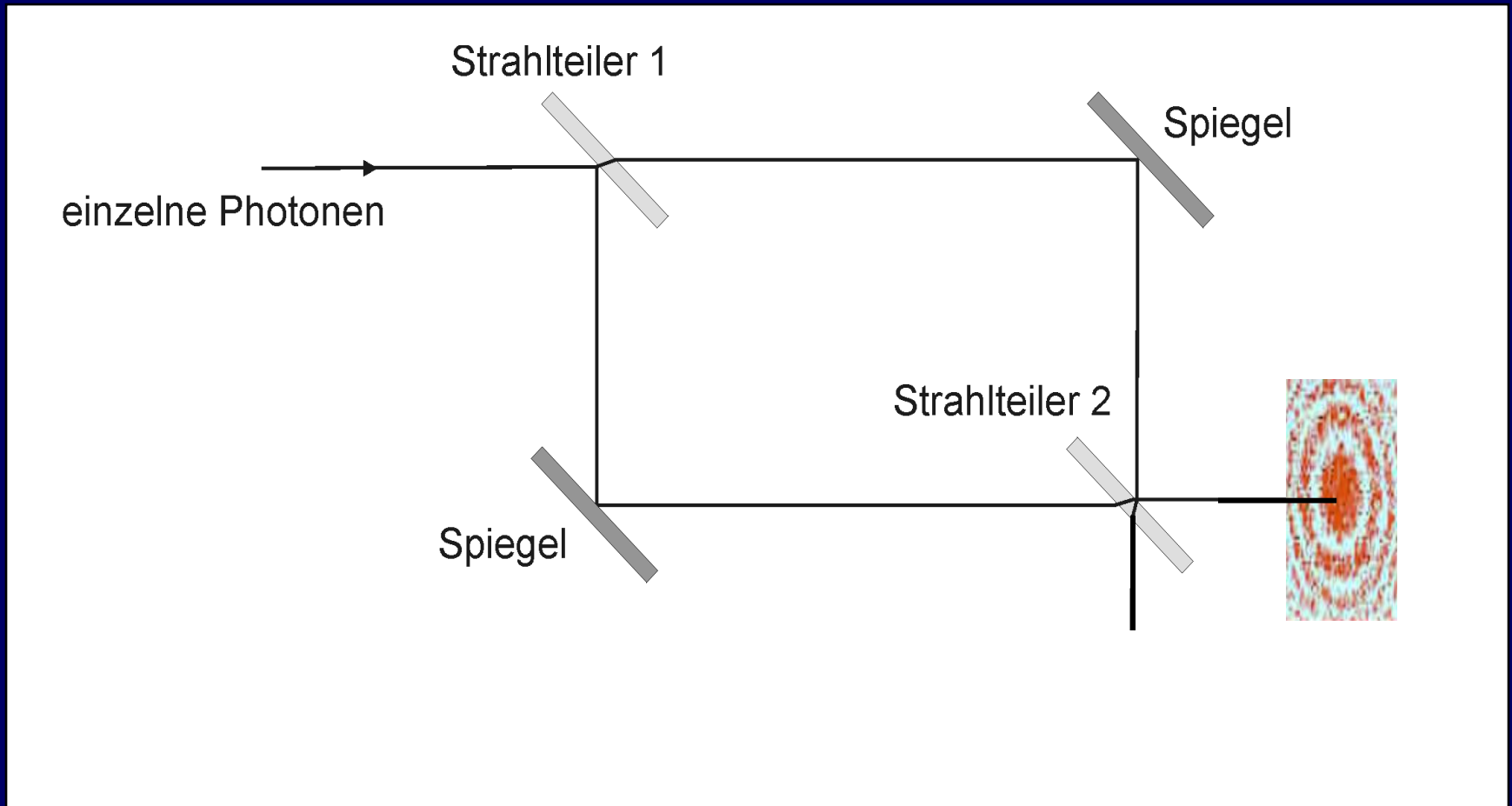


# Entwicklung des verbalen Modells:

Kann man das Auftreten eines Interferenzmusters vorhersagen?

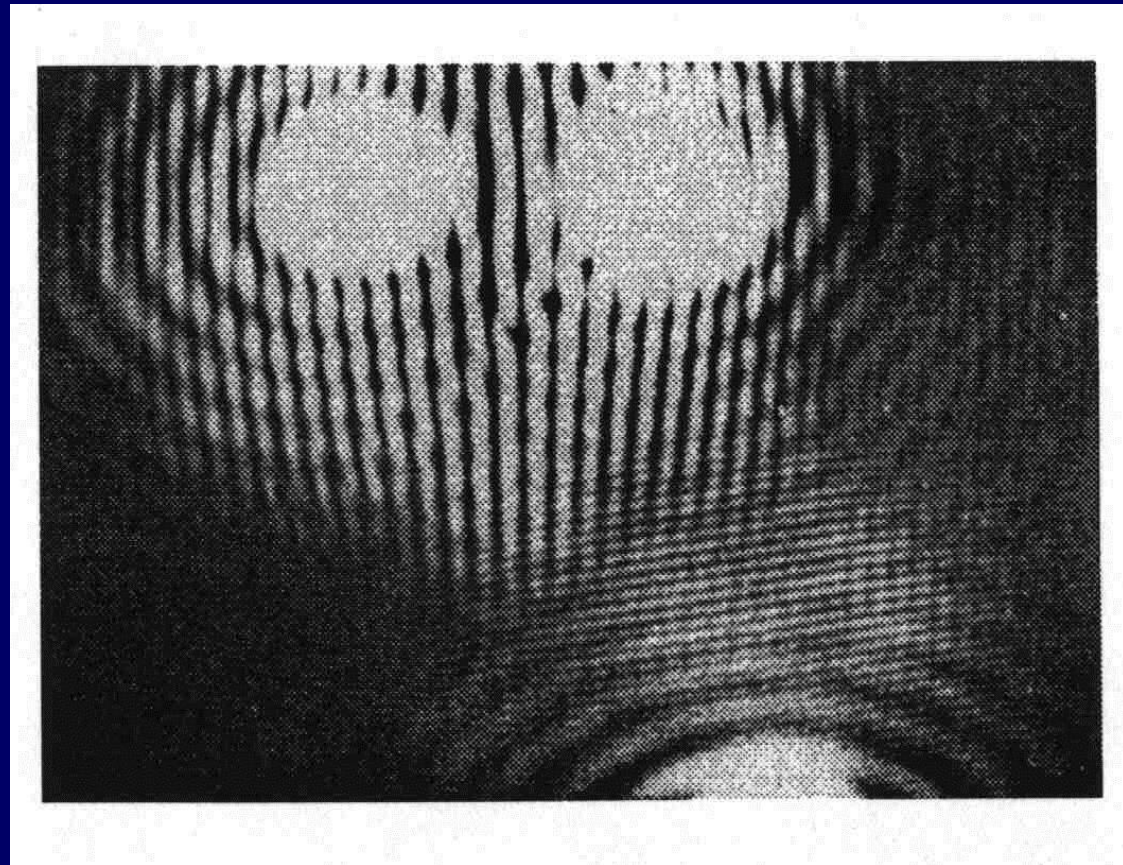
Wann tritt Interferenz immer auf?

# Interferometer mit einzelnen Photonen



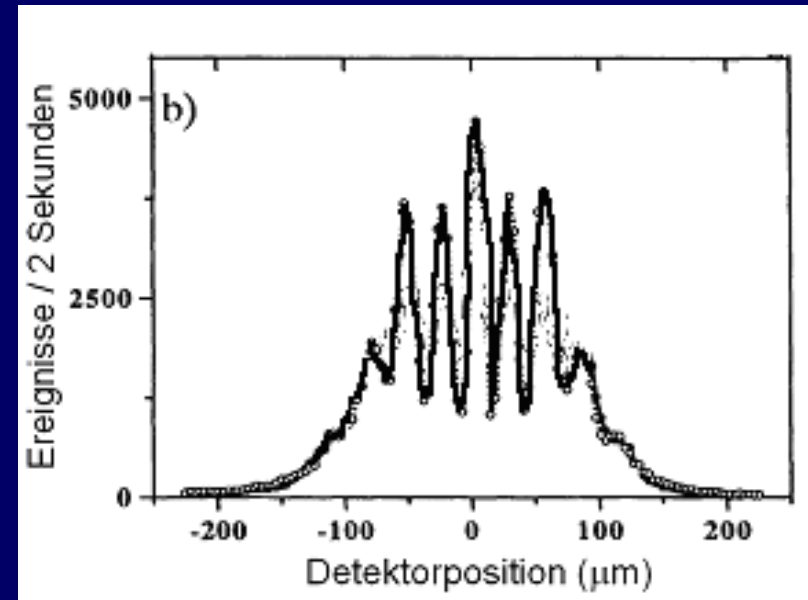
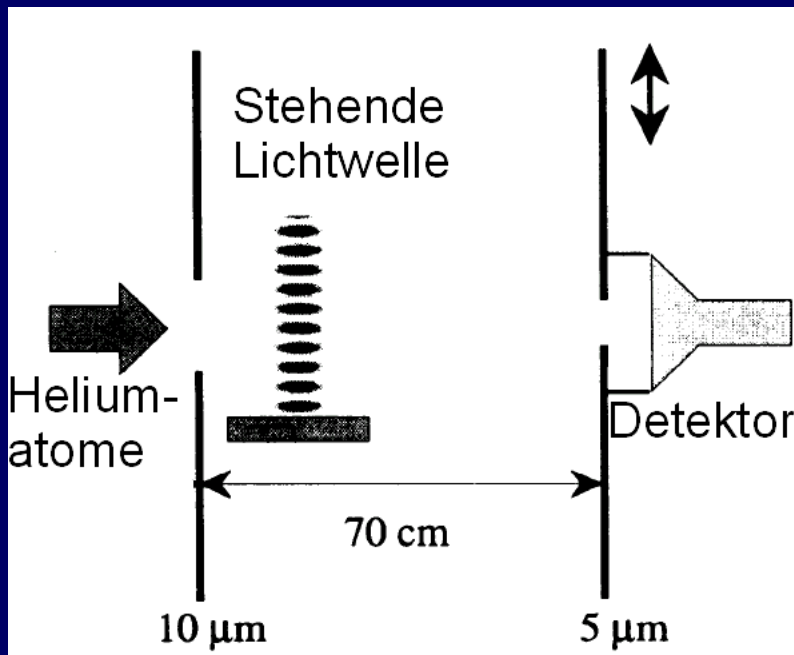
# Streuung von Elektronen an Löchern

Mit Gold zugewachsenes Mikrosieb



# Beugung von Atomen

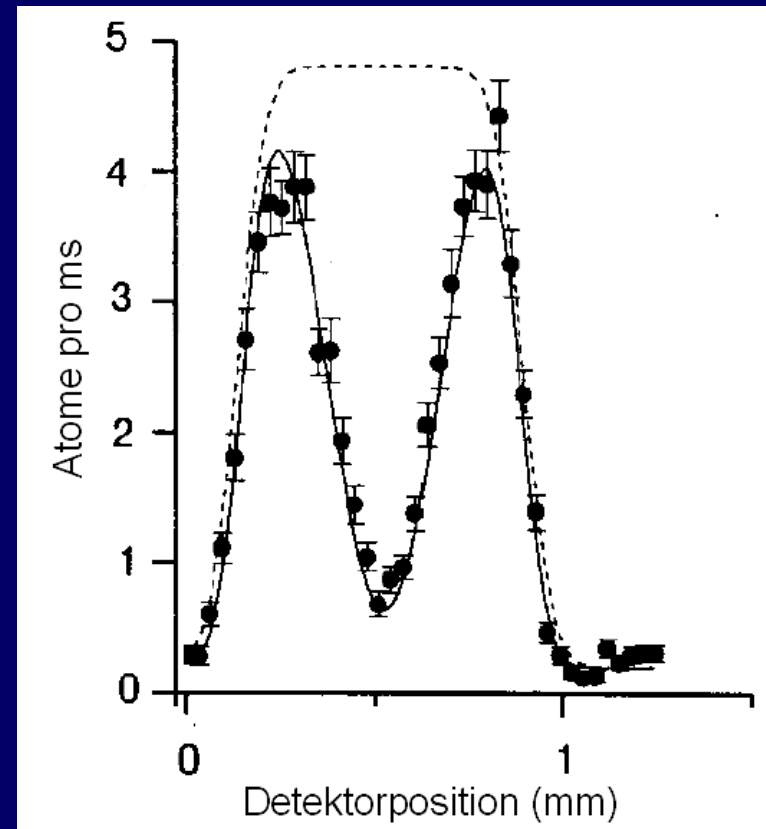
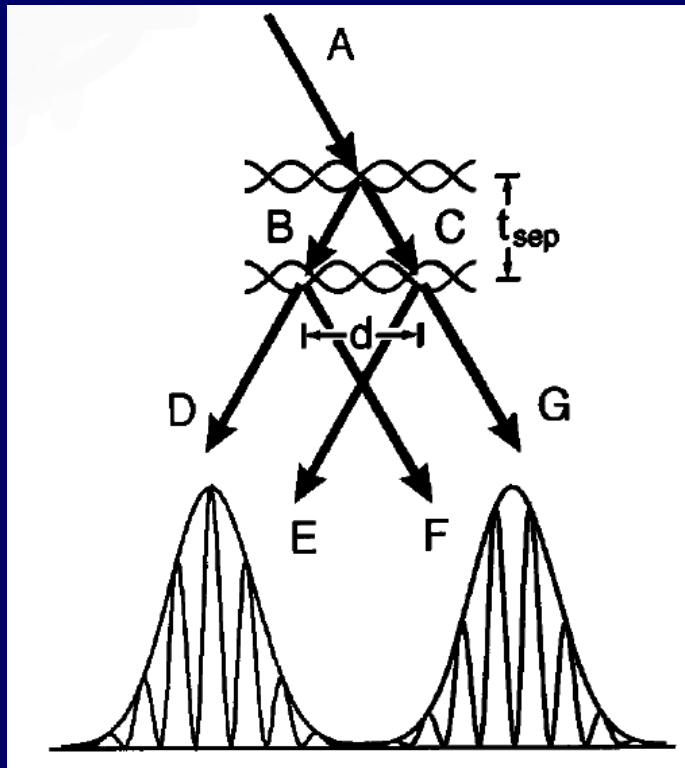
Pfau et al., Univ. Konstanz (1994)



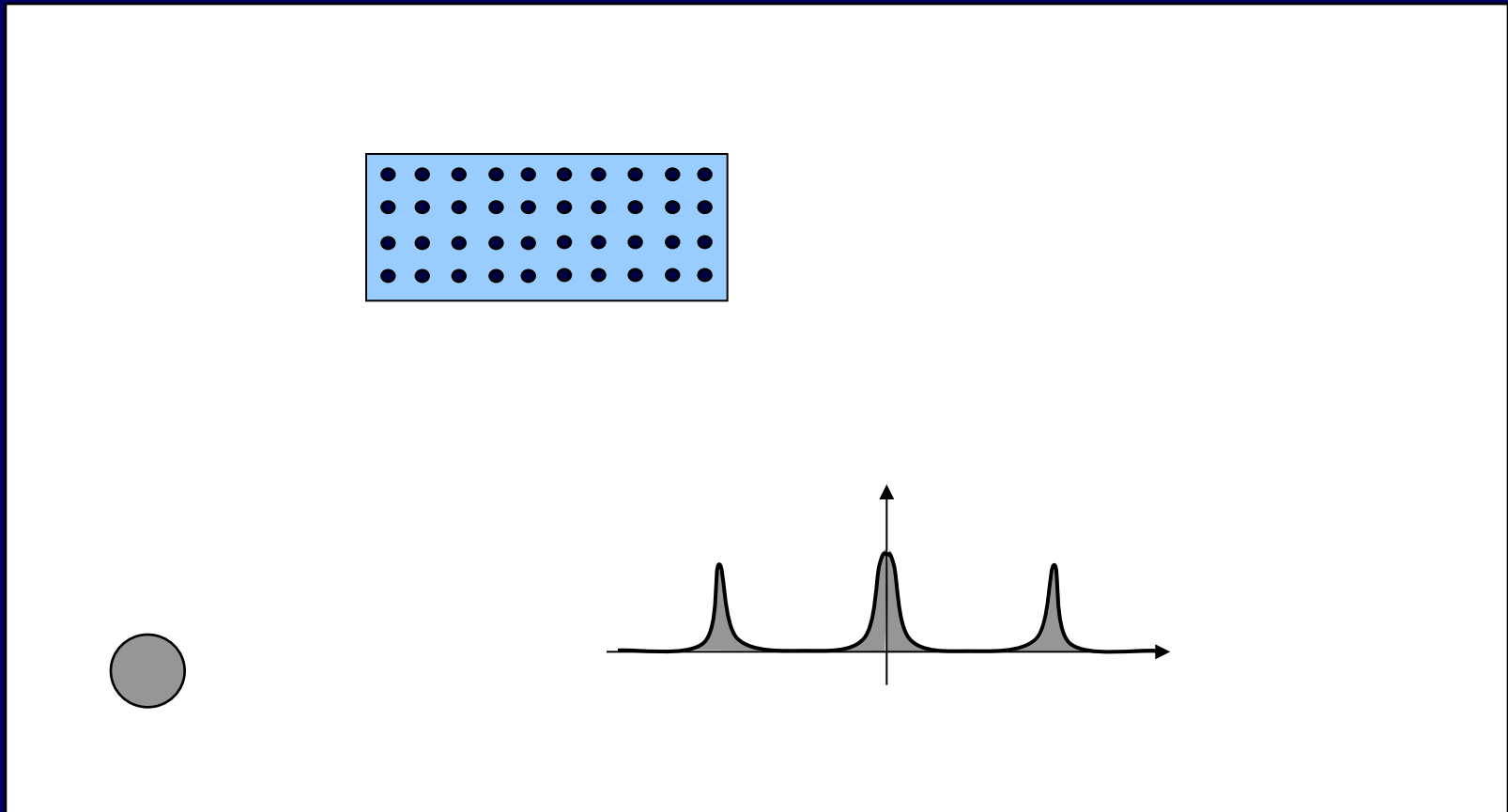


# Atom-Interferometer

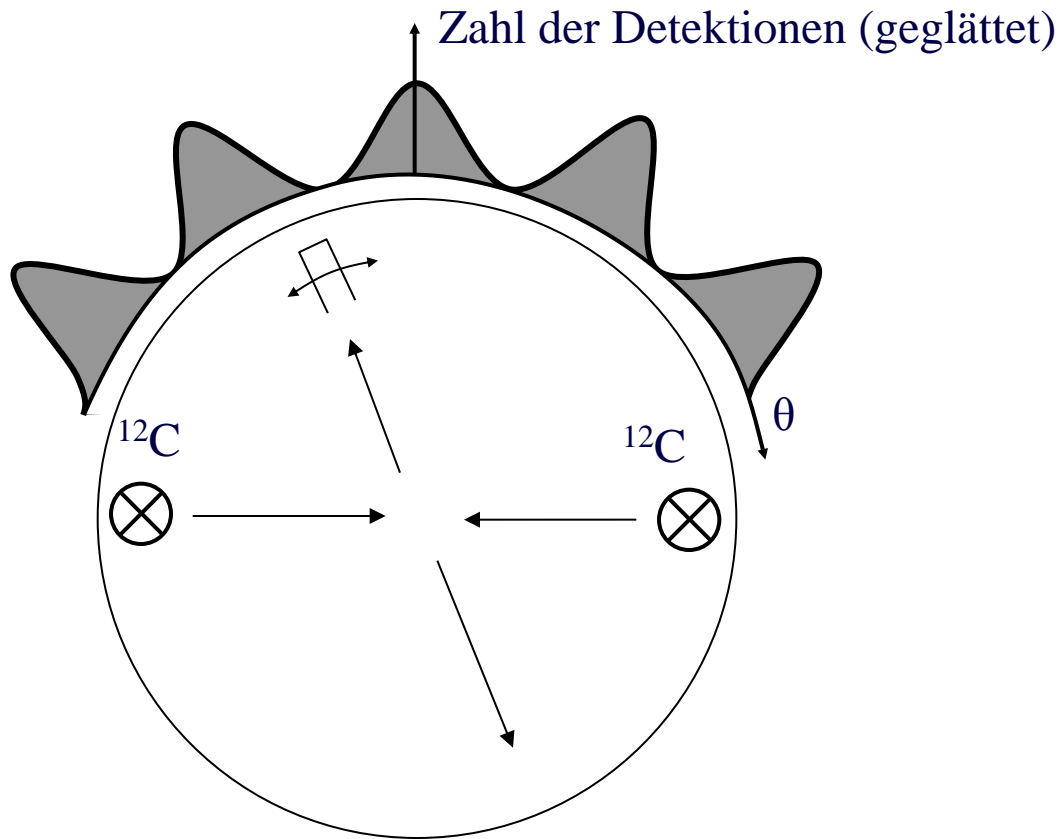
Dürr, Nonn, Rempe (1998)



# Beugung an Kristallen



# Streuversuche



Was ist allen diesen Experimenten  
gemeinsam?

Was ist allen diesen Experimenten  
gemeinsam?

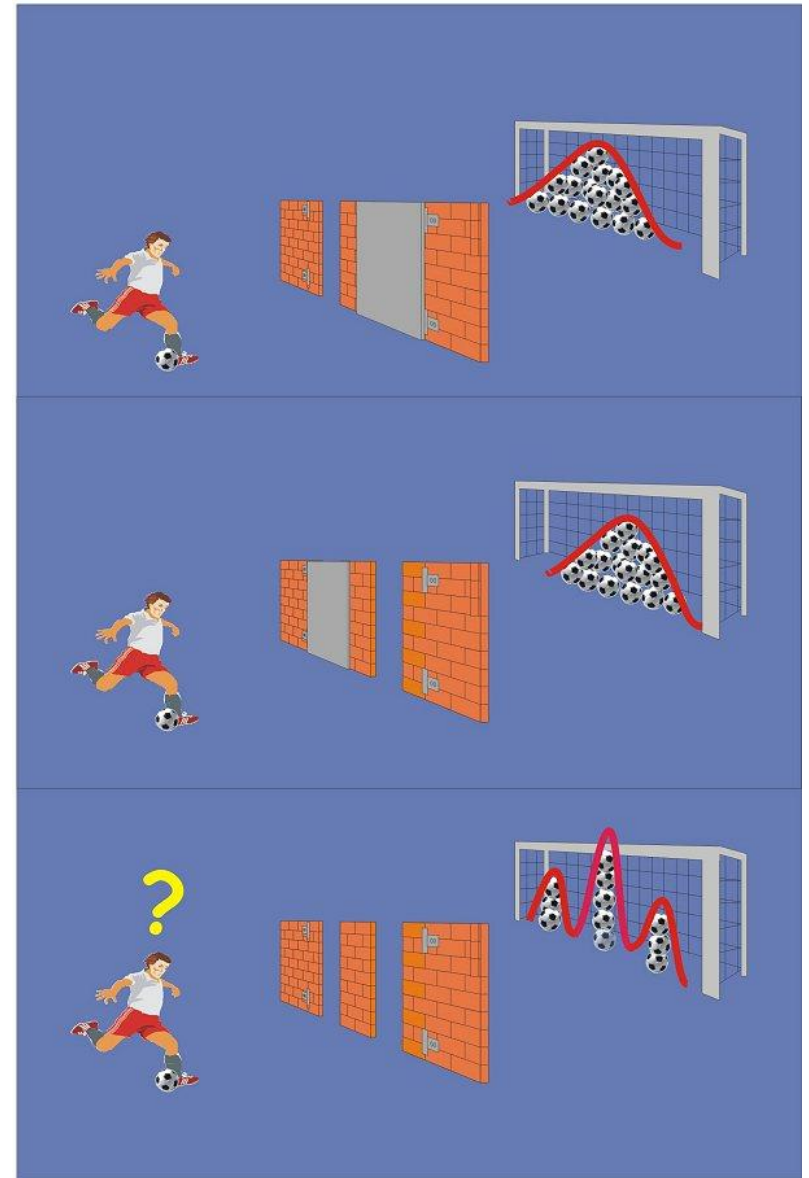
Mehrere klassisch denkbare

Möglichkeiten

Warum „klassisch  
denkbare  
Möglichkeiten“?

Sonst müsste man ja  
Fußballergebnisse  
bekommen.

## Soccer with quantum balls



**Gesetzmäßigkeit:**

**Immer wenn es mehrere  
klassisch denkbare Möglichkeiten  
(für ein bestimmtes Versuchsergebnis) gibt,  
dann ist ein Interferenzmuster möglich.**

# Gesetzmäßigkeit:

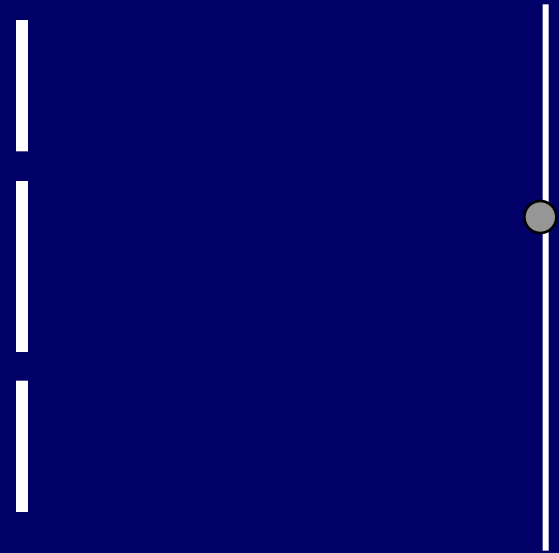
**Immer wenn es mehrere  
klassisch denkbare Möglichkeiten  
(für ein bestimmtes Versuchsergebnis) gibt,  
dann ist ein Interferenzmuster möglich.**

**Verstehen durch Anwenden und üben:**

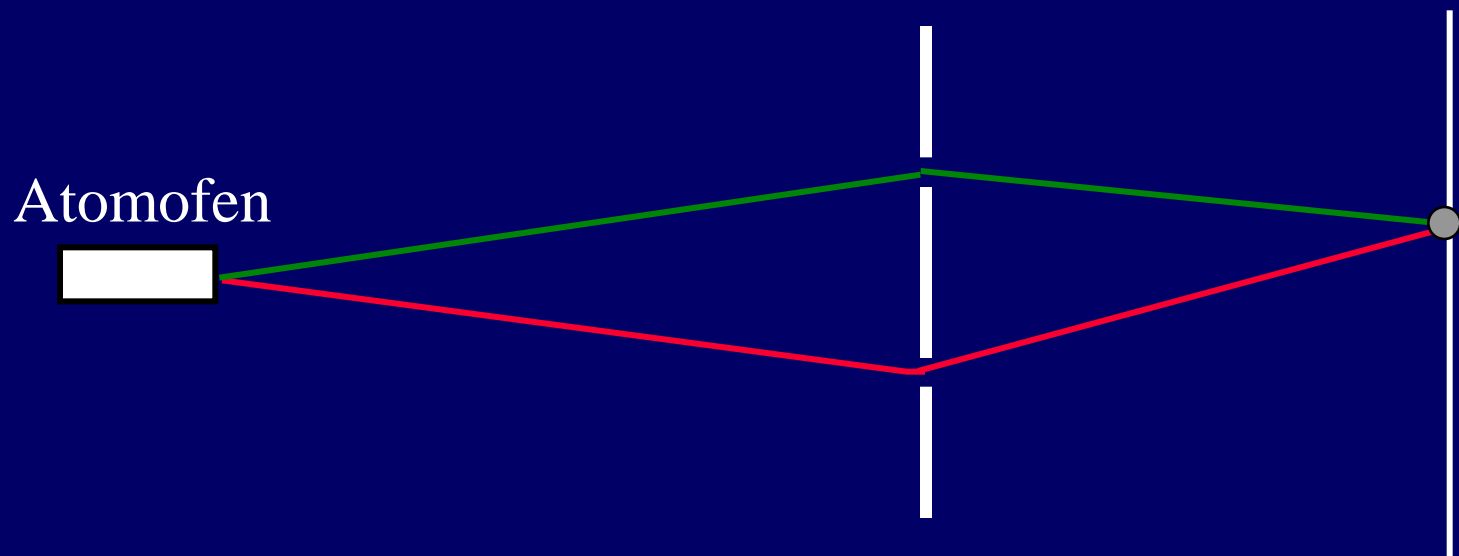


# Doppelspalt

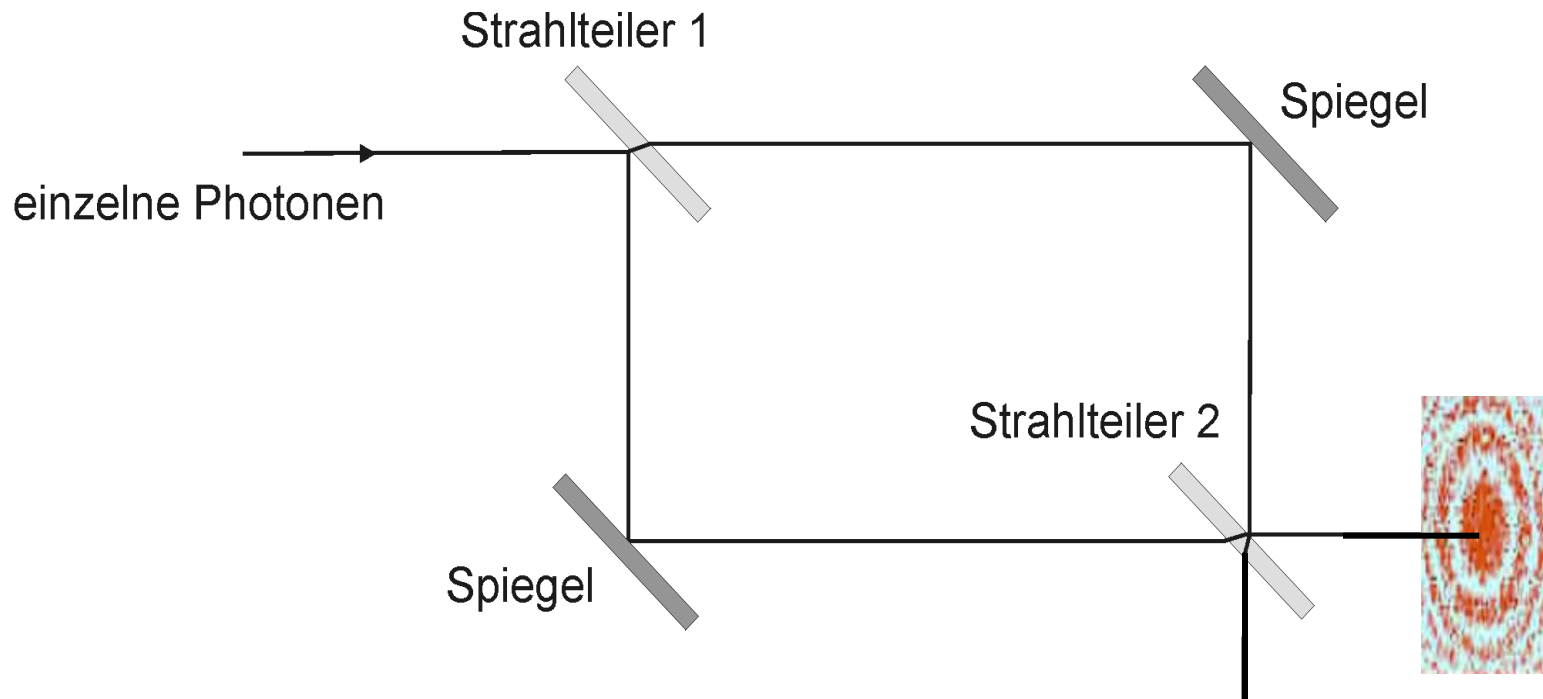
Atomofen



# Doppelspalt

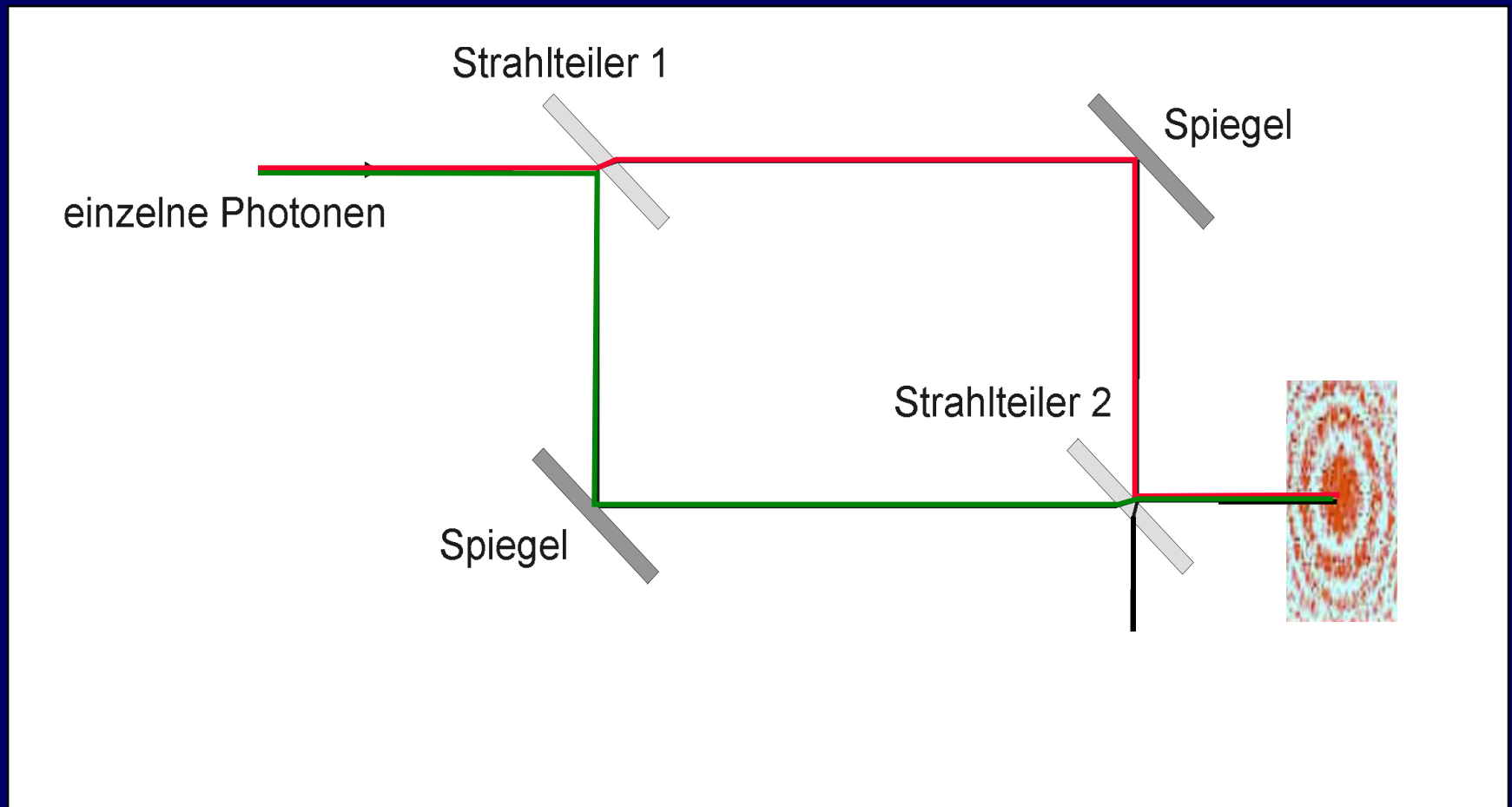


# Interferometer mit einzelnen Photonen

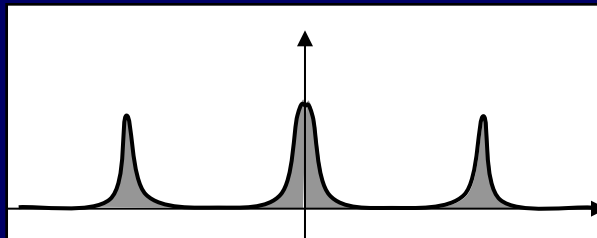
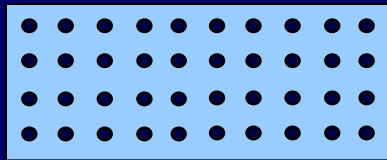


# Interferometer mit einzelnen Photonen

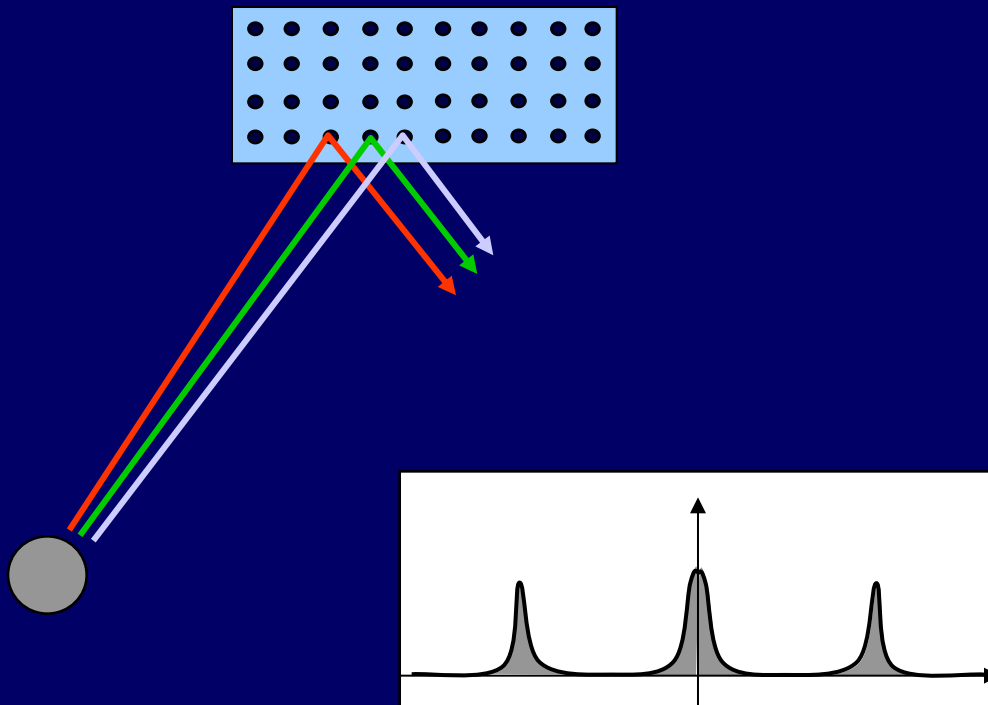
2 k.d.M:



# Beugung an Kristallen

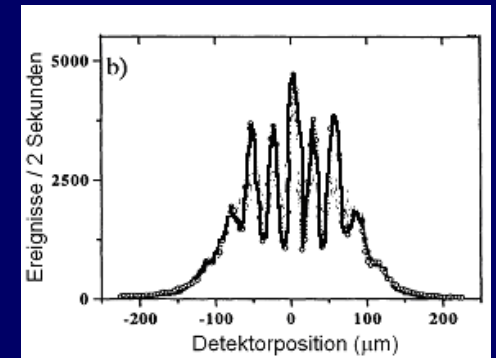
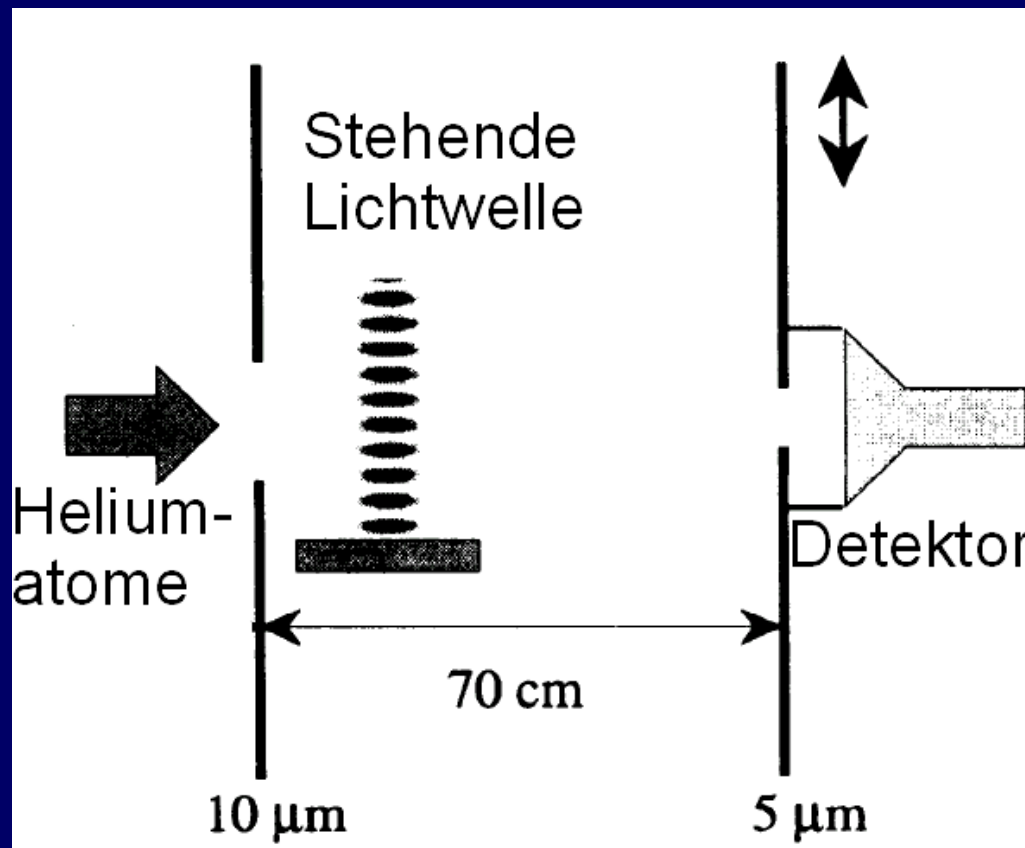


# Beugung an Kristallen



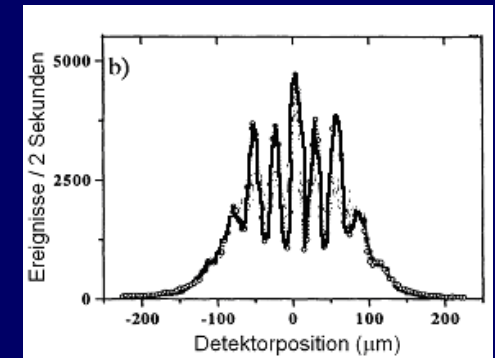
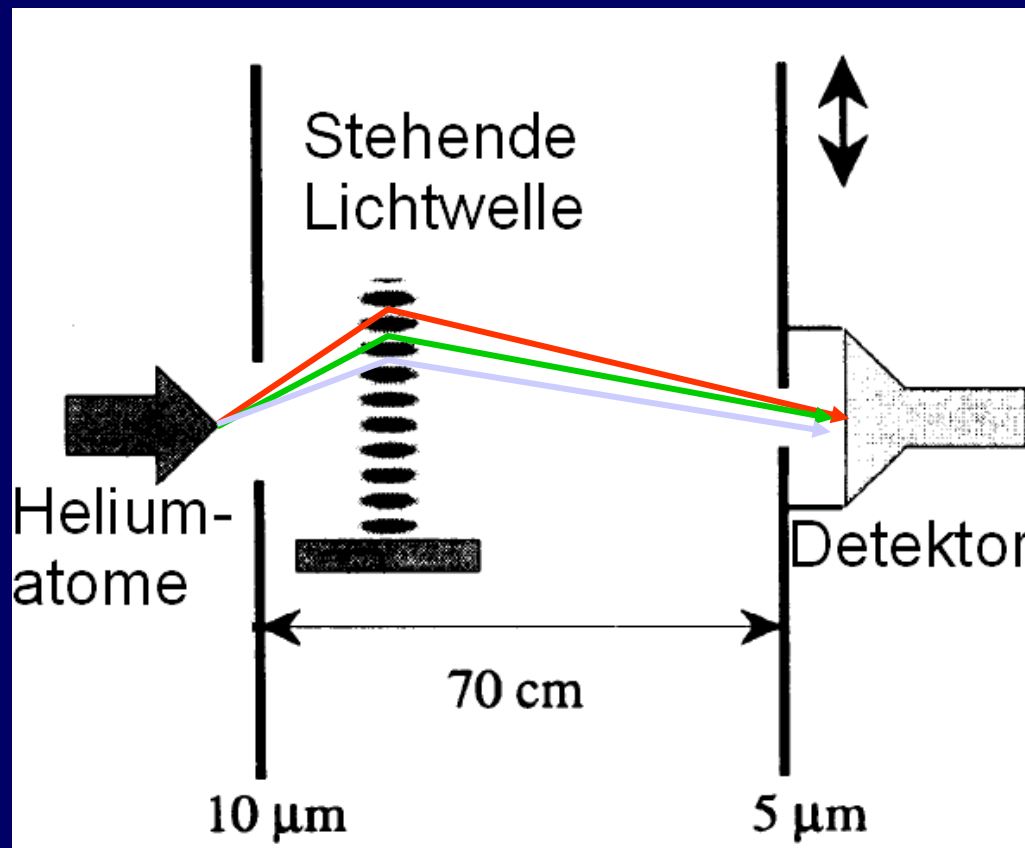
# Beugung an stehender Lichtwelle

Mehrere klassisch denkbare Möglichkeiten:



# Beugung an stehender Lichtwelle

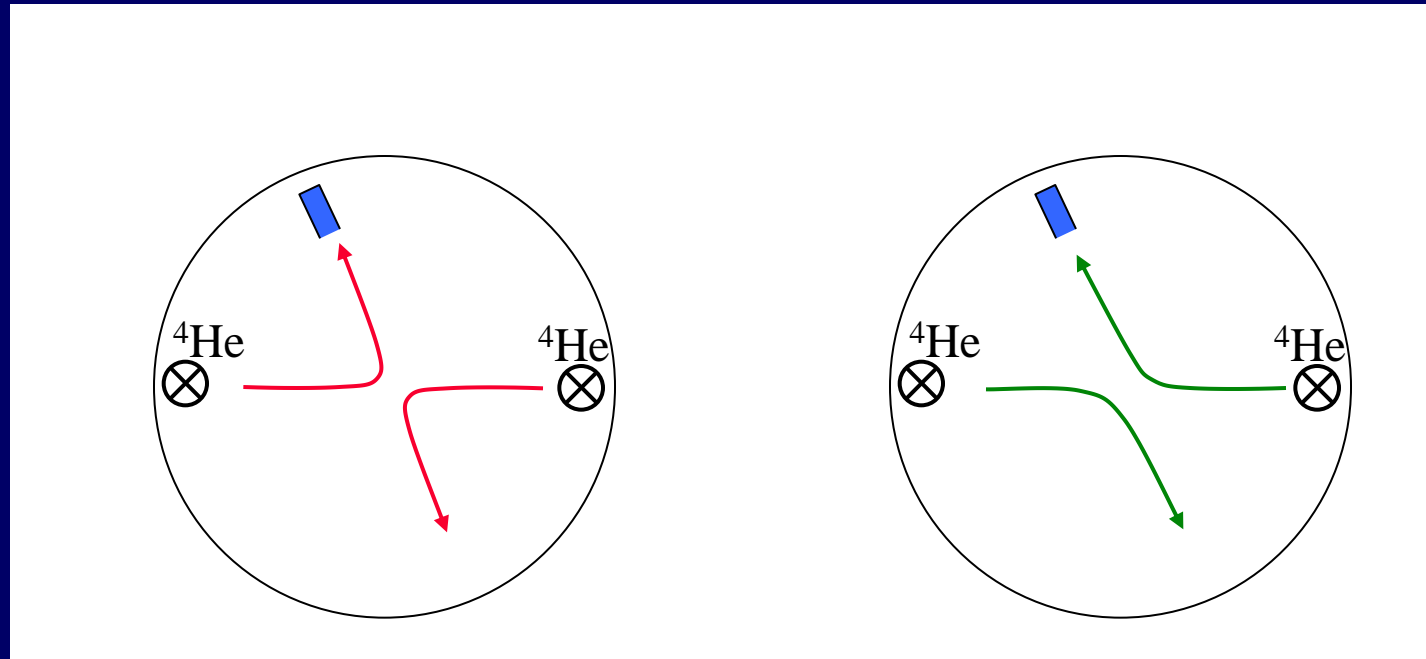
Mehrere klassisch denkbare Möglichkeiten:





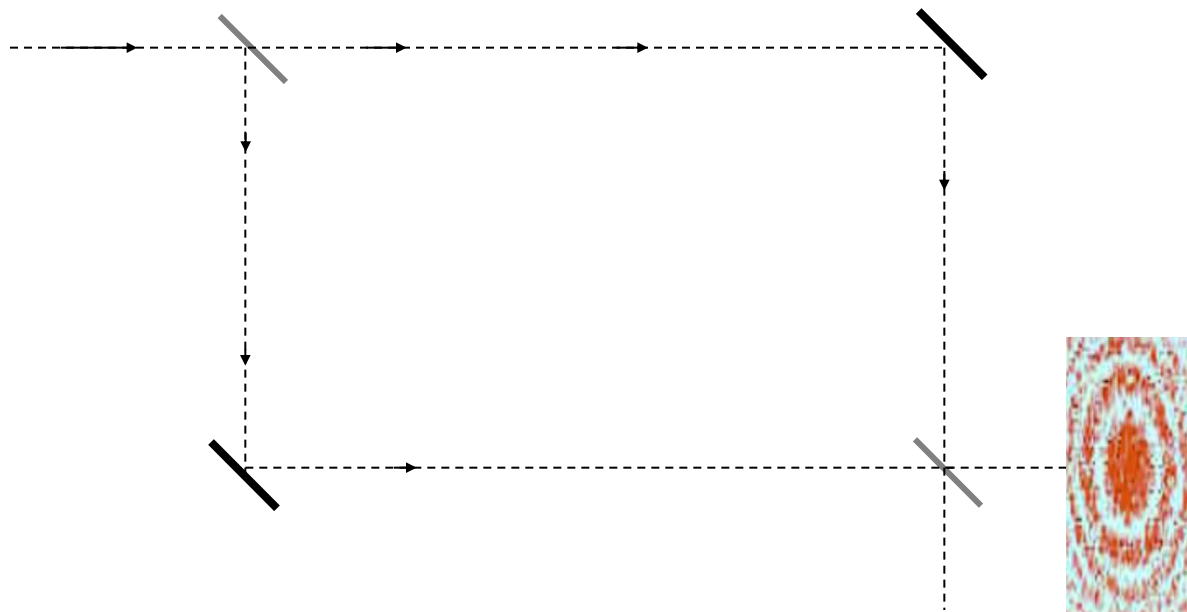
# Streuversuch

*Zwei klassisch denkbare Möglichkeiten:*

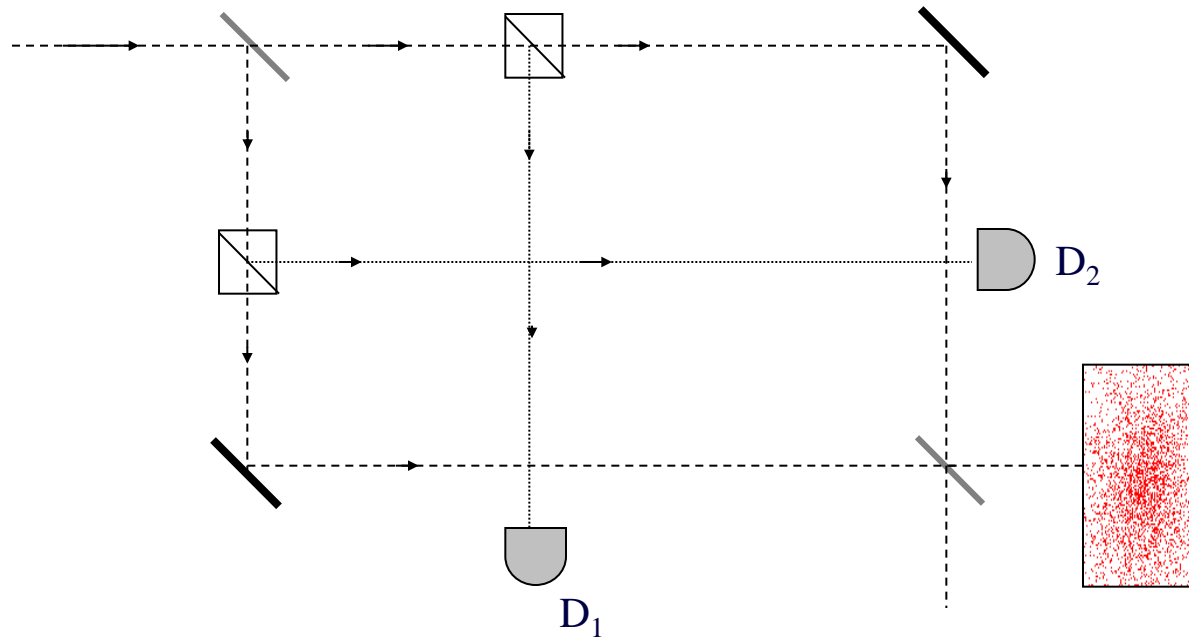


Erweiterung auf die  
Komplementarität:

# Interferometer mit einzelnen Photonen



# Photonen-“Spaltung” im Interferometer



# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Wir formulieren jetzt verschiedene Sätze.

Immer wenn ... ???

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn  
eine Messung gemacht wird,

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn  
eine Messung gemacht wird,

Was für eine Messung muss es sein?

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

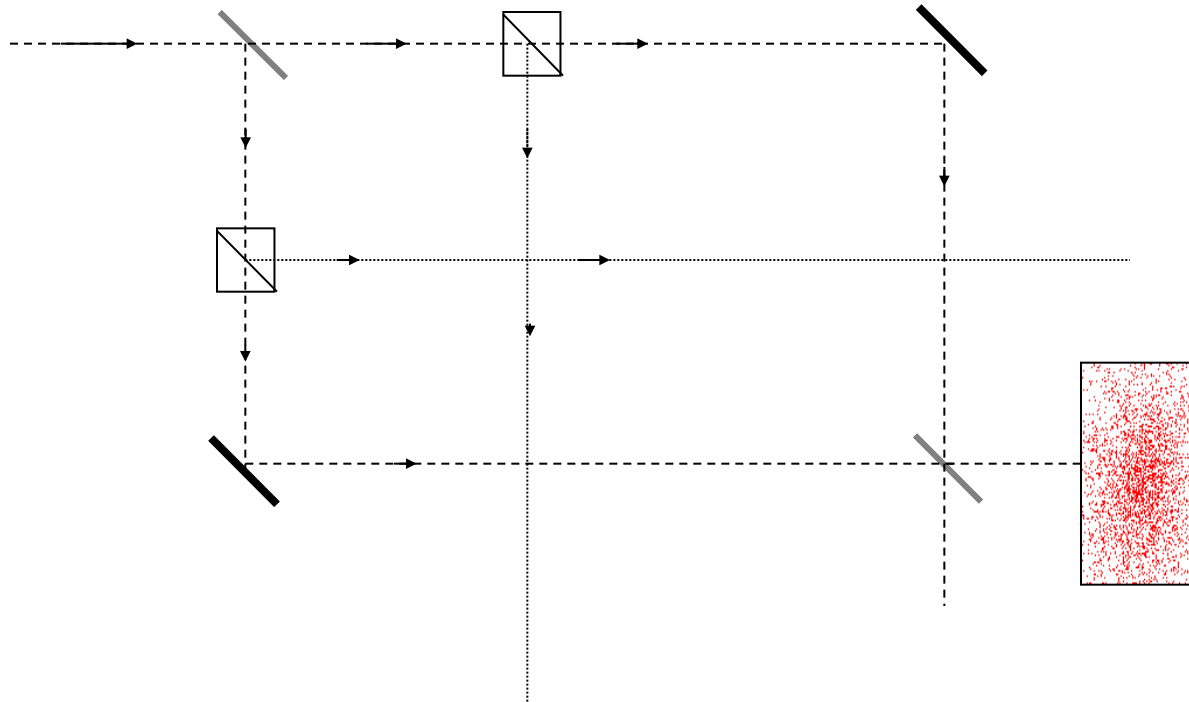
Immer wenn  
eine Messung gemacht wird,

mit der man heraus bekommt, welchen Weg das  
Quantenobjekt genommen hat,

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.



# Photonen-“Spaltung” im Interferometer



# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn  
eine Messung **möglich ist,**

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

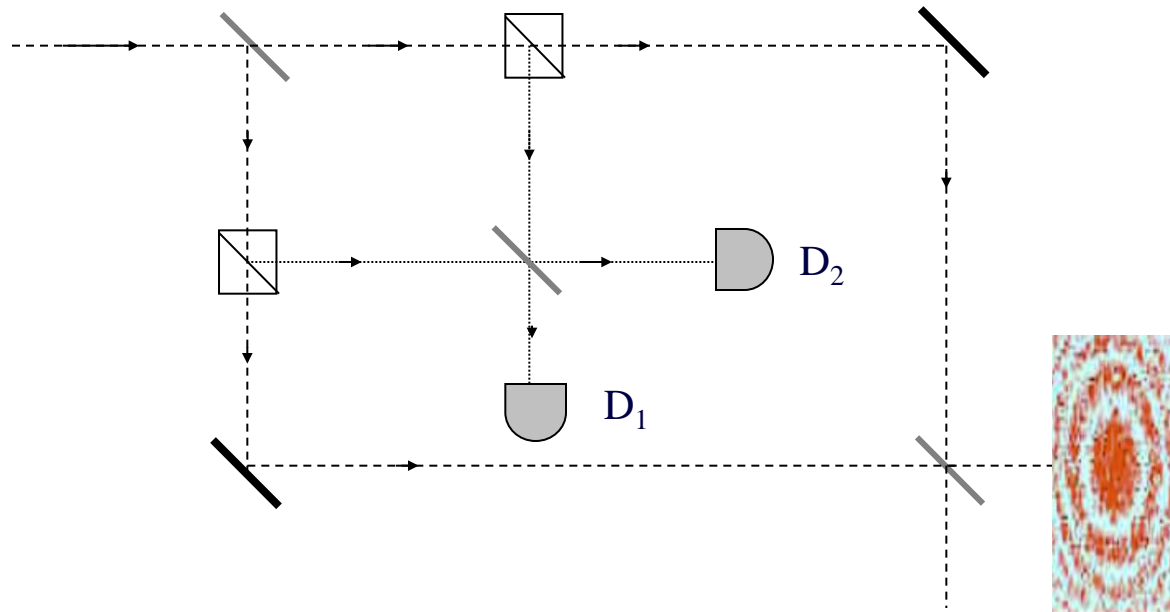
# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn  
eine Messung **möglich ist,**

mit der man heraus bekommen könnte, welchen  
Weg das Quantenobjekt genommen hat,

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

# Photonen-“Spaltung” im Interferometer



## Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn eine Messung möglich ist,  
mit der man (zum Zeitpunkt der Detektion des  
Quantenobjekts) heraus bekommen könnte,  
welchen Weg das Quantenobjekt genommen hat,  
dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn eine Messung möglich ist,  
mit der man (zum Zeitpunkt der Detektion des  
Quantenobjekts) heraus bekommen könnte,  
welchen Weg das Quantenobjekt genommen hat,  
dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

= brauchbare Regel,  
Aber noch nicht ganz einwandfrei ausgedrückt!!

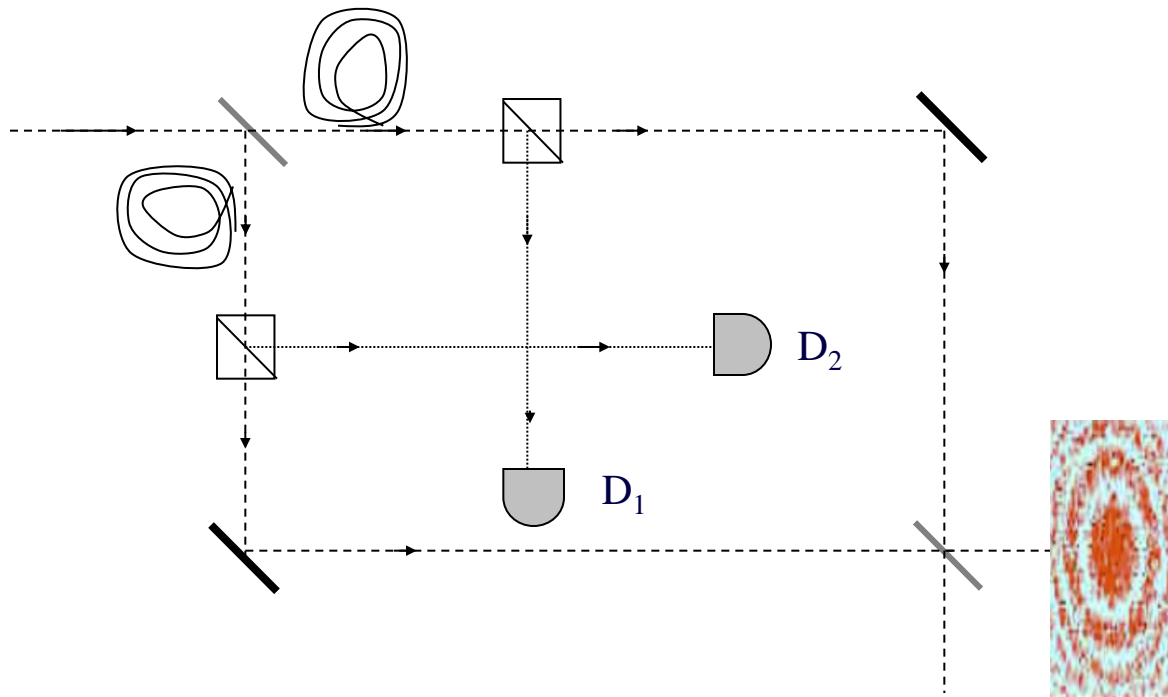
# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Warum ist die Regel nicht einwandfrei und wie muss man sich ausdrücken?

Der nächste Schritt muss zum weiteren Verständnis nicht unbedingt nachvollzogen werden.

# Verzögerte Entscheidung

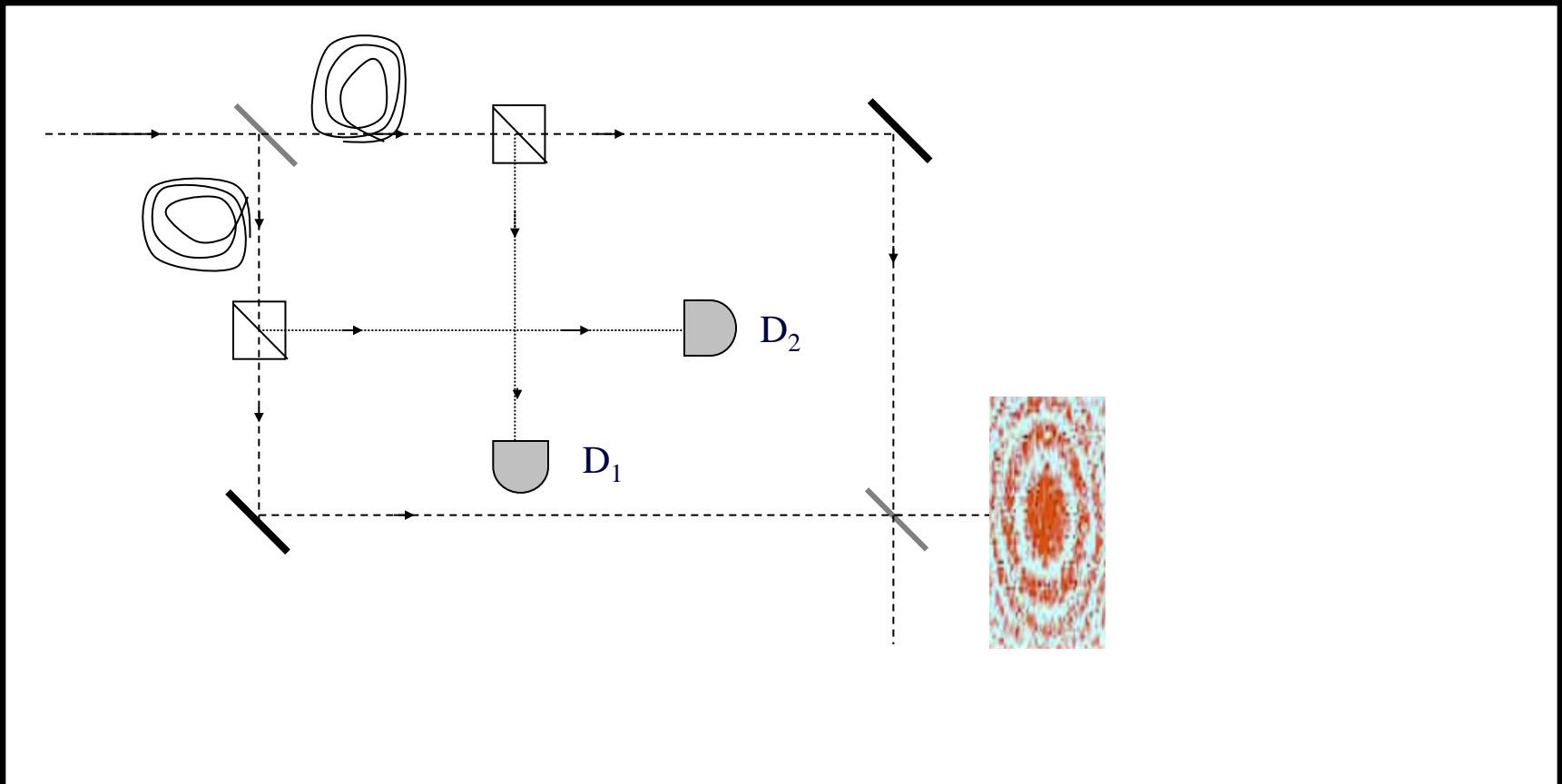
Wir warten, bis das Photon den 1. Strahlteiler hinter sich hat.





# Verzögerte Entscheidung

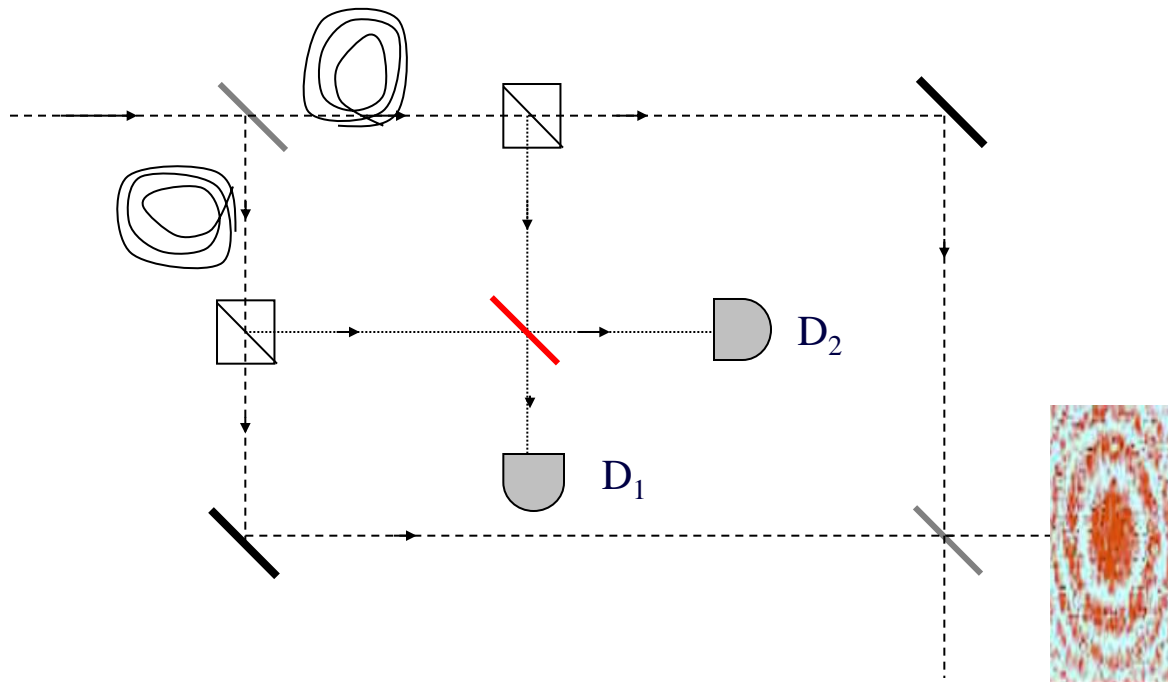
Wir warten, bis das Photon den 1. Strahlteiler hinter sich hat.  
Detektoren → Schluss auf den Weg des Photons



# Verzögerte Entscheidung

Wir warten, bis das Photon den 1. Strahlteiler hinter sich hat.  
Detektoren → Schluss auf den Weg des Photons

**Aber:** Was passiert, wenn wir schnell den Radierer rein tun?



# Verzögerte Entscheidung

Wir warten, bis das Photon den 1. Strahlteiler hinter sich hat.  
Detektoren → Schluss auf den Weg des Photons

**Aber:** Was passiert, wenn wir schnell den Radierer rein tun?

Dann trägt das Photon zum Muster bei. Es kann also nicht einen der Wege gegangen sein.

Folglich hat es sich auch vorher nicht für einen der Wege entschieden.

Folglich kann man nicht einmal sagen:

*„mit der man heraus bekommen könnte,  
welchen Weg das Quantenobjekt genommen hat“*

# Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität: Neue Formulierung:

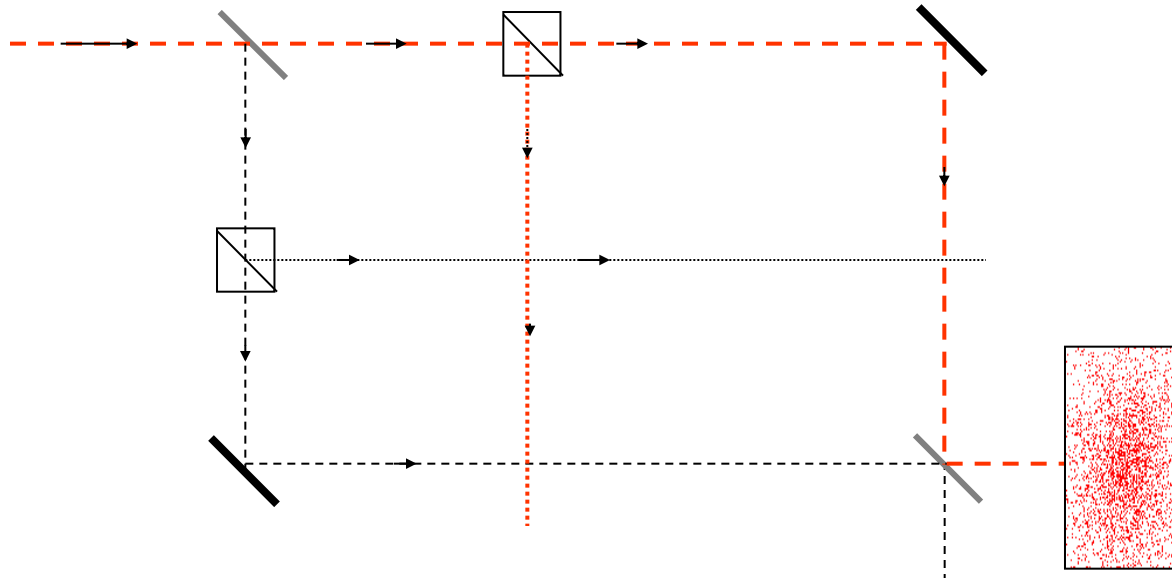
Immer wenn (zum Zeitpunkt des Nachweises)  
eine Messung möglich ist,

deren Messergebnisse den k.d.M. zugeordnet  
werden können,

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

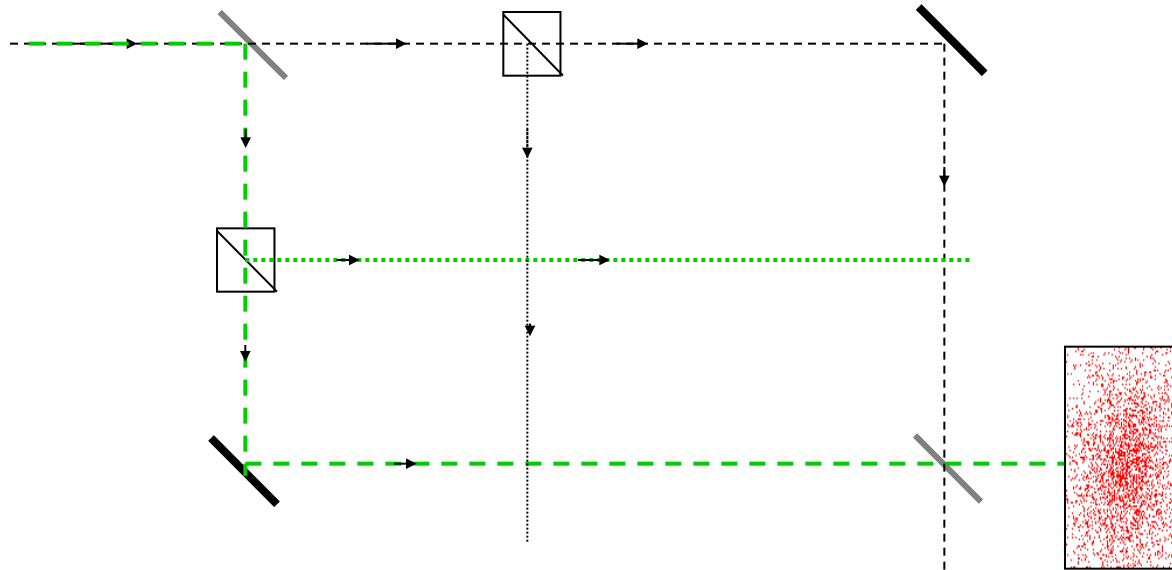
# Interferometer mit einzelnen Photonen

Erste k.d.M:

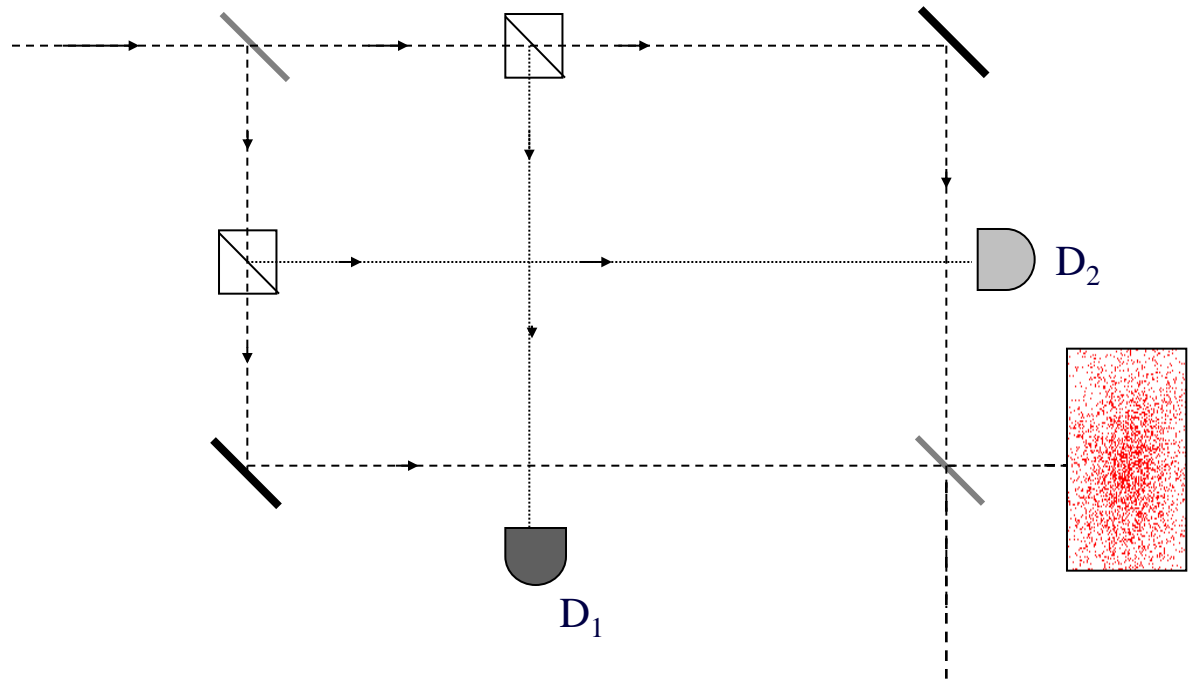


# Interferometer mit einzelnen Photonen

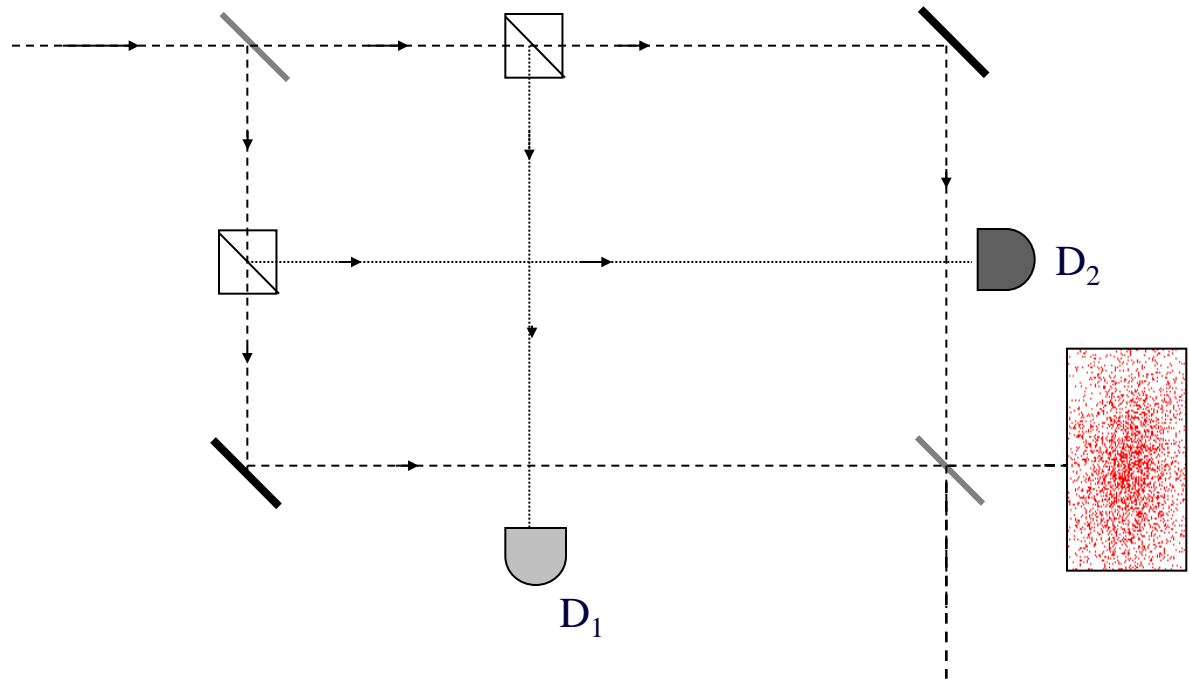
Zweite k.d.M:



# Photonen-“Spaltung” im Interferometer

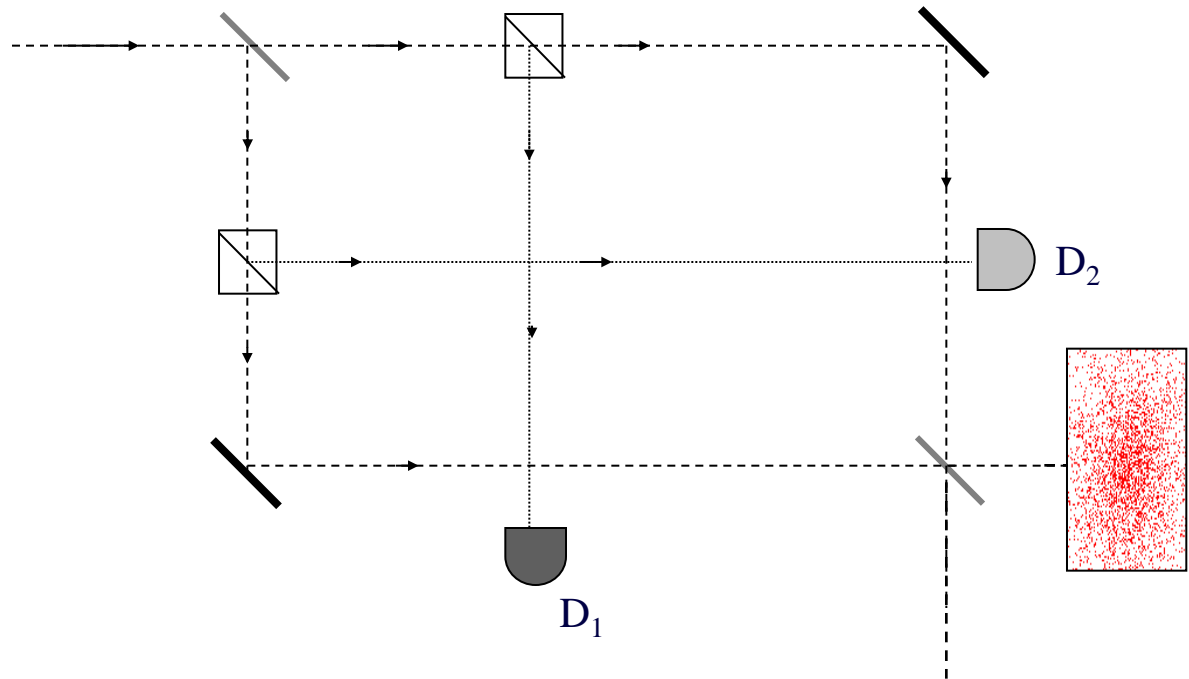


# Photonen-“Spaltung” im Interferometer



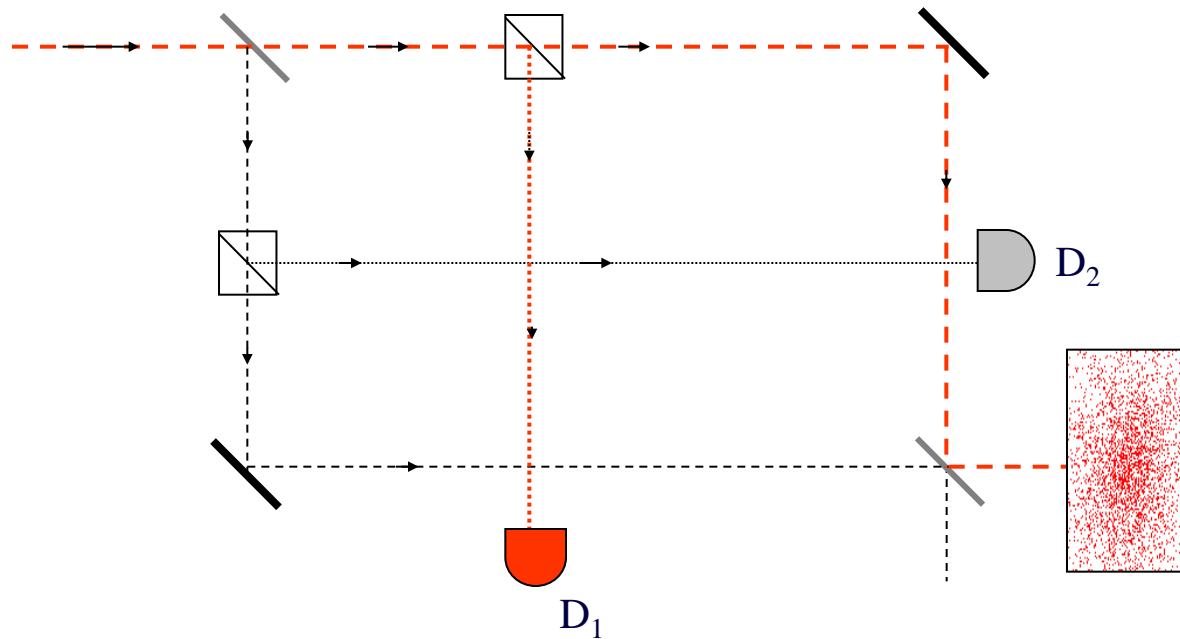


# Photonen-“Spaltung” im Interferometer

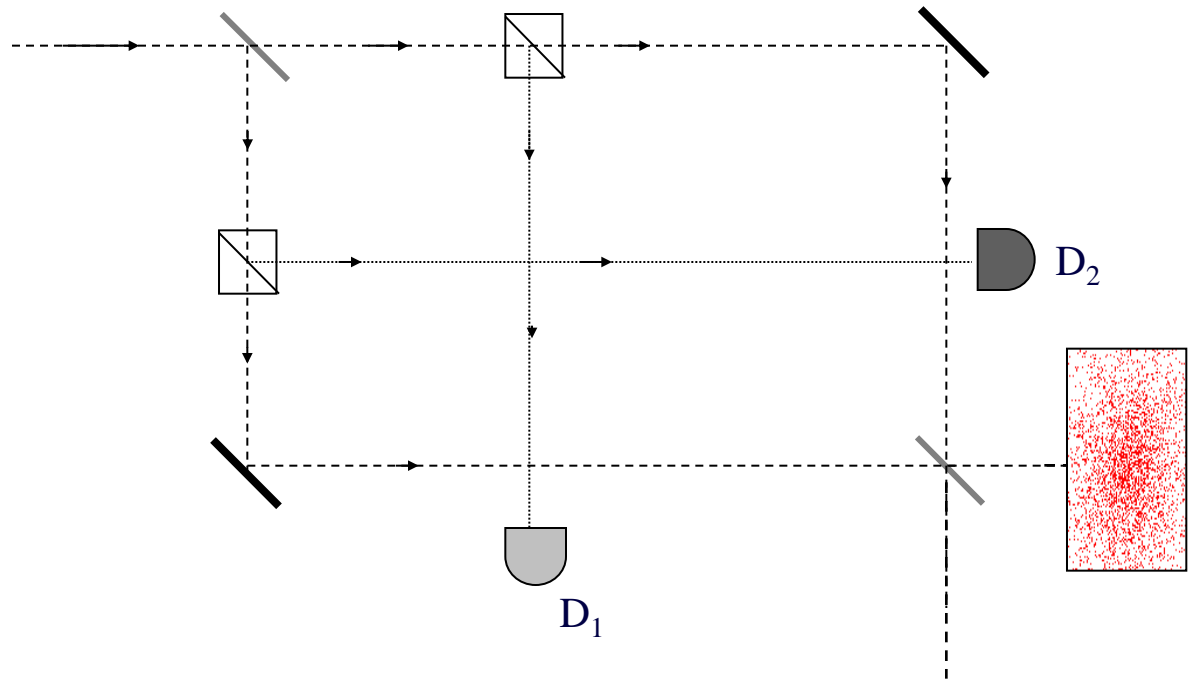


# Photonen-“Spaltung” im Interferometer

Zuordnung von D1 zur roten k.d.M.

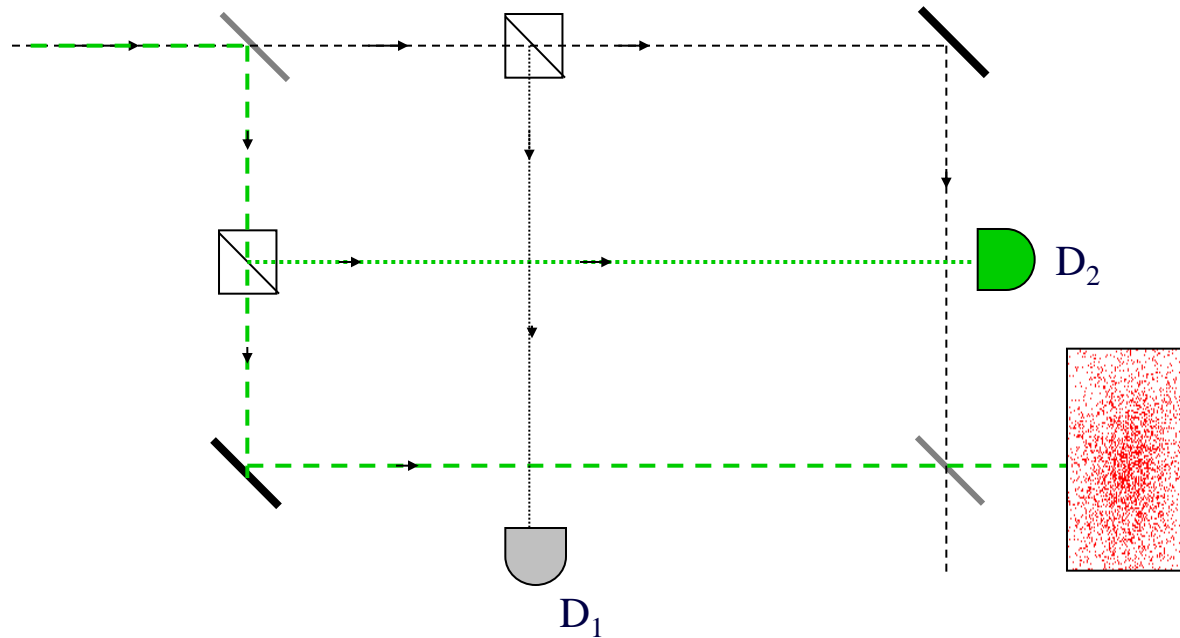


# Photonen-“Spaltung” im Interferometer



# Photonen-“Spaltung” im Interferometer

Zuordnung von D2 zur grünen k.d.M.



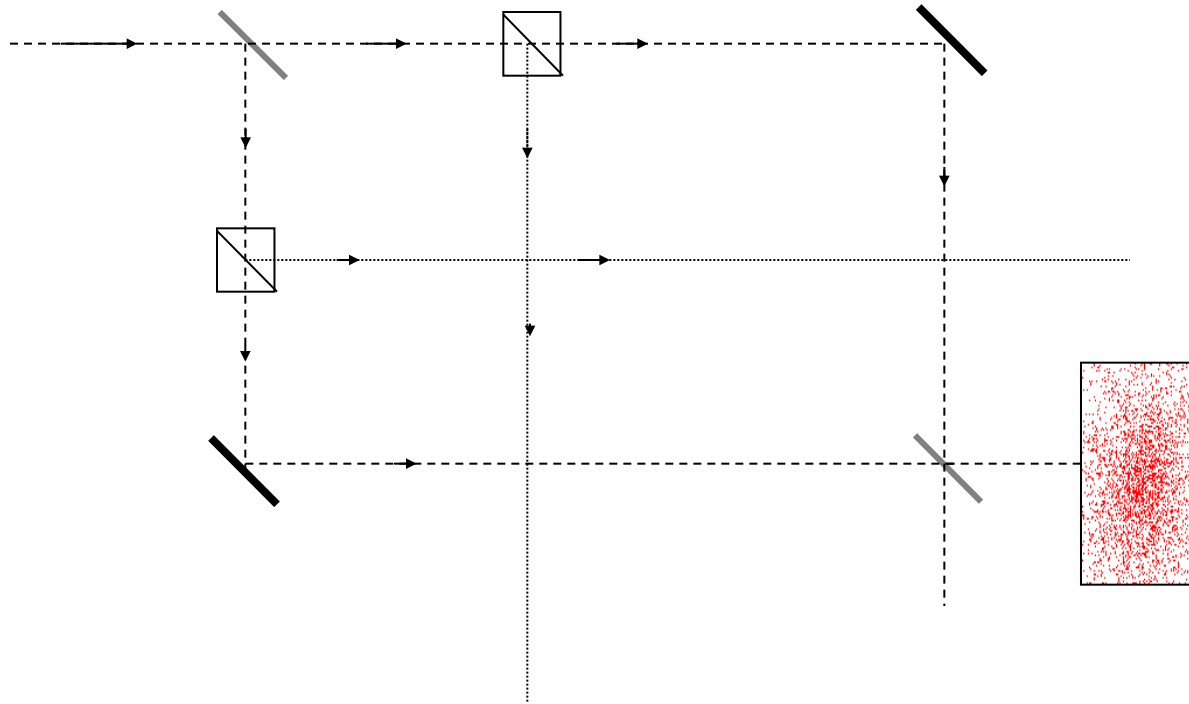
## Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn (zum Zeitpunkt des Nachweises)  
eine Messung möglich ist,

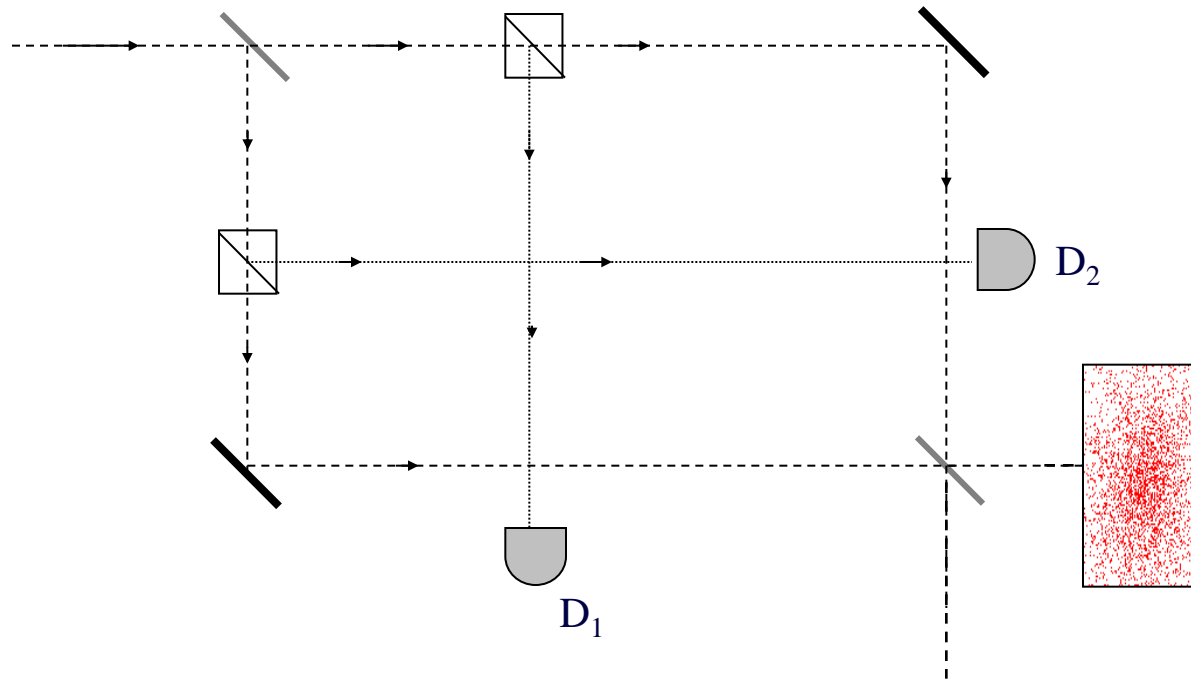
deren Messergebnisse den k.d.M. zugeordnet  
werden können,

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

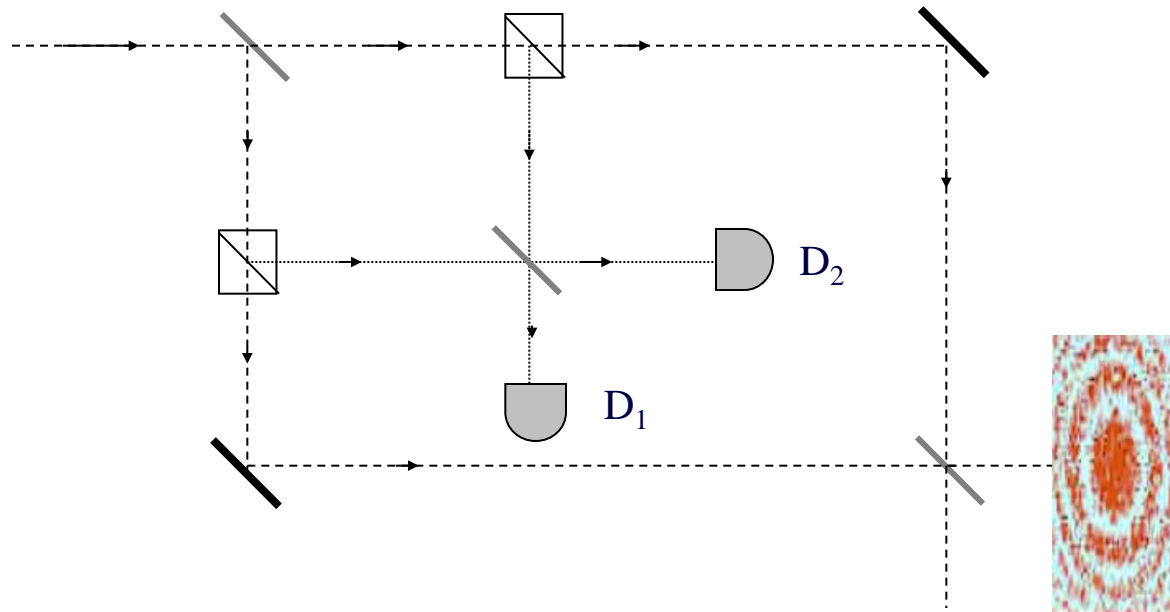
# Die Möglichkeit genügt ...



# Die Möglichkeit genügt ...



Auf den Zeitpunkt kommt es an!





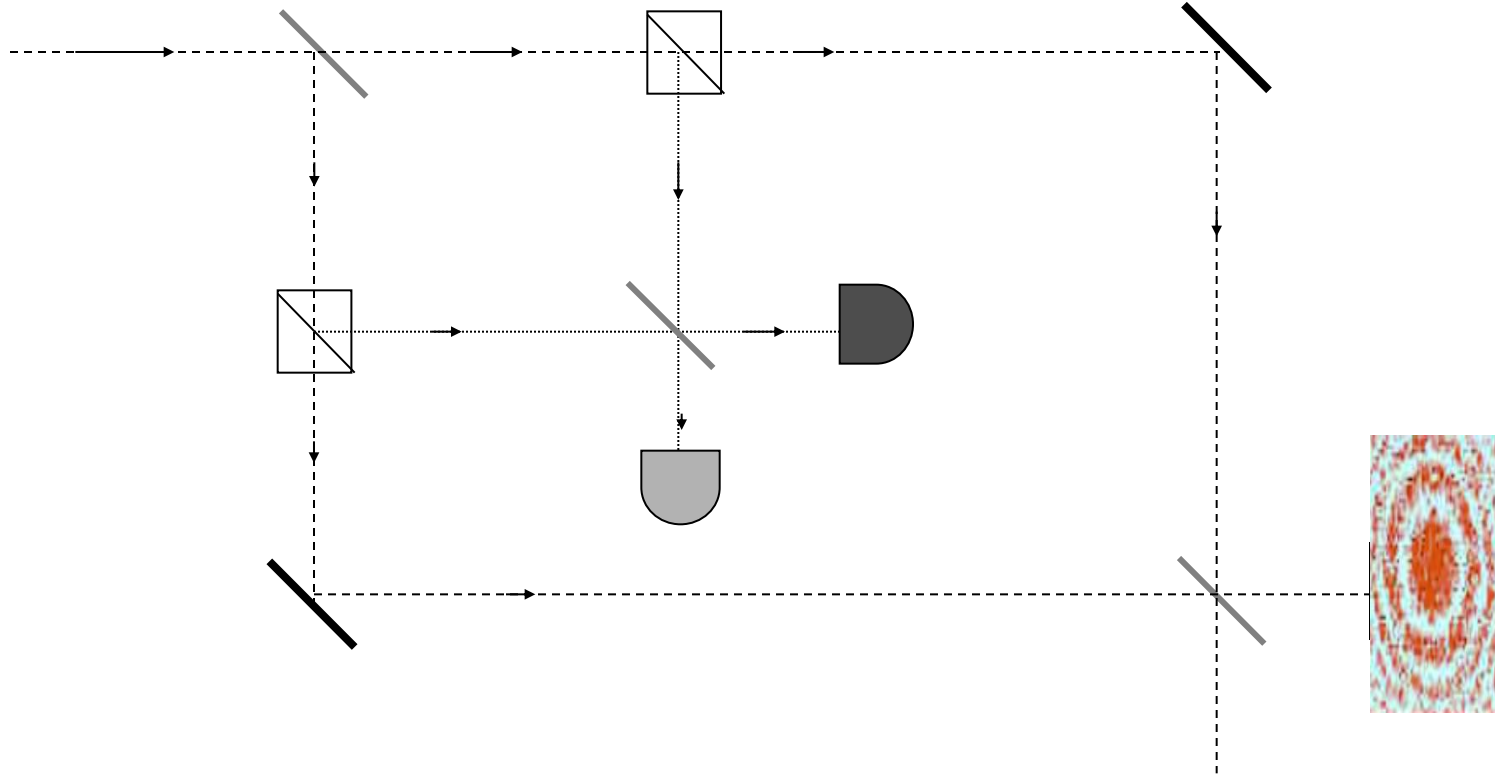
## Gesetzmäßigkeit zur Komplementarität:

Immer wenn (zum Zeitpunkt des Nachweises)  
eine Messung möglich ist,

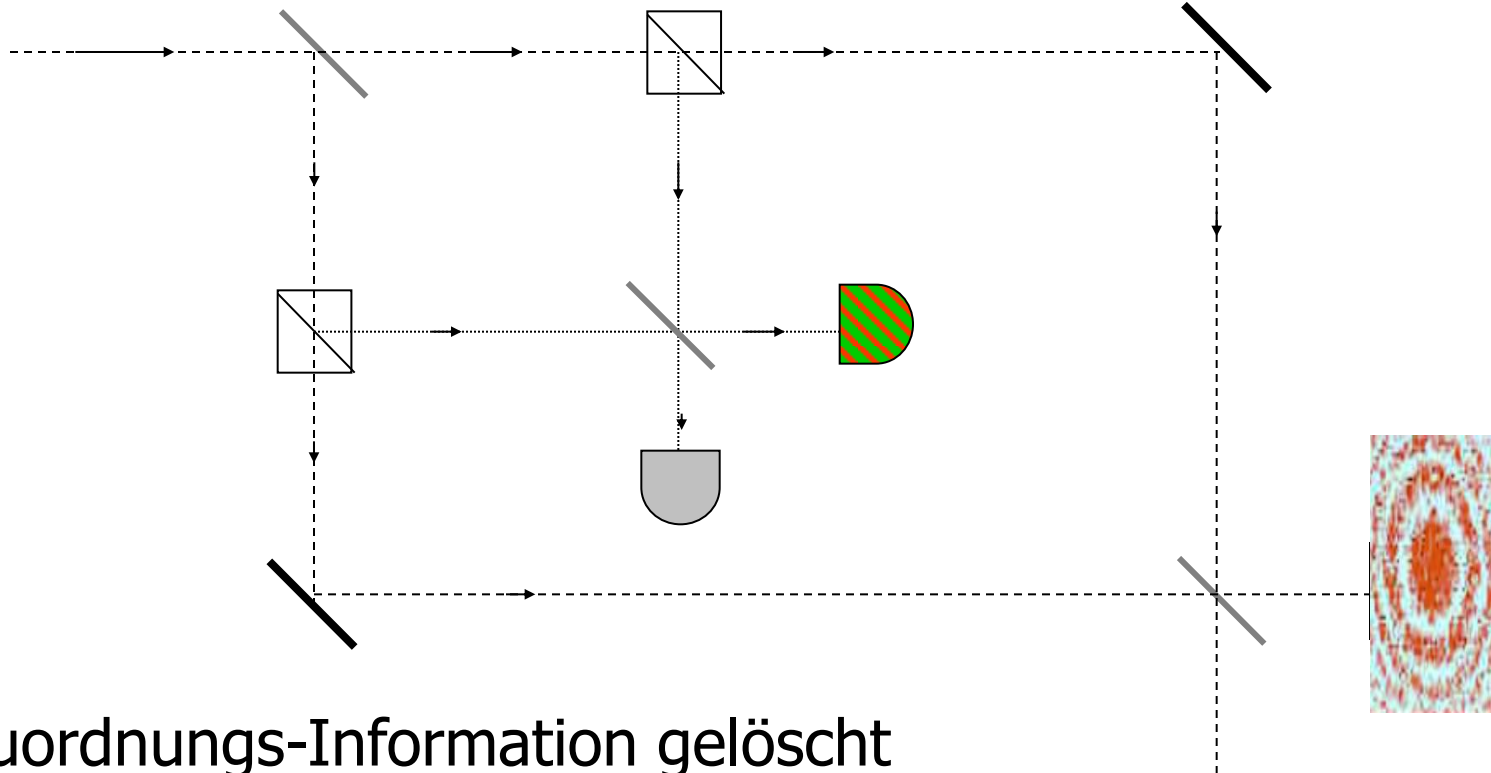
deren Messergebnisse den k.d.M. zugeordnet  
werden können,

dann gibt es doch kein Interferenzmuster.

Auf den Zeitpunkt kommt es an!

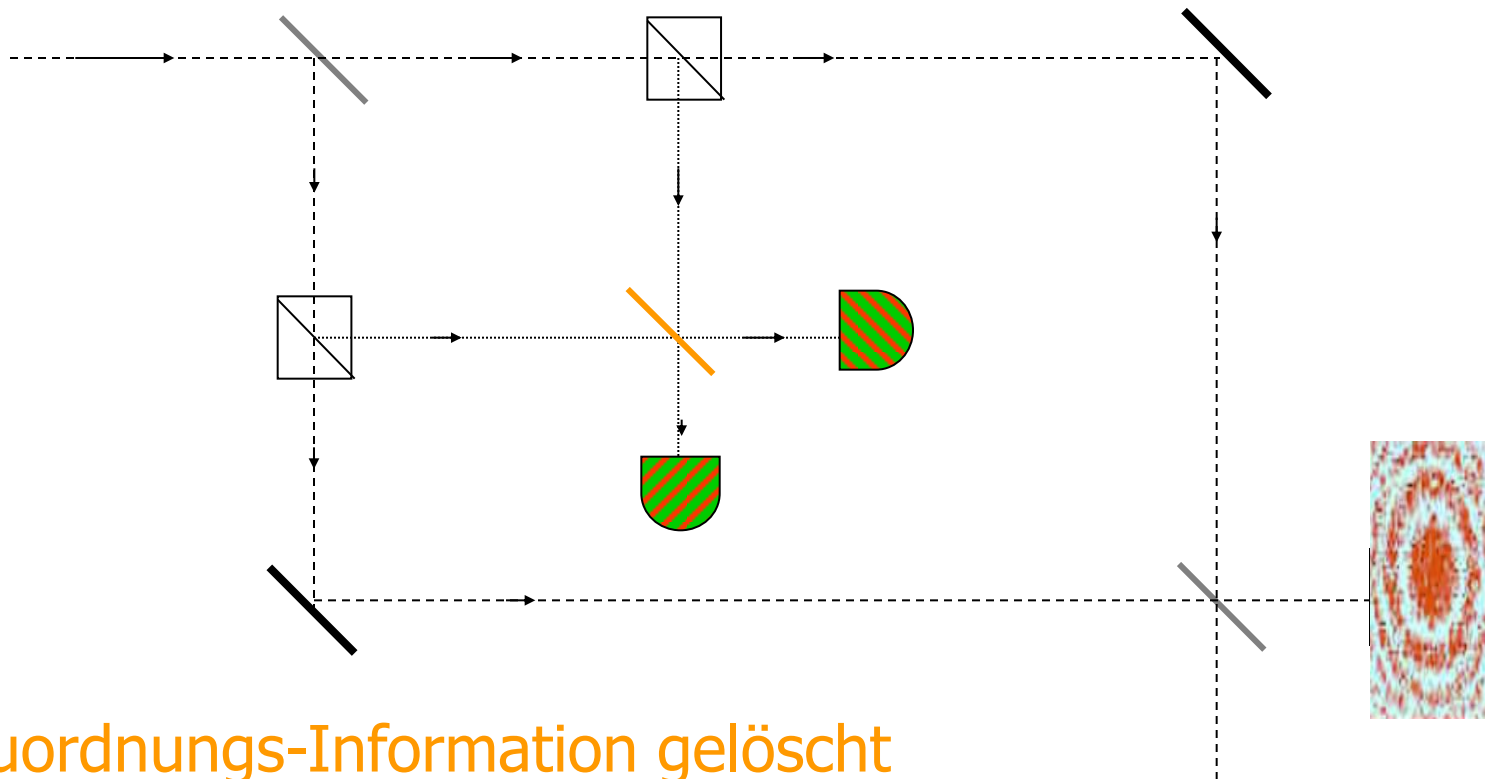


# Der „Quanten-Radierer“



Zuordnungs-Information gelöscht

# Der „Quanten-Radierer“

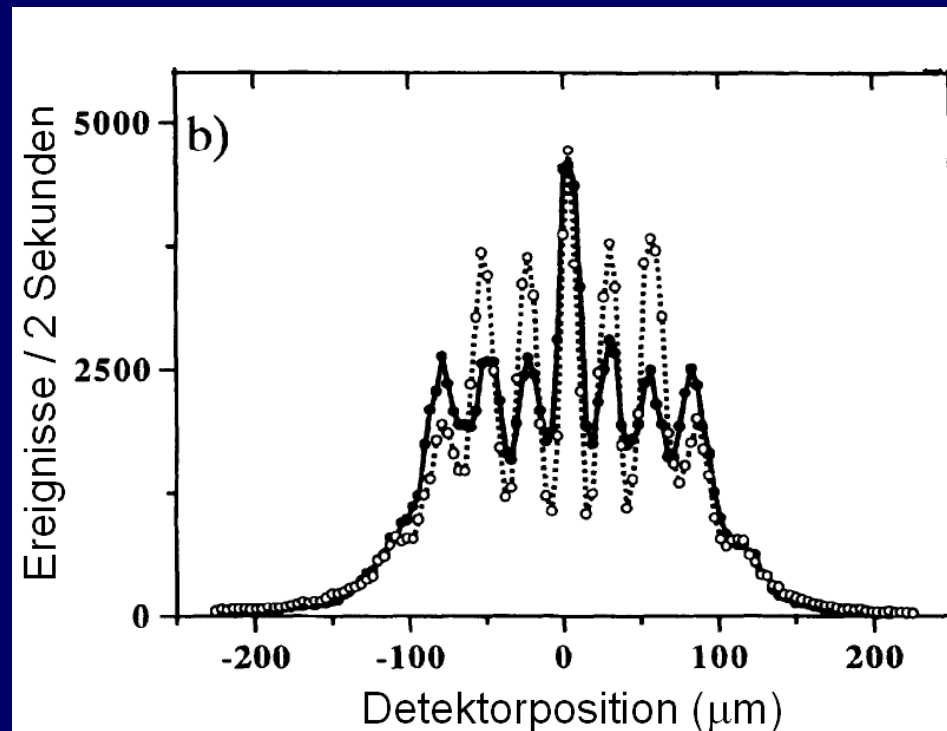
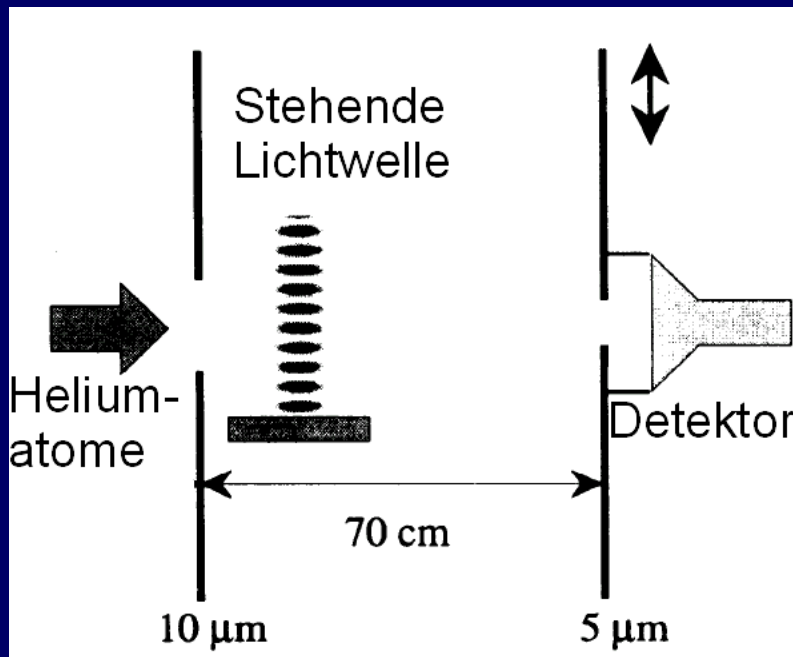


Zuordnungs-Information gelöscht

Anwendung auf weitere  
Komplementaritäts-Experimente

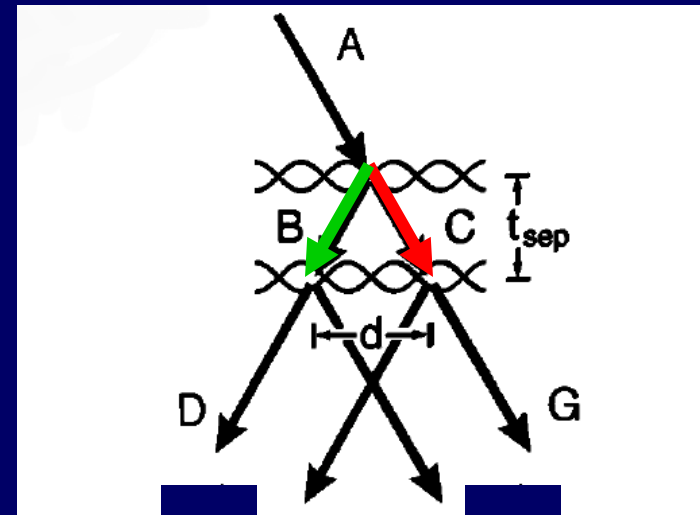
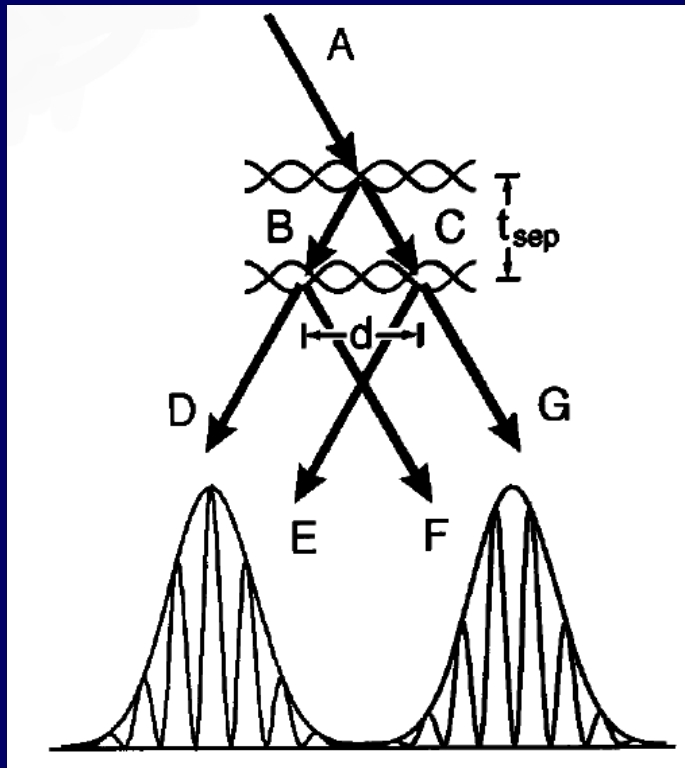
# Beugung von Atomen

Pfau et al., Univ. Konstanz (1994)



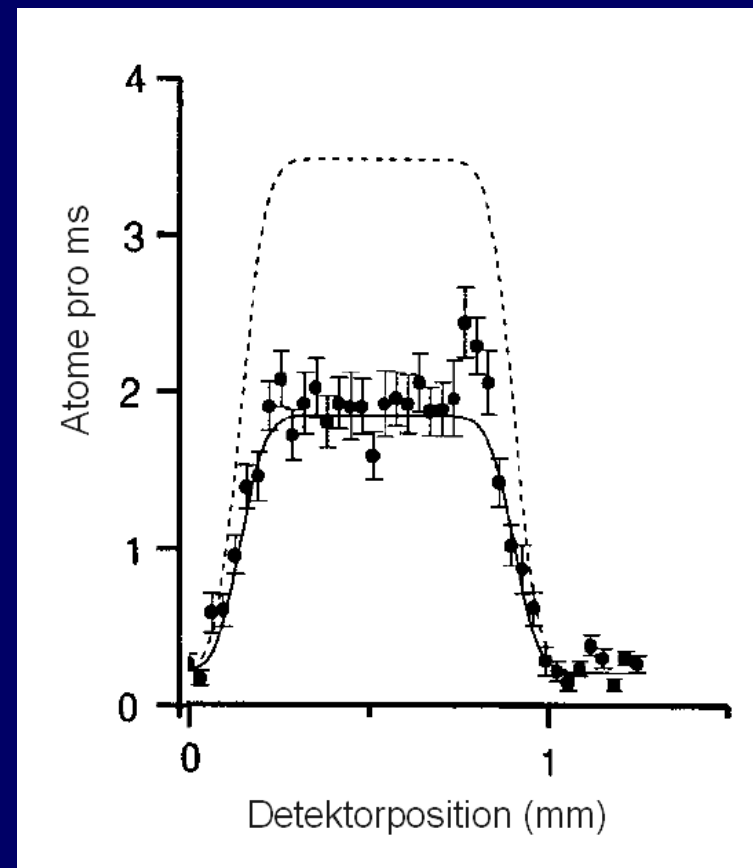
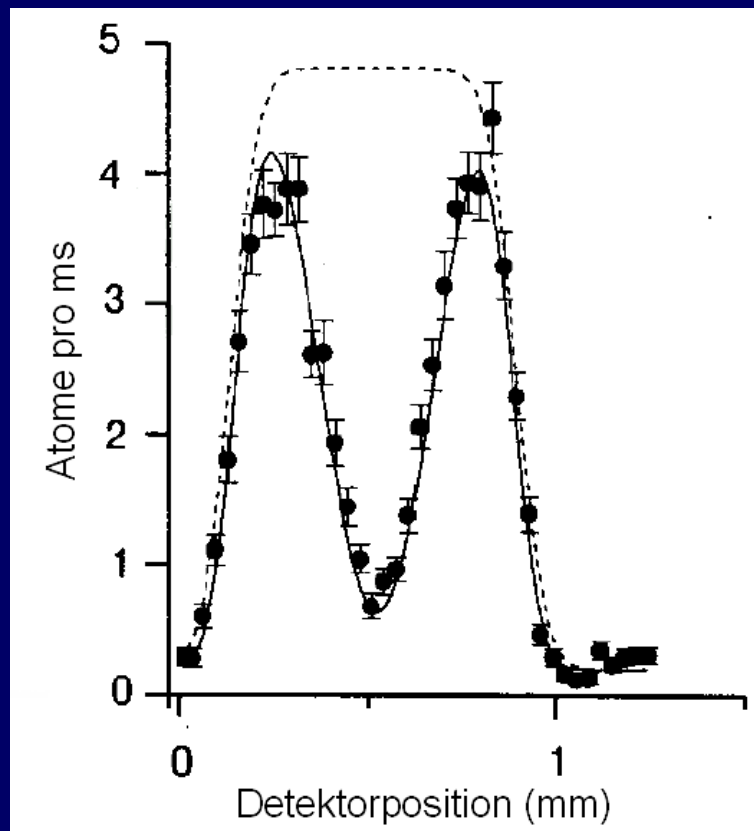
# Atom-Interferometer

Dürr, Nonn, Rempe (1998)



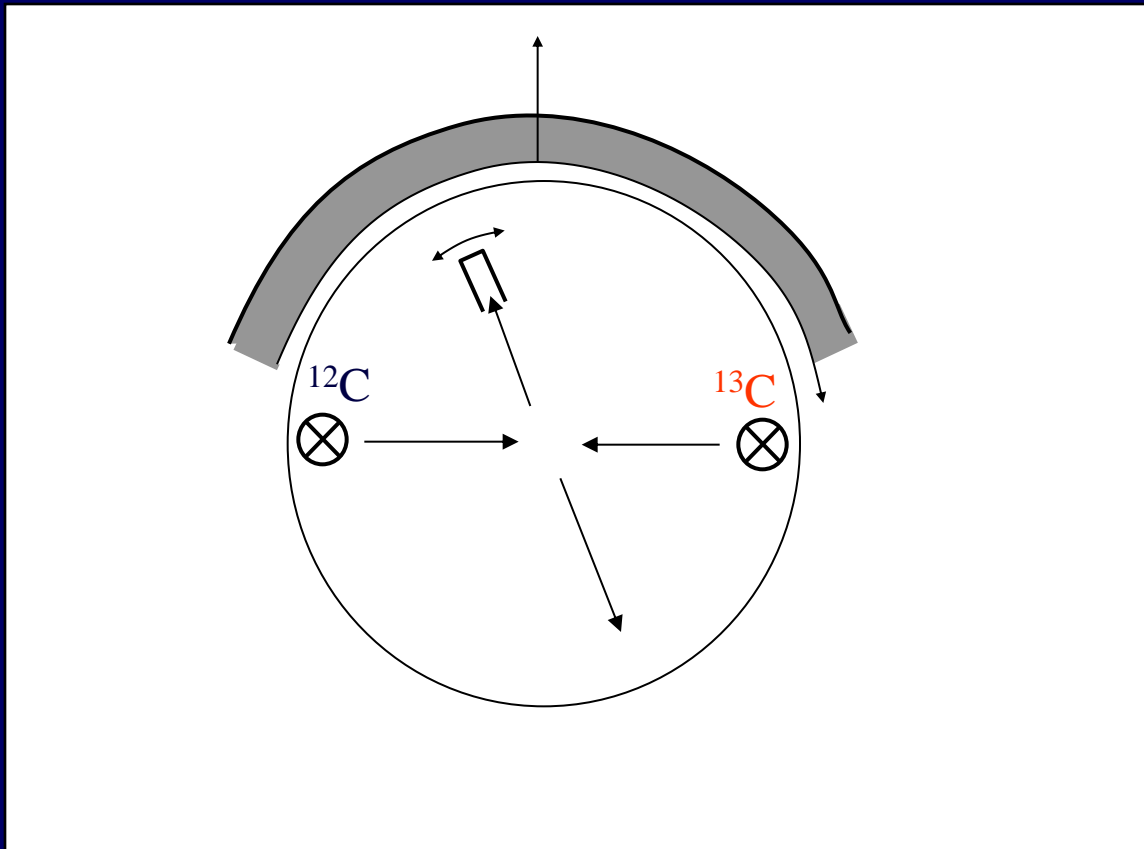
# Atom-Interferometer

Ergebnis:





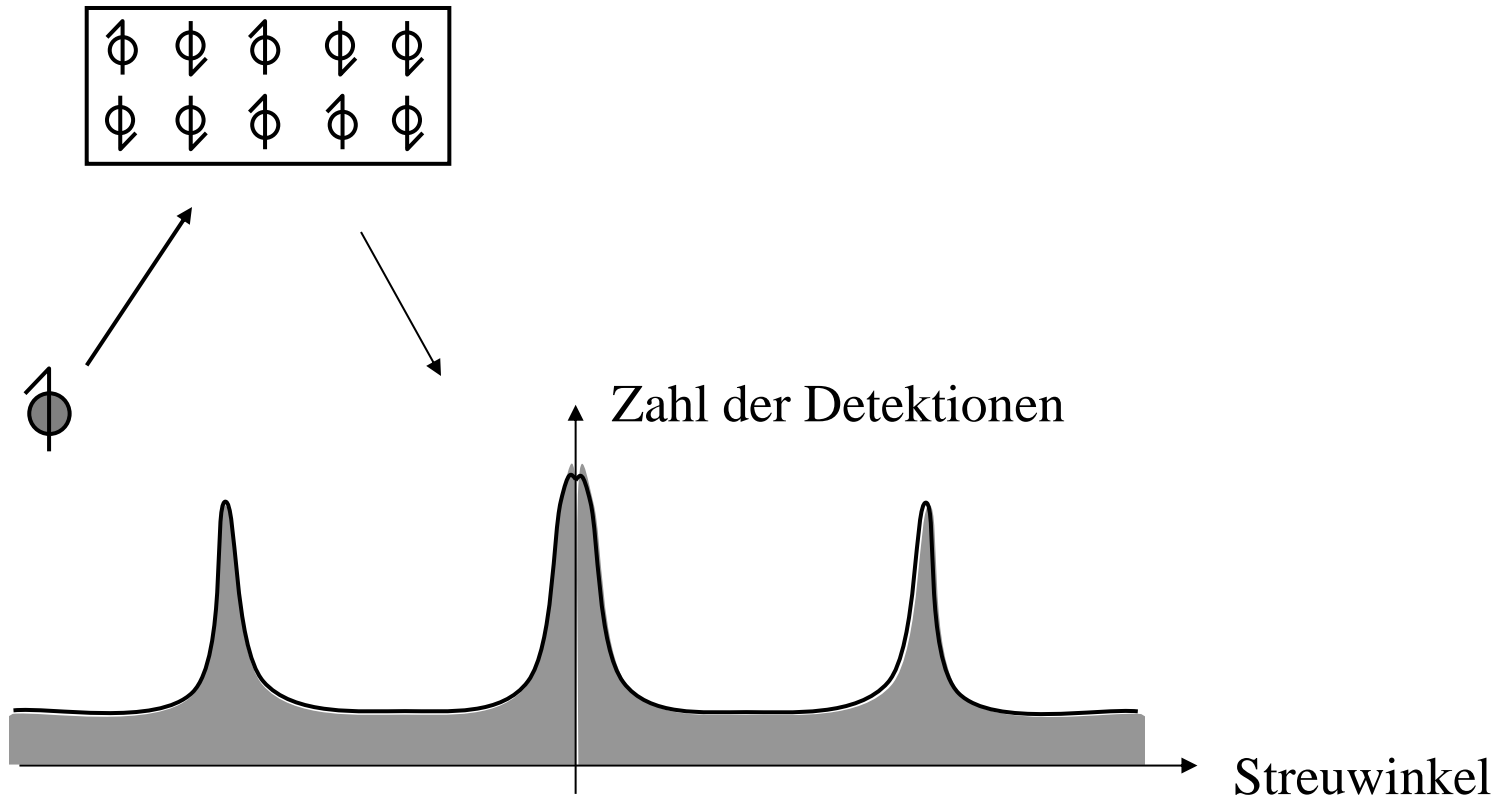
# C-C-Streuung



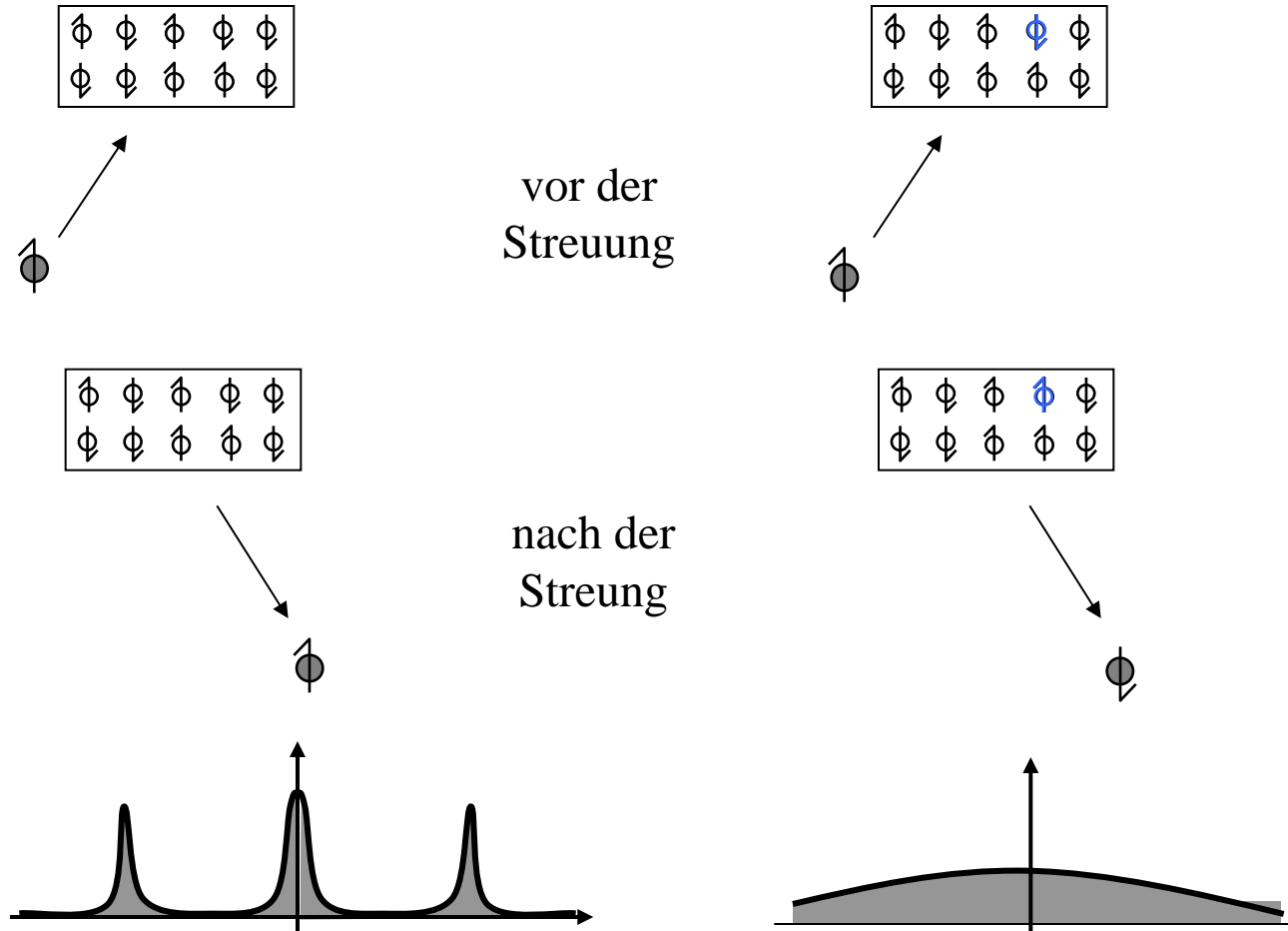
Anwendung auf eine „neue“ Situation:

Streuung von Neutronen

# Neutronenstreuung am C13-Kristall



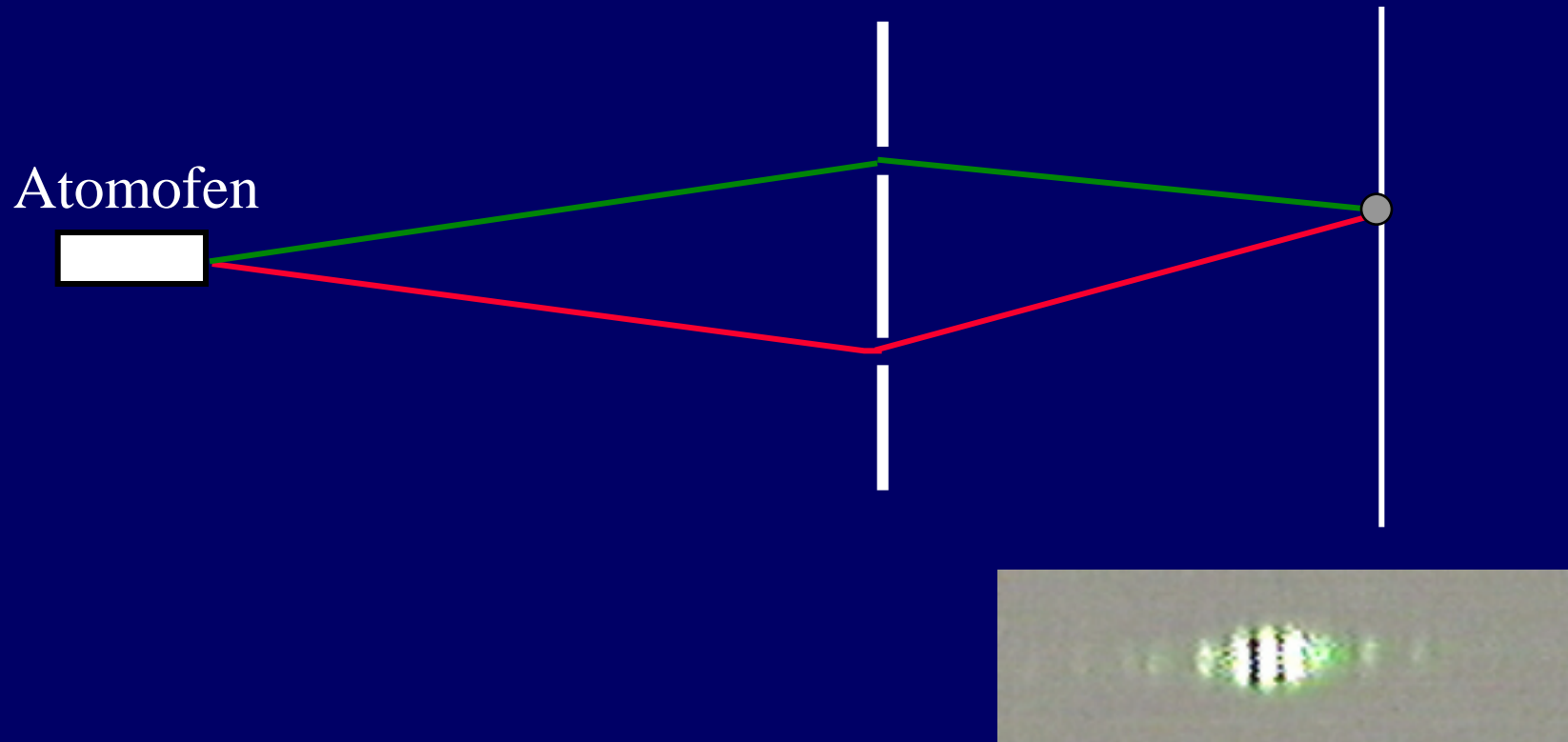
# Neutronenstreuung am C13-Kristall



Anwendung auf Schulexperiment:

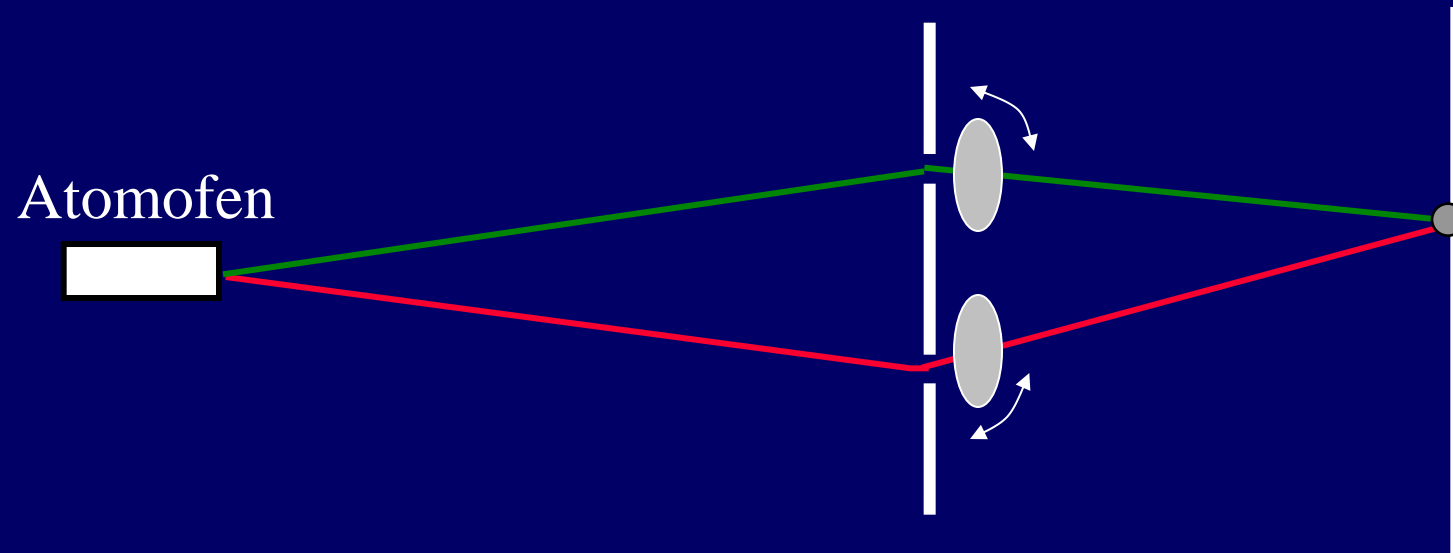
Der Doppelspalt mit Polarisationsfolien

# Doppelspalt

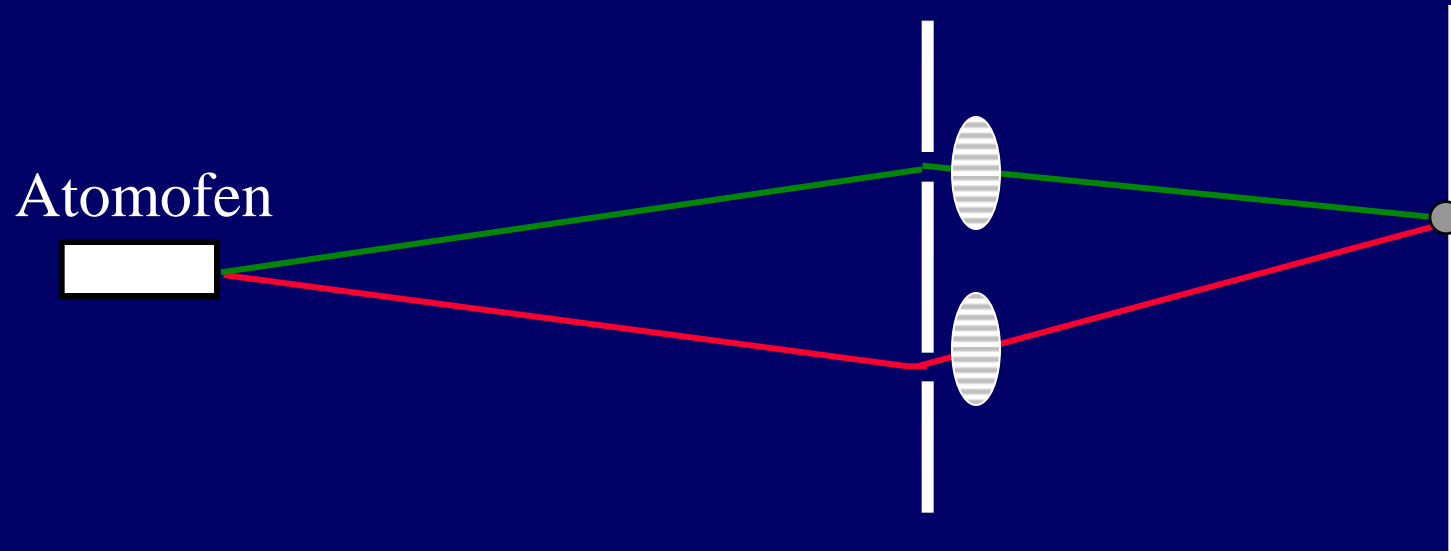


Zum Zeitpunkt des Nachweises ist keine Zuordnungs-Messung möglich.

# Doppelspalt mit Polfiltern



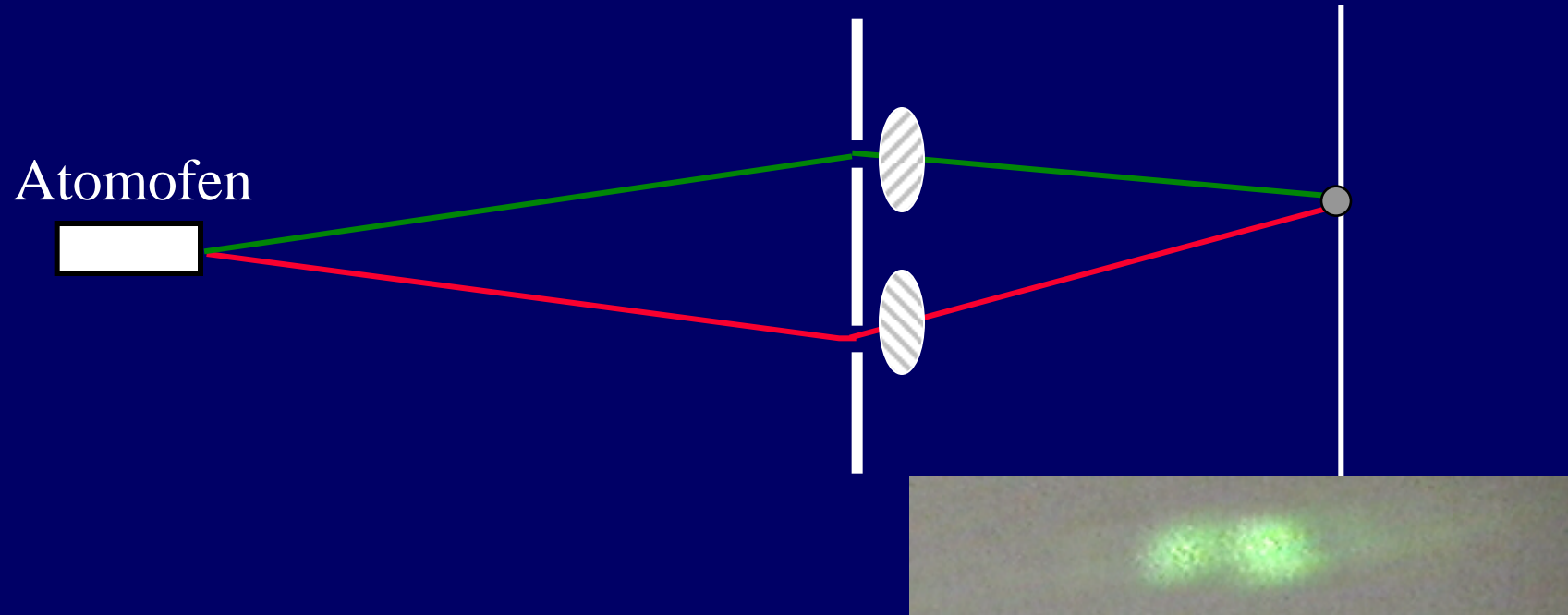
# Doppelspalt mit parallelen Polfiltern



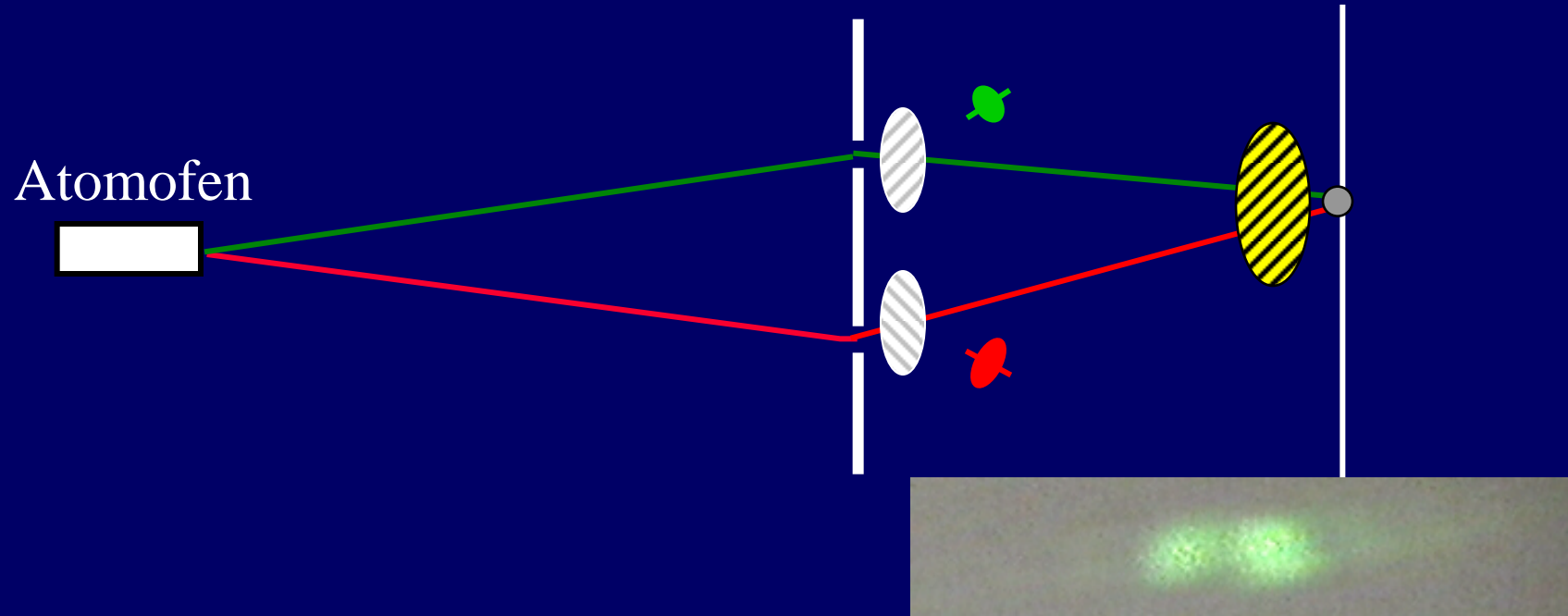
Zum Zeitpunkt des Nachweises ist keine Zuordnungs-Messung möglich.



# Doppelspalt mit orthog. Polfiltern



# Doppelspalt mit orthog. Polfiltern



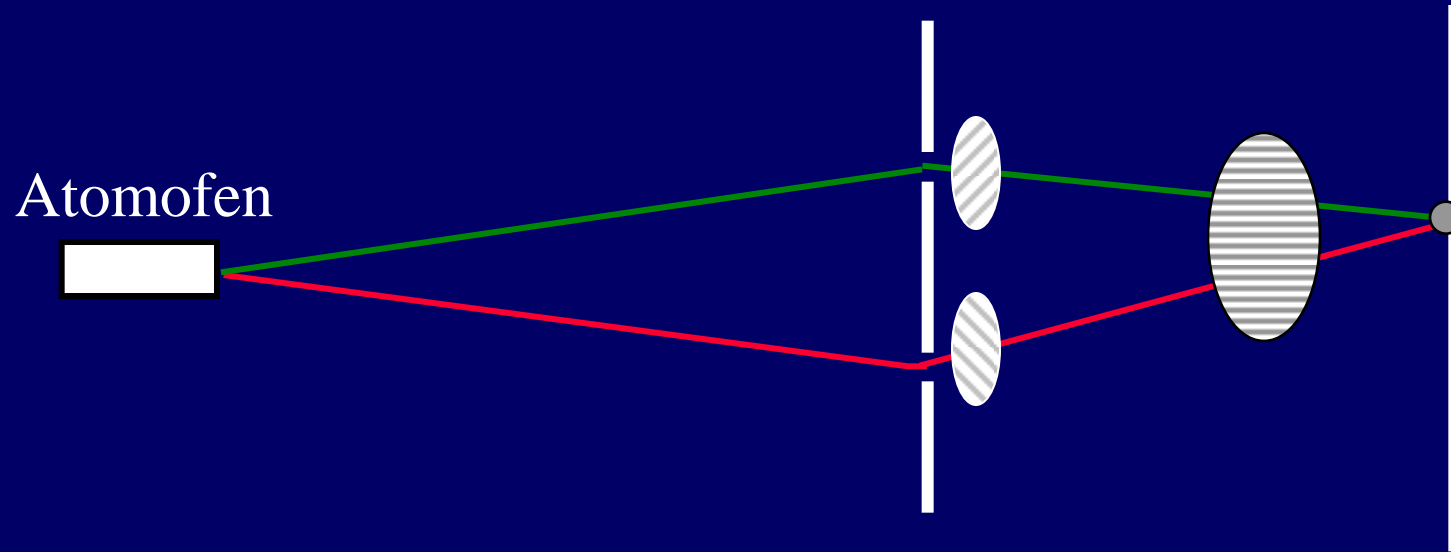
Mögliche Zuordnungsmessung:

Messung der Polarisation des Photons am Schirm.

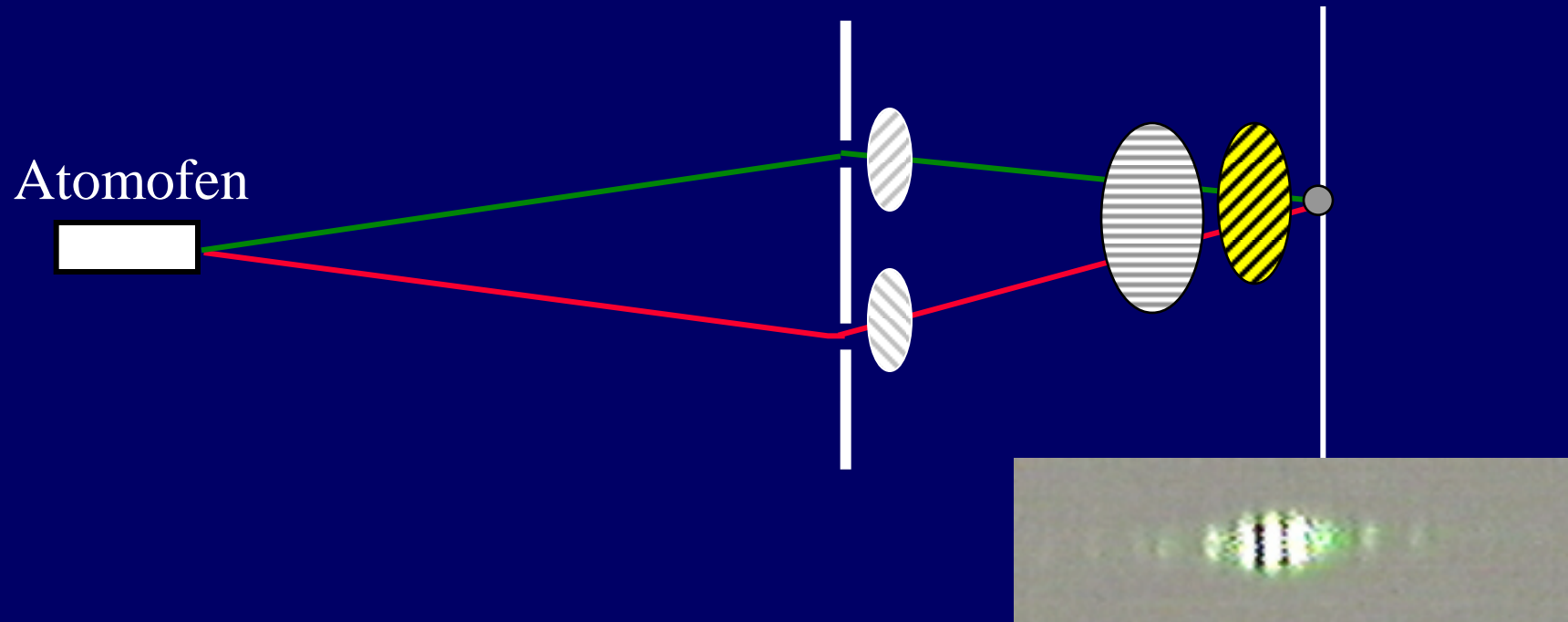
Geht durch: grüne k.d.M.

Wird absorbiert: rote k.d.M.

# Zusätzliche Folie: Quantenradierer



# Zusätzliche Folie: Quantenradierer



Zum Zeitpunkt des Nachweises ist keine Zuordnungs-Messung möglich.

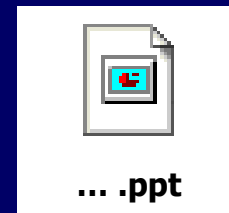
Geht durch: ??

Wird absorbiert: ??

# Die Wesenszüge der Quantenphysik

Powerpoint-Vortrag (ca. 10 MB) per Email.

**j.kueblbeck@gmx.de**



Detaillierte Darstellung in:

*„Die Wesenszüge der Quantenphysik  
Modelle, Bilder und Experimente“*

Zweite, überarbeitete Auflage

Aulis-Verlag,

**ISBN 3-7614-2464-7**

