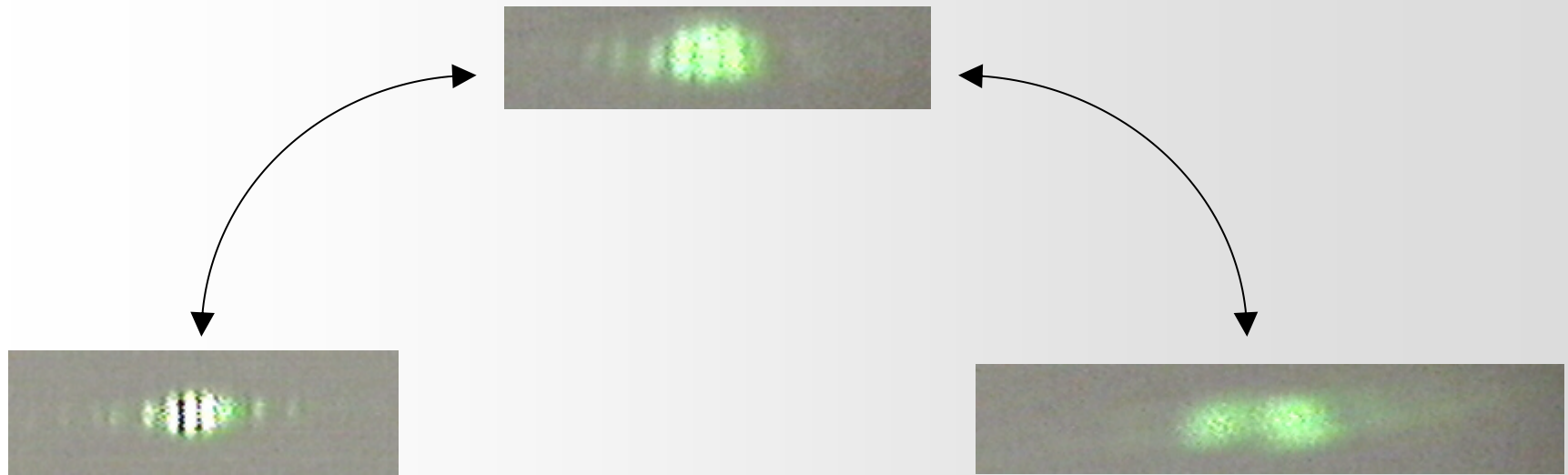




Komplementarität

Komplementarität beim Interferometer



Dr. Josef Küblbeck
Staatliches Seminar Stuttgart II
Mörrike-Gymnasium Ludwigsburg
j.kueblbeck@gmx.de

Komplementarität beim Interferometer

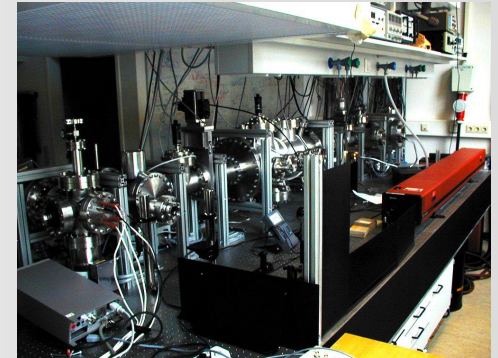
1. Interferenz im Quantenbereich

2. Komplementarität

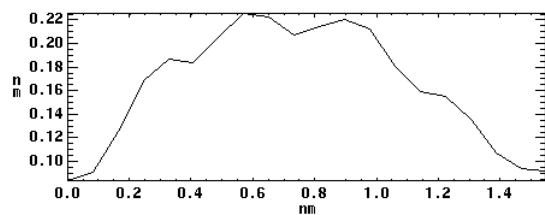
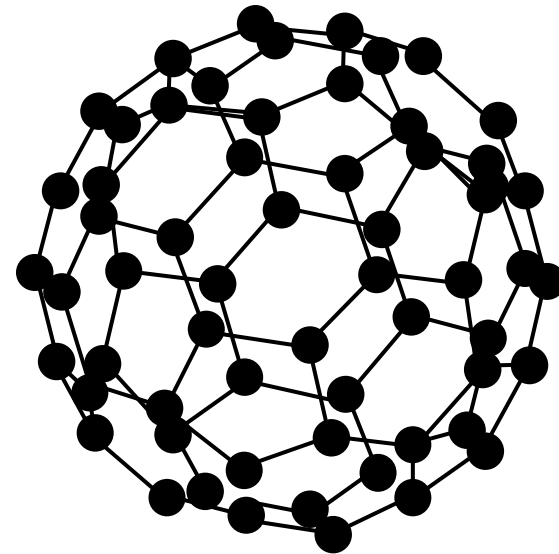
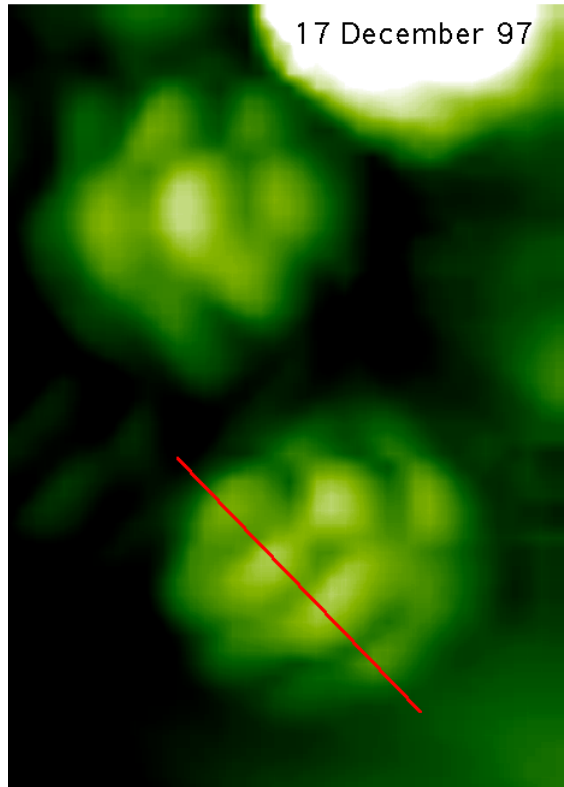
3. Eine Quantenblume



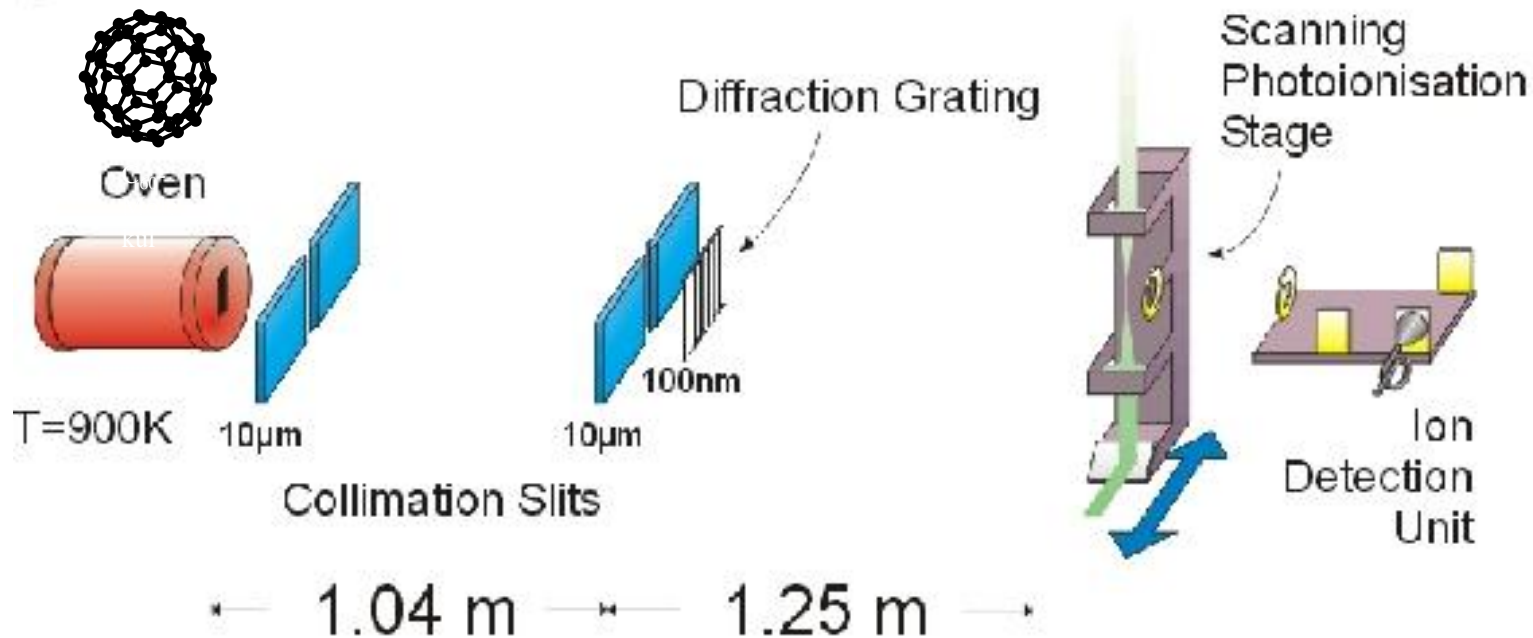
4. Quantenradierer-Experiment



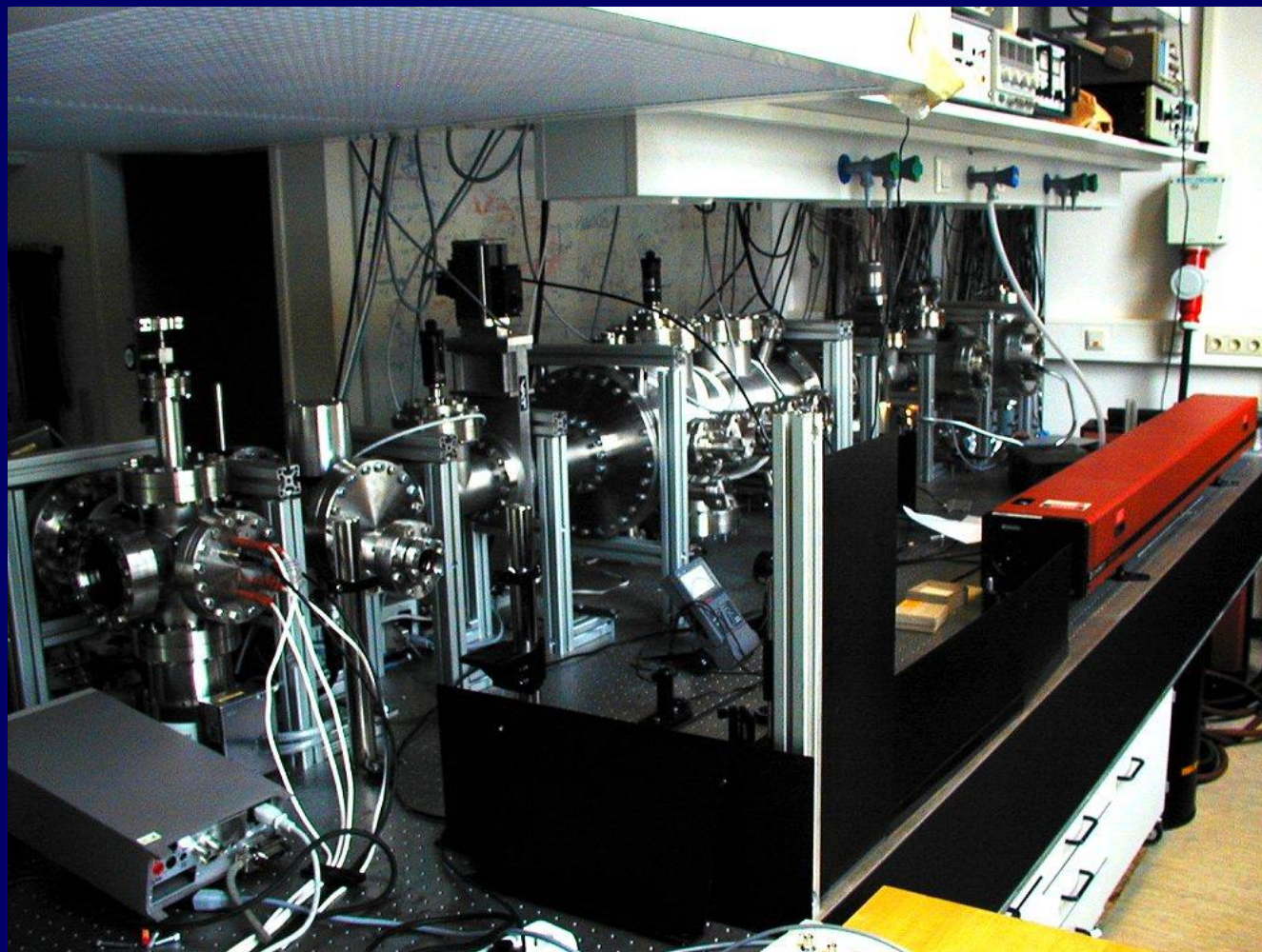
Interferenz: z.B: Das Fulleren-Experiment von Zeilinger et al. [1999]



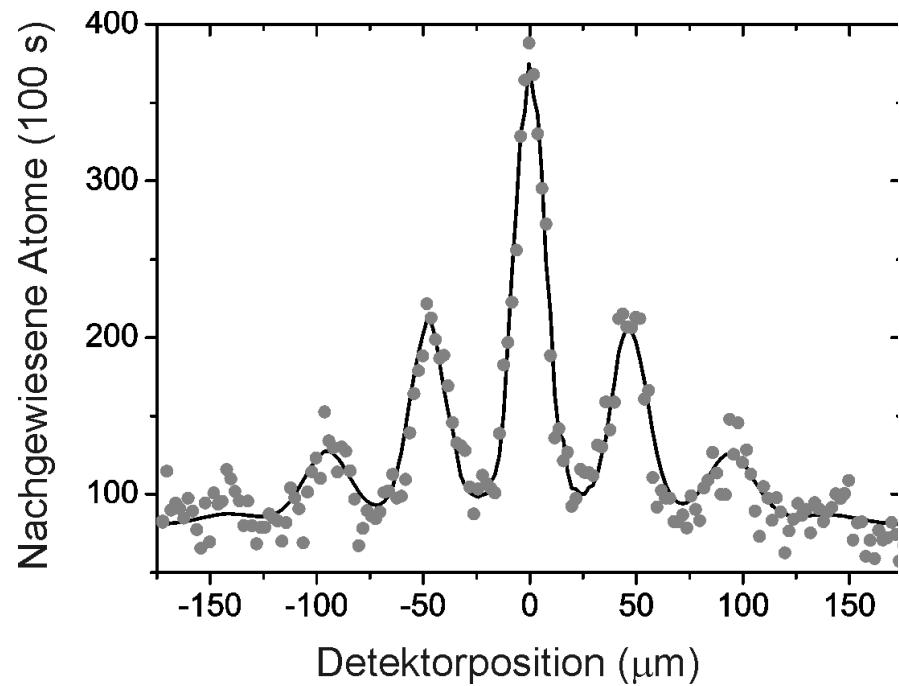
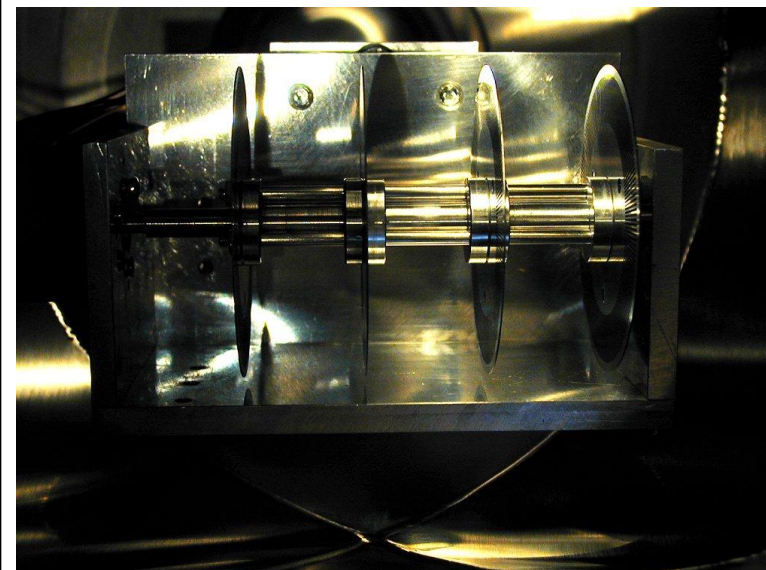
Das Fulleren-Experiment



Das Fulleren-Experiment

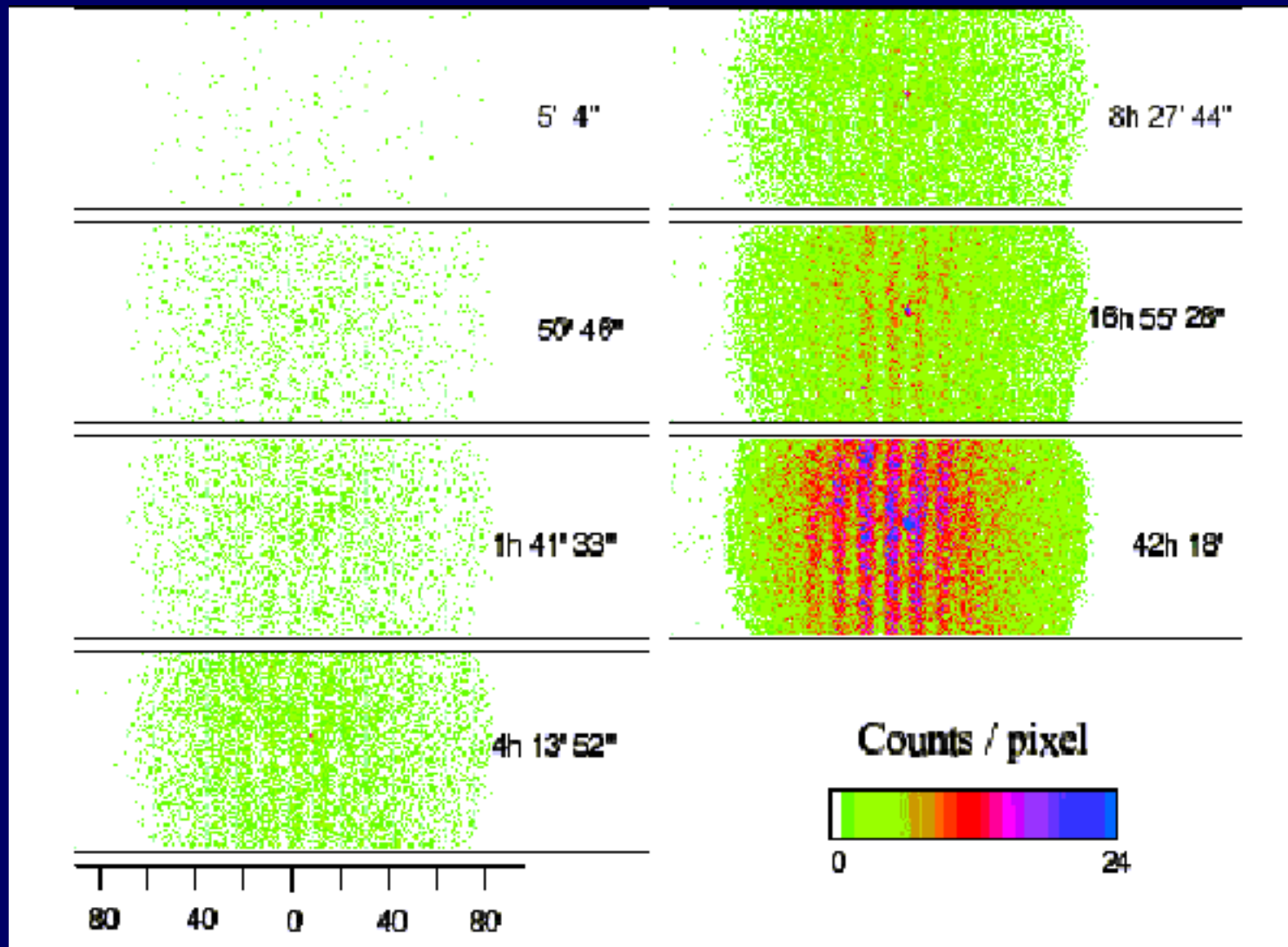


Das Fulleren-Experiment

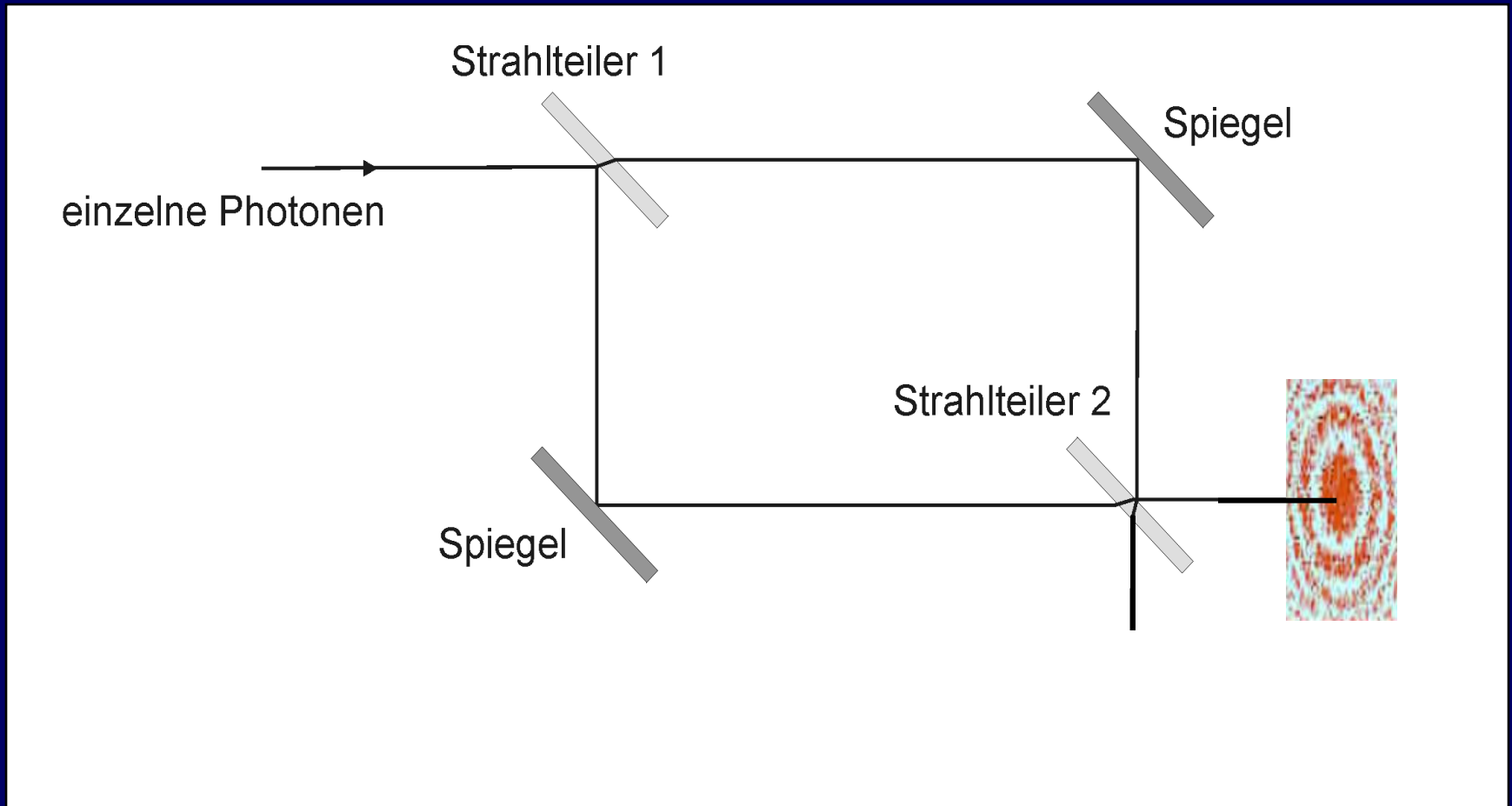


Fotos von Zeilinger et al. über W.Hirlinger

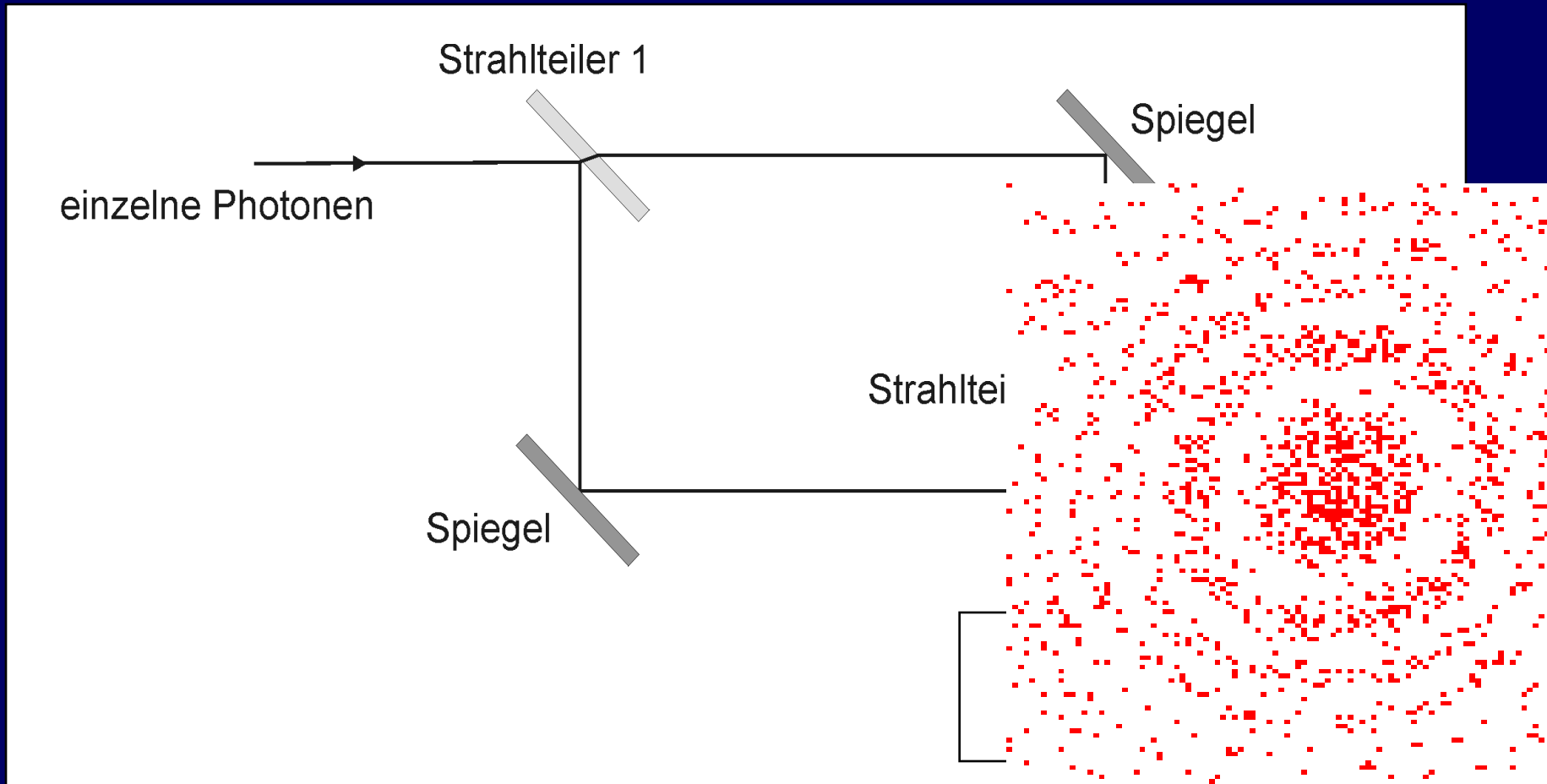
Oder: Heliumatome am Doppelspalt



Interferometer mit einzelnen Photonen

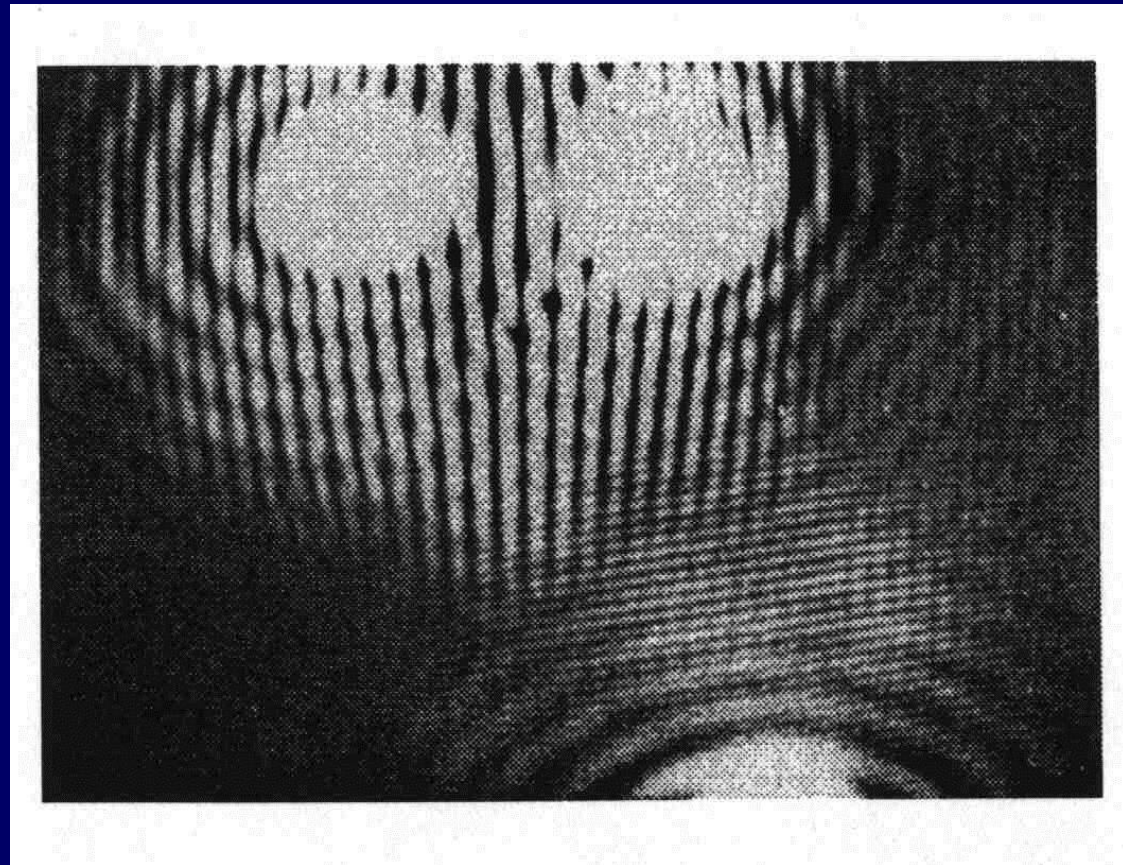


Interferometer mit einzelnen Photonen



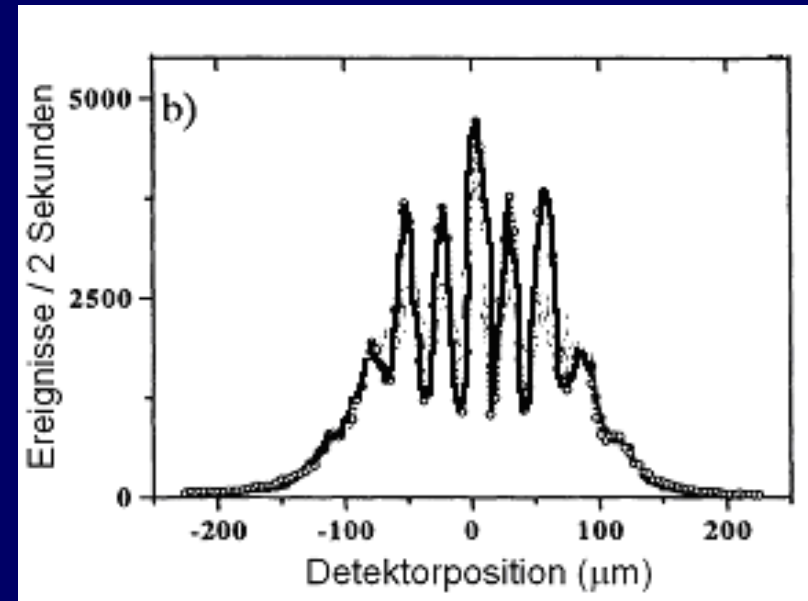
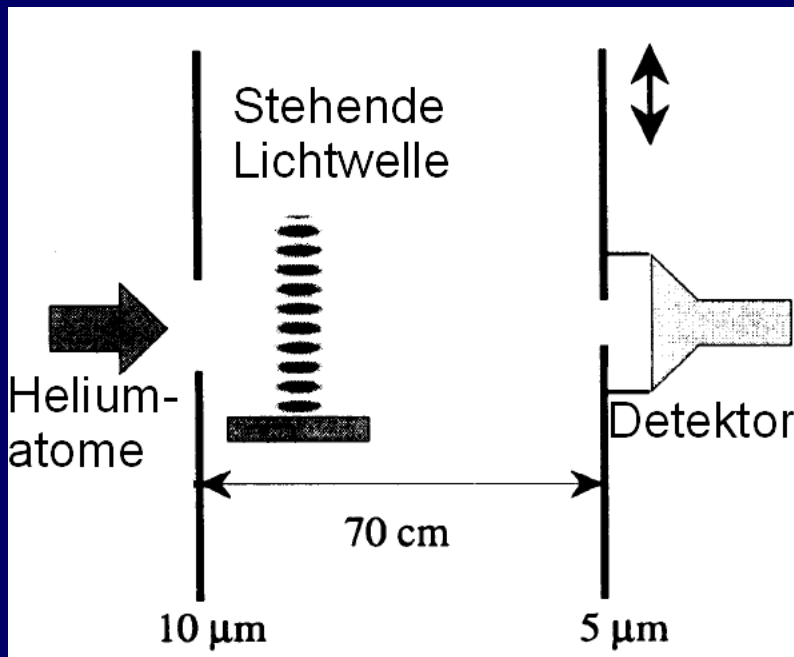
Streuung von Elektronen an Löchern

Mit Gold zugewachsenes Mikrosieb



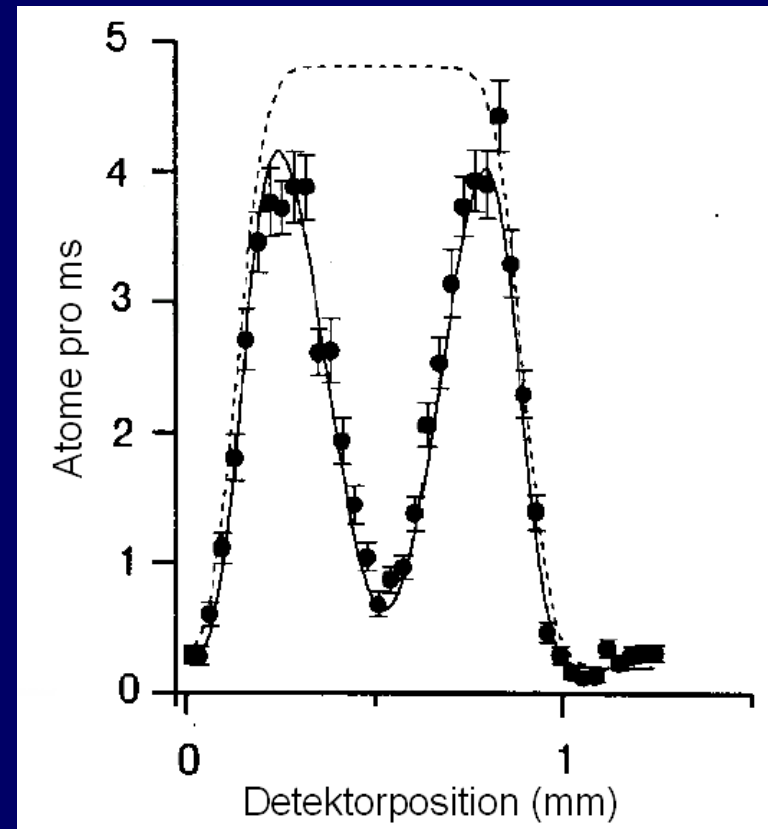
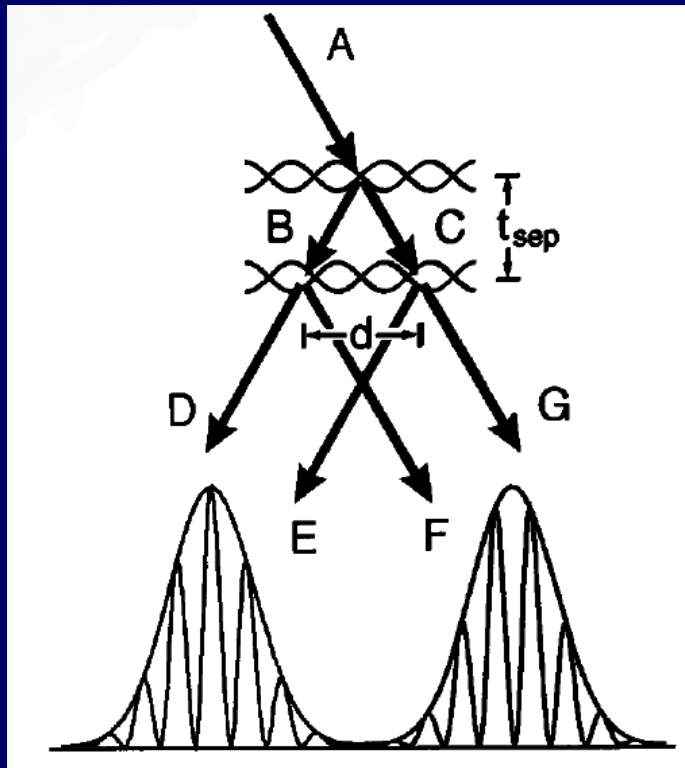
Beugung von Atomen

Pfau et al., Univ. Konstanz (1994)

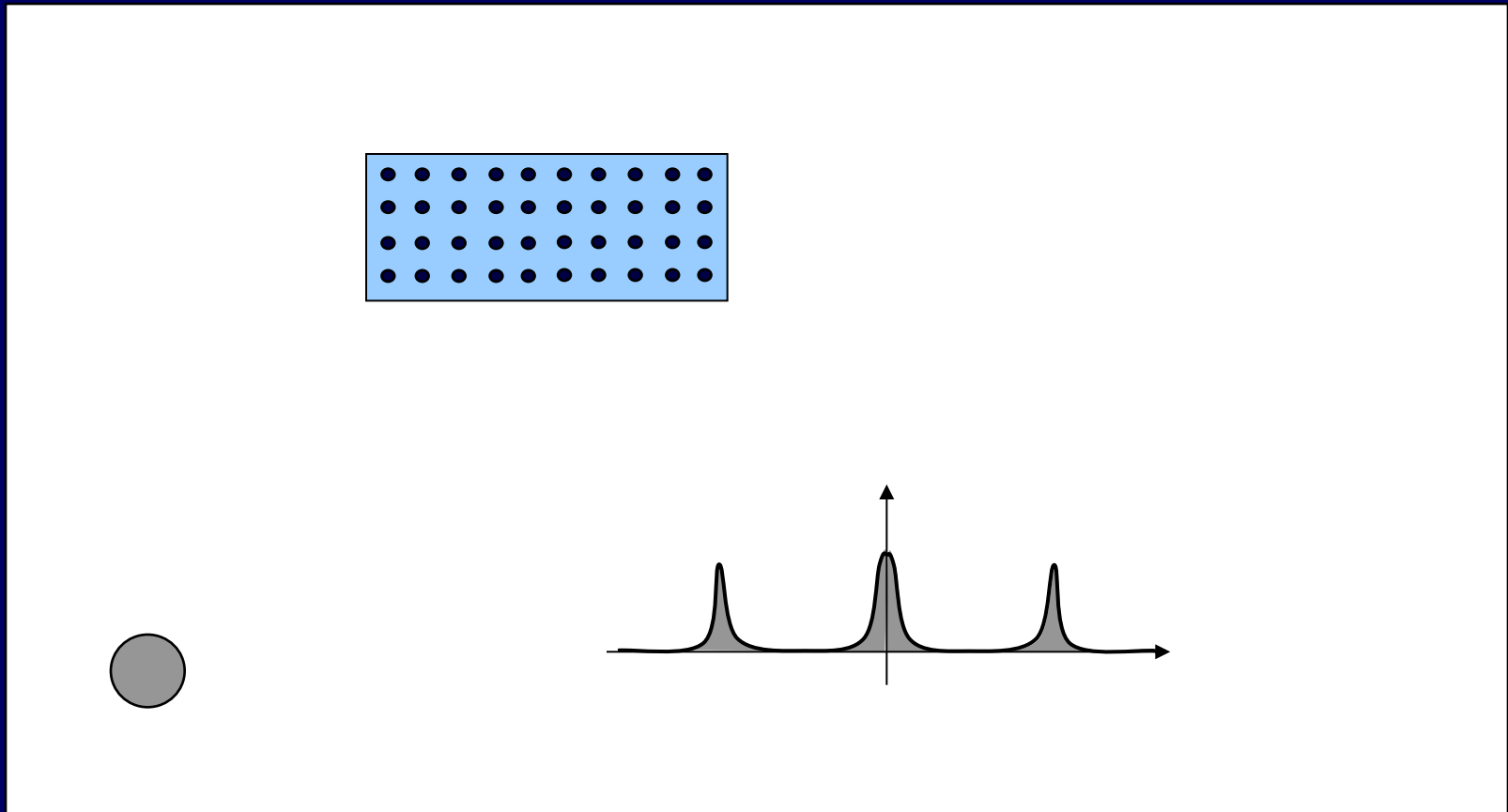


Atom-Interferometer

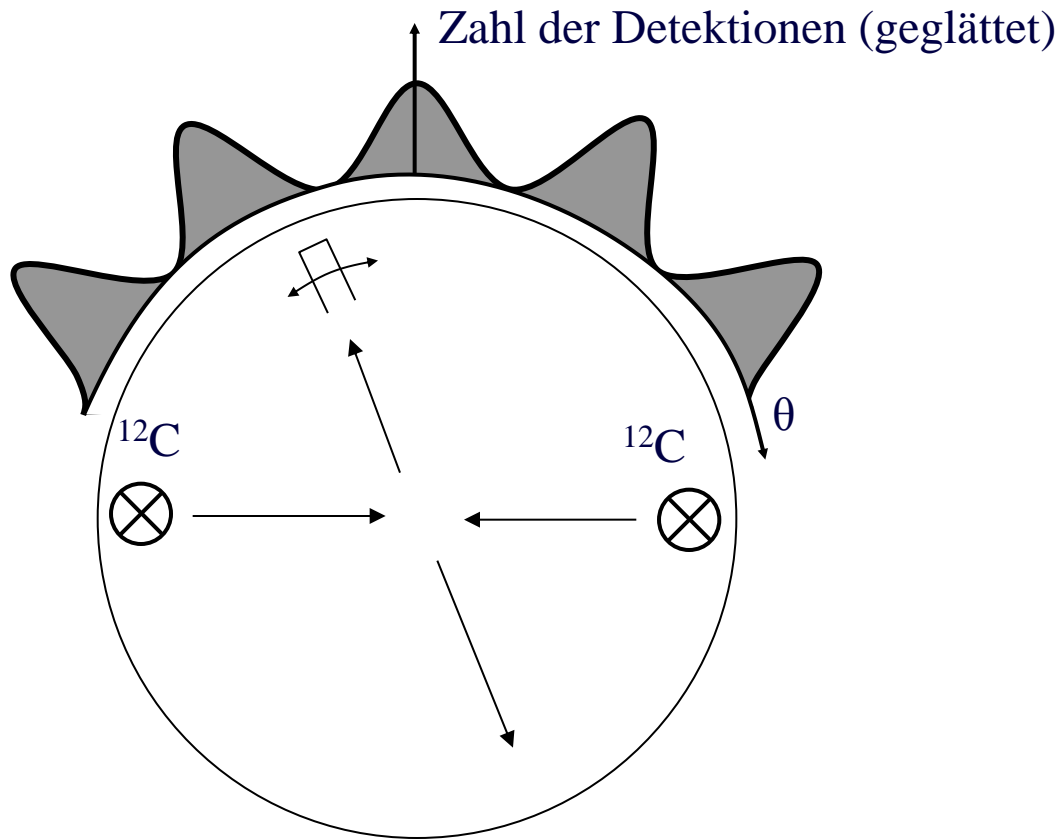
Dürr, Nonn, Rempe (1998)



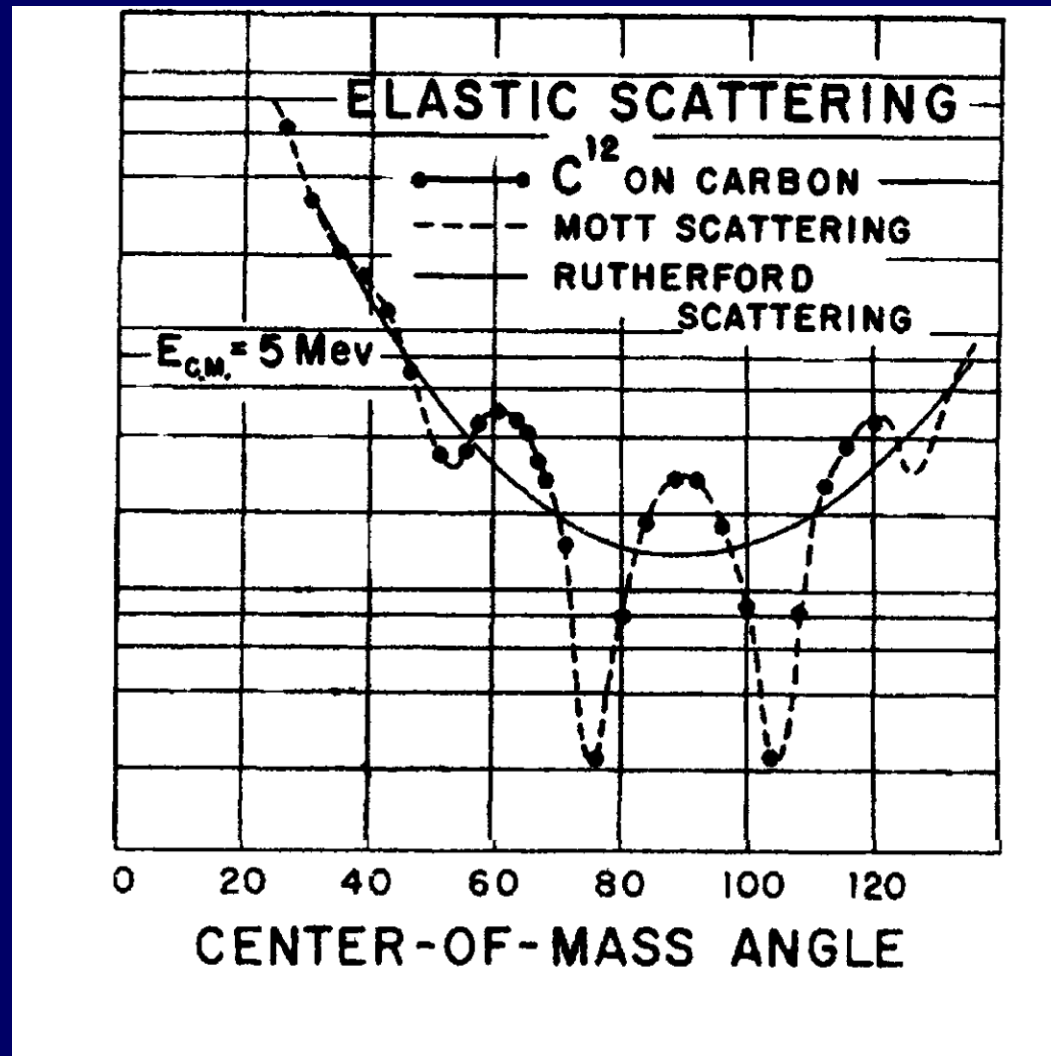
Beugung an Kristallen



Streuversuche



Streuversuche



Komplementarität beim Interferometer

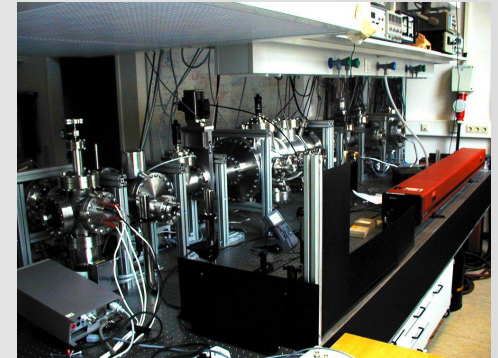
1. Interferenz im Quantenbereich

2. Komplementarität

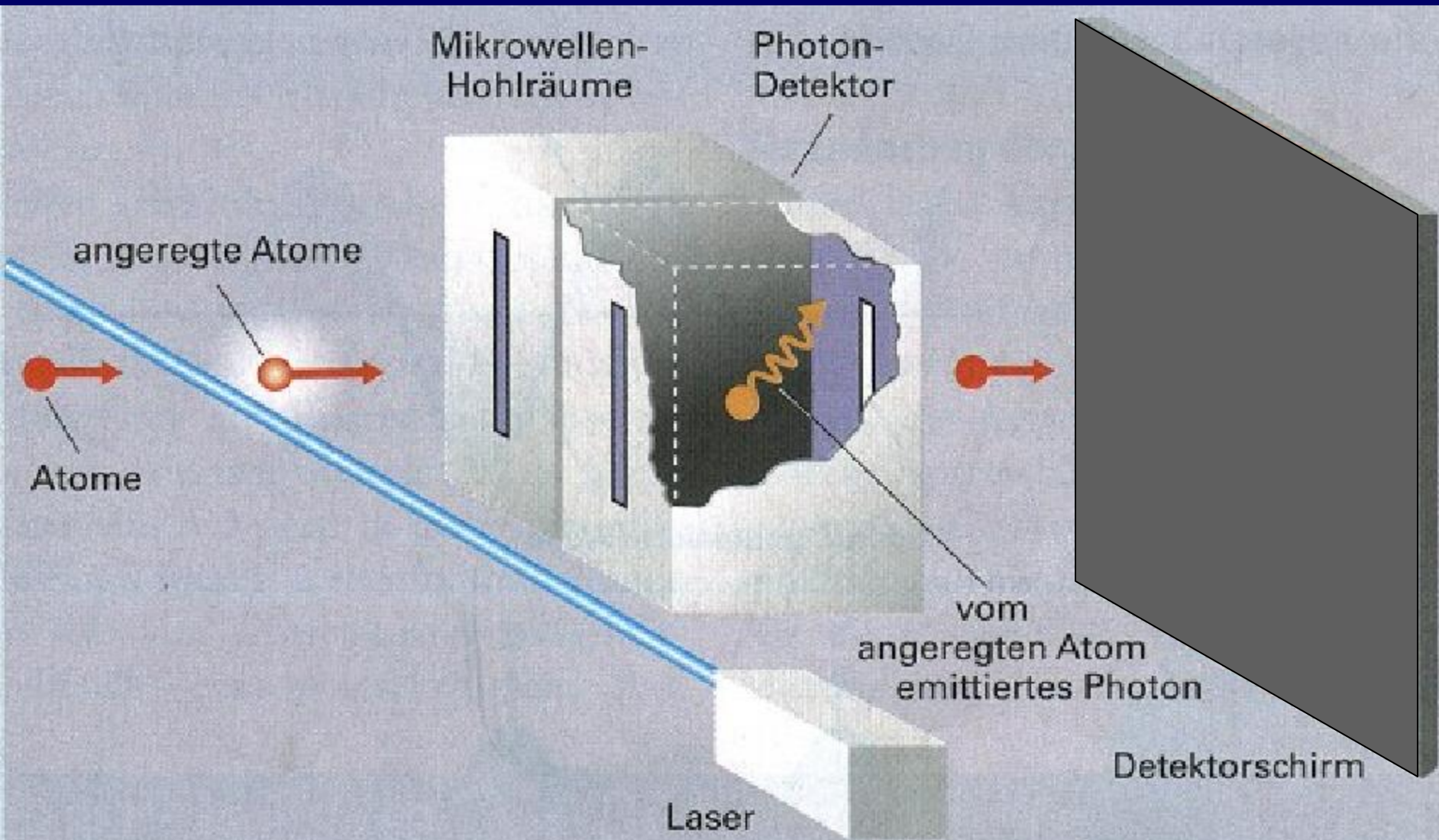
3. Eine Quantenblume



4. Quantenradierer-Experiment



Gedankenexperiment von Scully et al.



Doppelspalt-Experiment:

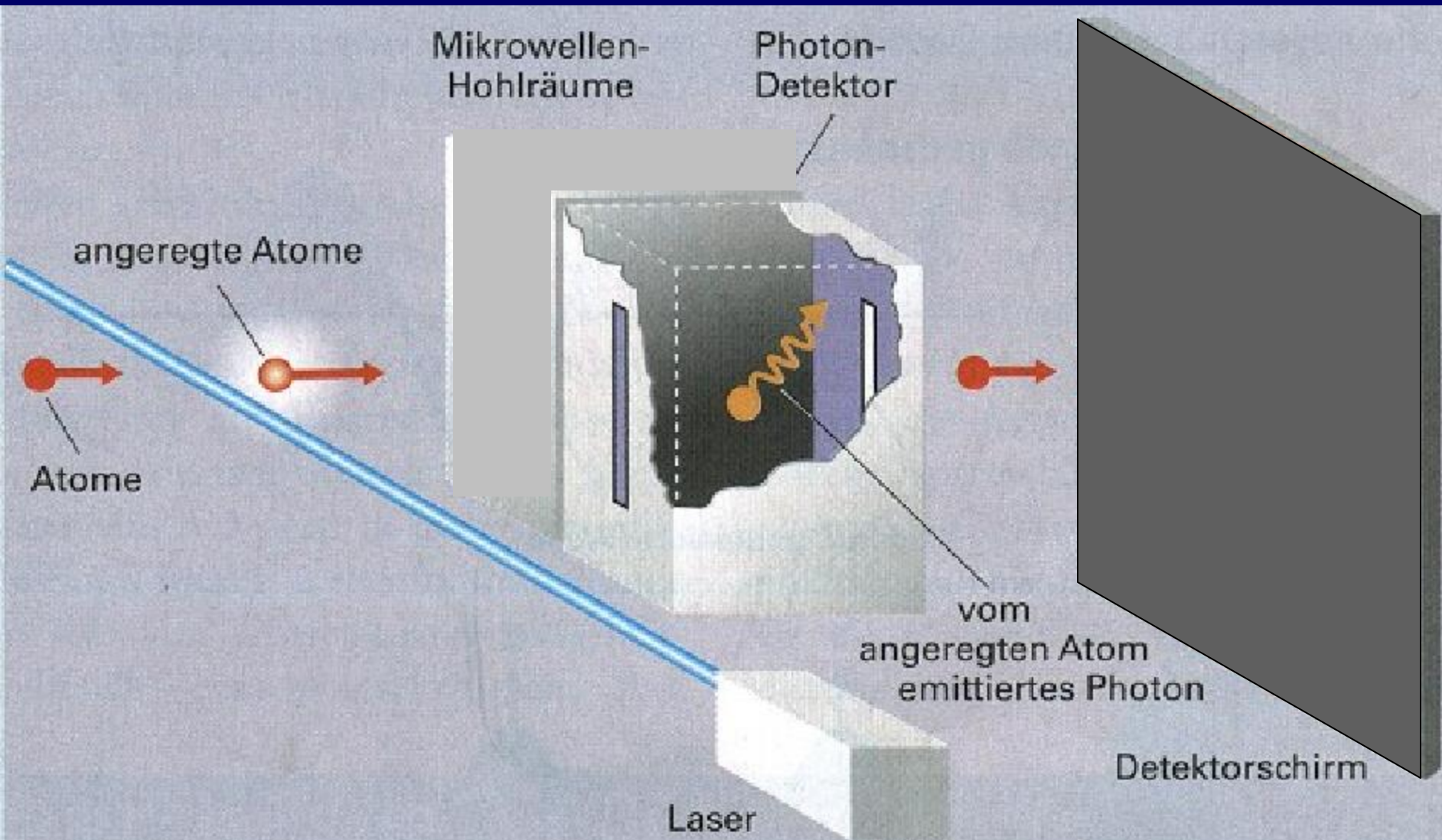
Ortsmessung an den Spalten

Welche Ergebnisse können auftreten?

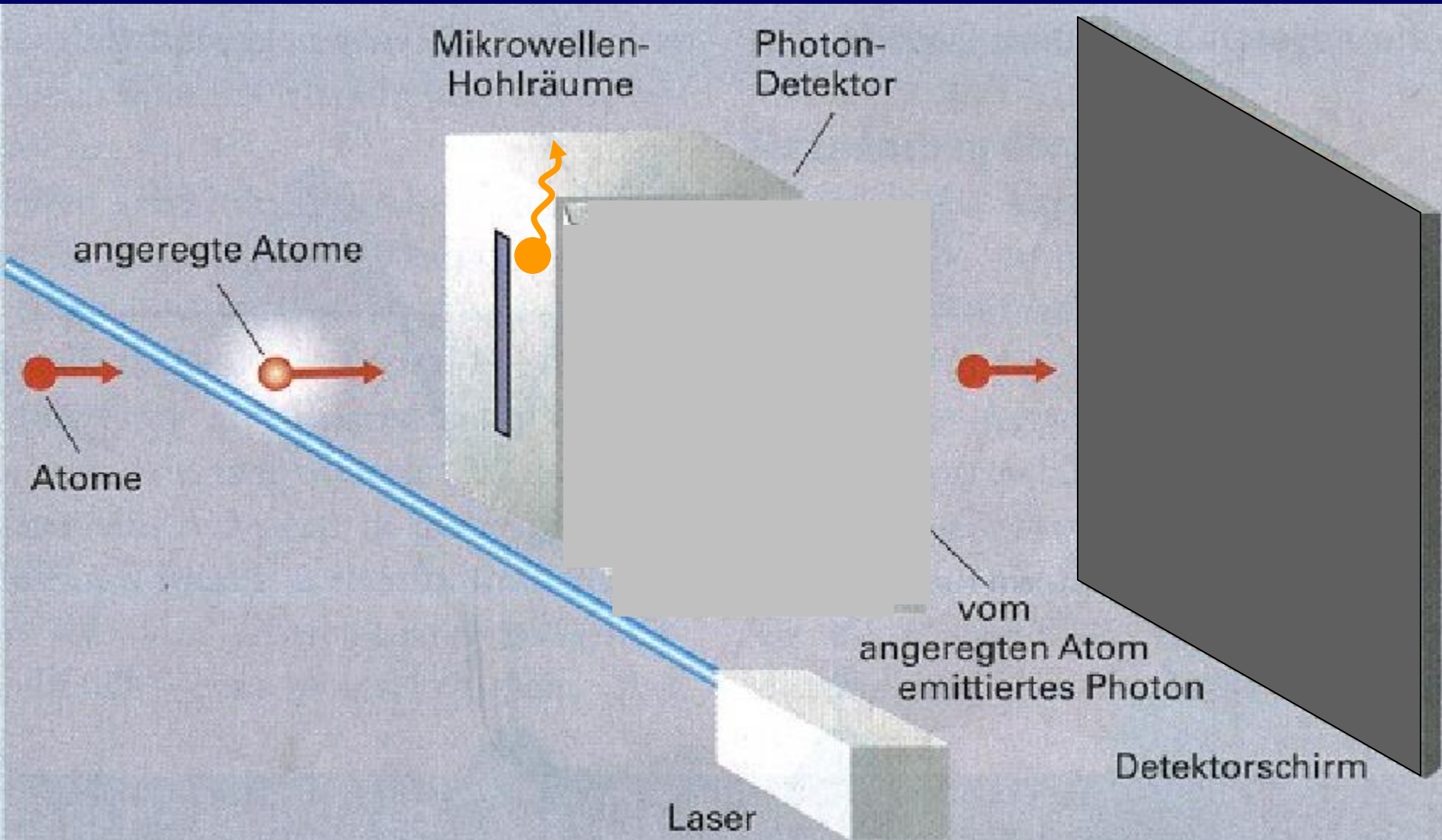
Ergebnis 1:

Stets gibt genau einer der beiden Detektoren ein Signal.

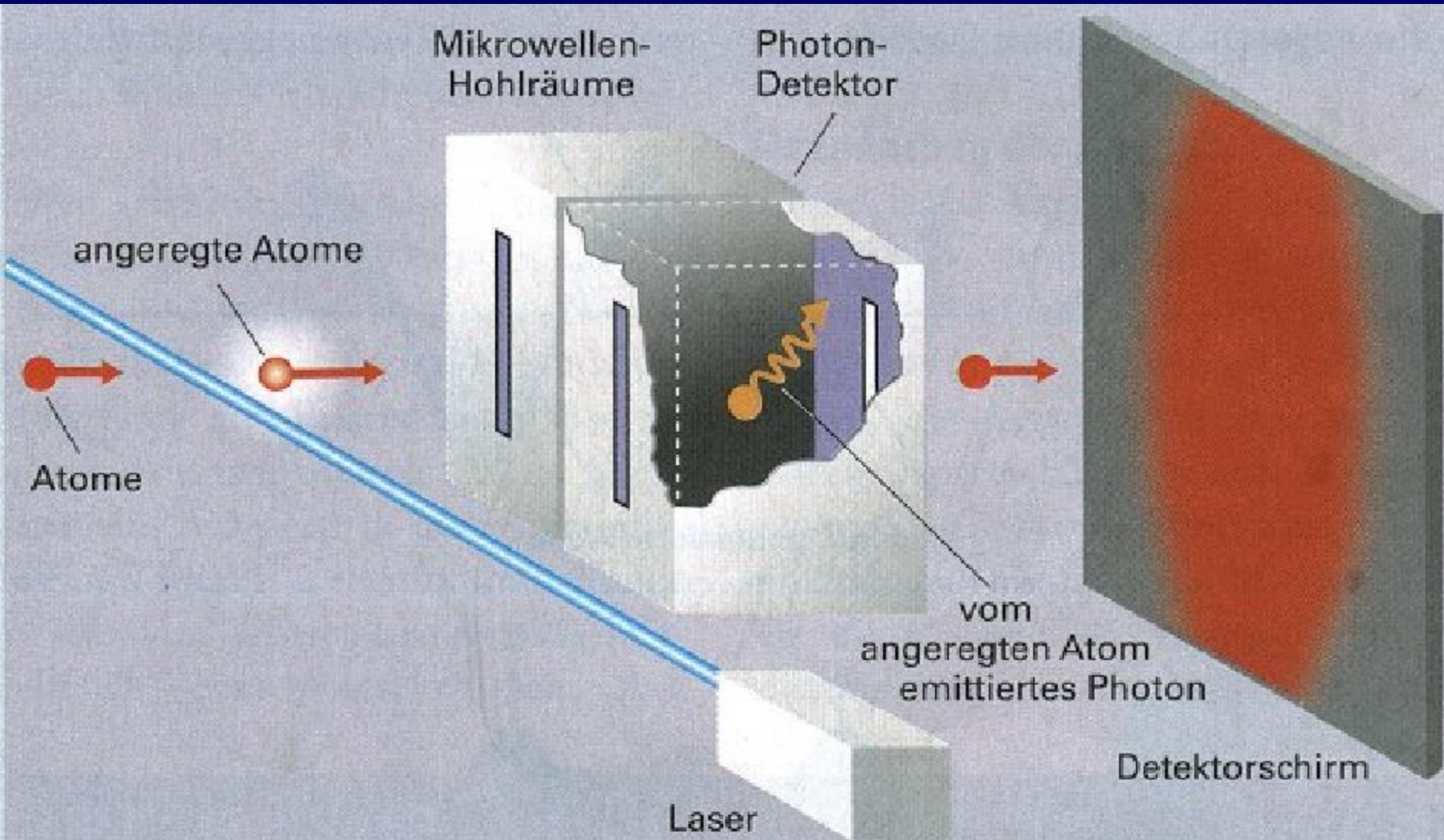
Ergebnis 1:



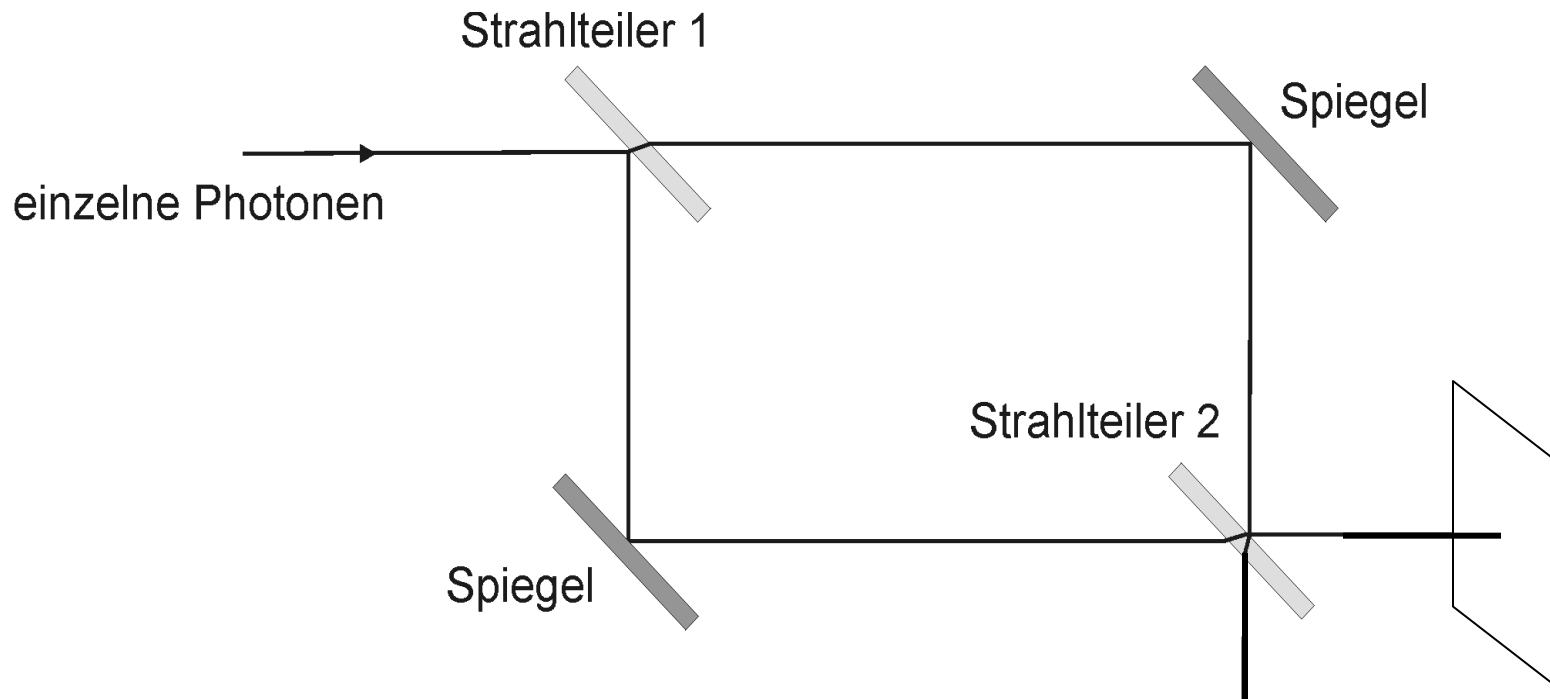
Ergebnis 1:



Ergebnis 2: Das Interferenzmuster ist nicht mehr beobachtbar.

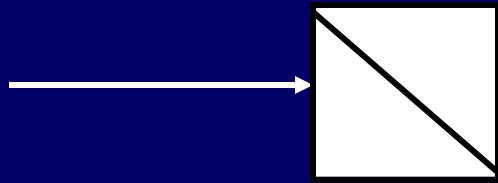


Umsetzung im Real-Experiment: Interferometer mit einzelnen Photonen



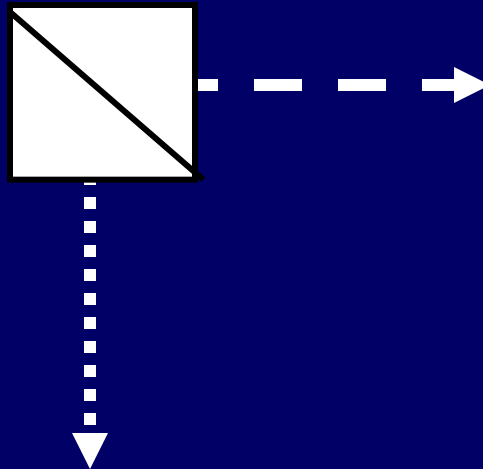
Photonen-“Spaltung”

Nichtlinearer
Kristall

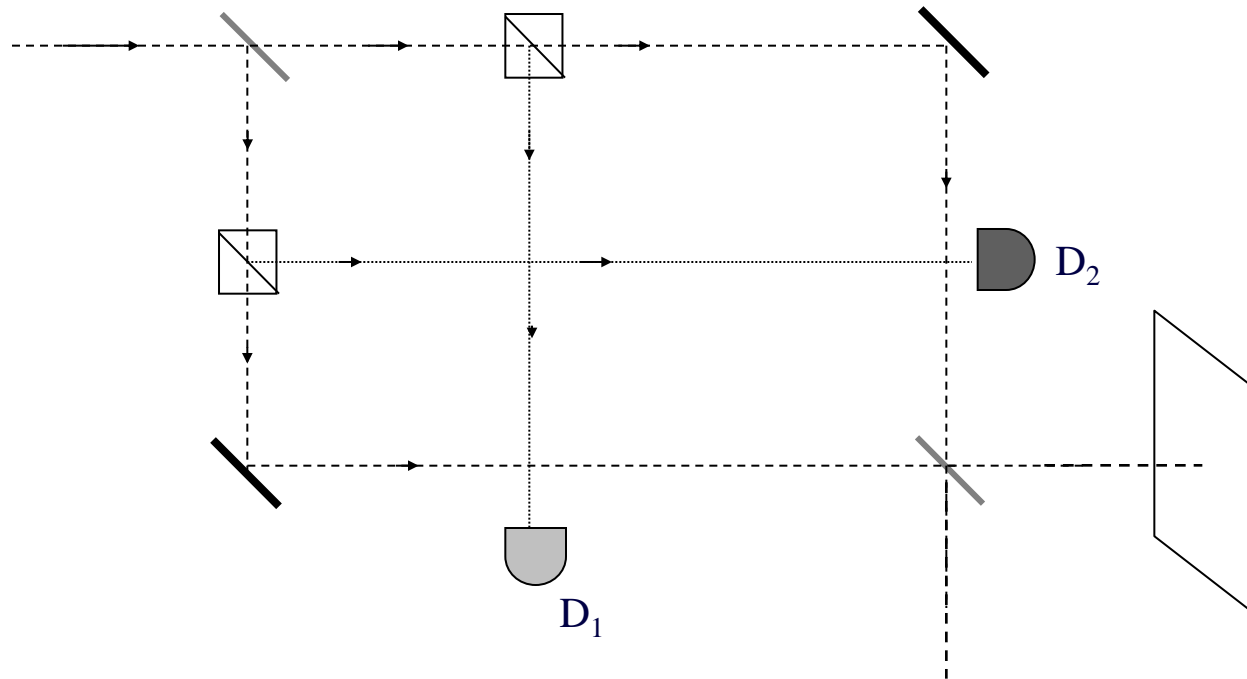


Photonen-“Spaltung”

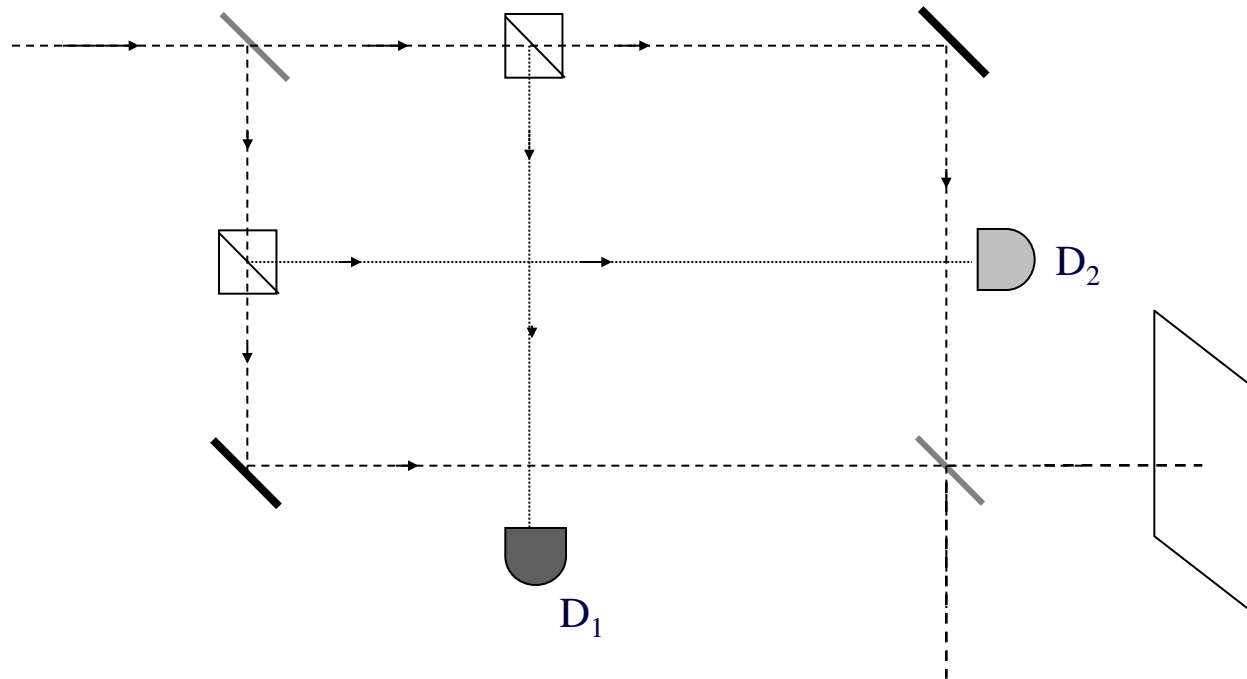
Nichtlinearer
Kristall



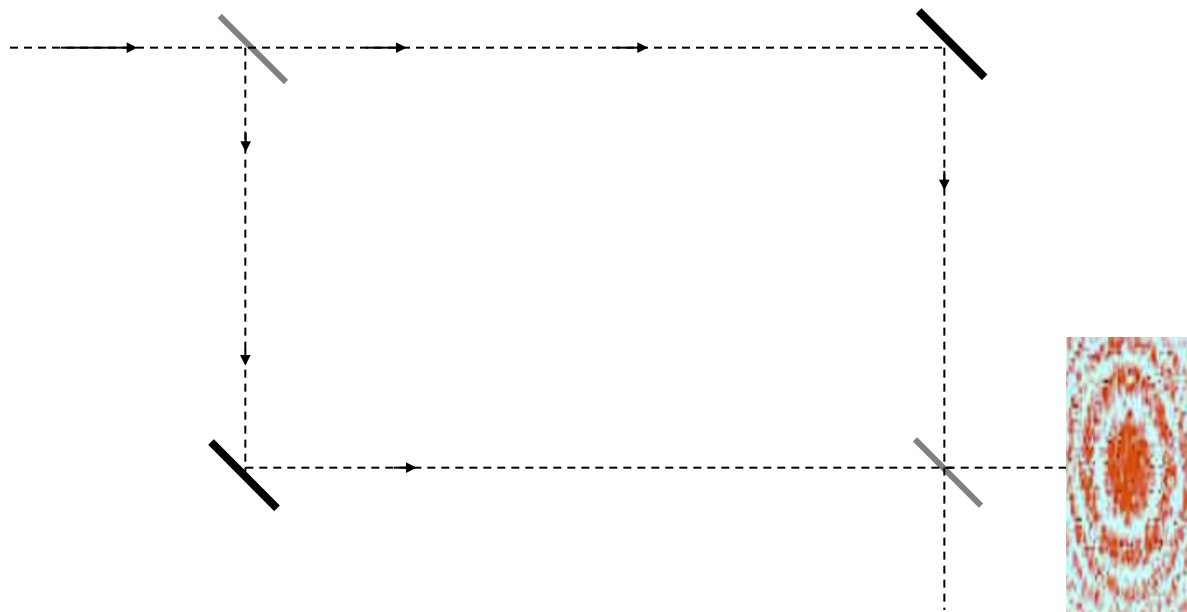
Photonen-“Spaltung” im Interferometer



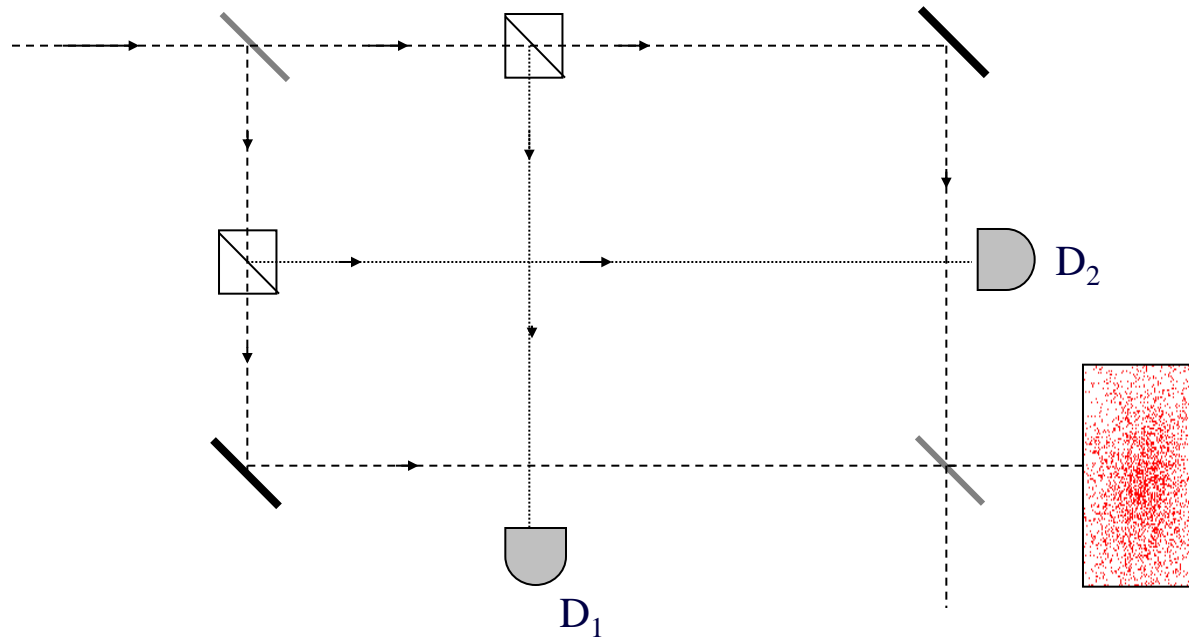
Photonen-“Spaltung” im Interferometer



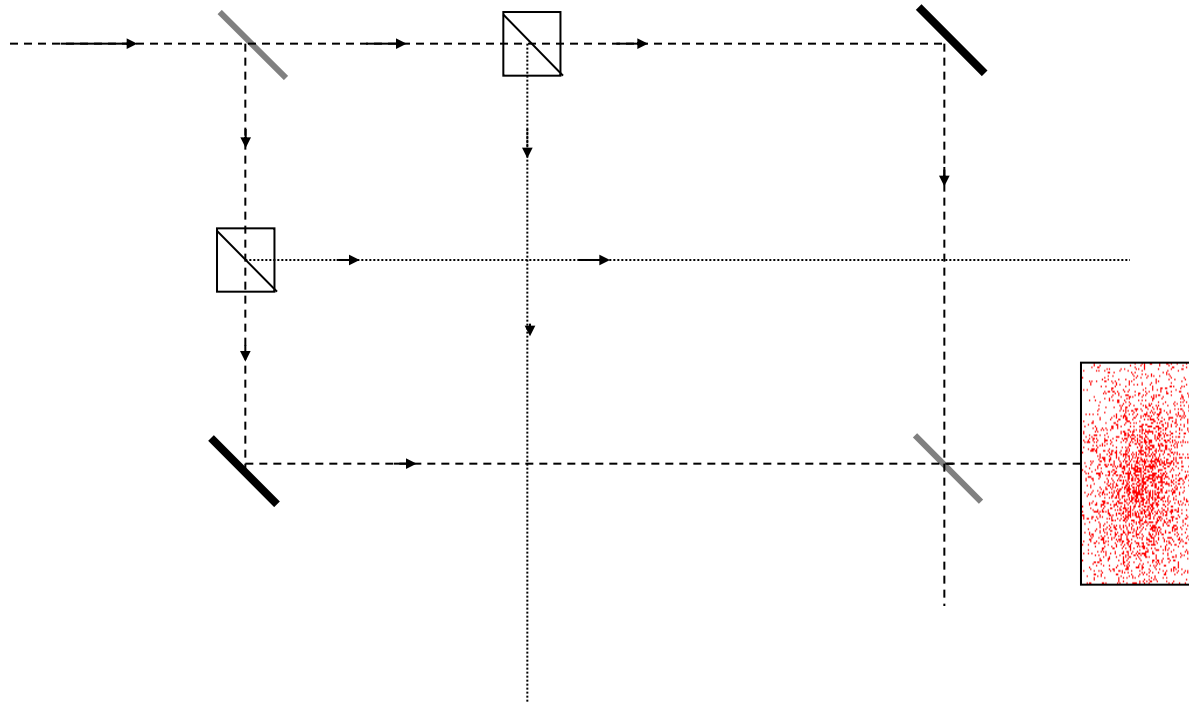
Interferometer mit einzelnen Photonen



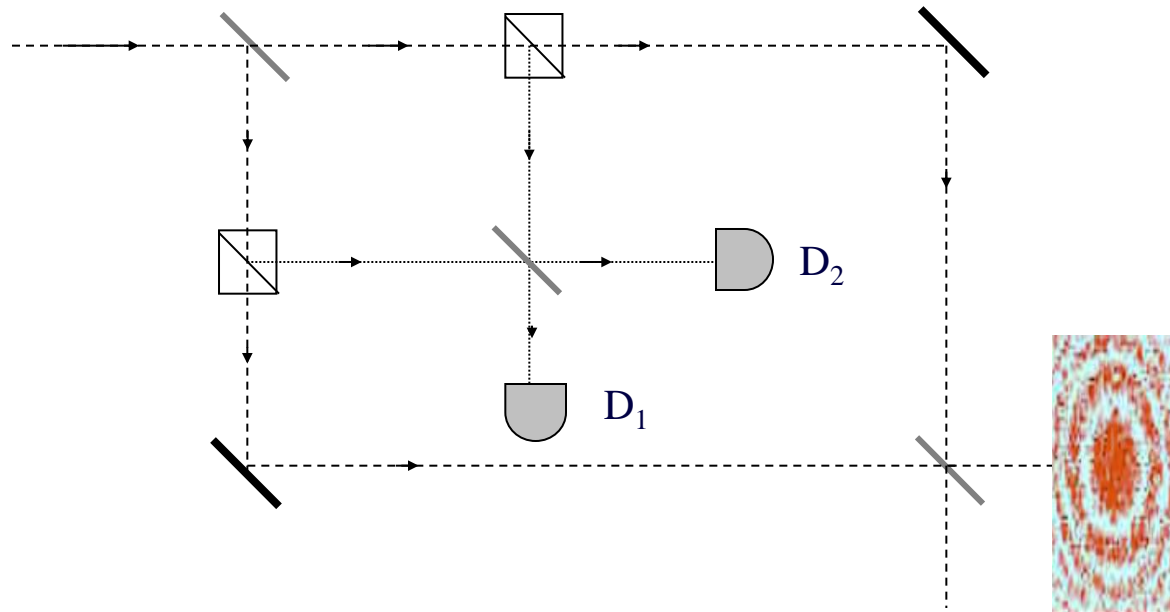
Photonen-“Spaltung” im Interferometer



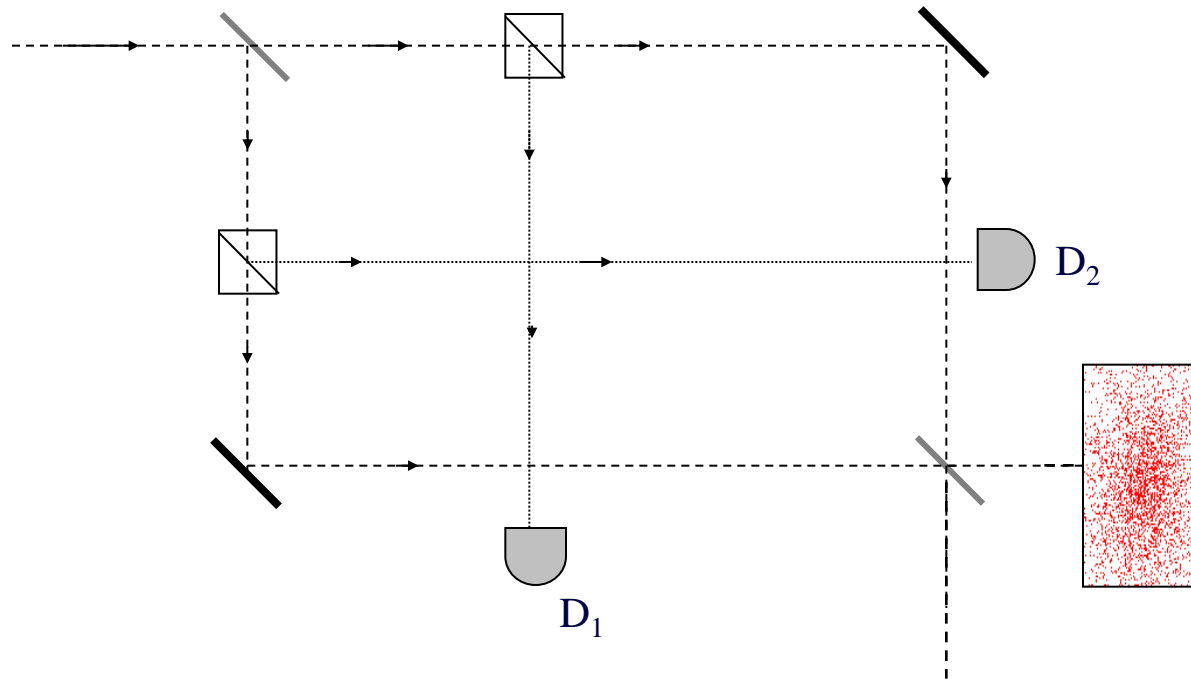
Photonen-“Spaltung” im Interferometer



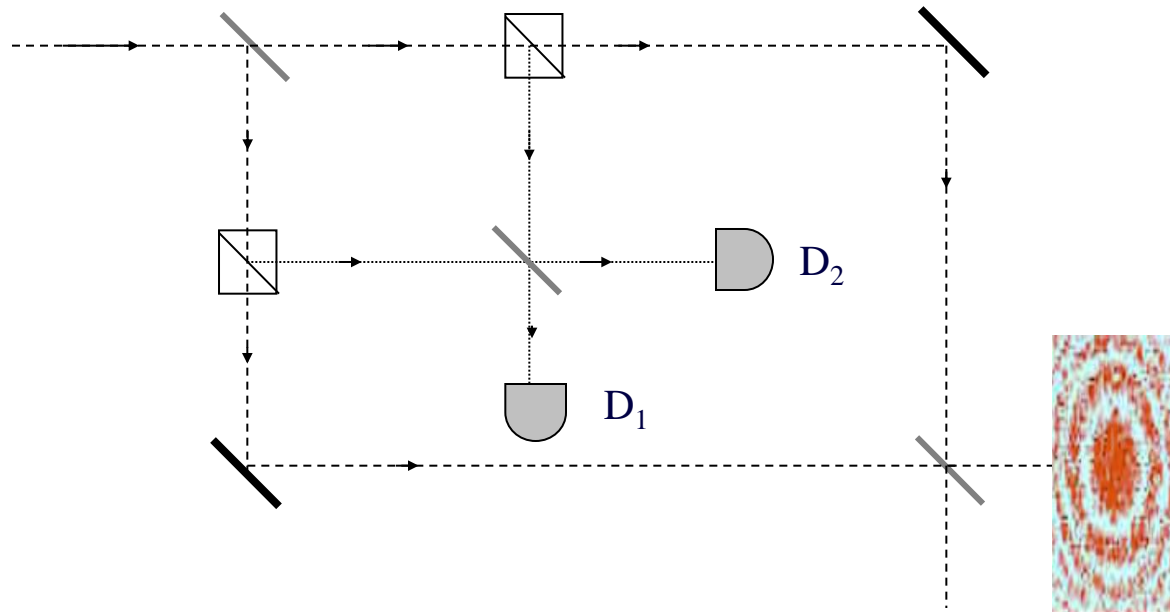
Photonen-“Spaltung” im Interferometer



Die Möglichkeit genügt ...



Auf den Zeitpunkt kommt es an!



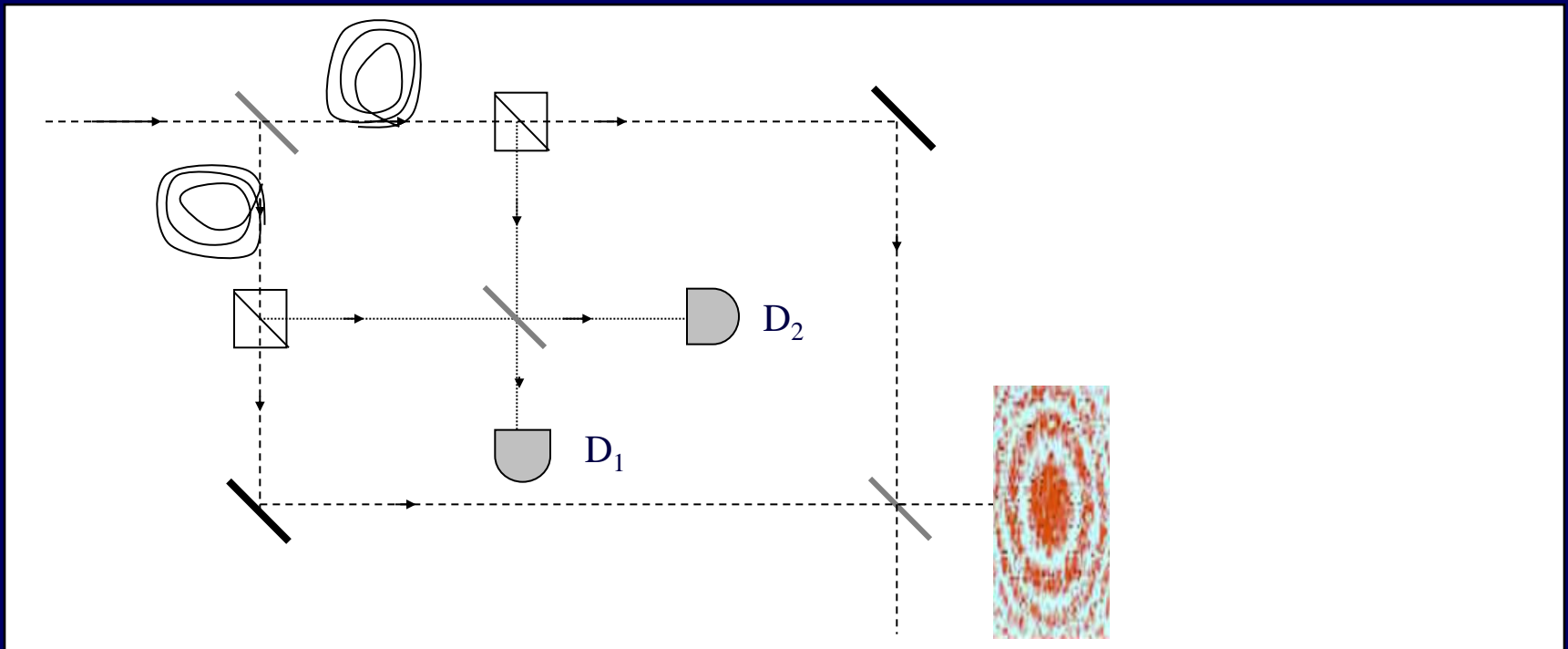
Experiment von J. Roch et al

http://www.physique.ens-cachan.fr/franges_photon/index.htm

Interferometer mit Weglänge von 48m

„Modulator“, der innerhalb einer millionstel Sekunde Interferenz aus/anschalten kann.

Prinzip:



Merkwürdiger Sachverhalt: Merkwürdige Sprache?

FAZ, 28.2.07

„Ein Eingriff in die Vergangenheit“

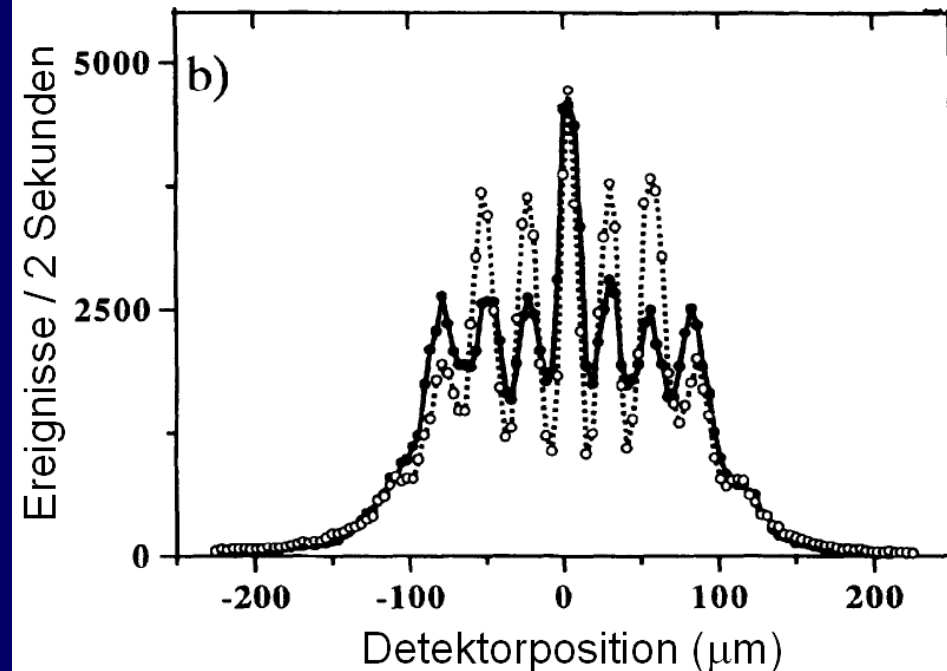
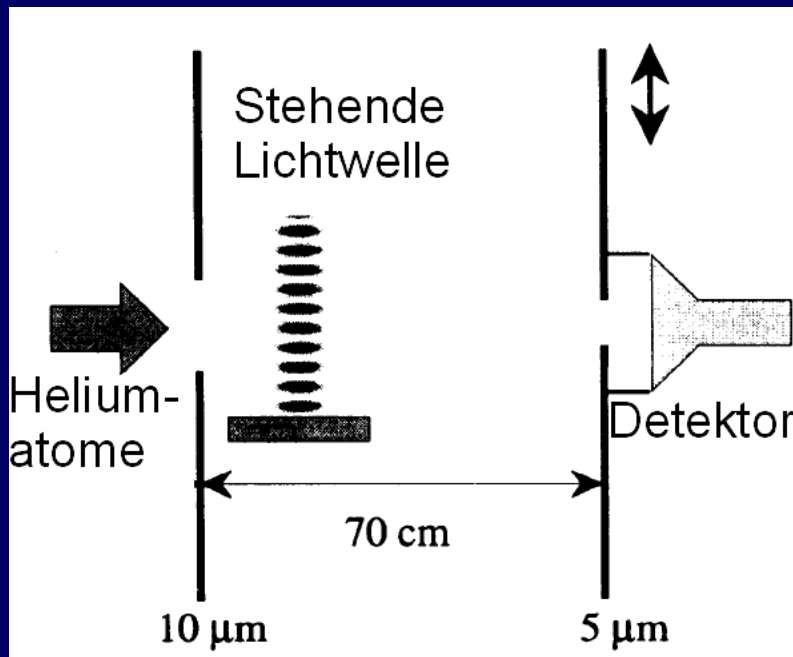
„Obwohl sich durch den Zustand des Modulators erst nachträglich entschied, ob ein Interferenzexperiment oder ein Versuch mit Partikeln ausgeführt wurde, verhielten sich die Photonen am Strahlteiler stets richtig: mal als Wellen, mal als Teilchen.“

Komplementarität beobachtet man
in vielerlei Experimenten!

Sie ist gewissermaßen „typisch“ für die Quantenphysik.

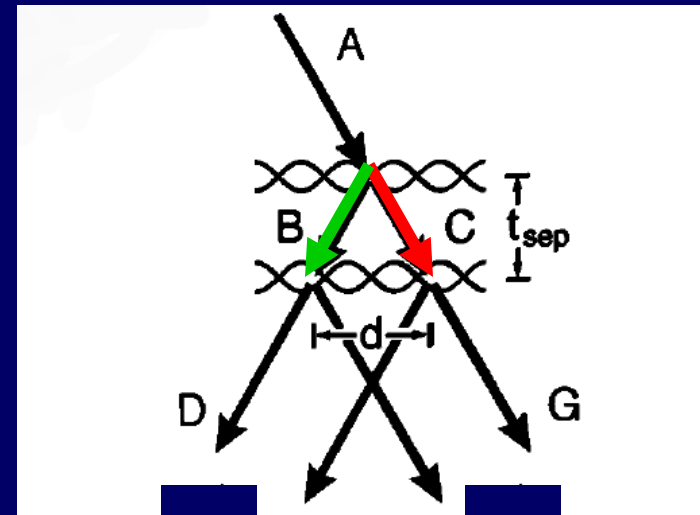
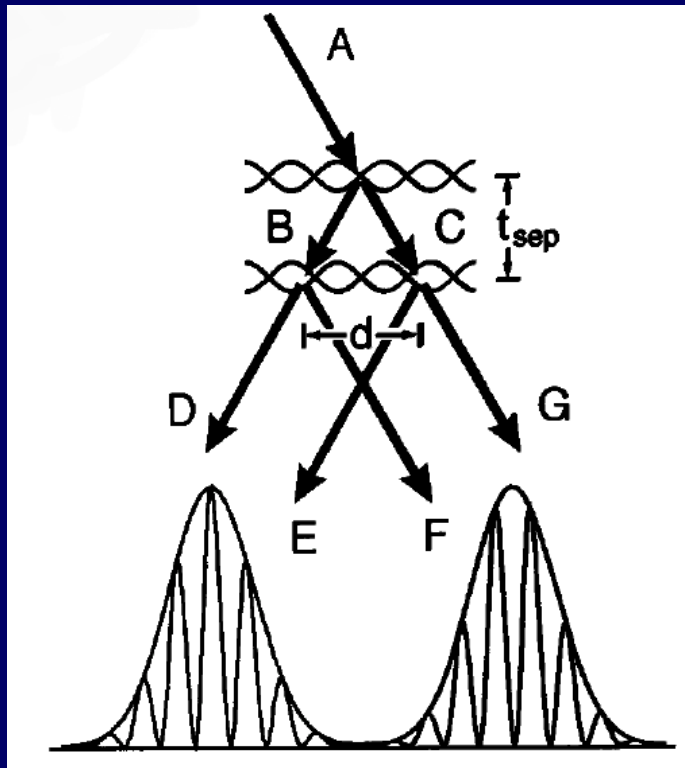
Beugung von Atomen

Pfau et al., Univ. Konstanz (1994)



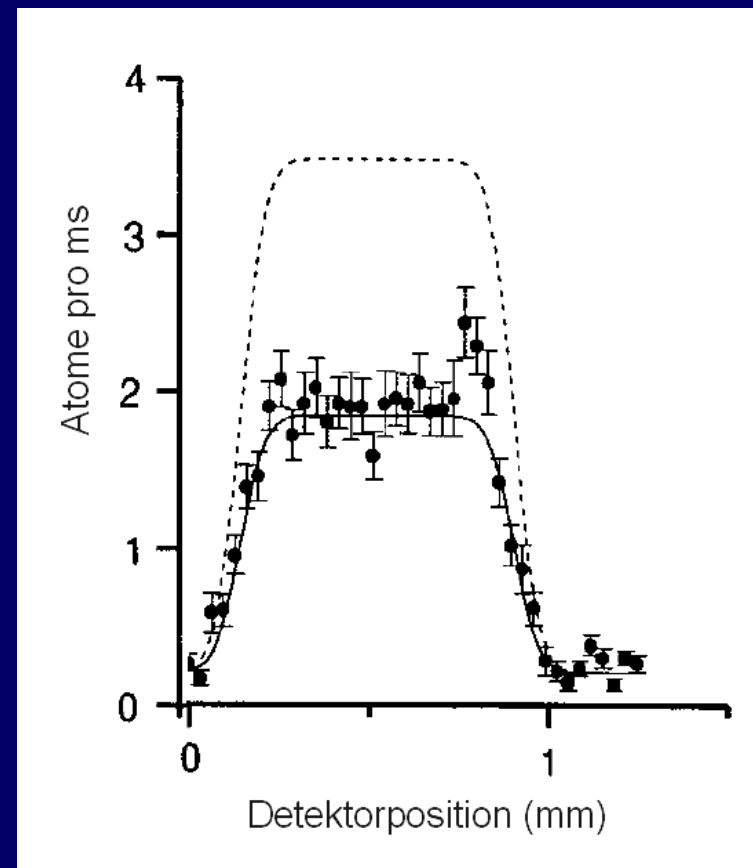
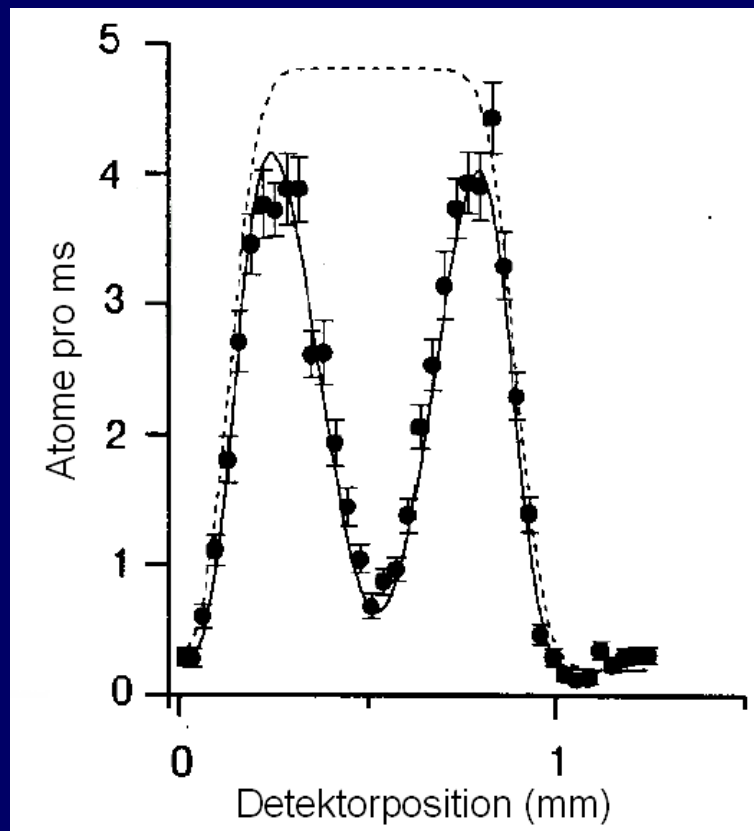
Atom-Interferometer

Dürr, Nonn, Rempe (1998)

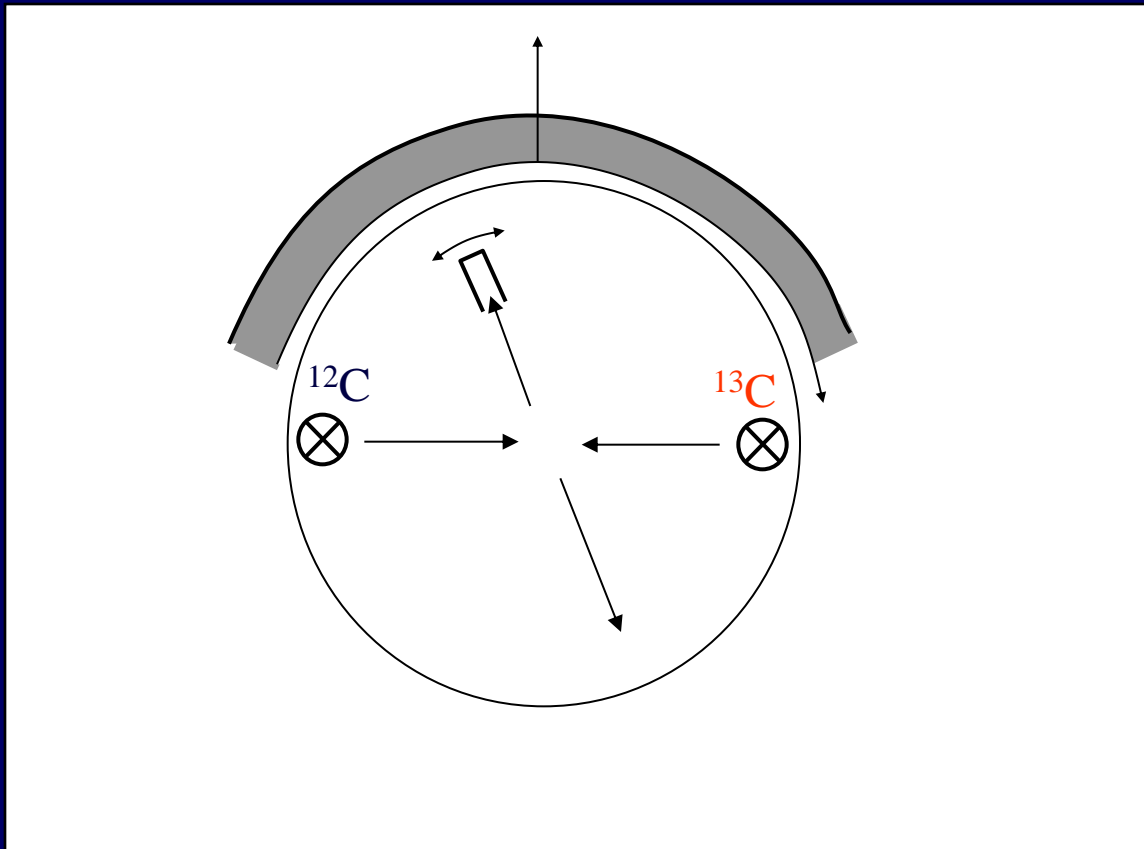


Atom-Interferometer

Ergebnis:



C-C-Streuung



Komplementarität beobachtet man
in vielerlei Experimenten!

Sie ist gewissermaßen „typisch“ für die Quantenphysik.

Sie zeigt sich auch im Formalismus.

Komplementarität zeigt sich auch im Formalismus:

Wenn es mehrere Beiträge zur selben Amplitude gibt:

ununterscheidbar → erst (komplex) addieren
unterscheidbar → erst (komplex) addieren

Allgemein:

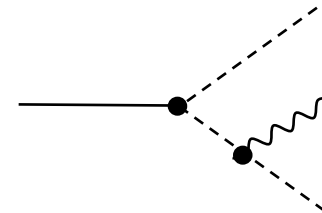
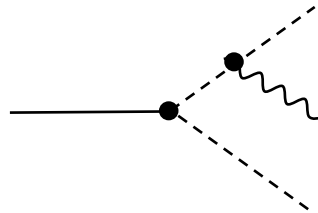
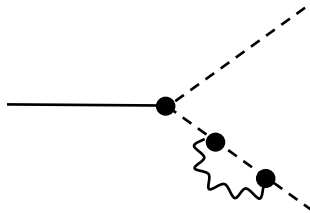
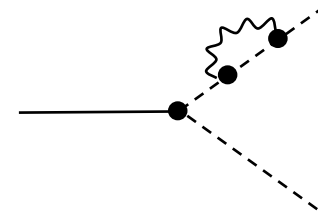
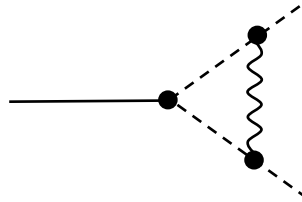
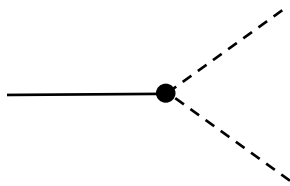
Untermengen von ununterscheidbaren Amplituden bilden

Für jede Untermenge:

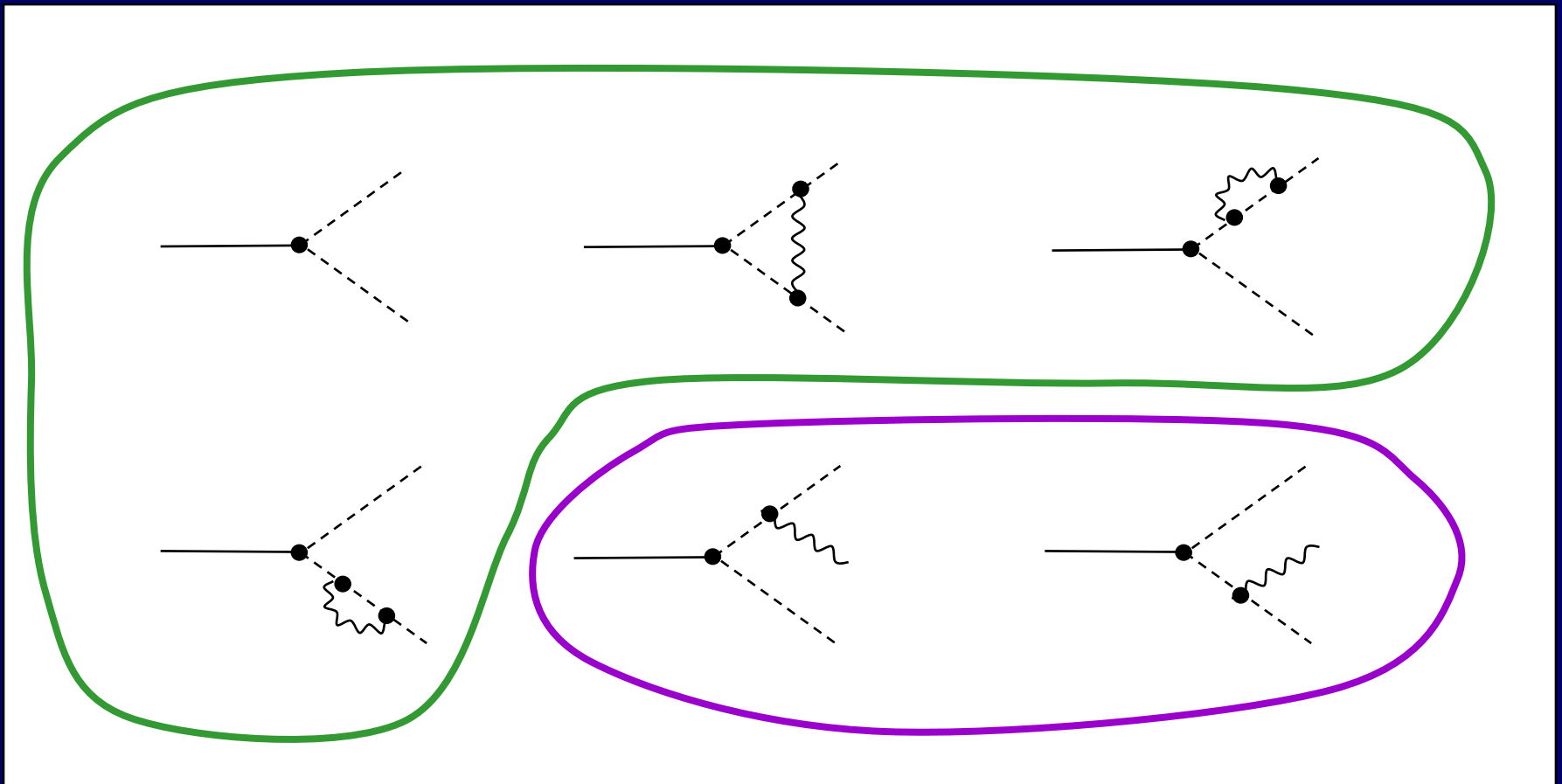
Amplituden komplex addieren,
dann quadrieren.

Anschließend die Quadrate summieren.

Ein Beispiel aus der Elementarteilchen-Physik: Der Kaon-Zerfall in zwei geladene Pionen:



Feynman-Graph \rightarrow Zeiger (= komplexe Zahlen)
mit Hilfe der „Feynman-Regeln“



Berechnung der Zerfallsrate

$$P(\theta) \sim \left| \begin{array}{l} \text{---} \bullet \begin{array}{l} \diagup \text{---} \\ \diagdown \text{---} \end{array} + \text{---} \bullet \begin{array}{l} \diagup \text{---} \\ \diagdown \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} + \text{---} \bullet \begin{array}{l} \diagup \text{---} \\ \diagdown \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} + \text{---} \bullet \begin{array}{l} \diagup \text{---} \\ \diagdown \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} \end{array} \right|^2$$

$$+ \left| \begin{array}{l} \text{---} \bullet \begin{array}{l} \diagup \text{---} \\ \diagdown \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} + \text{---} \bullet \begin{array}{l} \diagup \text{---} \\ \diagdown \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \\ \text{---} \bullet \text{---} \end{array} \end{array} \right|^2$$

The image shows the calculation of the decay rate $P(\theta)$ as a sum of squared magnitudes of Feynman diagrams. The first row contains four diagrams, each enclosed in a vertical bar and separated by a plus sign. The first diagram is a tree-level process with a solid line entering from the left and two dashed lines exiting to the right. The second diagram is a tree-level process with a solid line entering from the left, a dashed line exiting to the right, and a wavy line (representing a photon) connecting to a loop of two fermions (represented by solid lines) that then splits into two more dashed lines. The third diagram is a tree-level process with a solid line entering from the left, a dashed line exiting to the right, and a wavy line connecting to a loop of two fermions that then splits into two more dashed lines. The fourth diagram is a tree-level process with a solid line entering from the left, a dashed line exiting to the right, and a wavy line connecting to a loop of two fermions that then splits into two more dashed lines. The second row contains two diagrams, each enclosed in a vertical bar and separated by a plus sign. The first diagram is a tree-level process with a solid line entering from the left, a dashed line exiting to the right, and a wavy line connecting to a loop of two fermions that then splits into two more dashed lines. The second diagram is a tree-level process with a solid line entering from the left, a dashed line exiting to the right, and a wavy line connecting to a loop of two fermions that then splits into two more dashed lines. The entire expression is squared, as indicated by the 2 at the end of the second row.

Komplementarität beim Interferometer

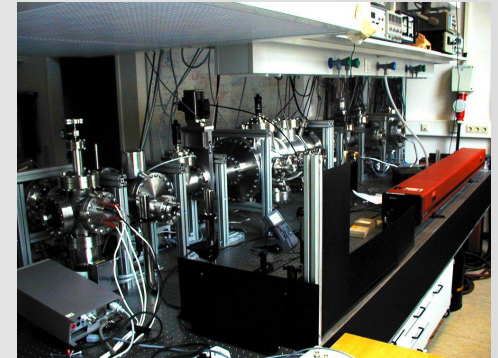
1. Interferenz im Quantenbereich

2. Komplementarität

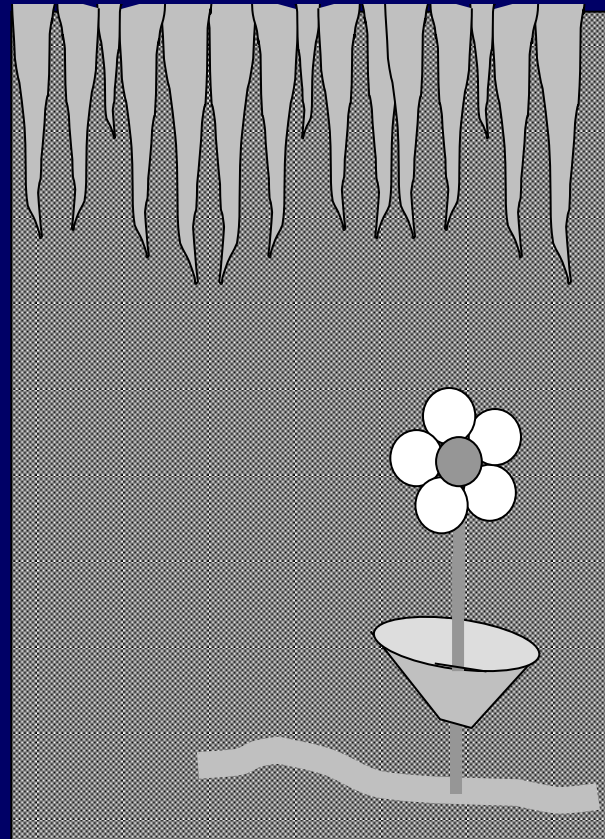
3. Eine Quantenblume



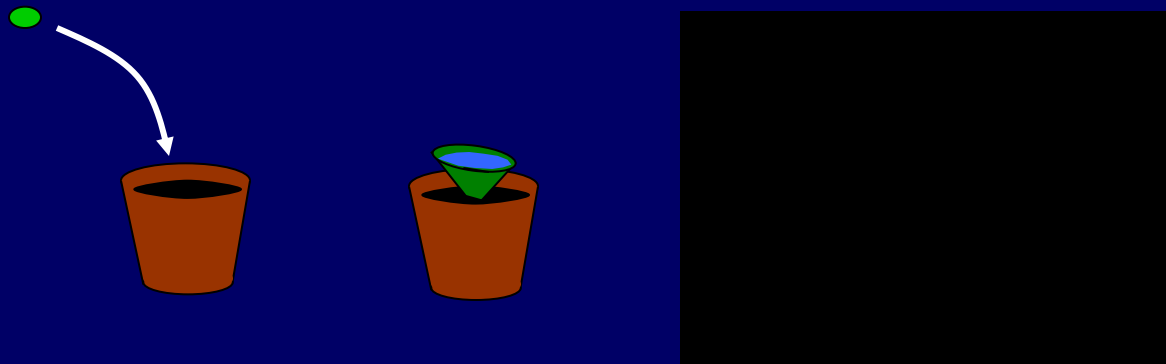
4. Quantenradierer-Experiment



In einer Höhle wächst eine Blume mit Trichterblatt.





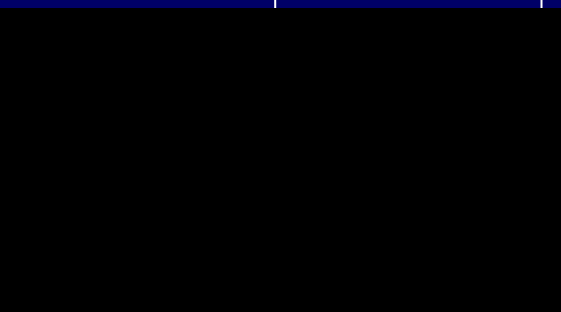



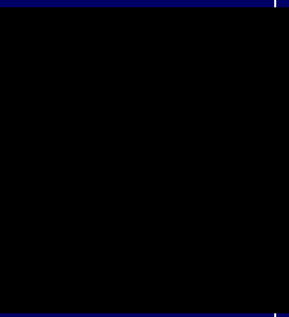





Bedingungen für erfolgreiches Wachstum:

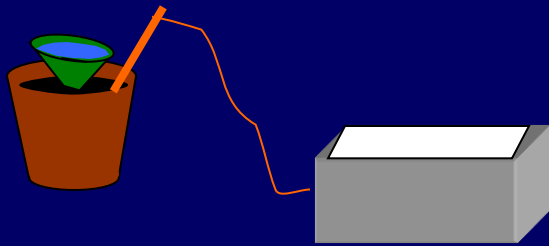


- Wasser im Trichterblatt
- Dunkelheit beim Wachstum

Licht stoppt das Wachstum:

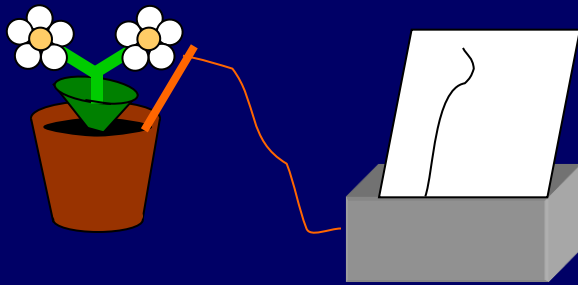
1. Tag	2. Tag	3. Tag	4. Tag	5. Tag
				
				
				

Wie bewässert sich die Pflanze?



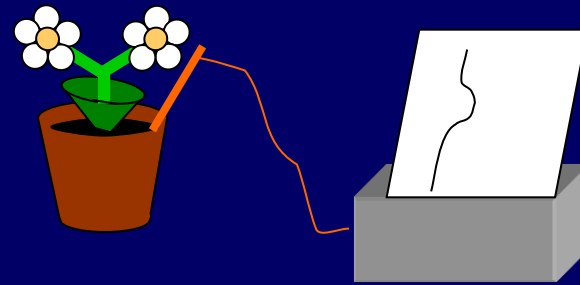
Wie bewässert sich die Pflanze?

Entweder:




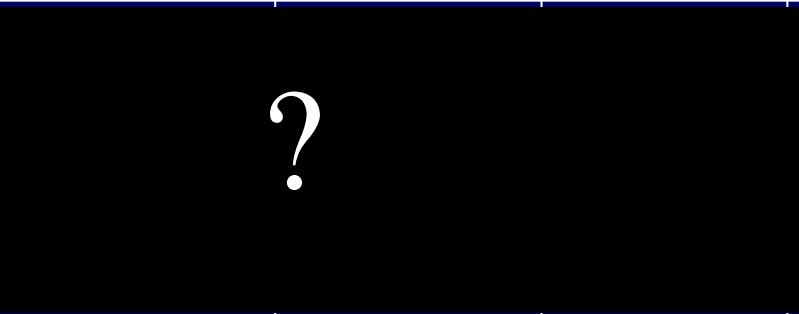



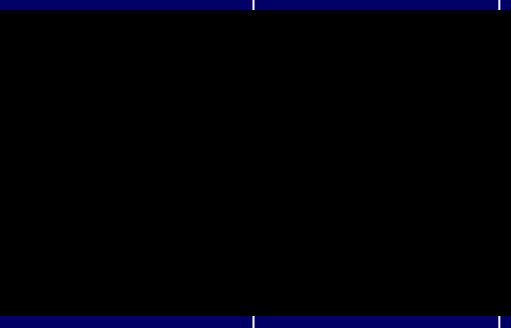
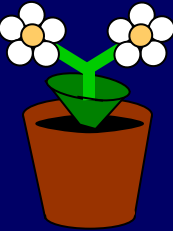

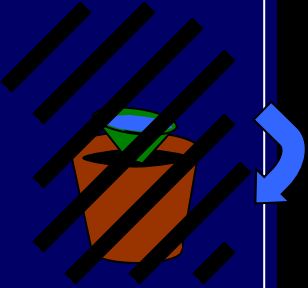
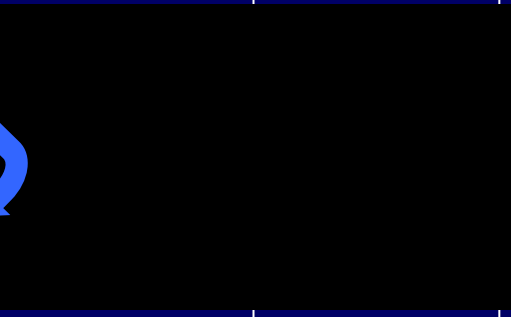
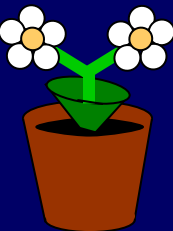
In der 1. Nacht

Oder:

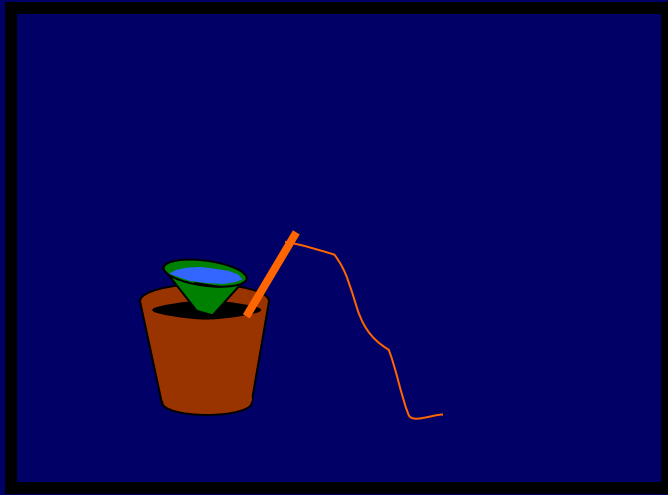


In der 2. Nacht

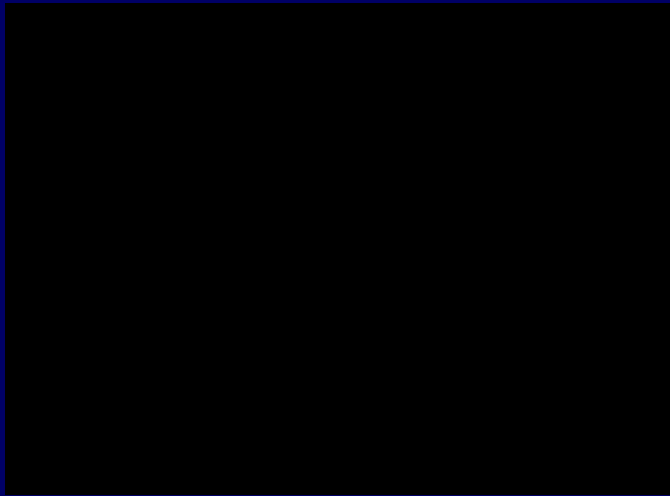
Überblick:

1. Tag	2. Tag	3. Tag	4. Tag	5. Tag
				
				
				

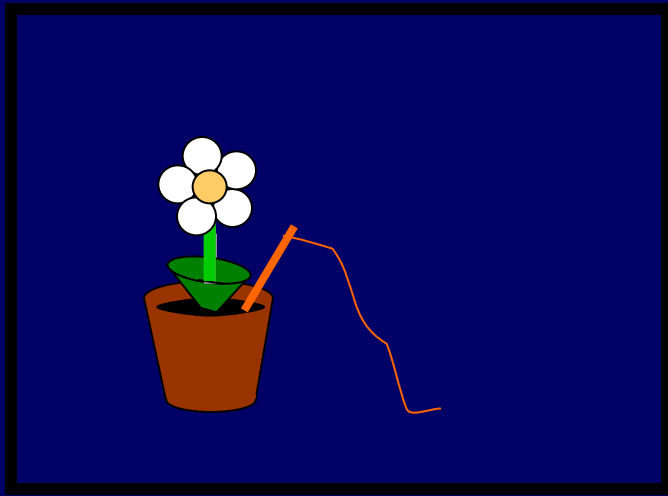
Wie bewässert sich die Pflanze?



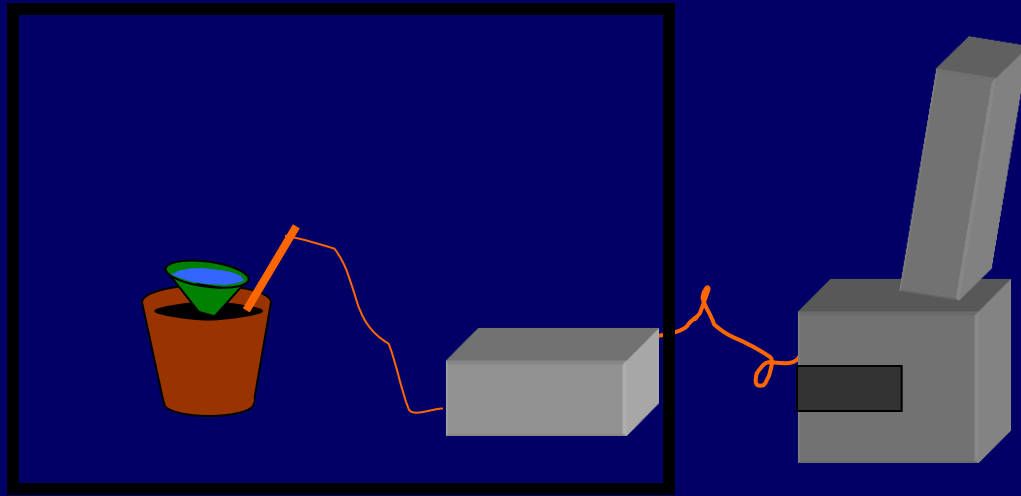
Wie bewässert sich die Pflanze?



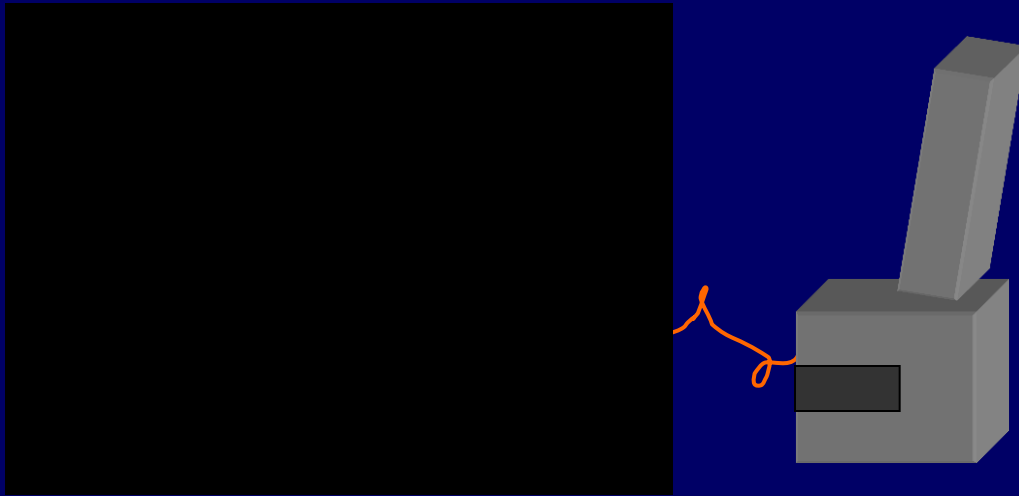
Ergebnis:



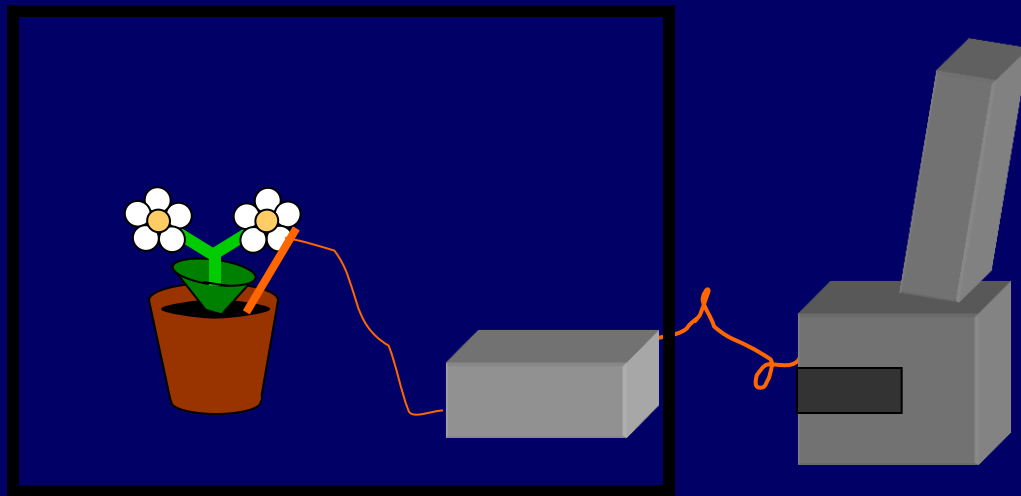
Datenerfassung mit dem Rechner:



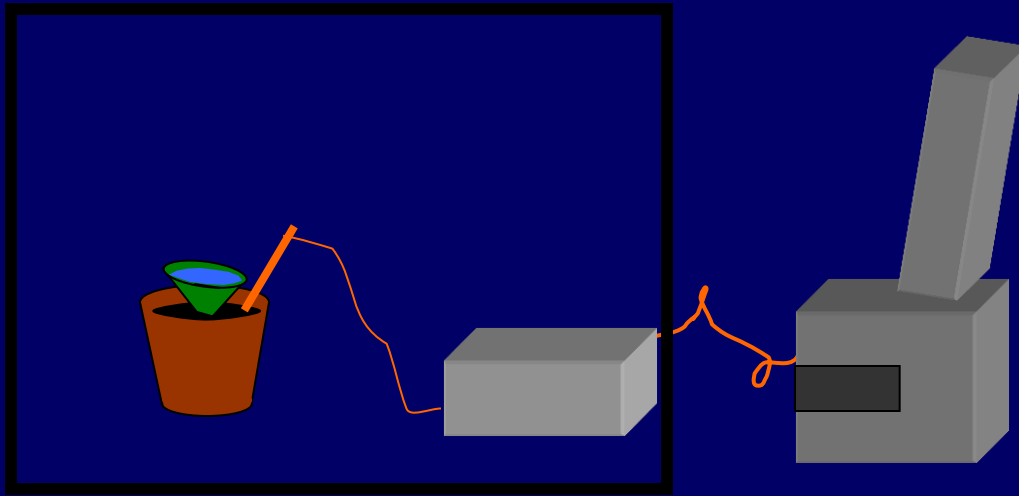
Datenerfassung mit dem Rechner:



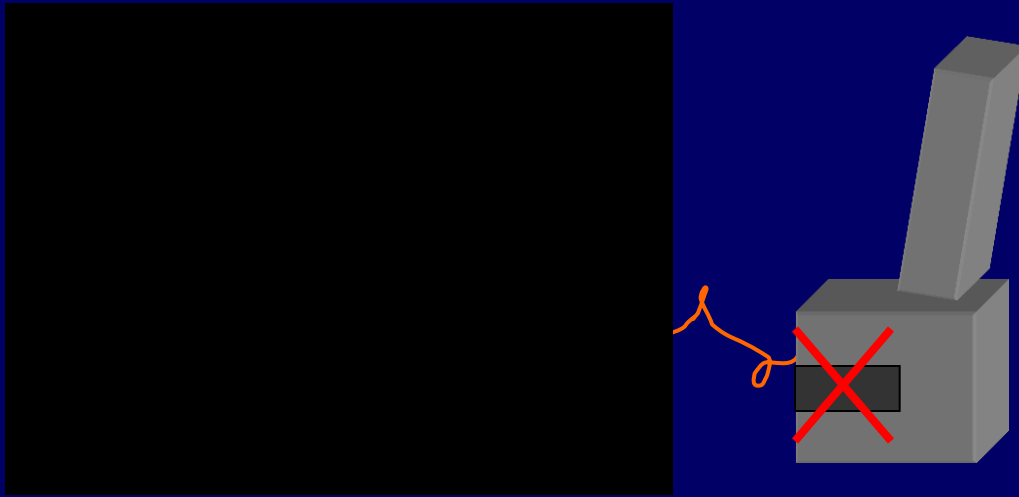
Ergebnis:



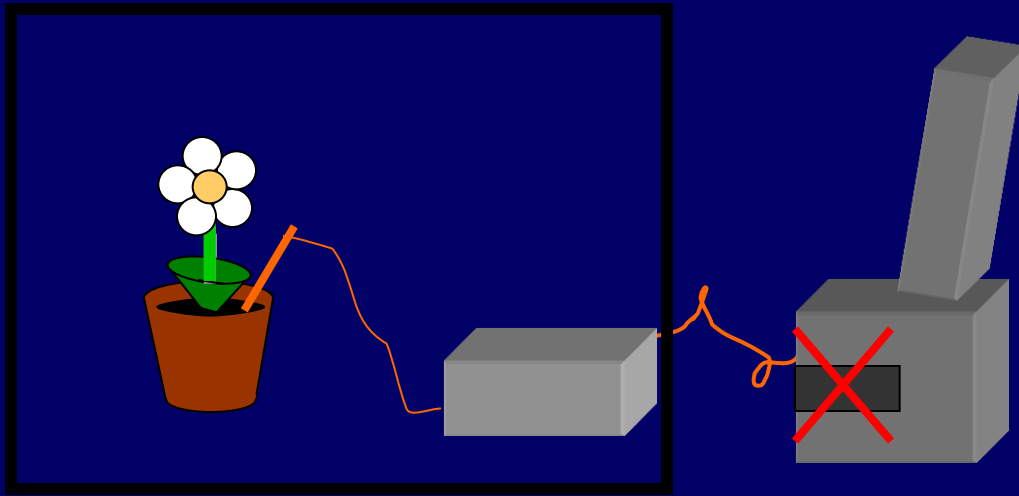
Festplatte geht kaputt:



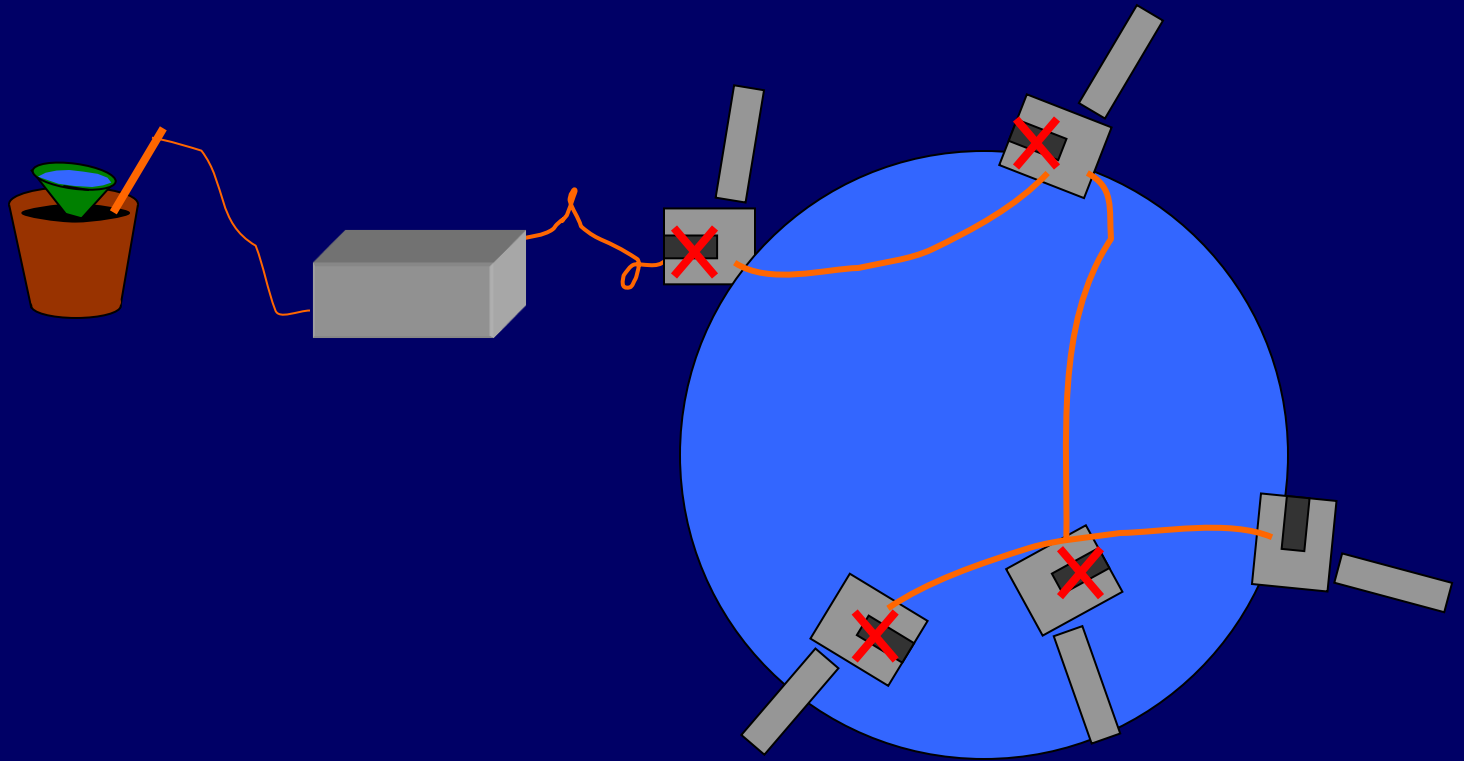
Festplatte geht kaputt:



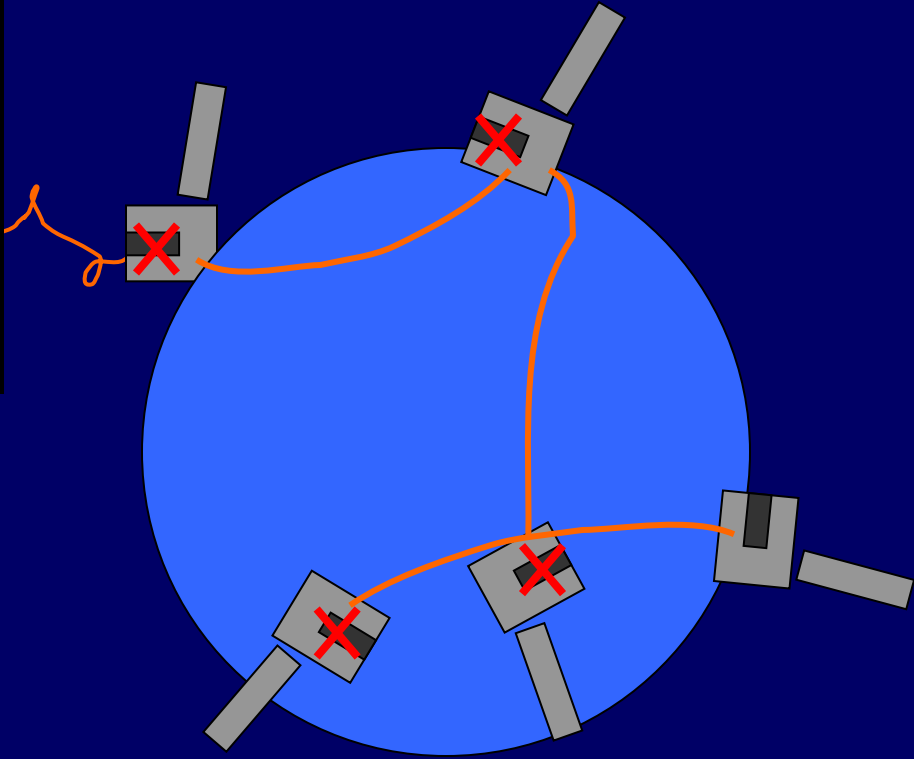
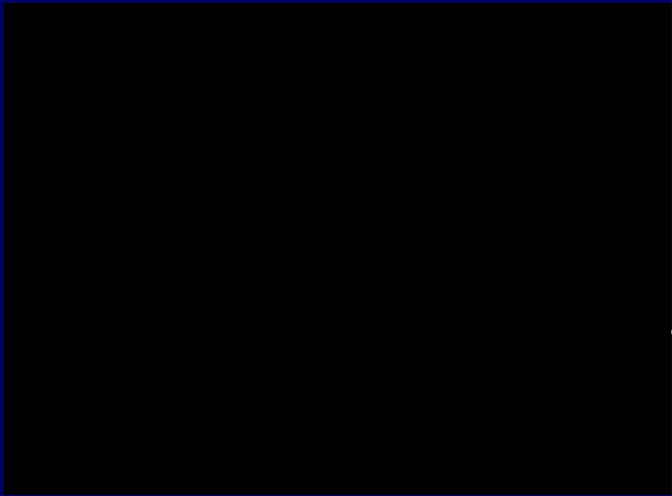
Ergebnis:



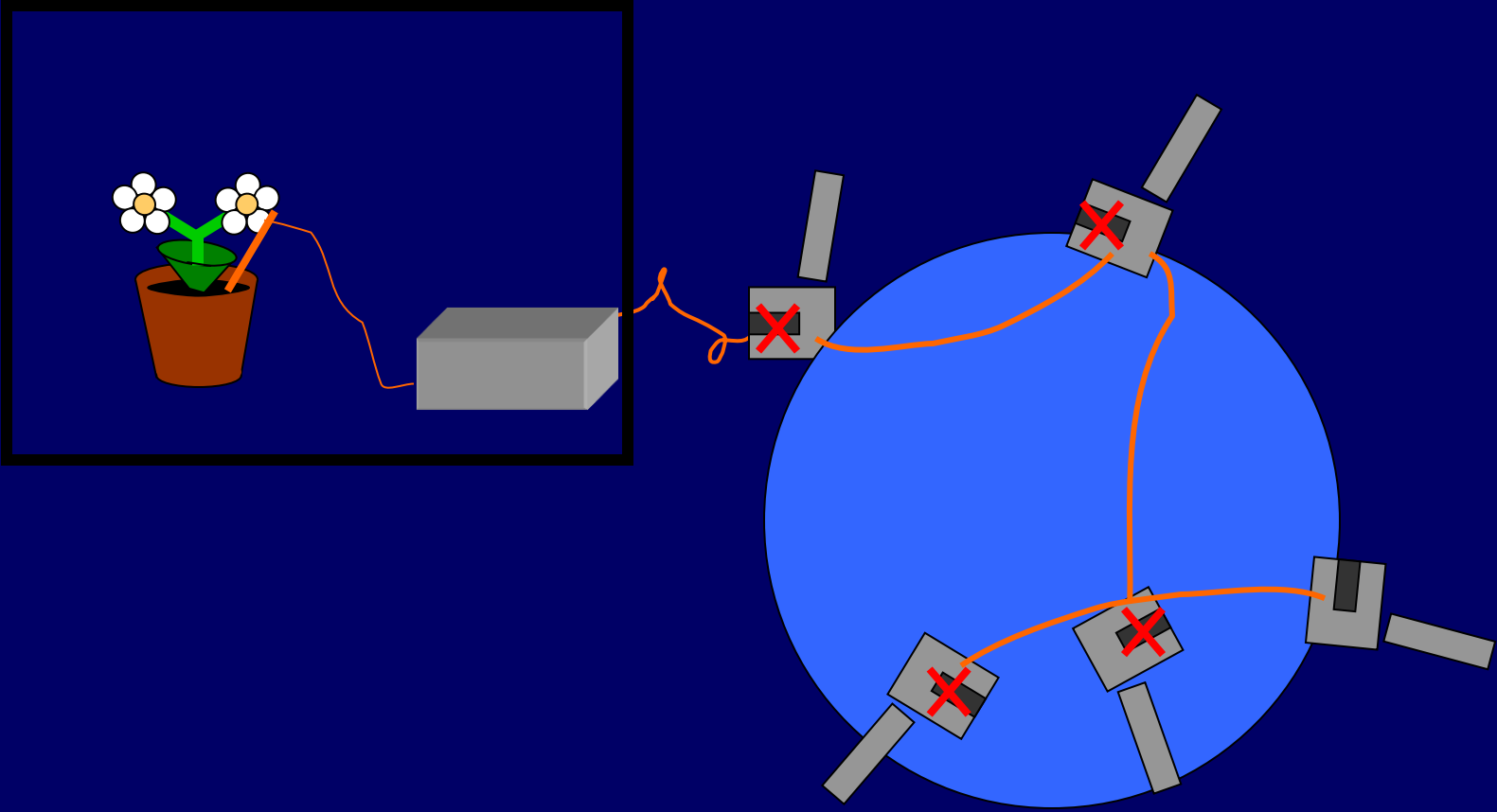
WWW



WWW



Ergebnis:

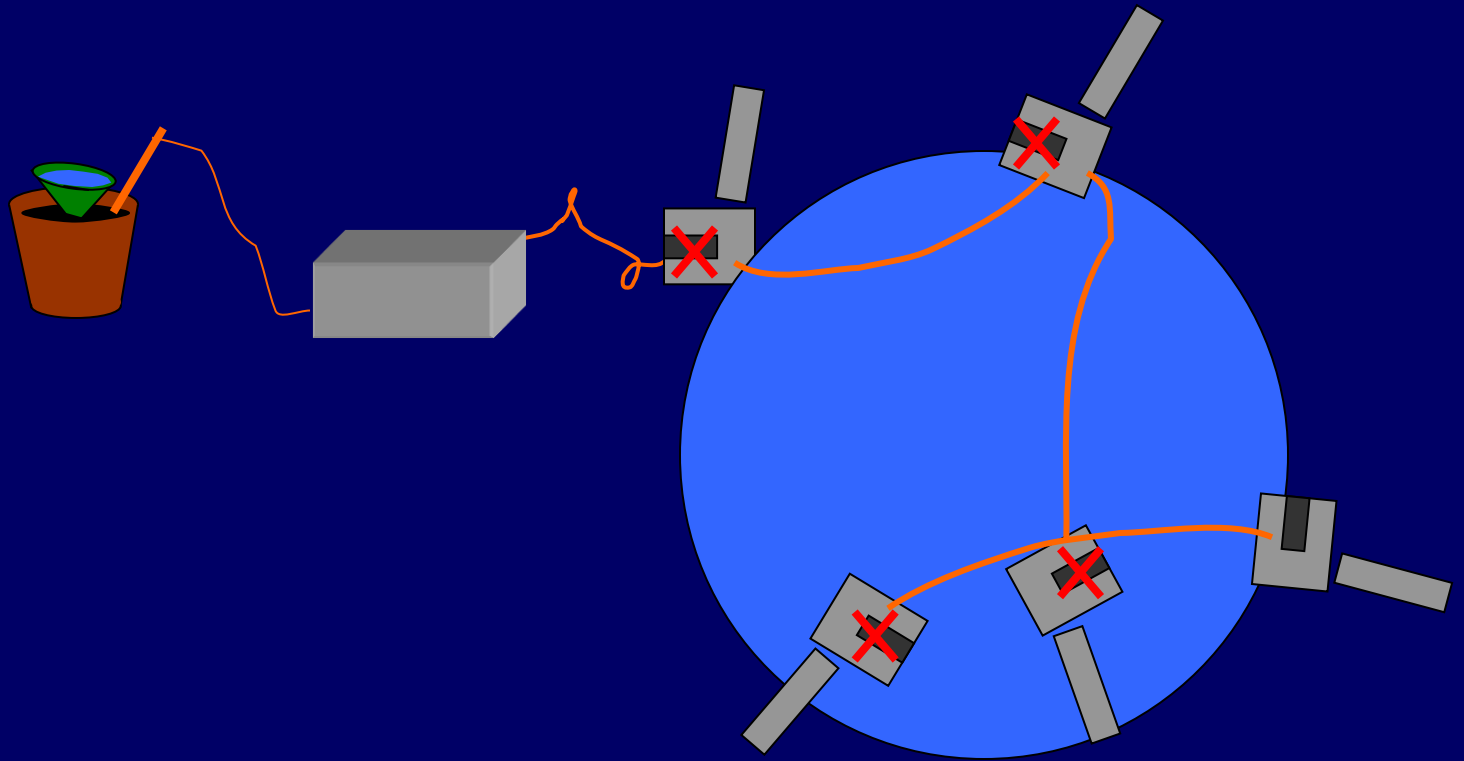


Zusammenfassung:

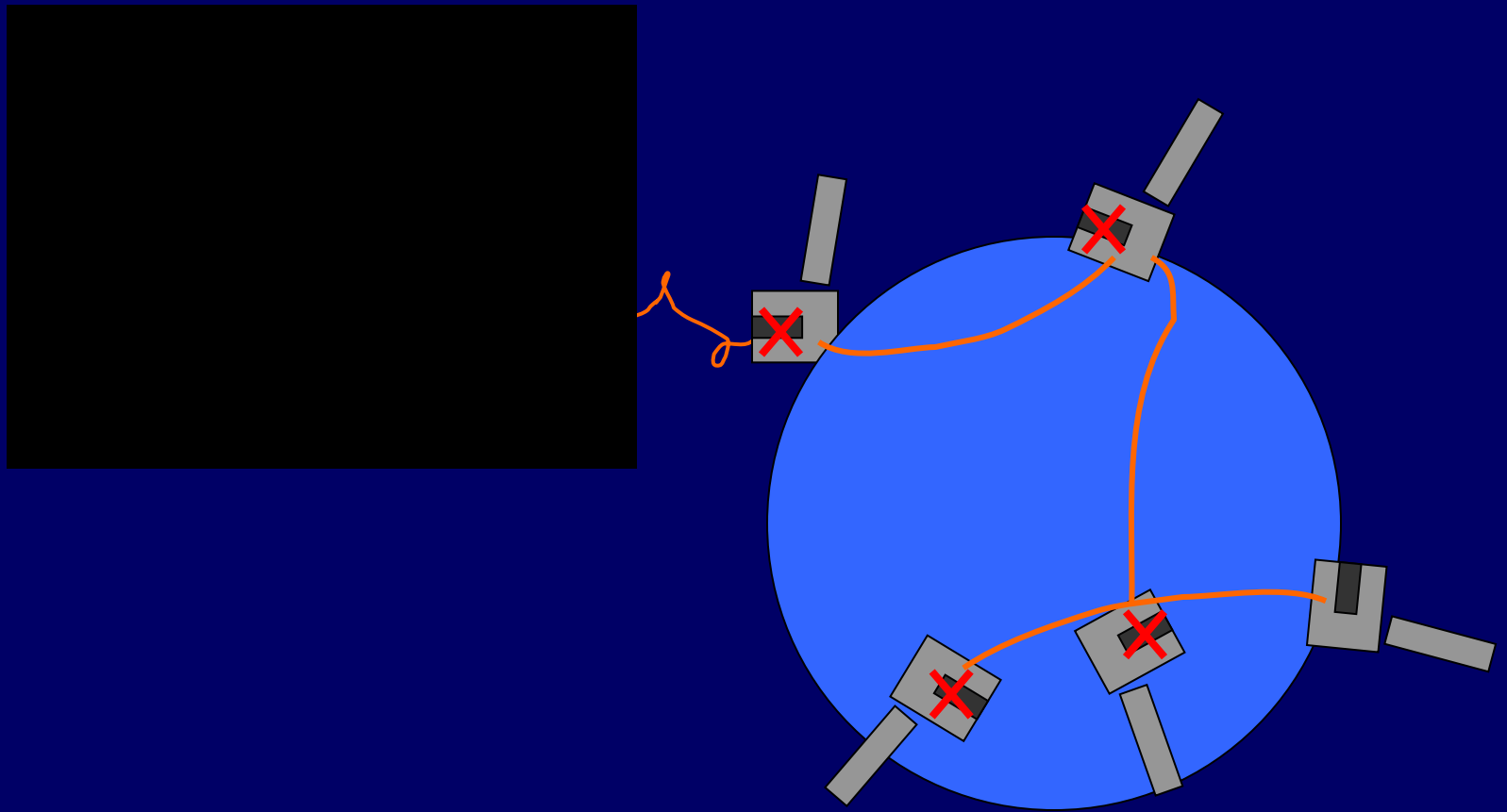
Wenn man rauskriegen kann,
wie sich die Blume bewässert hat,

bekommt man keine große Blüte.

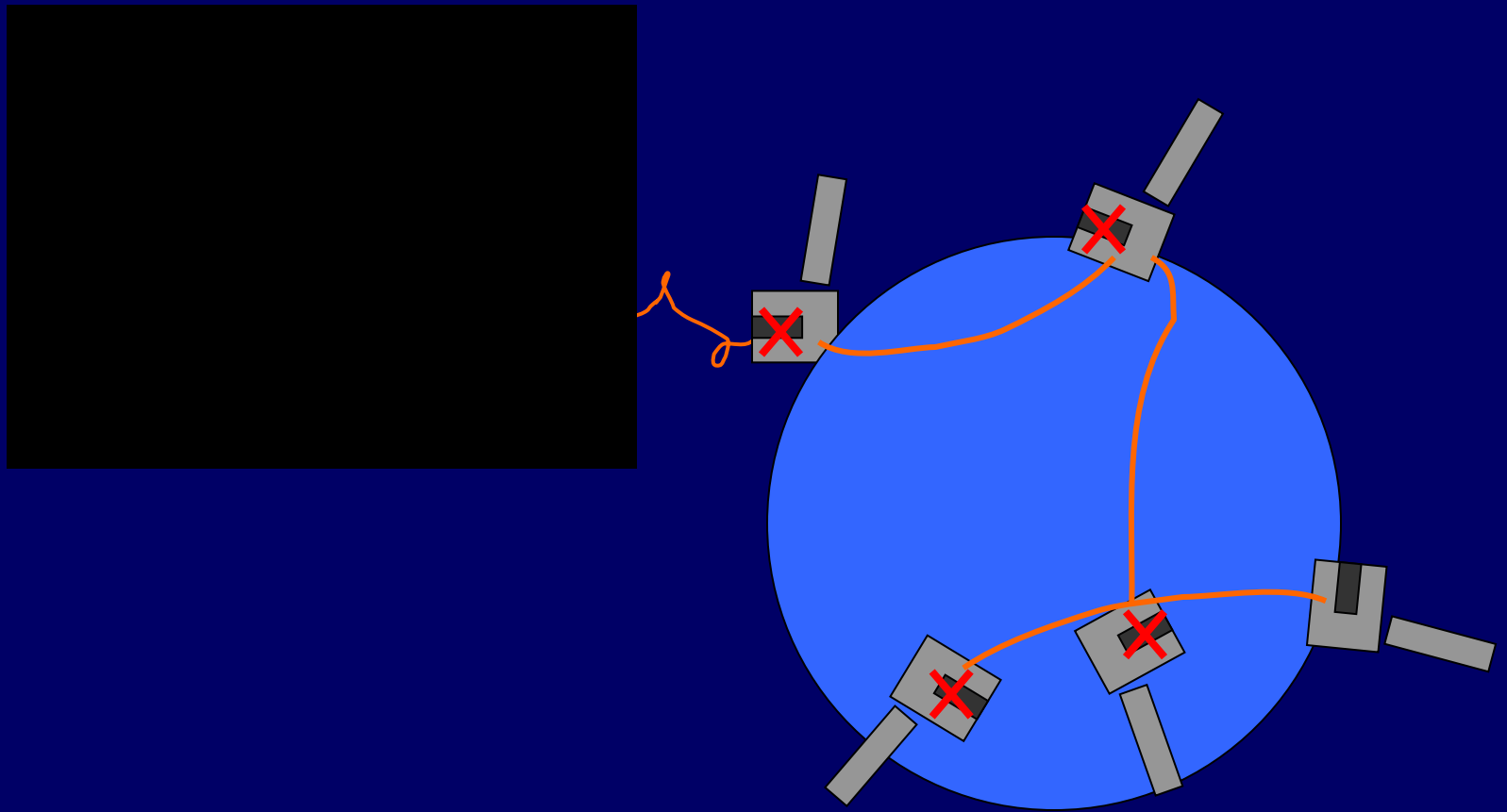
Auf den Zeitpunkt kommt es an!



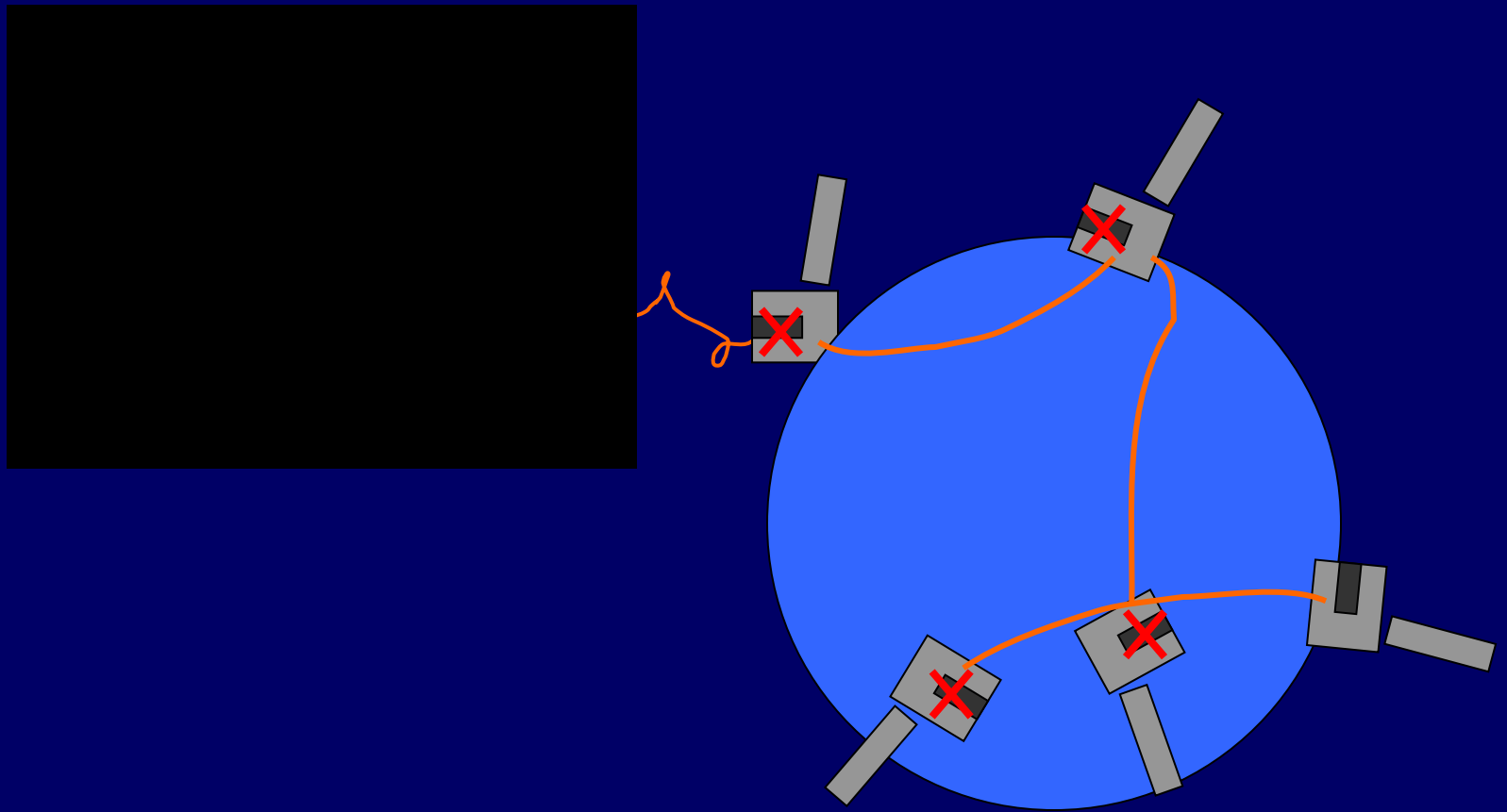
Auf den Zeitpunkt kommt es an!



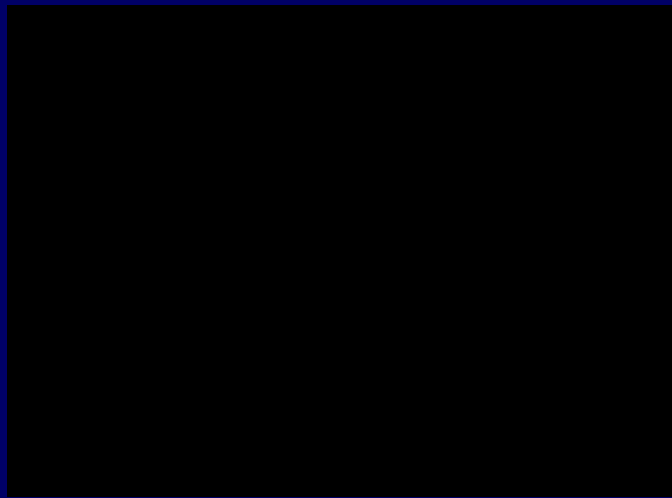
Auf den Zeitpunkt kommt es an!



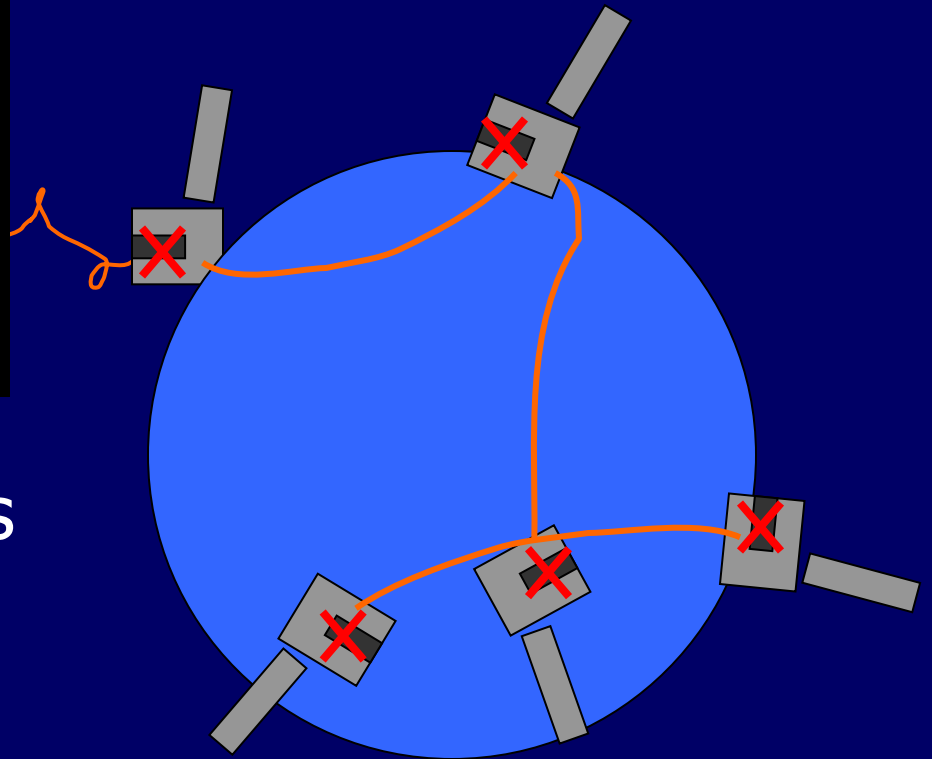
Auf den Zeitpunkt kommt es an!



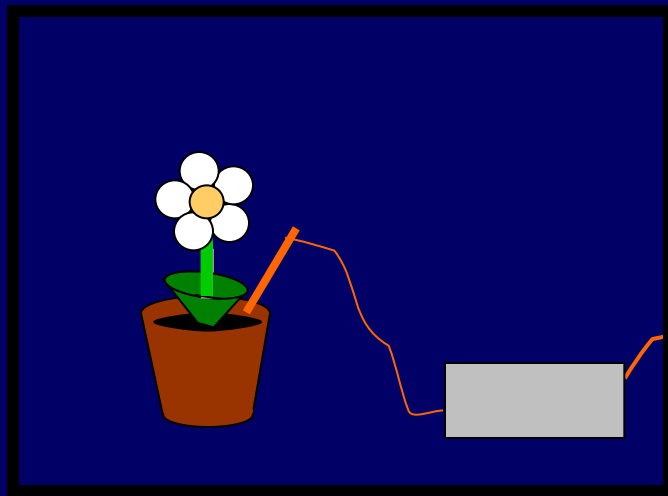
Auf den Zeitpunkt kommt es an!



Morgen des 5. Tags

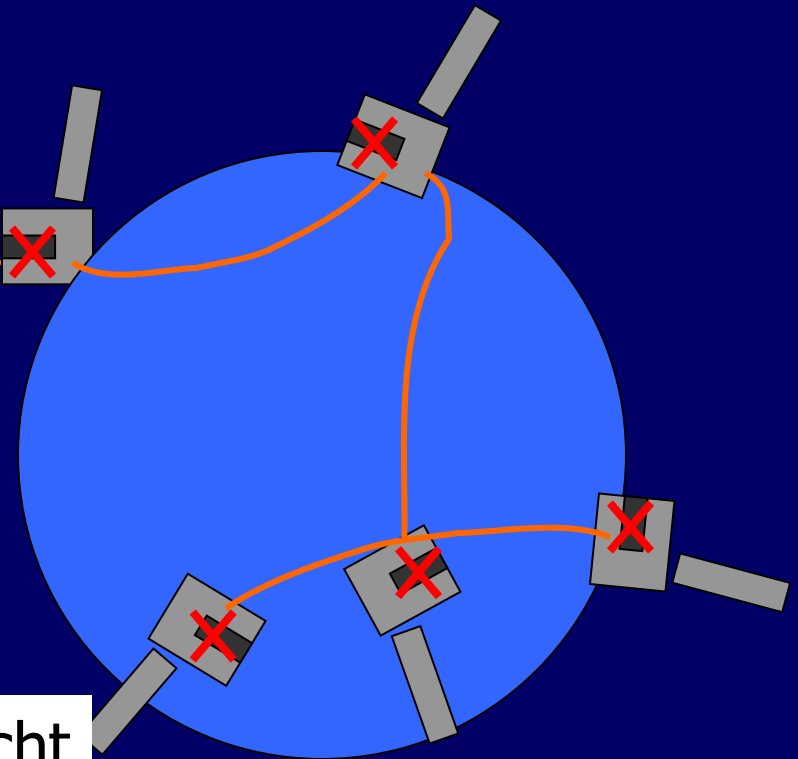


Auf den Zeitpunkt kommt es an!



Morgen des 5. Tags

Bewässerungs-Information gelöscht



Komplementarität beim Interferometer

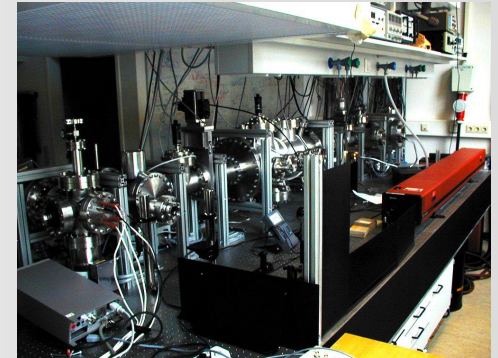
1. Interferenz im Quantenbereich

2. Komplementarität

3. Eine Quantenblume



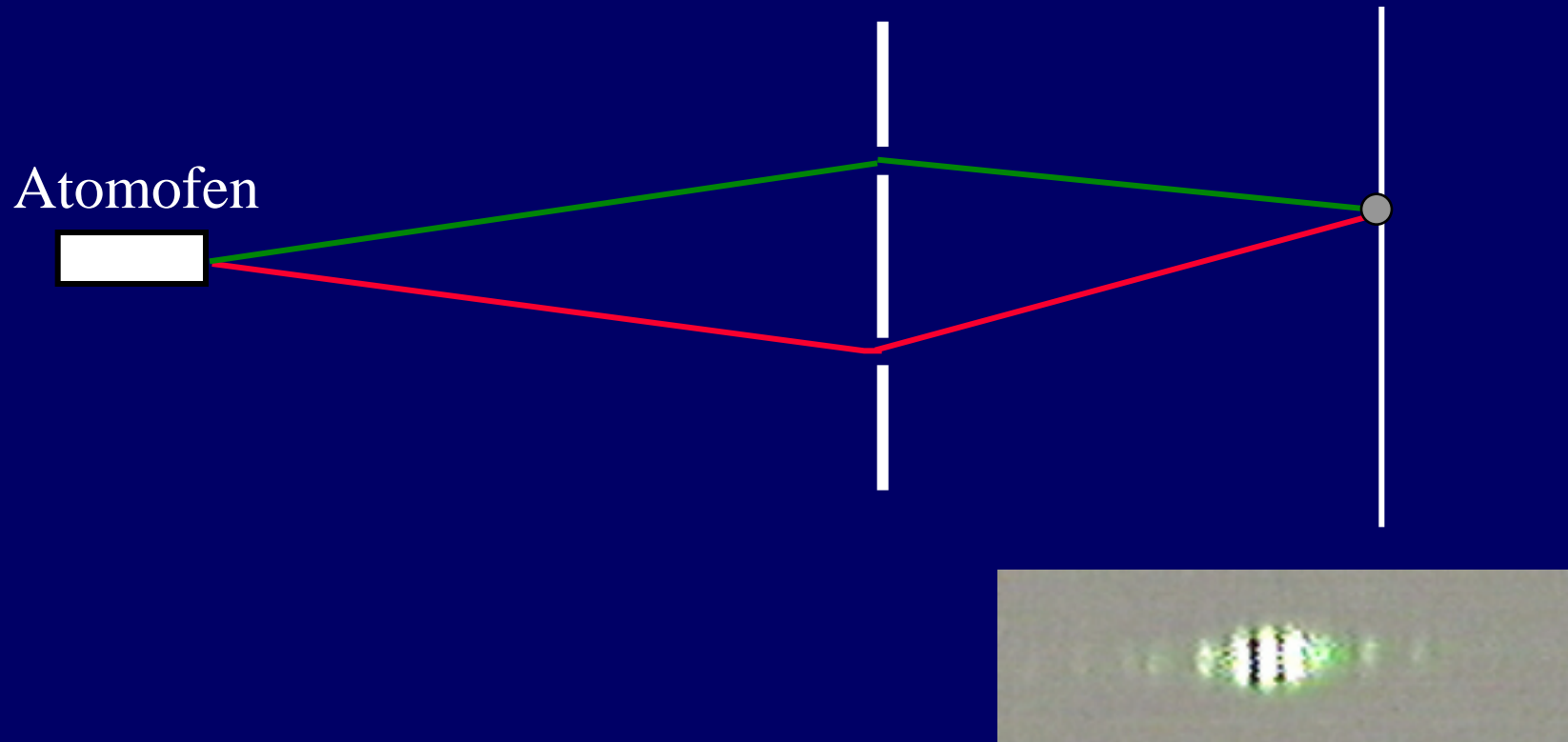
4. Quantenradierer-Experiment



Ein Schulversuch zur Komplementarität:

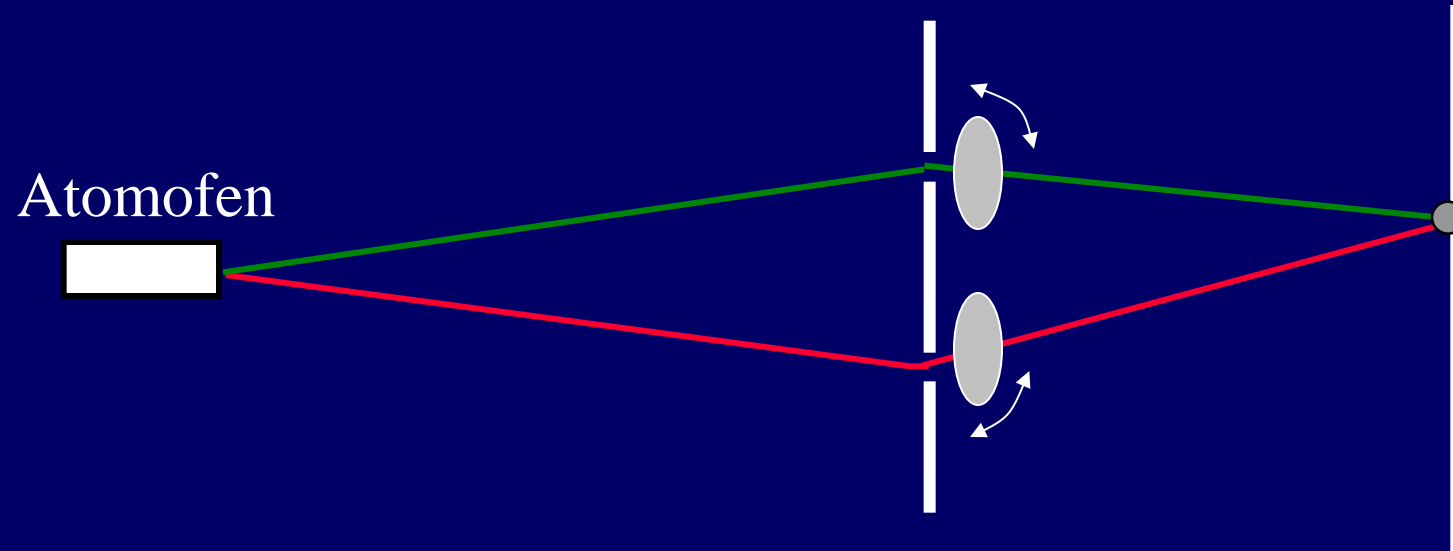
Der Doppelspalt mit Polarisationsfolien

Doppelspalt

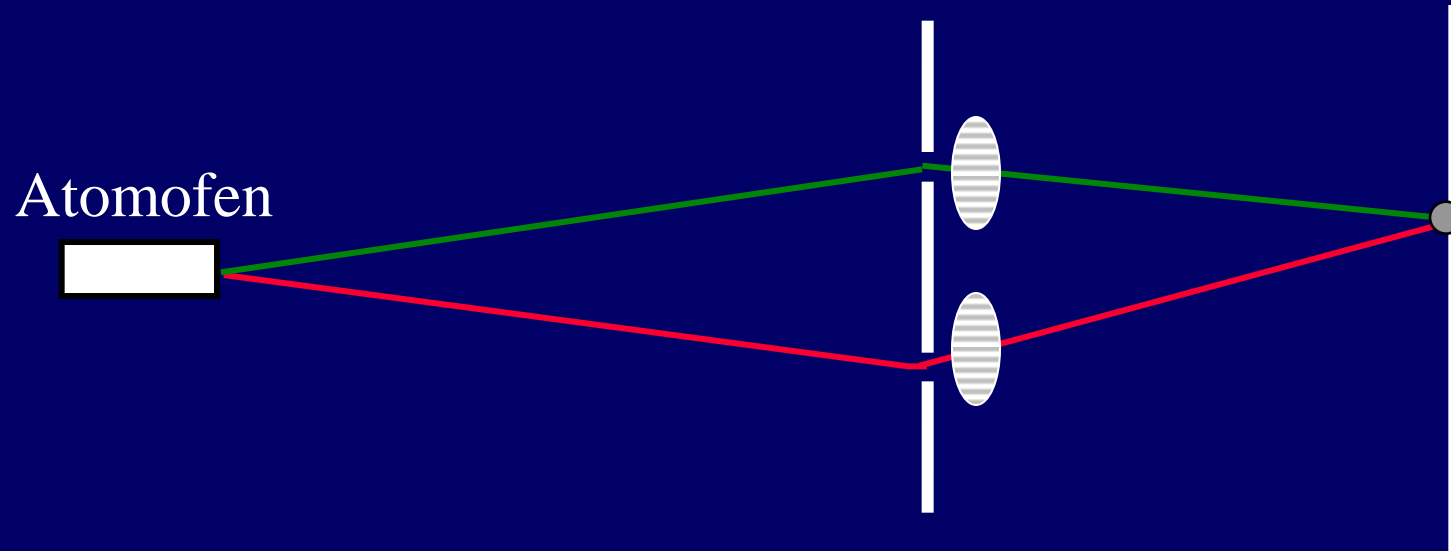


Zum Zeitpunkt des Nachweises ist keine Zuordnungs-Messung möglich.

Doppelspalt mit Polfiltern



Doppelspalt mit parallelen Polfiltern



Zum Zeitpunkt des Nachweises ist keine Zuordnungs-Messung möglich.

Doppelspalt mit orthog. Polfiltern

