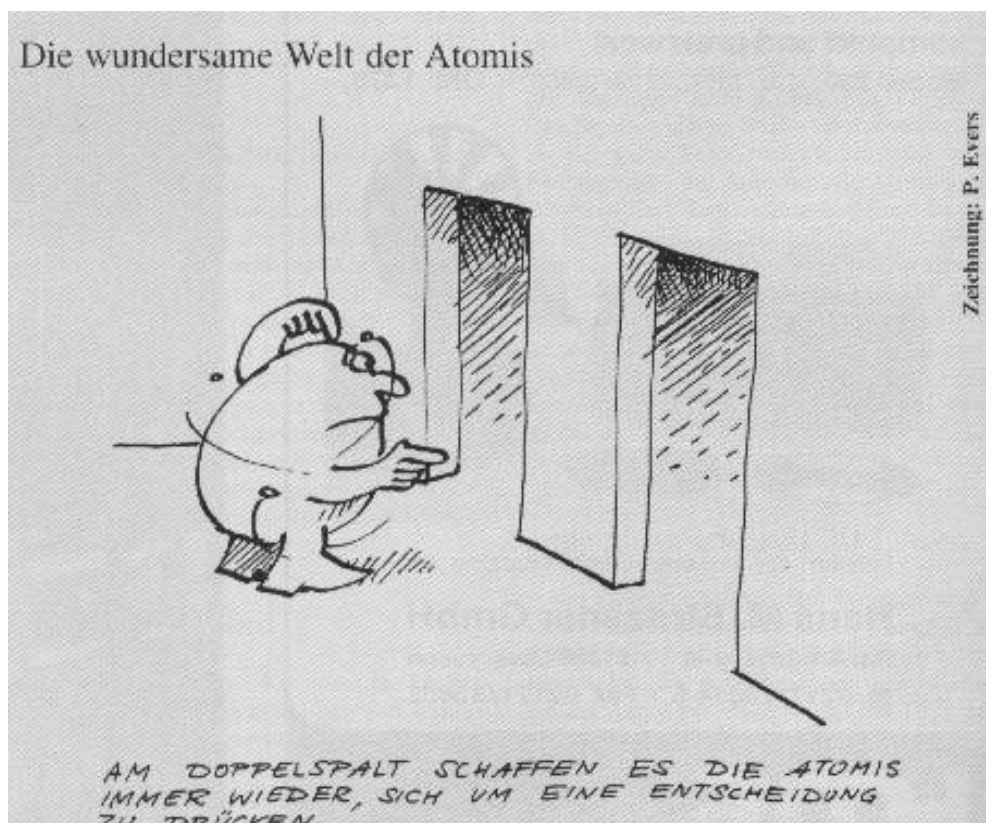


# Neuere Entwicklungen der Quantenphysik

„Wenn die Quantenphysik recht hat,  
ist die Welt verrückt“ (Albert Einstein)

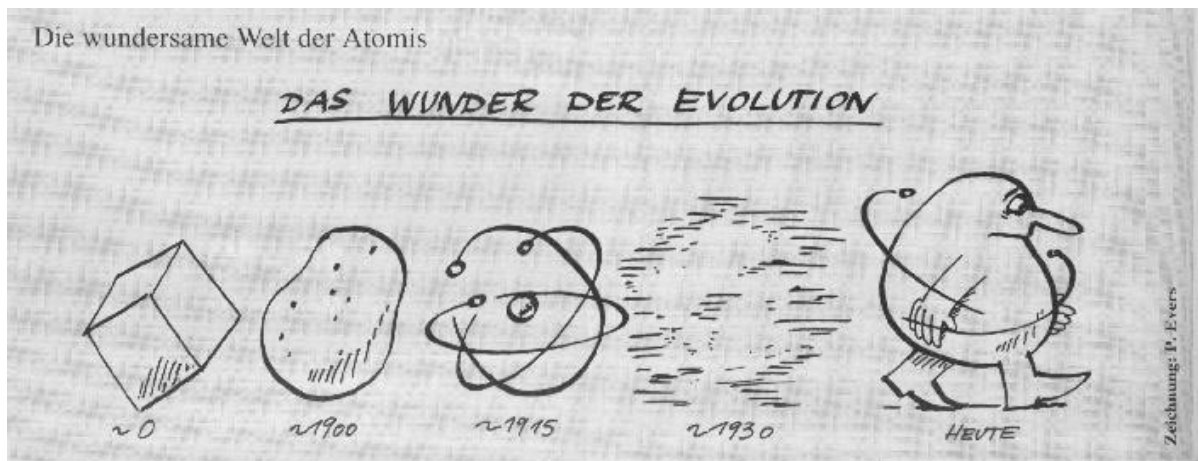


Doppelspalt-Interferenz von Atomen

**Real gewordene „Gedankenexperimente“  
bestätigen die Grundprinzipien der Quantenphysik**

## INHALT

- Philosophische Überlegungen
- Grundideen der Quantenphysik
- Quantenphysik in der Schule - der neue Lehrplan
- Experimentelle Möglichkeiten in der Schule
- Beispiel eines Analogieexperiments: der Quantenradierer
- Einfache experimentelle Arrangements
- Die Nichtlokalität der Quantenphysik  
Bell'sche Ungleichungen
- Kabinettstückchen aus den Quantenlabors
  - Wechselwirkungsfreie Quantenmessung
  - Atom-Optik
  - Quantenteleportation



## Frühe Überlegungen der Philosophen

Demokrit (~400 v. Chr.):

Materie besteht aus kleinsten (unteilbaren) Einheiten

Kant (1724-1804):

Atomhypothese enthält innere Widersprüche!

### These

Zusammengesetzte Substanz besteht aus kleinsten Teilen.

### Anti-These

Keine zusammengesetzte Struktur besteht aus einfachen Teilen. Es existiert nichts Einfaches.

Beweis indirekt:

Angenommen, es gäbe keine einfachen Teile; dann bliebe nach Aufhebung der Zusammensetzung nichts übrig.

Zusammensetzung von Substanz nur im Raum möglich. Volumen ist Summe der Teilvolumina. Auch einfachste Teile müssen einen Raum einnehmen. Damit wären sie nicht einfach, sondern aus Teilvolumina zusammengesetzt.

**Bei atomaren Größenordnungen ist mit Widersprüchen bei Verwendung klassischer Begriffe zu rechnen.**

## Welle oder Teilchen?

Klassische Physik kennt zwei erfolgreiche Konzepte:

Teilchen	Welle
Impuls $\vec{p}$	Wellenlänge $\lambda$
Energie $E$	Wellenzahlvektor $\vec{k}$
	Frequenz $f$
	Kreisfrequenz $\omega$

## Quantenphysik

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

$$E = \hbar \omega$$

Mikroobjekte vereinigen in sich Eigenschaften  
punktförmiger Teilchen **und** ausgedehnter Wellen

etabliert durch viele experimentelle Fakten:

- Wellenoptik: Licht besitzt Welleneigenschaften
- Photoeffekt, Comptoneffekt: Wechselwirkung von Licht mit Materie wie punktförmige Teilchen
- Elektronenbeugung: Welleneigenschaften von „Materie“
- ...

## Quantenmechanik

beschreibt alle experimentellen Fakten erfolgreich!

# Die Grundideen der Quantenmechanik

- Makroskopische Objekte bestehen aus kleinsten Einheiten, den **QUANTEN**
  - Licht aus Photonen
  - Materie aus Atomen
    - bzw. aus Elektronen u. Kernen
    - oder aus Elektronen, Photonen, Quarks und Gluonen
- Quanten besitzen „**Welleneigenschaften**“
  - Amplitude und Phase
    - darstellbar durch (ortsabhängige) komplexe Zahl  $\Psi(\vec{r})$
  - Phasen sind nicht direkt meßbar!**
- **alle nicht unterscheidbaren Möglichkeiten** zur Erreichung des gleichen Endzustands **interferieren** analog zum Gangunterschied in der Optik
  - Phasen äußern sich durch Interferenzmuster!**
- Der **Meßprozeß** ergibt immer **genau einen der möglichen Endzustände**
  - Regeln der QM definieren die Wahrscheinlichkeiten**
  - stochastisches Element!**
    - Betragsquadrat einer komplexen Zahl,  $|\Psi(\vec{r})|^2$
- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation:
  - Nicht alle Eigenschaften von Quanten sind gleichzeitig scharf meßbar** z.B.
    - Ort und Impuls
    - zwei Richtungen des Eigendrehimpulses („Spin“)
    - zwei Polarisationsrichtungen von Photonen

**Mathematisch präzisiert im Formalismus der QM**

## Was passiert beim Meßprozeß?

Hier bewegen wir uns experimentell (noch) auf dünnem Eis  
⇒ Viel Raum für Spekulationen!

aus der Kopenhagener Deutung:

A macroscopic object is not subjected to the rules of quantum mechanics but only to classical physics.

Charakteristika einer Messung an einem Quantensystem:

- **irreversible** Wechselwirkung mit einem „Meßgerät“  
Meßgeräte werden immer kleiner, Quantensysteme immer größer  
⇒ „weiche“ Grenze zwischen Quanten- und klassischer Physik  
„Schrödingersche Kätzchen“ im Labor
- Projektion des Zustandsvektors auf **einen** Zustand  
aus der Superposition vieler Möglichkeiten wird eine ausgewählt  
Wirklich zufällig ? - darüber gibt es viele Spekulationen
- Makroskopische Interferenz wird nicht beobachtet  
sehr schön illustriert in Schrödingers perfidem „Katzenexperiment“  
Dies scheint nun verstanden: Stichwort „Dekohärenz“

Dekohärenz entsteht immer, wenn ein Quantensystem Information an die Umgebung verliert. Es ist ein sehr schneller und effizienter Mechanismus, der Superpositionen unmöglich macht.  
Haupt-Problem bei Realisierung von „Quanten-Computern“

meine Überzeugung:

QM ist die fundamentalere Theorie, klassische Physik die Näherung.  
Deshalb muß es gelingen, auch Meßgeräte und den Meßprozeß mit dem Formalismus der QM zu beschreiben - eines Tages!

## **Verpflichtend (Leistungsfach):**

### **Mikroobjekte I**

- Freie Elektronen und Photonen am Doppelspalt
- Wahrscheinlichkeitswelle
- Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation

### **Mikroobjekte III**

- Fotoeffekt
- Comptoneffekt

### **Atomphysik I**

- Elektron-Atom-Wechselwirkung (Franck-Hertz-Vers.)
- Linienspektren, Termschema
- Atommodell, Periodensystem

## **Wahlblöcke:**

### **Mikroobjekte II**

- Braggreflektion, Elektronenbeugung
- Röntgenstrahlung, Grenzwellenlänge

### **Atomphysik II**

- Potentialtopf, Orbitale
- Leistungen der Atommodelle (chem. Bindung, char. Röntgenstrahlung, Lumineszenz, Laser ... )

### **Interpretationen der Quantenphysik**

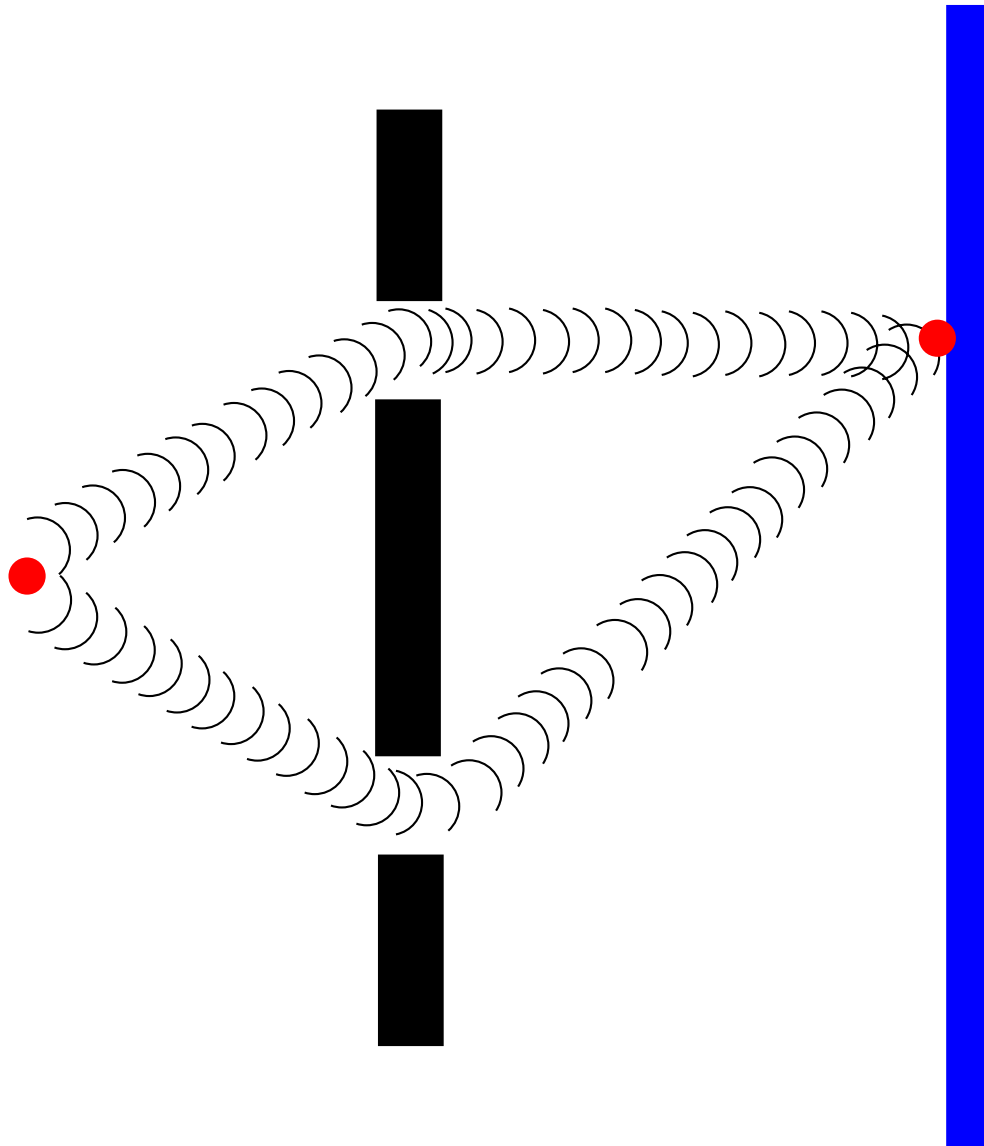
- Naturphilosophische Probleme
- Interpretationen der Quantenmechanik
- Experimentelle Befunde



# Quantenphysik im Experiment

## Einfachste Experimentelle Arrangements (1)

### Doppelspalt

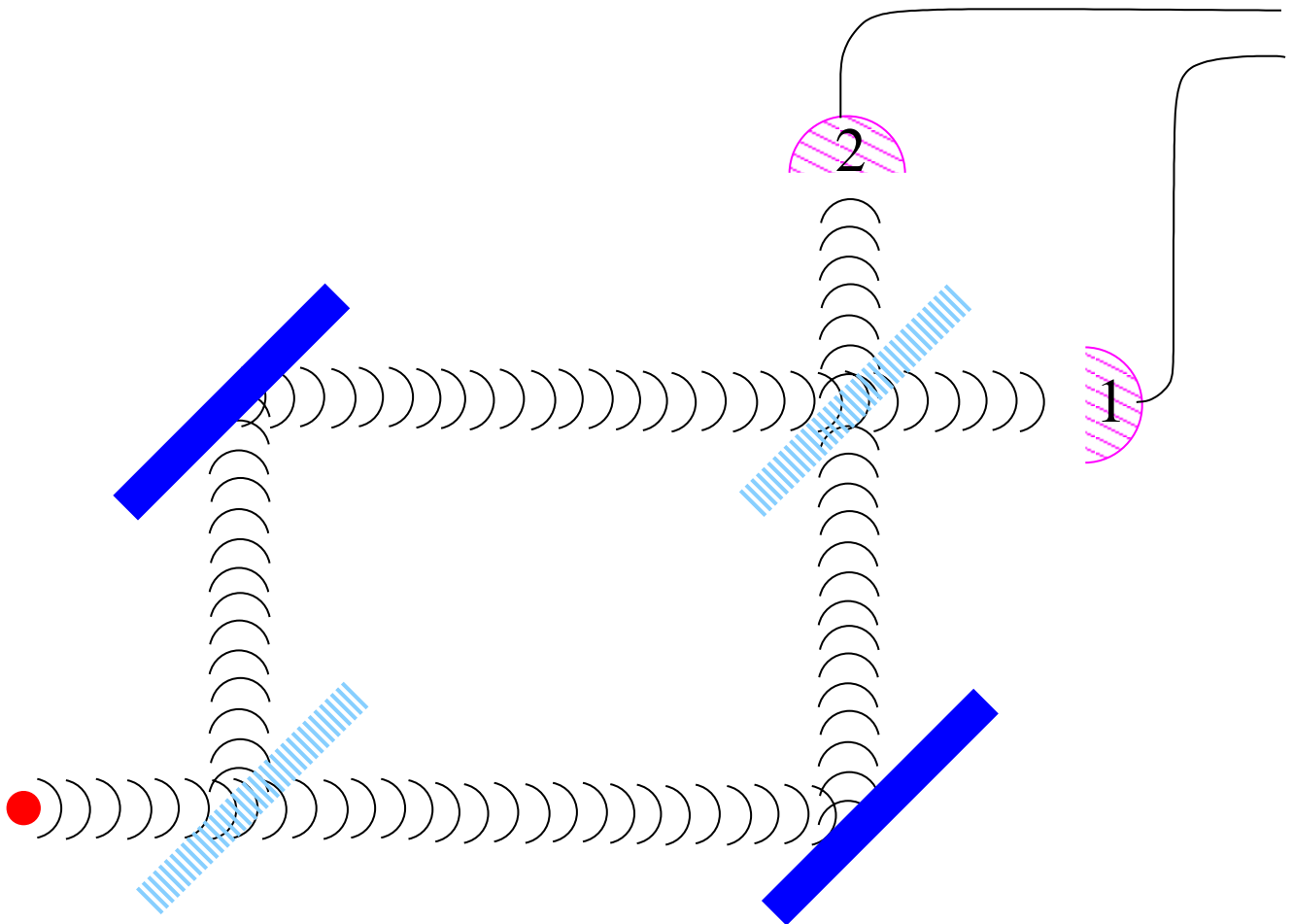


Realisiert für EINZELNE

- Photonen
- Elektronen
- He-Atome
- Fullerene ( $C_{60}$ ) (erst 1999)

# Einfachste Experimentelle Arrangements (2)

## Zweistrahl-Interferometer (Prinzip)



Detailausführung der Spiegel und Strahlteiler von der Art der untersuchten Teilchen abhängig !

Realisiert für EINZELNE

- Photonen
- Elektronen
- Neutronen
- Atome

## Experimentelle Möglichkeiten in der Schule

- **Licht** wird traditionell unter verschiedensten Aspekten behandelt
  - geometrische Optik
  - Wellenoptik
  - Teilchenaspekte des Photons (Photoeffekt, Comptoneffekt)
- Photonpolarisation ist eine zum “Spin” analoge Quanteneigenschaft
  - zwei Einstellungsmöglichkeiten bzgl. beliebig vorgegebener Richtung (wie Elektronenspin)
  - Polarisation bzgl. zweier Richtungen ( (1) bzw. (2)) nicht gleichzeitig bestimmt:  $\parallel_{(1)}$  und  $\parallel_{(2)}$  “komplementär”
  - Photoneigenschaften aus Eigenschaften der klassischen elektromagnetischen Welle deduzierbar

### **Eine ganze Reihe von Analogieexperimenten mit schulischen Mitteln durchführbar**

- Interpretation im “Photonenbild” erlaubt vertiefenden Zugang zur Quantenphysik
- erleichtert die Diskussion neuester Experimente mit Photonen, z.B.:
  - Nichtlokalität
  - Verschränkte zwei-Teilchen-Zustände
  - Quantenteleportation
  - wechselwirkungsfreie Quantenmessung
  - ...

- **Materiewellen** mit der Elektronenbeugungsröhre
- Quantisierung von Ladung und Masse im Millikan- & (e/m)-versuch

kaum experimentelle Möglichkeiten in der Schule

digitale Videos von Hochschulexperimenten können helfen

- **Energiequantelung** bei gebundenen Zuständen in der Atomphysik
  - Linienspektren
  - Franck-Hertz-Versuch
  - Röntgenspektren

**Z. Zt. hochinteressant, weil Techniken zur Beobachtung von einzelnen Atomen existieren**

- **kollektive Quanteneffekte** in der Schule kaum thematisiert
  - Festkörpereigenschaften  
schon aus Mittelstufe bekannt, aber nicht mit QM erklärt!
  - Supraleitung  
Schulexperiment mit Hochtemperatursupraleiter verfügbar!
  - Suprafluidität
  - Bose-Einstein-Kondensation und Atomlaser

## Photonen am Polarisator

linear polarisiertes Licht auf Polfilter unter Winkel  $\Phi$  ergibt in Richtung  $\Phi$  linear polarisiertes Licht mit Intensität

$$I = w \cdot I_0, \quad \text{mit } \cos^2 \Phi \equiv w$$

z.B.

$$45^\circ : \quad \sim \uparrow \sim \text{ auf } \nearrow \Rightarrow \sim \nearrow \sim \quad w = \frac{1}{2}$$

$$90^\circ : \quad \sim \uparrow \sim \text{ auf } \rightarrow \Rightarrow \text{vollständige Absorption} \quad w = 0$$

für einzelne Photonen („ganz oder gar nicht“):

- Photon mit Wahrscheinlichkeit

$w$  in Richtung des Filters polarisiert

$1 - w$  im orthogonalen Zustand, d.h. hier: absorbiert

### quantenmechanischer Meßprozeß von komplementären Variablen:

- zwei Polarisationsrichtungen sind nicht gleichzeitig meßbar  
“Komplementarität”
- nach der Messung befindet sich das System im gemessenen Zustand  
“Projektionspostulat der QM”

Anmerkung: Photonpolarisation formal äquivalent zum Elektronen-Spin

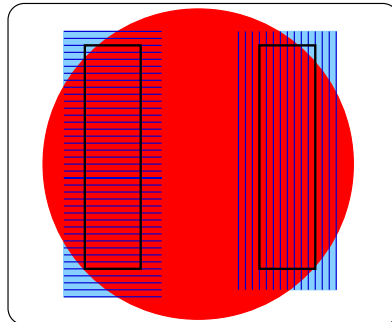
$$45^\circ, \text{ dann } 90^\circ : \quad \sim \uparrow \sim \text{ auf } \nearrow \quad \rightarrow$$

$$w = \cos^2(45^\circ) \cos^2(45^\circ) = 0.25$$

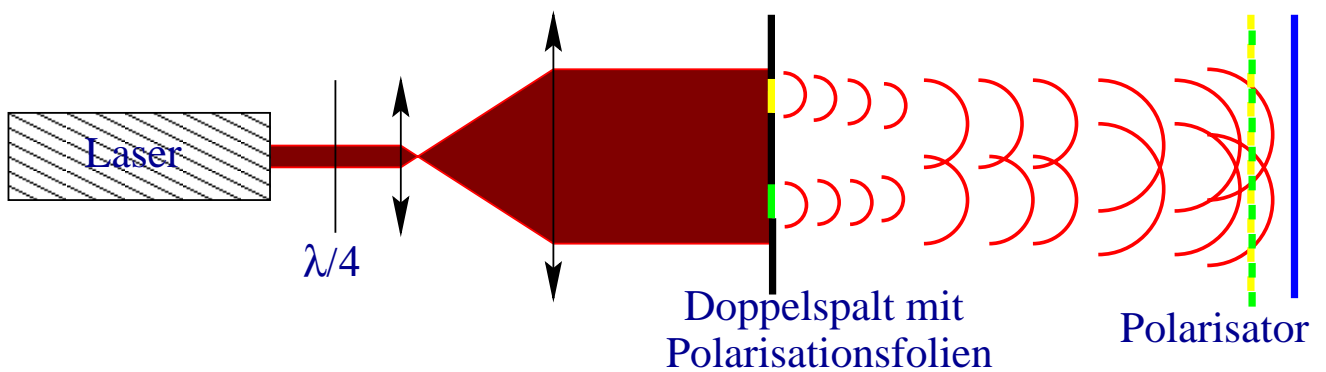
$\Rightarrow$  **es kommen Photonen durch!**

Analogieexperiment zum Quantenradierer

Spalte eines Doppelspalts mit Polarisationsfolien abgeklebt:



**Der Aufbau**



? Wird Doppelspalt-Interferenz beobachtet?

Antwort ...

- ... für die klassische elektromagnetische Welle
- ... oder im Photonenbild

verschiedene Experimente:

- **Doppelspalt ohne Polarisationsfolien**  
Überlagerung von Einzel- und Doppelspaltinterferenz
- **abgeklebte Spalte, ohne Polarisator vor Schirm**  
nur Einzelspaltinterferenz!

Intensität am Schirm (klassisch):

$$\begin{aligned} I(x) &\propto |\vec{E}_1(x) + \vec{E}_2(x)|^2 \\ &= |\vec{E}_1(x)|^2 + |\vec{E}_2(x)|^2 + 2 \underbrace{\vec{E}_1(x) \cdot \vec{E}_2(x)}_{= 0} \end{aligned}$$

Intensitäten der beiden Spalte addieren sich!

quantenphysikalisch:

Wege durch Spalt (1) und (2) unterscheidbar

- **abgeklebte Spalte, Polarisator vor Schirm unter  $45^\circ$**   
klassisch:

$$\begin{aligned} I(x) &\propto |(\vec{E}_1(x) + \vec{E}_2(x)) \cdot \vec{e}_{45} \vec{e}_{45}|^2 \\ &= 0.5(|\vec{E}_1(x)|^2 + |\vec{E}_2(x)|^2) + 2 \underbrace{(\vec{E}_1(x) \cdot \vec{e}_{45})(\vec{E}_2(x) \cdot \vec{e}_{45})}_{\text{Interferenzterm} \neq 0} \end{aligned}$$

quantenphysikalisch:

Wege durch Spalt (1) und (2) **ununterscheidbar**

$\Rightarrow$  **Doppelspaltinterferenz**

- gedankliche Erweiterung  
**Polarisator wird erst nach dem Durchgang der Photonen durch den Doppelspalt angebracht**  
⇒ **Doppelspaltinterferenz wie eben**  
Information über den Weg der Photonen wird nachträglich “ausradiert”

Eindrucksvolle Demonstration des  
“quantenmechanischen Fundamentalprinzips”

**“ununterscheidbare Möglichkeiten interferieren”**

**d.h. Möglichkeiten, vom (präparierten) Anfangszustand zum (beobachteten) Endzustand zu gelangen**

**Zeitliche und räumliche Abstände zwischen Anfangs- und Endzustand spielen dabei keine Rolle; Quantenphysik ist “nicht-lokal”.**



## Nichtlokalität der Quantenphysik

### Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon „EPR“

#### Zwei Teilchen

- die einmal in Wechselwirkung standen
- jetzt aber weit entfernt sind



$$p_1 - p_2 = 0, x_1 - x_2 = 0$$

klassisch:

„freie“ Teilchen

quantenmechanisch:

durch gemeinsames  $\Psi$   
„aneinandergekettet“

Nach dem Realitätsbegriff von EPR (1935):

Messung an Teilchen **2** muß **1** unbeeinflusst lassen!

- Messung von  $x$  oder  $p$  an **2** legt  $x$  oder  $p$  für **1** fest
- also sind  $x_1$  und  $p_1$  auch ohne Messung „Elemente der Realität“

Quantenmechanik:

Impuls- oder Ortsmessung an Teilchen **2** beeinflusst instantan **1**  
verletzt Lokalität!

Schlußfolgerung von EPR:

**QM muß unvollständig sein!**

Postulat von „versteckten Variablen“

EPR 1935: We think that such a theory is possible.

wir wissen heute: **nein!**

## Bohms Version des EPR Paradoxons

Betrachten experimentell einfachere Variable:

**Korrelationen** zwischen

**Teilchenspins** oder **Photon-Polarisation**

in Zweiteilchensystemen



Gesamtpolarisation ist durch gleichzeitige, kohärente Erzeugung der Photonen festgelegt (wie vorher Ort und Impuls)

dann: Messung der Polarisationen unter **verschiedenen Richtungen!**

Nach ihrer Erzeugung befinden sich die Photonen nach der QM im „verschränkten Zustand“

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1 \uparrow\rangle |2 \uparrow\rangle + |1 \rightarrow\rangle |2 \rightarrow\rangle)$$

das ist z.B. äquivalent zu

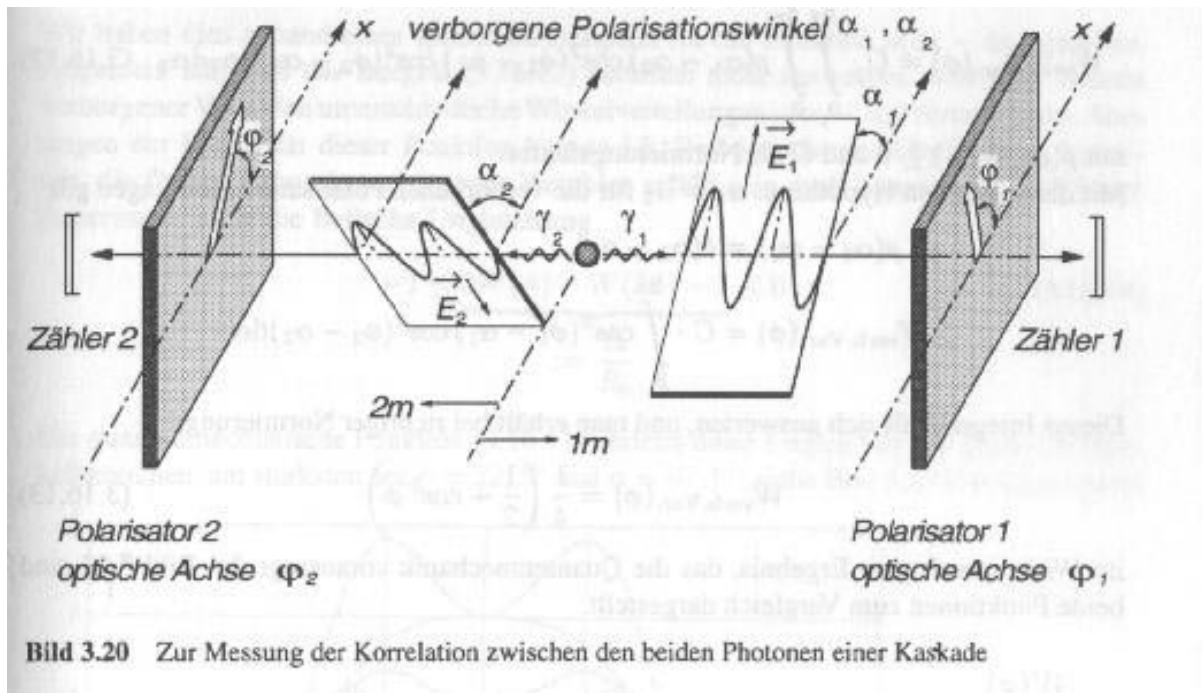
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1 \nearrow\rangle |2 \nearrow\rangle + |1 \searrow\rangle |2 \searrow\rangle)$$

nur in anderer Basis geschrieben  
es gibt beliebig viele (gedrehte) andere

Mehr wissen wir nach der QM **vor** einer Messung nicht!

In Theorien mit **versteckten Variablen** lägen aber die Spinrichtungen der Photonen **schon vorher fest**, z.B. **Winkel  $\alpha$  zur Vertikalen** als versteckte Variable

## QM und versteckte Variable



$\alpha_1$  und  $\alpha_2$  sind die „versteckten“ Variablen  
betrachten Spezialfall  $\alpha_1 = \alpha_2 \equiv \alpha$

Wahrscheinlichkeit, daß beide Photonen Filter passieren:

### Quantenmechanik:

$$W_{\text{QM}} = \frac{1}{2} \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2)$$

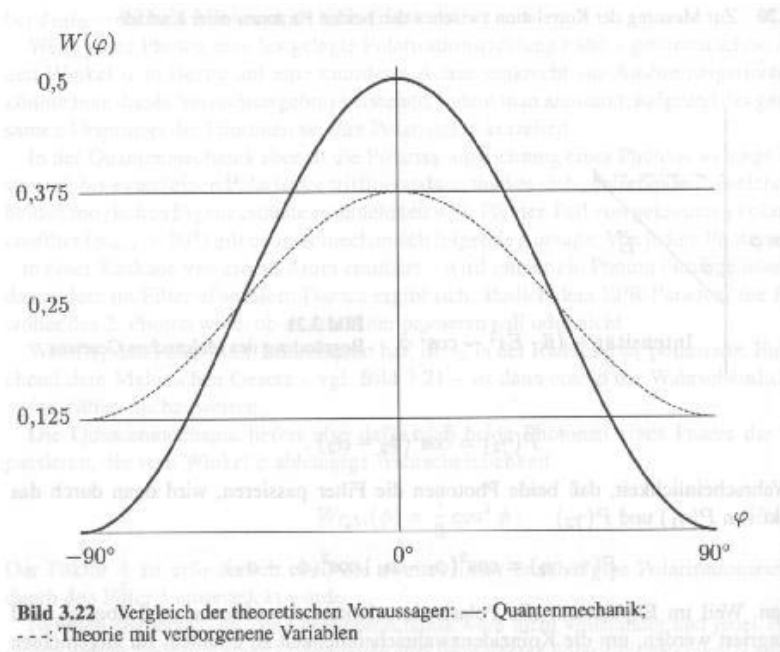
### Theorie mit versteckter Variablen $\alpha$ :

$$P(\gamma_1, \gamma_2) = \cos^2(\varphi_1 - \alpha) \cos^2(\varphi_2 - \alpha)$$

nach Integration über  $\alpha$

$$W_{\text{verst. Var.}} = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} + \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2) \right)$$

graphisch ( $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ):



Quantenmechanik liefert andere Vorhersage  
als Theorie mit „versteckter Variablen“

Korrelationen in der QM sind generell stärker!

**Das kann man experimentell testen!**

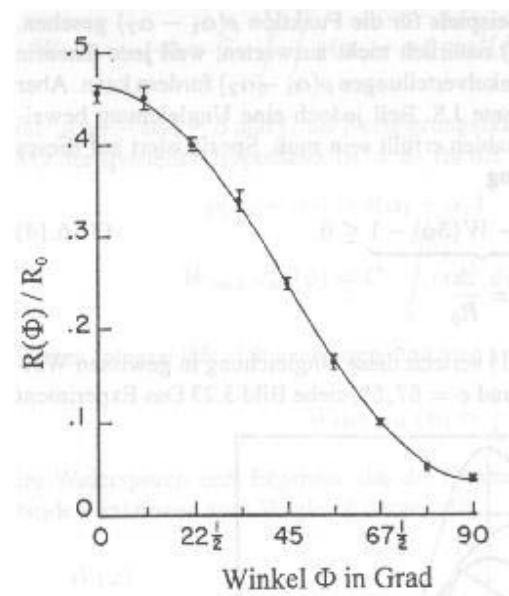
Erster Versuch, 1972

Vergleich experimenteller Messungen mit den Vorhersagen der QM+Detektoreffizienz

(Berkeley 1972)

**Noch nicht eindeutig!**

**Inzwischen eindeutig zu Gunsten der QM entschieden (Aspect et al., 1982)!**



Also:

**Allein die Hypothese, daß den Photonen bei der Emission eine feste Polarisations-Richtung zugeschrieben werden kann, führt zu anderen Vorhersagen als die Quantenmechanik!**

Man kann auch allgemeinere Annahmen über  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  machen. Für diesen Fall gelang es G. Bell 1964, eine Ungleichung anzugeben, die für jede Theorie mit versteckten Parametern gelten muss. Für den Fall der Photon-Polarisation lautet sie:

$$-1 \leq 3 \cdot W(\varphi) - W(3\varphi) - 1 \leq 0$$

beinhaltet Messungen bei Winkeln  $\varphi$  und  $3 \cdot \varphi$

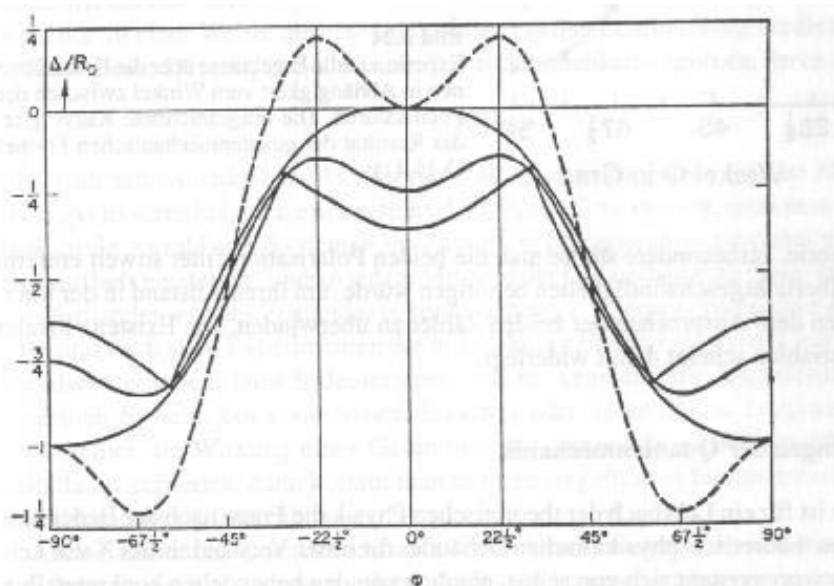


Bild 3.23  $\Delta/R_0$  als Funktion von  $\varphi$  für parallele Korrelation (010-Kaskade).  
 - - - : Quantenmechanik; — : Verschiedene Theorien mit verborgenen Variablen

Bells Ausdruck für verschiedene Theorien

bei  $\varphi = 22.5^\circ$  (und  $\varphi = 67.5^\circ$ ) ist Abstand zur QM am größten

## Wechselwirkungsfreie Messung !

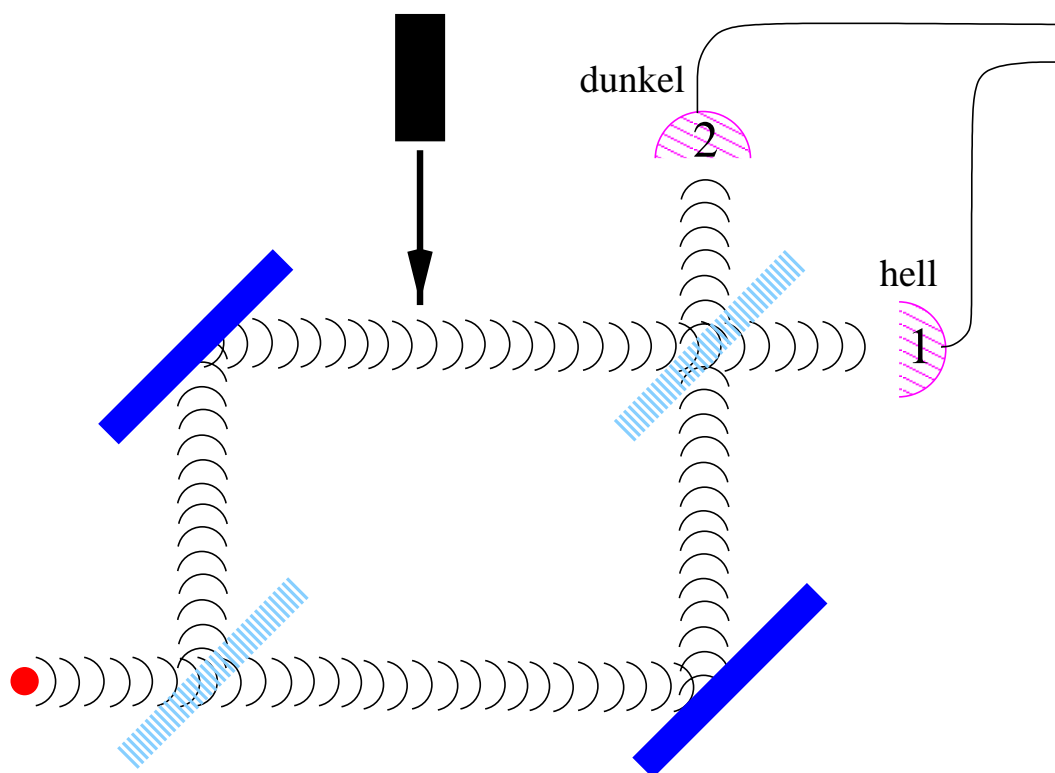
Man sagt der Quantenphysik nach, die Unzulänglichkeit des Meßprozesses sei Grund für Ihre Verrücktheiten

Aber gerade die Quantenphysik erlaubt eine **wechselwirkungsfreie Messung**

„Sehen eines Gegenstands, ohne daß Licht ihn trifft!“ ?

ja !

im Prinzip:



Bei verschlossenem zweiten Interferometer-Arm registriert der sonst immer dunkle Detektor 2 25 % der Lichtintensität

Licht besteht aus Photonen.

Photonen wechselwirken immer nur **ganz oder gar nicht**

### Im Photonenbild:

Von den eintretenden Photonen werden

beide Arme offen	ein Arm verschlossen
100 % vom Detektor 1 registriert	50 % vom Verschluß absorbiert 25 % vom Detektor 1 registriert 25 % vom Detektor 2 registriert

- 25 % der Photonen erreichen den Detektor zwei  
offensichtlich  
ohne Wechselwirkung mit dem Verschluß

ODER

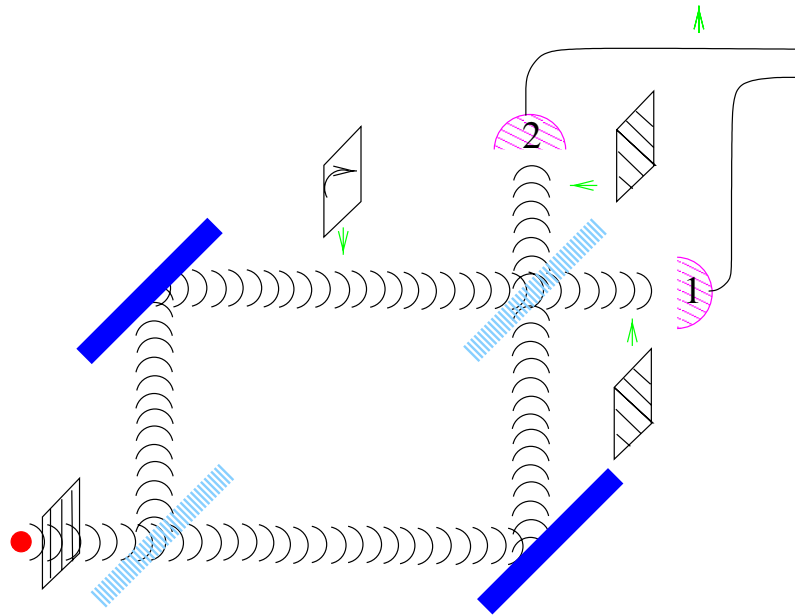
- mit 25 % Wahrscheinlichkeit verrät uns ein  
einzelnes Photon die Gegenwart des Verschlusses  
ohne jemals dort gewesen zu sein!

Photon „spürt“ den gesamten experimentellen Aufbau -  
also auch den weit entfernten Interferometer-Arm !

Quantenphysik ist „nicht-lokal“ !

Noch eine nette Spielerei mit dem Mach-Zehnder:

- polarisiertes Licht & Polarisations-Rotator in einem Arm



⇒

keine Interferenz, 50 % Intensität in beiden Detektoren  
Wege sind jetzt unterscheidbar!

- bringen dann 45°-Polfilter vor jeden Detektor

⇒

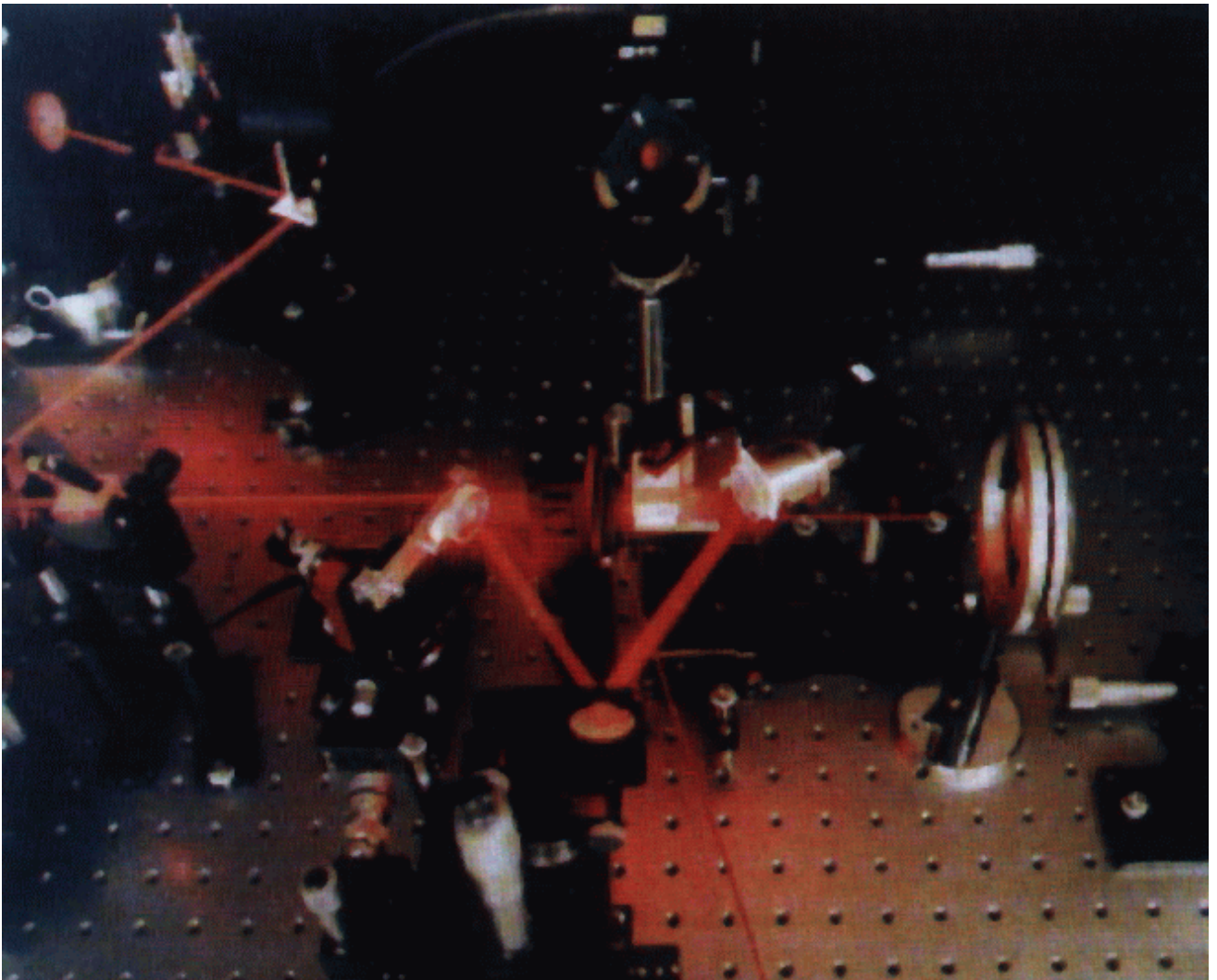
50 % der Photonen werden von den Polfiltern absorbiert  
aber wieder volle Interferenz, Detektor 2 bleibt dunkel!  
Detektoren können Wege jetzt nicht mehr unterscheiden!

Können im Prinzip Detektor 2 weit weg bringen  
und Entscheidung über 45°-Polfilter erst **nach**  
dem Photondurchgang durch Interferometer treffen!

- ? Wo hat sich das Photon denn nun entschieden, ob es  
Welle oder Teilchen sein will?



Kürzlich in einem Quantenlabor (Los Alamos):  
wechselwirkungsfreie Messungen mit 70 %



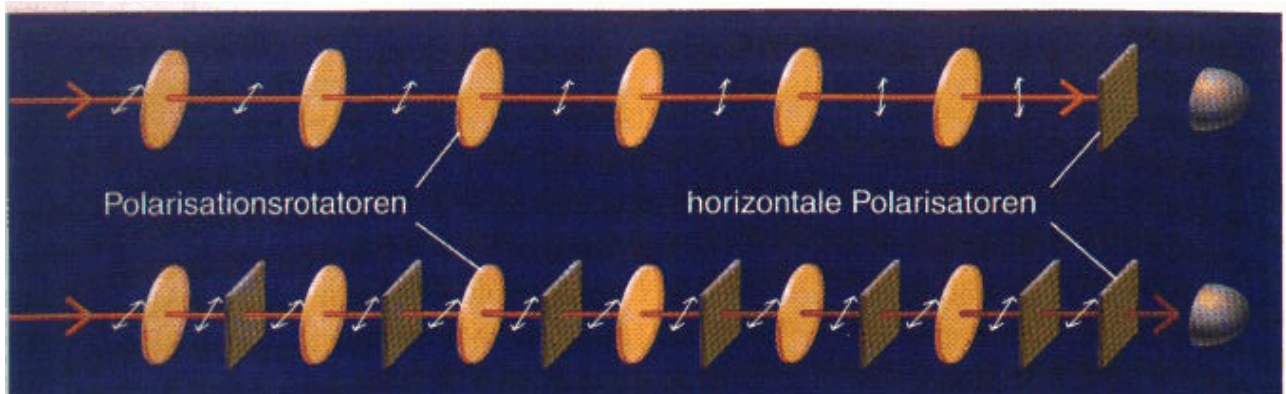
- etwas trickreich:  
Ausnutzung des „Quanten-Zeno-Effekts“

## Prinzip des Quanten-Zeno-Effekts

Betrachten Photon, dessen Polarisation von Polarisations-Rotatoren schrittweise von  $\rightarrow$  nach  $\uparrow$  gedreht wird

z.B.  $6 \cdot 15^\circ$

Führen dann jeweils eine Messung in  $\rightarrow$ -Richtung durch



Bei jedem Meßprozeß wird Polarisation auf  $\rightarrow$  projiziert.

**Drehung der Polarisation unterbleibt**

einige Photonen werden allerdings absorbiert!

Erhöhung der Schrittzahl  $n$  läßt Absorption nach 0 gehen!

$$(1 - (\cos^2 \Phi)^n)$$

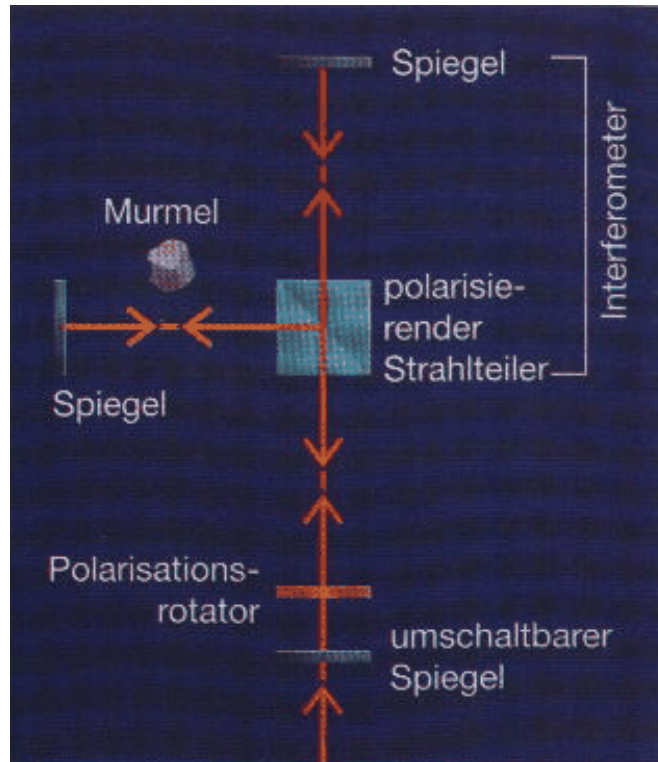
**Quanten-Zeno-Effekt:**

wiederholte Messungen lassen Quantenzustand „einfrieren“

Name nach dem giech. Philosophen Zeno von Elea

## Prinzip der wechselwirkungsfreien Messung

- Licht durchläuft den Aufbau mehrfach
- Ersetzen horizontalen Polarisationsfilter durch **Polarisations-abhängigen Strahlteiler** (z.B. doppelbrechenden Kristall)
- - beim Zusammenfügen **beider** Anteile bleibt Polarisation erhalten  
- fehlt der vertikale Anteil, wirkt der Polarisations-Teiler wie ein horizontaler Polarisationsfilter

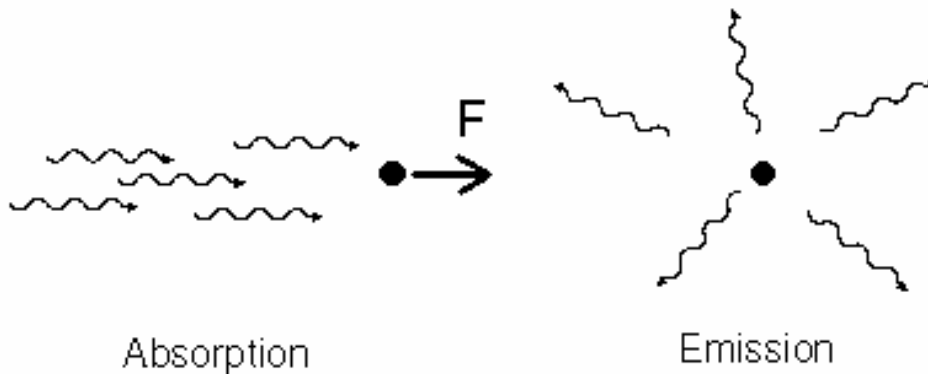


- mit offenem 2. Arm:  
Polarisationsrichtung um  $90^\circ$  gedreht
- mit blockiertem 2. Arm:  
Quanten-Zeno-Effekt verhindert  
Drehung der Polarisation

**Auf diese Art bisher 70 % Effizienz erreicht**

„Murmeln“ wurden nachgewiesen, obwohl sie nur  
in 30% der Fälle von einem Photon getroffen wurden!

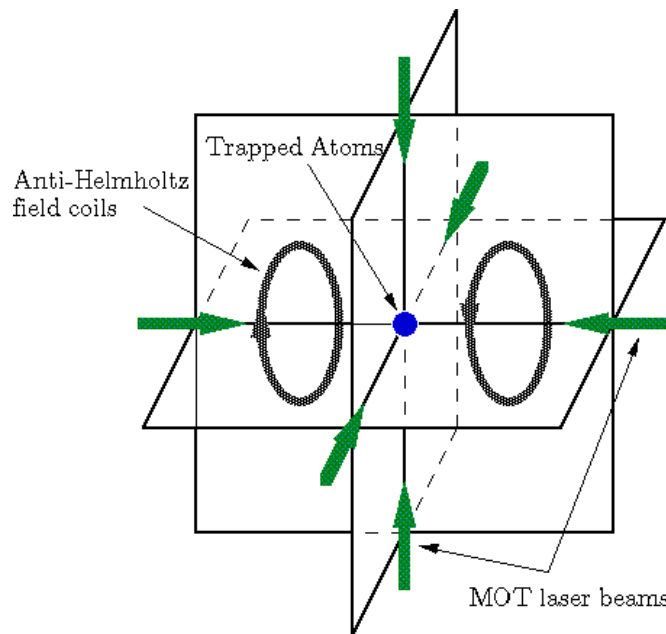
# KALTE Atome – „Atom-Optik“



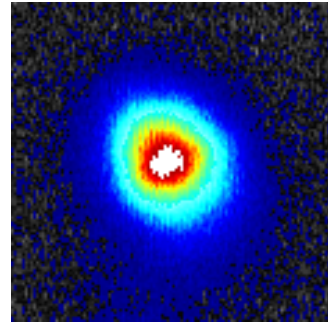
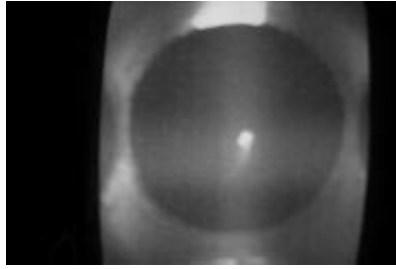
Atome erfahren bei Absorption von Photonen aus Laserstrahl einen **Netto-Impulsübertrag**

⇒ **Kühlung bis auf wenige  $\mu\text{K}$**

6 bzgl. atomarem Übergang rot-verstimmte Laserstrahlen bilden Prinzip der **Magneto-Optischen Falle** („MOT“)



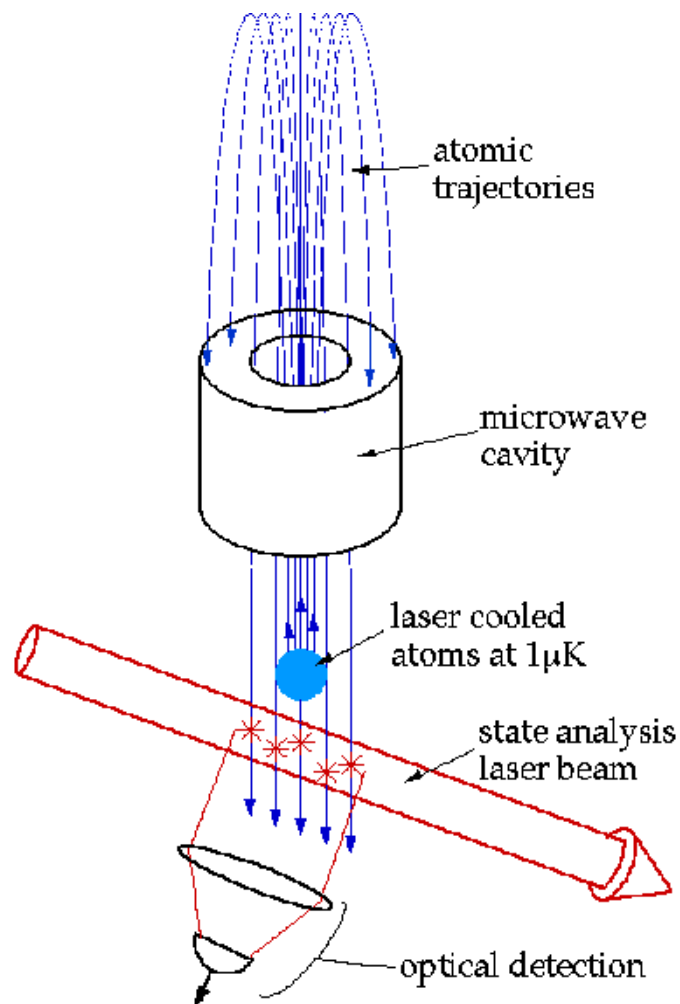
- Effekt der Rot-Verstimmung: Absorption für auf Laserstrahl zufliegende Atome stärker (Doppler-Eff.)
- Magnetfeld zweier Helmholtzspulen mit entgegengesetzten Strömen führt zu verschwindender Absorption im Zentrum der Falle (Zeeman-Effekt)



Typischerweise  $10^8$  Atome gespeichert

Durch Verstimmen eines Lasers können gezielt wenige Atome aus der Falle entlassen werden

## Atom-Fontäne

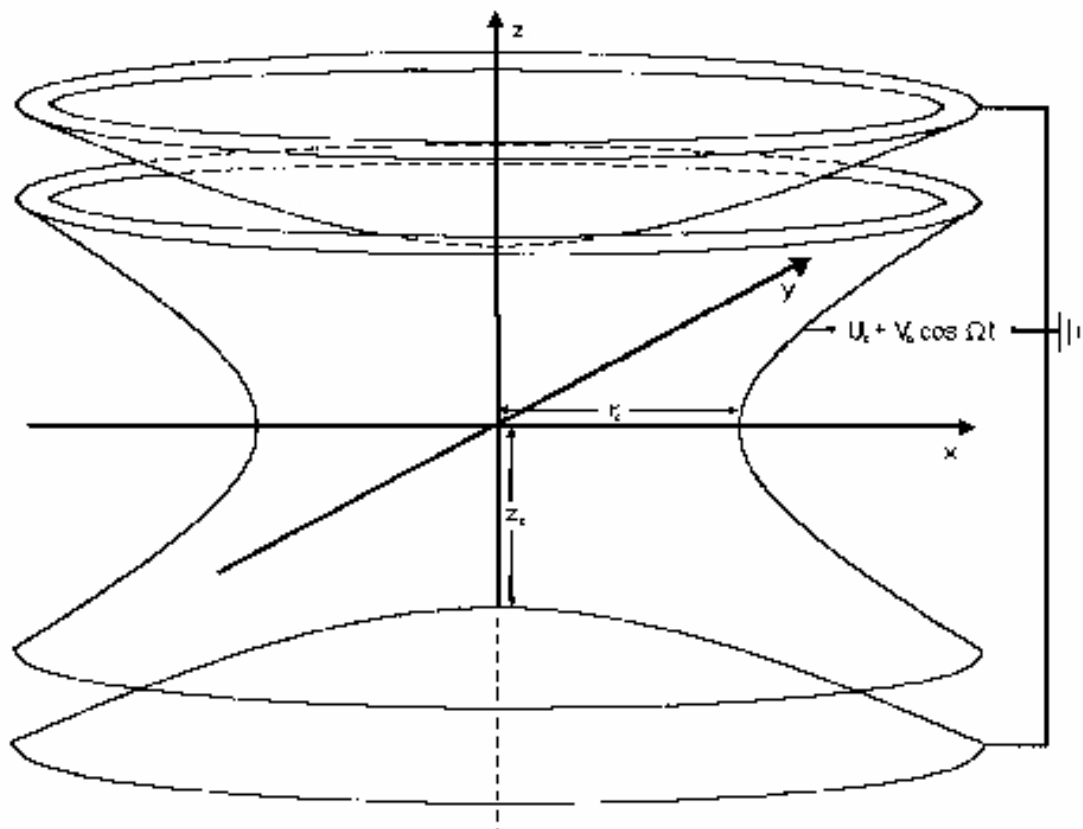


## Speicherung von Ionen in der Paul-Falle

### elektrisch geladene Atome (Ionen)

können in einer “Paul-Falle” gespeichert werden

- Elektrodynamik verbietet in allen drei Raumrichtungen rücktreibendes Potential der Form  $\Phi \propto -(x^2 + y^2 + z^2)$
- aber im zeitlichen Mittel mit elektrischen Wechselfeldern realisierbar

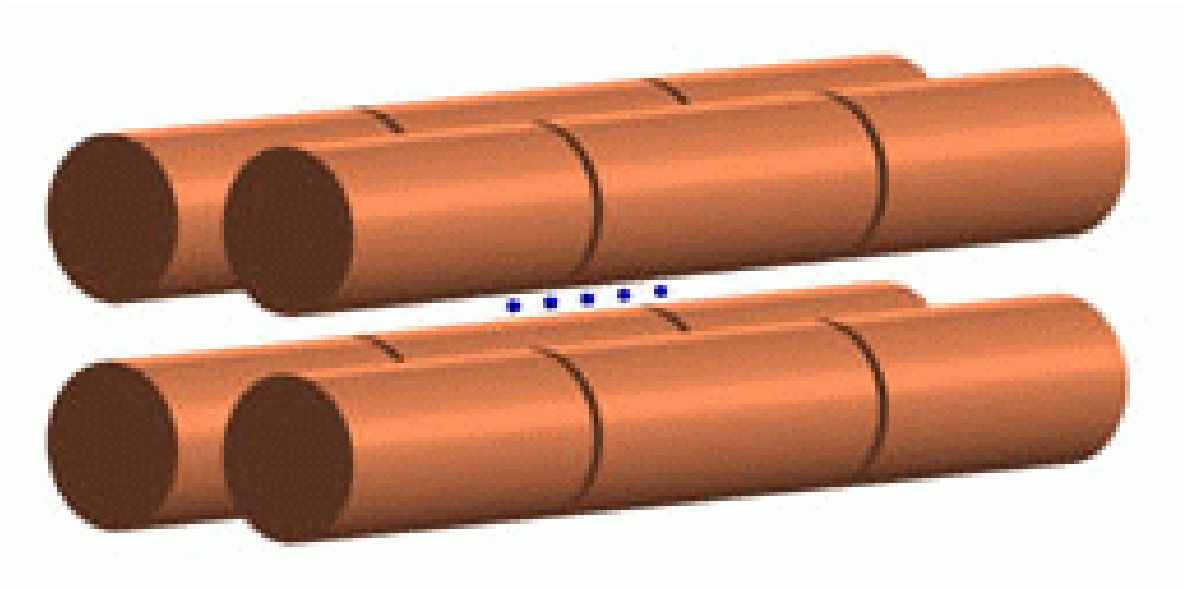


### Elektrodenanordnung bei der Paul-Falle

- Rücktreibend zum Zentrum der Falle in x-y-Richtung
- z-Richtung durch angelegte Wechselspannung

## Lineare Paul-Falle

Auch lineare Elektrodenanordnungen sind möglich



Lineare Paul-Falle

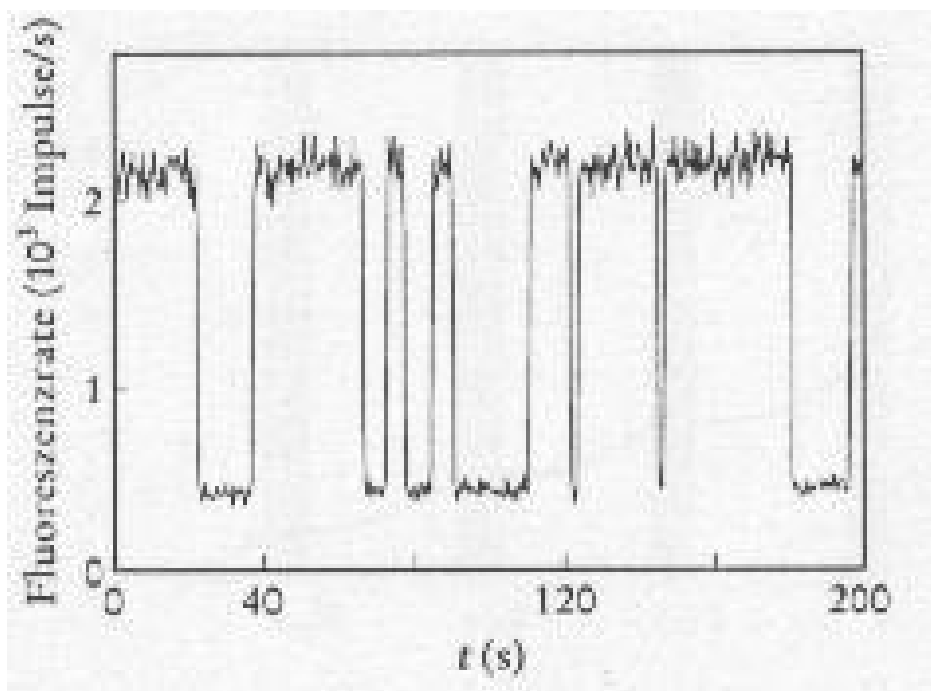
Dimensionen:

- Durchmesser der Stangen 6 mm
  - Abstand von der Mitte 2.7 mm
  - Spannung: 100 – 200 V bei 2 – 3 MHz
- 
- leichter optisch zugänglich (für Laser)
  - axiale Speicherung durch Gleichspannung
  - mehrere Ionen in linearer Kette speicherbar

## Quantensprünge zugeschaut

### EIN Atom in zwei abgestimmten Laserstrahlen

1. **intensiv**: Anregung in kurzlebigen Zustand  
⇒ Aussendung von Fluoreszenz-Photonen
2. **schwach**: Anregung in metastabilen Zustand  
⇒ keine Aussendung von Fluoreszenz-Photonen mehr



- Sprung in meta-stabilen Zustand schaltet Fluoreszenz ab
- Rücksprung in Grundzustand schaltet sie wieder ein

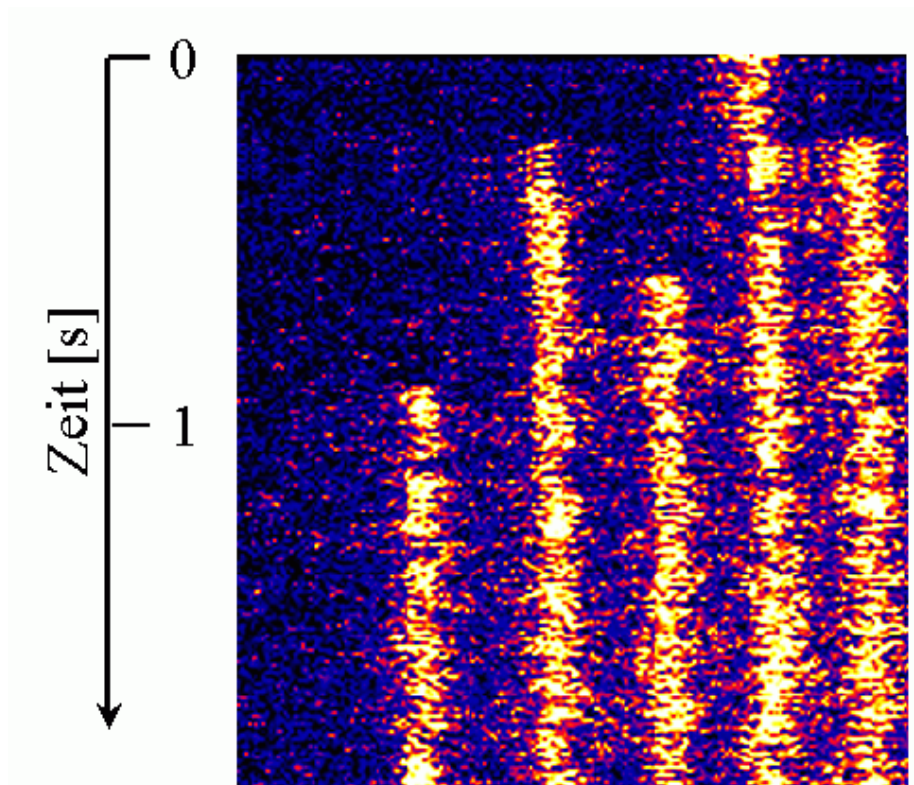
Stochastische Übergänge  
exponentielle Lebensdauer-  
verteilung!



## Eine echte Messung mit linearer Falle

- Laser zur Anregung in metastabilen Zustand abgeschaltet zum Zeitpunkt  $t=0$  s
- Einsetzen des Fluoreszenzlichts nach Rücksprung eines Ions in den Grundzustand

Ion #4 war bei  $t=0$  s nicht angeregt



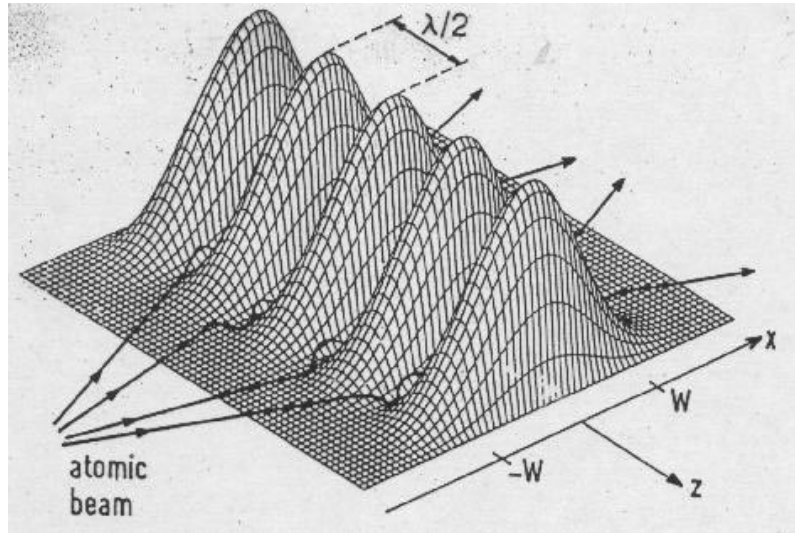
Fluoreszenzlicht von 5 Ionen in linearer Falle  
als Funktion der Zeit (vertikal)

## Authentische Messvideos

sollen für Schülerswertung zur Verfügung gestellt werden

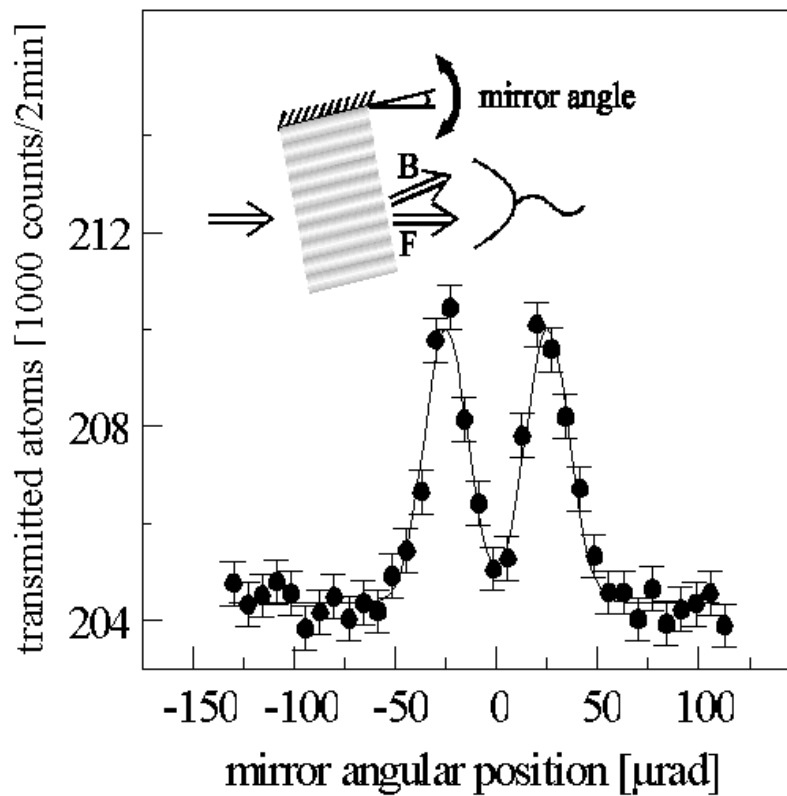
# Beugung von Materiewellen am Lichtgitter

## Atome wechselwirken mit stehender Lichtwelle

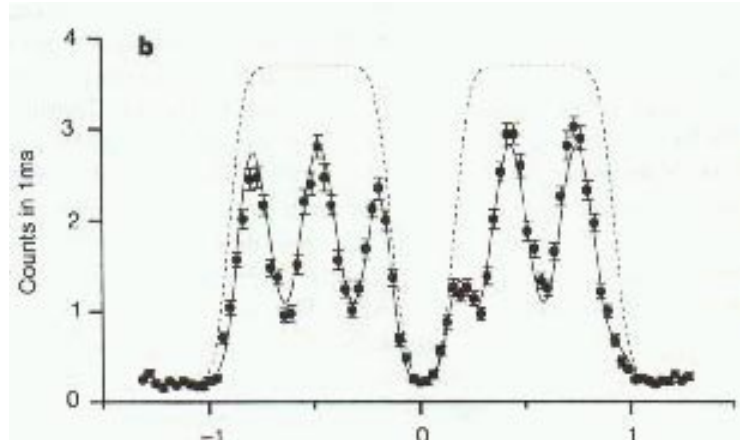
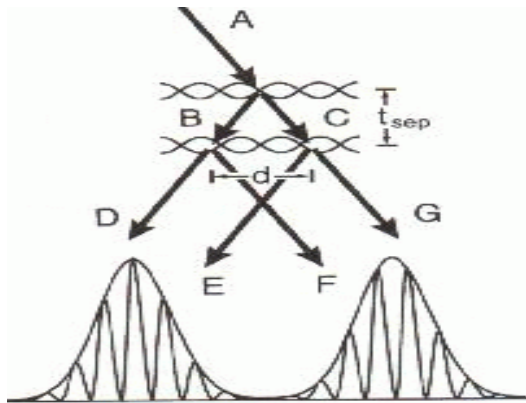


in sich selbst reflektierter intensiver Laserstrahl

⇒ Beugung von **Atomwellen** am „**Lichtgitter**“



# Interferenzexperiment mit kalten Rb-Atomen „Atomstrahlinterferometer“

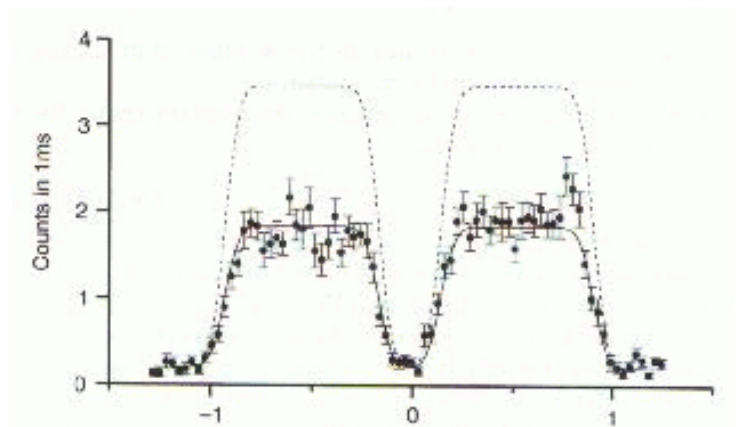


Wege D u. E und F u. G interferieren –

beide Ausgänge zeigen zueinander inverses Interferenzmuster ✓

Wird der rechte Weg durch Mikrowellenanregung eines metastabilen Hyperfeinstrukturübergangs markiert

⇒



keine Interferenz mehr ✓

## Das Besondere an diesem Experiment:

- Ausnutzung von inneren Freiheitsgraden eines massiven Quantenobjekts zur Weg-Markierung
- dabei kaum nennenswerter Impulsübertrag  
mind. 1000 mal kleiner als zum Verschwinden der Interferenz nötig!



Welcher-Weg-Information führt zu Verlust der Interferenz  
– unabhängig von Unbestimmtheitsrelation!

**zum ersten Mal in diesem Experiment im Sept. 1998 gezeigt!**

vgl. z.B. Doppelspalt-Experiment mit Elektronen:

- Messung der Position am Spalt mit hinreichender Genauigkeit führt **wegen Unbestimmtheitsrelation** zu großem Impulsübertrag
- Impulsübertrag kann für das Verschwinden der Interferenz verantwortlich gemacht werden

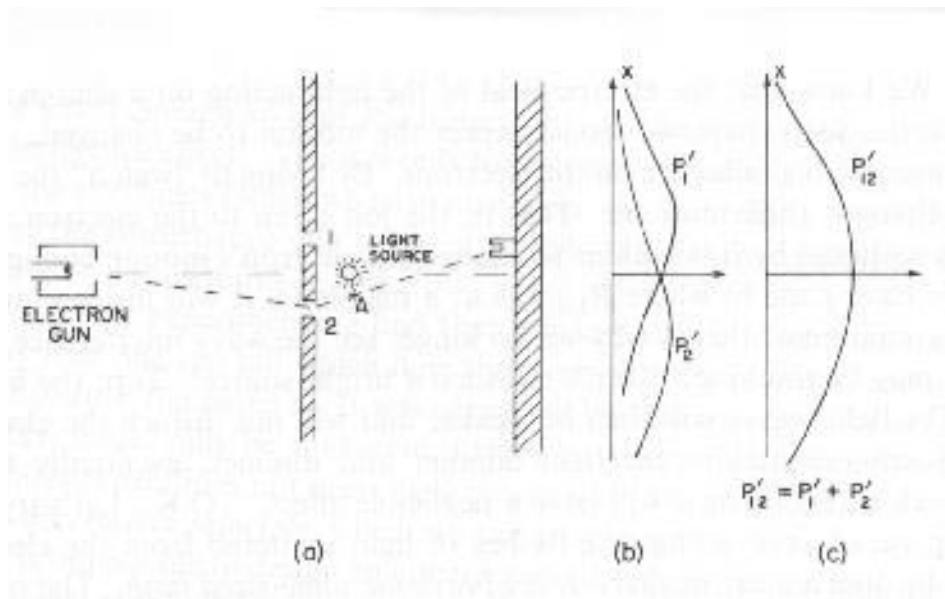
Einsteins Rückstoßmessung am Spalt  
Feynmans Lichtmikroskop

Feynman:

„No one has ever found  
(or even thought of) a way  
around the uncertainty principle“

**Schade, daß er es nicht mehr erleben konnte!**

# Feynmans Doppelspalt-Experiment mit optischer Beobachtung des Weges



aus: The Feynman Lectures on Physics, Vol. III

## „Verschränkte Zustände“

### Korrelationen zwischen Polarisationsrichtungen von 2 Photonen



Gesamtpolarisation ist durch gleichzeitige, kohärente Erzeugung der Photonen festgelegt

Vor Messung an einem der Photonen ist keine Richtung ausgezeichnet!

Photonen nach der QM im „verschränkten Zustand“  
(oder “Bell-Zustand“):

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1 \parallel\rangle |2 \parallel\rangle + |1 \perp\rangle |2 \perp\rangle)$$

|| und  $\perp$  beziehen sich auf **beliebige** Richtung!

QM fordert:

Eine Polarisations-Messung an Teilchen 1  
beeinflusst instantan Teilchen 2

„EPR Paradoxon“

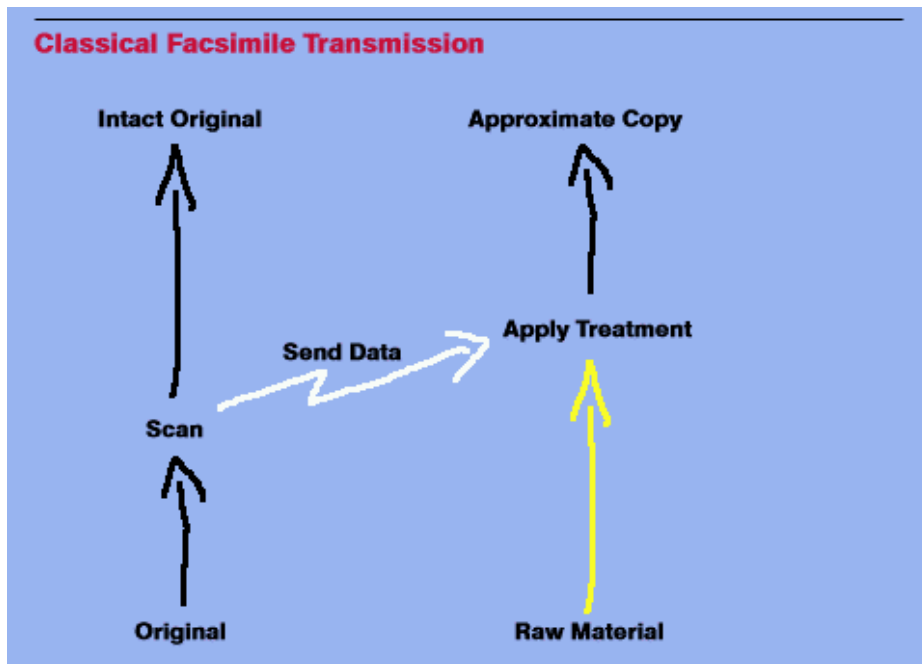
vielfach experimentell bestätigt, verschränkte Zustände  
räumlich weit entfernter Quantenobjekte ist Alltag

bisheriger Rekord: Univ. Genf, auf Glasfaserkabel zwischen  
Bernex und Bellevue, ca. 10 km Entfernung

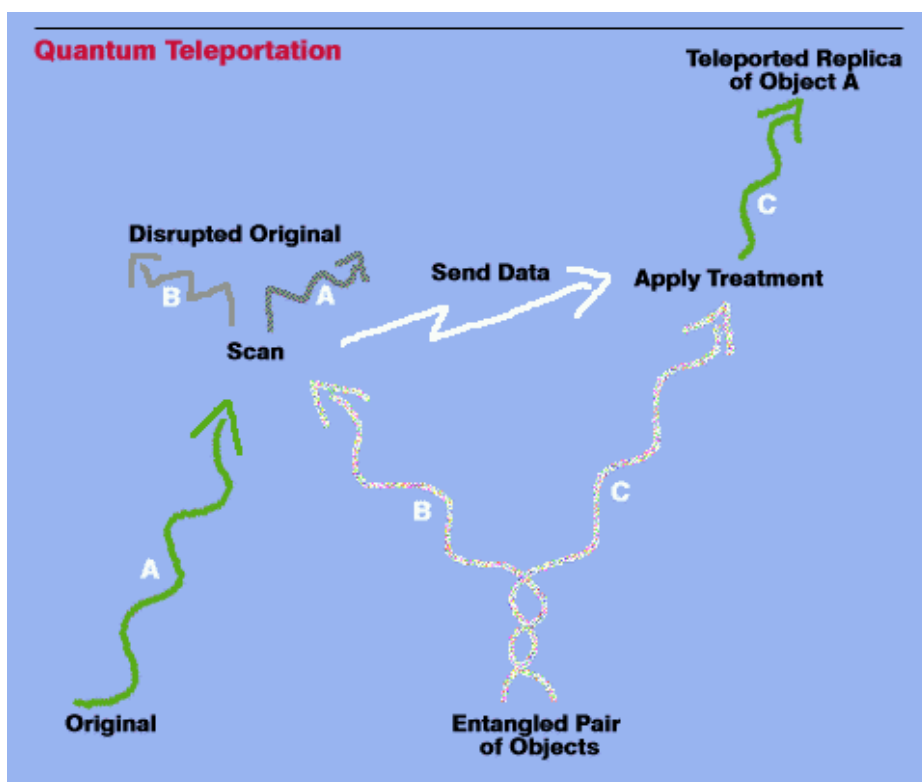
**Quantenphysik ist nicht-lokal**

# Anwendung von EPR-Zuständen: „Quantenteleportation“

Klassische Übertragung:



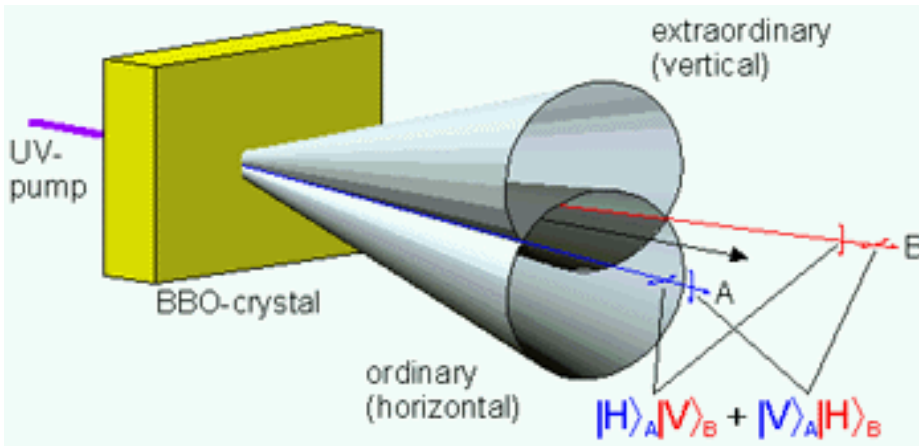
oder mit Hilfe von Quantenmechanik:



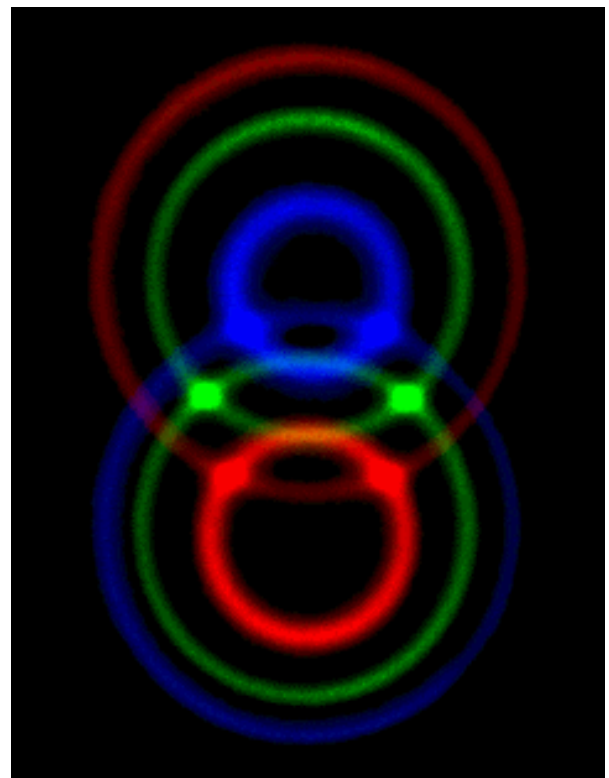
## Intensive Quelle von EPR-Photonen

Beschuß eines nichtlinearen  $\beta$ -Barium-Borat (BBO) Kristalls mit einem intensiven, kurzen UV-Laserpuls,  
 $\lambda=351 \text{ nm}$ ,  $\Delta t=200 \text{ fs}$

⇒ je zwei Photonen durch „**parametrische Abwärtskonversion**“ (Umkehrung der Frequenzverdopplung)

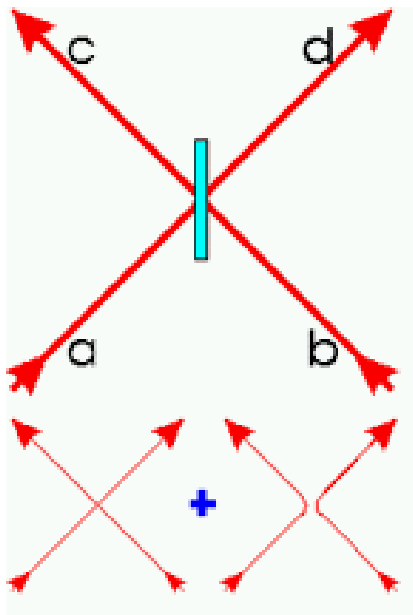


Aufnahme mit drei Interferenzfiltern  
in 5 nm-Wellenlängenbereichen um  
681, 702 u. 725 nm





# Mischung von Photonen am Strahlteiler



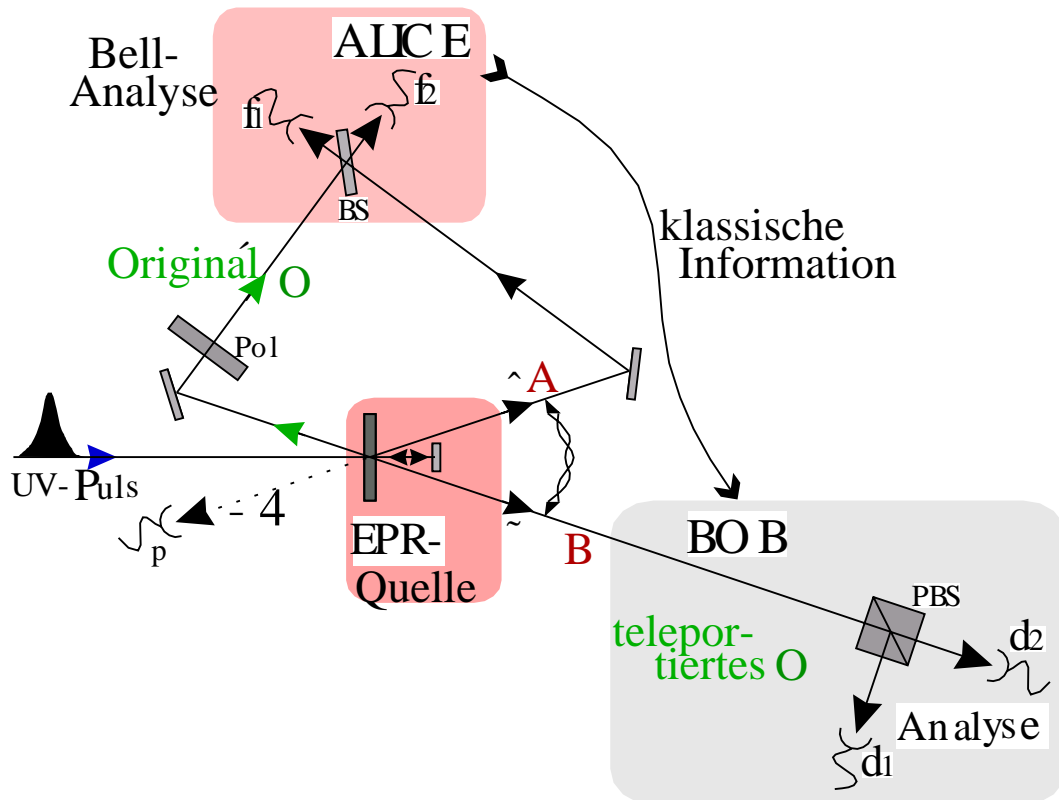
Durch Überlagerung an einem Strahlteiler können zwei Photonen ununterscheidbar gemacht werden

⇒ verschiedene Möglichkeiten interferieren.

- Verwendung von degenerierten Photonen aus parametrischer Abwärtskonversion
- schmalbandige Wellenlängenselektion (3 nm FWHM) mittels Blenden und Interferenzfiltern, d.h. Photonen haben Kohärenzlängen von ca.  $150 \mu\text{m}$  !
- Weglängeneinstellung über piezoelektrische Translatoren
- Laser-Vermessung zur Alinierung
- Koinzidenzmessung mit Einzelphoton-Empfindlichkeit in sehr kurzem Zeitfenster

# Das erste Experiment

(A. Zeilinger et al., Innsbruck, Dez. 1997)



„Teleportation“ von Photon-Spinzustand mit 25 % Erfolg  
da nur einer von 4 möglichen Bell-Zuständen detektiert

- Erzeugung von verschränkten Photonen A und B
- Alice überlagert Original O und Photon A am Strahlteiler  
jetzt sind O und A verschänkt!
- Koinzidenz-Messung der Photonen am Strahlteiler  
hier: nur 1 von 4 möglichen Ergebnissen registriert  
(mit antisymmetrischer Gesamtwellenfunktion)
- dies hat wegen Nicht-Lokalität instantane Auswirkung auf B
- Meßergebnis von Alice wird klassisch an Bob übertragen
- Bob weiß jetzt:  
**Teleportation erfolgreich, d.h  $B \equiv O$**

**Anm.:** Detektion aller 4 beim Sender mögl. Meßergebnisse  
ermöglicht Rekonstruktion von O beim Empfänger mit 100% Erfolg

Interessant für abhörsichere Telekommunikation  
und zum Auslesen von „Quanten-Computern“

## Empfehlenswerte (deutschsprachige) Literatur

- **Lehrbuch zur Quantenphysik**  
Horst Rollnik, Quantentheorie, Band 1, Vieweg Verlag (1995), Braunschweig/Wiesbaden.
- **Darstellung neuer Experimente**  
Quantenphänomene, Spektrum der Wissenschaft Sonderheft (1999), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg.
- **direkt für den Lehrer und die Schule**  
Praxis der Naturwissenschaften, Quantentheorie, Heft 8/48, Dezember 1999, Aulis Verlag, Köln;  
Praxis der Naturwissenschaften, 100 Jahre Quantentheorie, Heft 8/49, Dezember 2000, Aulis Verlag, Köln.

## Resumé

- In den 70 Jahren ihres Bestehens hat die Quantenphysik alle Tests mit Bravour bestanden, hier demonstriert anhand von „Kabinett-Stückchen“ aus den modernen Quantenlabors.
- Der Übergang zwischen Quanten- und klassischer Physik wartet noch auf eine Klärung

(hier nicht angesprochen)