



**Würzburger Quantenphysik-Konzept  
Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule**

**WQPK:**

**Würzburger Quantenphysik-  
Konzept**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Zitat nach A. Zeilinger: „Quantum Teleportation“ in Scientific American, April 2000, S. 32 - 41

**Indeed, following Bohr, I would argue that we can understand quantum mechanics, if we realize that science is not describing**

**how nature is**

**but rather expresses**

**what we can say about nature.**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Ziele:

- weniger Formalismus
- mehr „Verständnis“ in der QP
- Vermeidung des „Geburtsfehlers der herkömmlichen Didaktik der QP“

Basis: gängige Lehrbücher der Quantentheorie

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Geburtsfehler:

- Die Wellen der Quantenphysik (Wellenfunktionen) breiten sich - wie die Teilchen - im uns umgebenden Anschauungsraum aus.
- Die Wellen der Quantenphysik (Wellenfunktionen) repräsentieren Teilchen – statt Wahrscheinlichkeiten



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Was Sie erwartet:

- I Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- II Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- III Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- IV Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- V Resümee



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## I Sprachregelungen über Wellen und Teilchen



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Das sollte selbstverständlich sein:

- dass in der Schrödinger-Theorie Wellen vorkommen, aber in häufig hochdimensionalen Konfigurationsräumen : Wellenfunktionen
- dass Schrödingersche Wellenfunktionen nur Wahrscheinlichkeits-Vorhersagen für künftige Messungen machen, für Teilchen-Zustände
- dass Wellenfunktionen keine Wellen im Anschauungsraum sind
- dass die Bornsche Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Schule behandelt sein und genutzt werden sollte

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Quanten-Teilchen sind definiert als Eigenzustände des Teilchenzahl-Operators mit Teilchenzahl = 1.**

**Quanten-Teilchen sind definiert als Quanten-Objekte, die abzählbar sind (Teilchenzahl = 1).**

- Teilchen-Eigenschaft hat nichts mit Lokalisierung zu tun !
- Ein Elektron, Photon, ... ist eindeutig ein Teilchen im Sinne der Quantenphysik, aber kein klassisches Teilchen.
- Ein Atom, Fulleren-Molekül, ... ist ein Teilchen im Sinne der QP, wenn es als Ganzes gezählt wird.
- Ein Mehr-Teilchen-Zustand (z.B. ein Photonenzwilling) besteht nicht aus individuellen Teilchen. Diese entstehen erst durch eine Messung.





# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Quanten-Teilchen ?

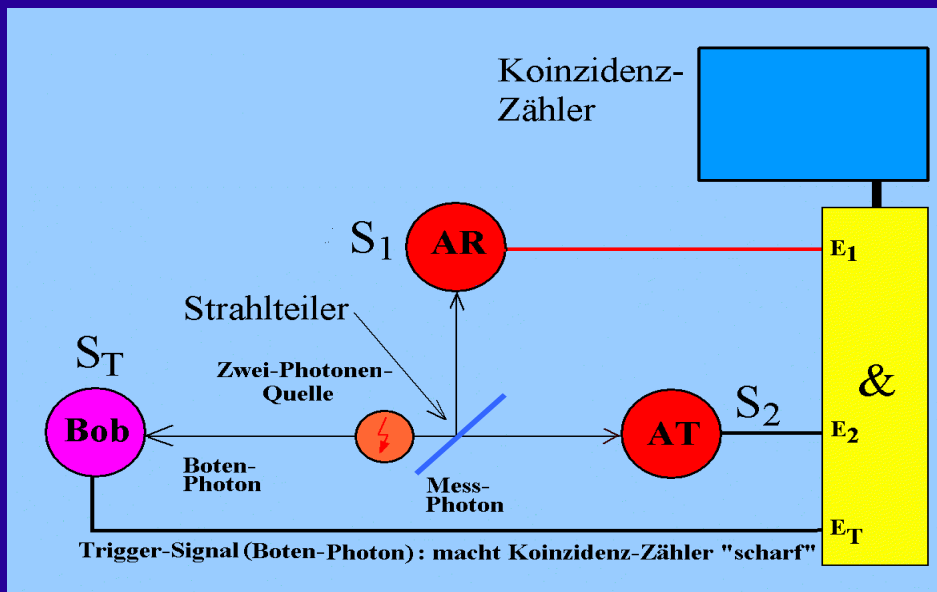
Millikan 1911: Es gibt keine (ungebundenen) Bruchteile von Elektronen

Quantentheorie ca. 1930: Es gibt keine „verschmierten“ Elektronen  
oder „Ladungswolken“

**Quanten-Teilchen sind Träger einiger weniger  
fester Eigenschaften wie Ladung, (Ruhe-)Masse,  
Spin, Baryonenzahl, ...**

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Das GRA-Experiment (Grangier-Roger-Aspect 1981):**  
Wie verhält sich das Messphoton am Strahlteiler?



**SIMULATION**

**Photonen treten – wie Elektronen - immer ungeteilt auf**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Teilchen-Zustände (Fock-Zustände) sind  
Zustände mit be-stimmter Teilchenzahl**

Gegensatz dazu: (z.B. kohärente Zustände):  
Zustände mit un-be-stimmter Teilchenzahl



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Was Sie erwartet:

- I Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- **II Was meine ich mit heuristischen Methoden?**
- III Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- IV Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- V Resümee



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Ich habe mir also folgende Forderungen an "vernünftige" **heuristische Verfahren für die Schule** gestellt:

- Sie sollen physikalische Sachverhalte **treffend** vor Augen stellen.
- Sie und die erläuterten Sachverhalte sollen **einfach** sein.
- Sie sollen **möglichst wenig im Widerspruch** stehen zu anderen wichtigen Aussagen der Physik, insbesondere der Quantenphysik.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

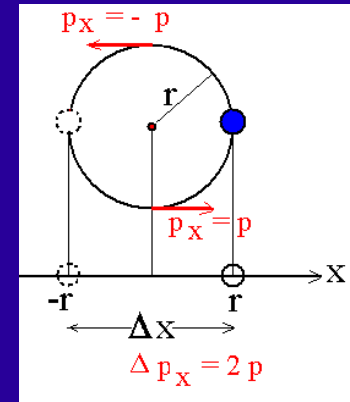
## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### H-Atom: E heur. aus Minimalprinzip ?

(1)  $E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$

(2)  $E_{\text{pot}} \text{ prop. } -1/r$

(3)  $E_{\text{kin}}$  aus der HUR:  $\Delta p \cdot \Delta r = h/2\pi$  mit  $\Delta r \approx r$   $\Delta p \approx p$  gilt also  
 $\Delta p \cdot \Delta r \approx r \cdot p = h/2\pi$ , also  $p = h/2\pi r$  und damit  $E_{\text{kin}} = p^2/2m$  prop.  $1/r^2$



Ableitung von E nach r liefert als Minimum die Gesamtenergie E.

Ergebnis stimmt (recht gut) mit der Grundzustandsenergie des H-Atoms und dem Bohrschen Radius überein.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### H-Atom: E heur. aus einem Minimalprinzip ?

- (1)  $E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$       Widerspricht Quantenphysik: Gesamtenergie  $E$  und  $E_{\text{pot}}$  können nicht gleichzeitig existieren.
- (2)  $E_{\text{pot}}$  prop.  $-1/r$       Wer sollte denn  $E_{\text{pot}}$  am Ort mit Radius  $r$  haben?
- (3)  $E_{\text{kin}}$  aus der HUR:      klingt quantenmechanisch, aber Un-be-stimmtheit ist nicht Schwankungsbereich.
- (4)  $\Delta p \cdot \Delta r \approx r \cdot p = h/2\pi$       Das ist gerade die Bohrsche Quantenbedingung:  
=> Grund für Grundzustandsenergie entsprechend Bohr
- (5)  $E_{\text{kin}}$  prop.  $1/r^2$       Das Elektron im Abstand  $r$  vom Kern soll diese kinetische Energie haben?



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

In diesem Sinn verstehe  
ich „heuristisch“ nicht !





# **Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule**

## **III Die Grundfakten bzw. heuristischen Methoden nach dem**

## **Würzburger Quantenphysik-Konzept**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**▲ Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.**

- Messgröße nicht nur unbekannt
- Sie existiert ohne Messung **nicht als Eigenschaft des Systems**
- Beispiel: Ohne eine Messung hat ein Elektron keinen (be-stimmten) Ort und keine (be-stimmte) Geschwindigkeit.

Vor der Messung kann man weder sagen, dass das System die zugehörige Eigenschaft hat, noch dass es sie nicht hat.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**▲ Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.**

**Objektive Un-be-stimmtheit :**

**Wenn ein Objekt eine be-stimmte – klassisch denkbare - Eigenschaft nicht hat, kann sie durch eine Messung be-stimmt werden, aber dann mit streuenden Messwerten !**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**▲ Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.**

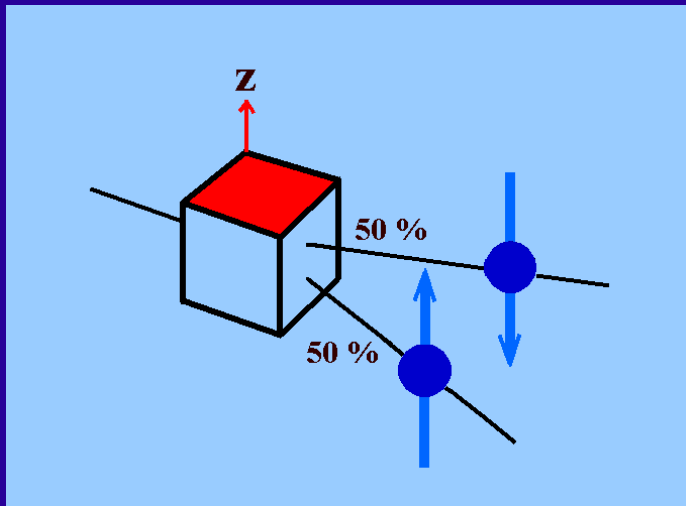
**Objektive Un-be-stimmtheit :**

**Sie ist der Grund für streuende Messwerte mit objektiven Wahrscheinlichkeiten.**

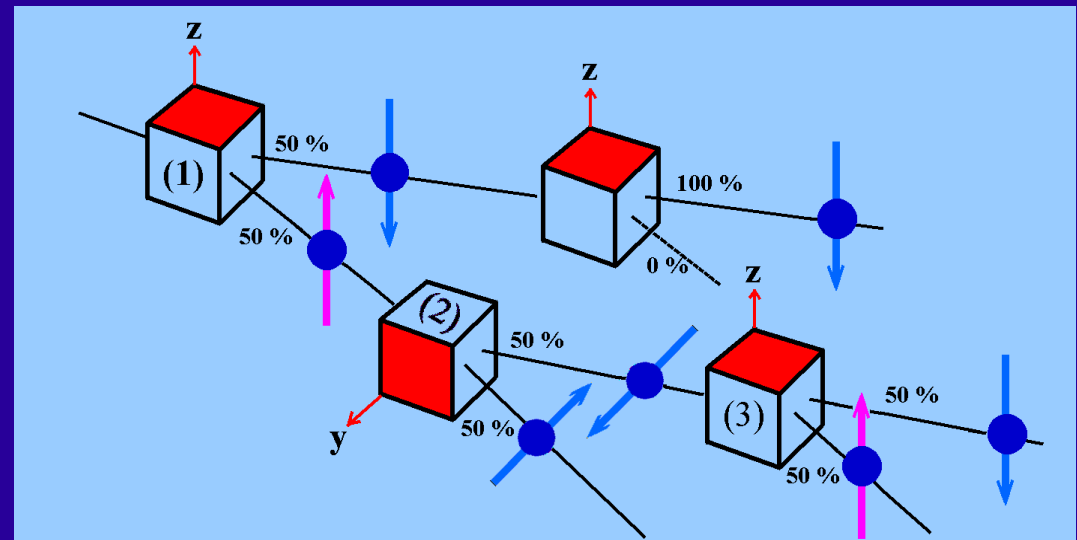
**=> Borns Wahrscheinlichkeitsdeutung der Wellenfunktion**

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Objektive Un-be-stimmtheit: Spin-Messungen (Stern-Gerlach-Apparatur) Mehr



Vor der Messung ist der Spin un-be-stimmt.



Obere Zeile: nach der 1. Messung Spin be-stimmt; Messergebnis ist reproduzierbar.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**▲ Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.**

**Es gibt Zustände zu einer be-stimmten Messgröße:**

**Dann **hat** das Quantenobjekt diese Eigenschaft.**

**Wiederholte Messungen liefern gleiche Messwerte.**

**=> Beispiel: Stationäre Zustände eines Atoms mit be-stimmter Energie  $E$ ; Spinkomponente  $S_z$**

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**▲ Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.**

**Wenn eine Messgröße un-be-stimmt ist, befindet sich das Quantenobjekt in einem „Überlagerungszustand“ von Zuständen mit bestimmter Messgröße.**

**=> Beispiel:  $S_z$  un-be-stimmt =>**

**Überlagerung von  $S_z$  auf und  $S_z$  ab ( $S_z = 1$  und  $S_z = -1$ )**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**B** Nicht alle klassisch denkbaren Eigenschaften eines Systems sind *gleichzeitig* realisiert / haben *gleichzeitig* einen physikalischen Sinn / sind *gleichzeitig* messbar:

### Komplementarität

Beispiel: Ein Elektron hat nicht gleichzeitig Ort und Geschwindigkeit als Eigenschaft.

Die jeweiligen Messapparaturen lassen nicht zu, dass beide gleichzeitig einen physikalischen Sinn haben.





# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Zwei Größen A und B heißen komplementär, wenn sie nicht gleichzeitig Eigenschaften des Objekts sein können (nicht gleichzeitig messbar sind).**

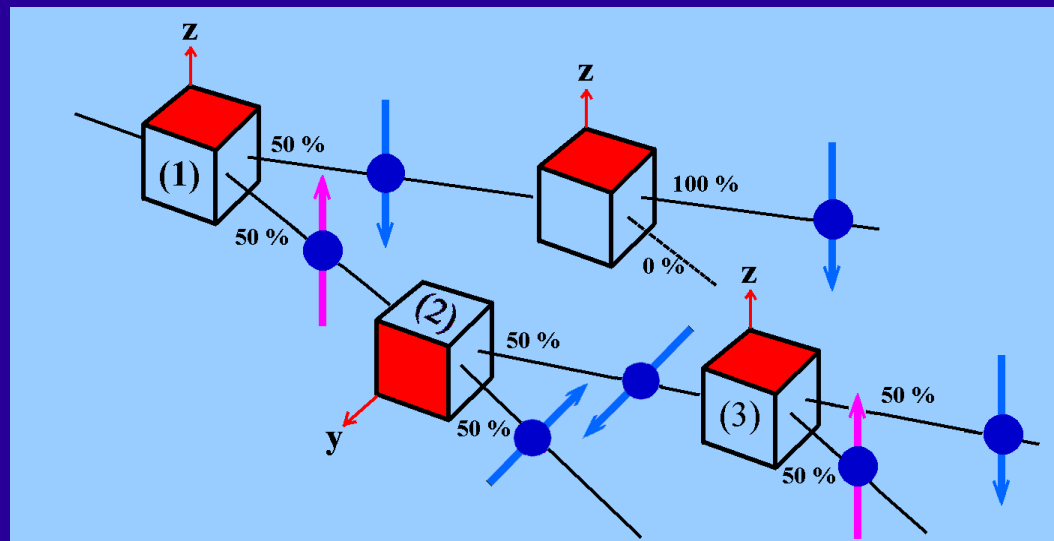
### Beispiele:

- Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons
- Beim Doppelspalt: Durchtrittsort und Interferenzfähigkeit
- Spin in unterschiedliche Richtungen:  $S_x$ ,  $S_z$  oder  $S_x$ ,  $S_y$
- Kinetische und potenzielle Energie

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Spin-Messungen (Stern-Gerlach-Apparatur)

Hat ein Elektron zugleich Spin-Komponenten in x-, y-, z-Richtung ?



**Nein !!!**

Nach der Messung der y-Komp. des Spins (2) ist die z-Komp. un-be-stimmt geworden.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**M.E. sind**

- objektive Un-be-stimmtheit und
- Komplementarität

**die Schlüssel zum „Verständnis“ der QP in der Schule !**

Keine Schülerfragen:

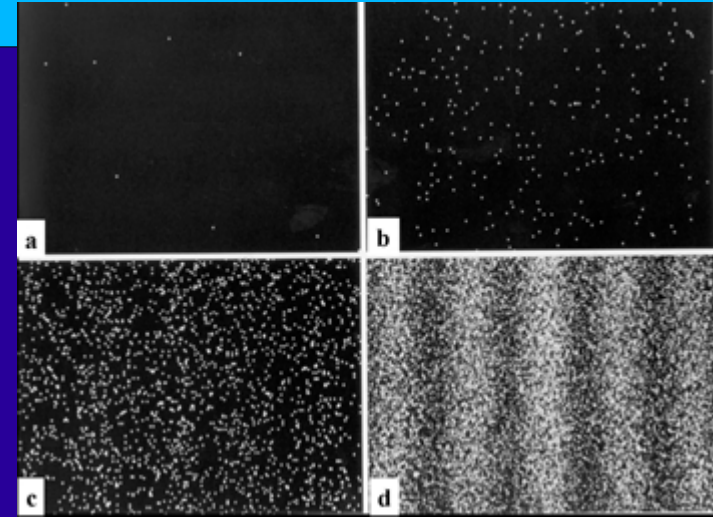
- Wie kommt ein Teilchen zum Nachweisort?
- Welche Geschwindigkeit hat ein Teilchen an einem bestimmten Ort?
- Warum streuen die Messwerte gemäß der HUR?
- Ist zu erwarten, dass eine bessere Theorie die fehlenden Kenntnisse doch noch findet?

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Versuche von Taylor (ph), Tonomura (e), GRA u.a.

Bereits ein einzelnes Photon oder Elektron führt in einer solchen Situation zur Interferenz.



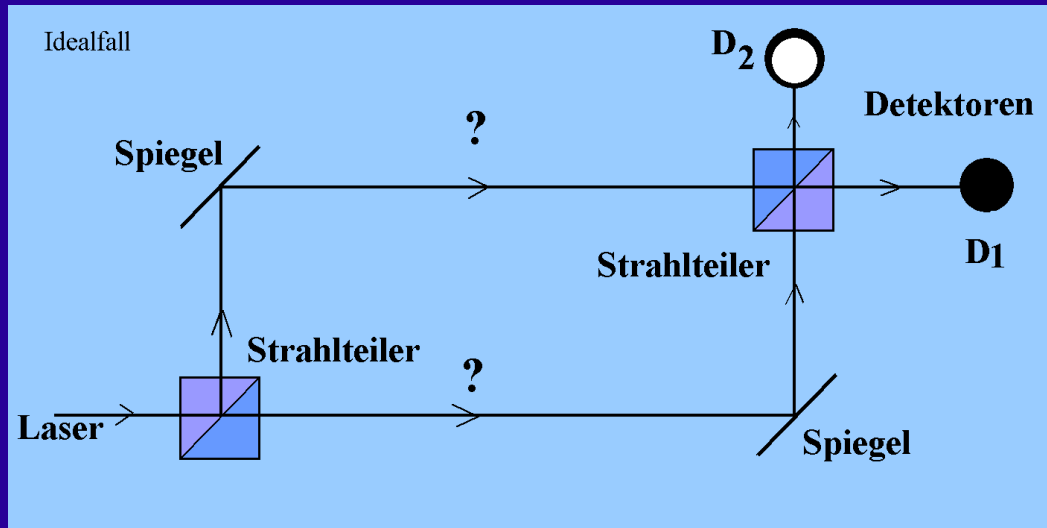
**C Einteilchen-Interferenz** ist die Interferenz von nicht unterschiedenen klassisch denkbaren Möglichkeiten.

Interferenz findet statt, wenn zu einem Ereignis zwei oder mehr klassisch denkbare Möglichkeiten beitragen, zwischen denen nicht unterschieden wird.

**Interferenz: eher „Überlagerung von Möglichkeiten“ als von „etwas“ (Wellen)**

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Mach-Zehnder-Interferometer



Ein-Teilchen-Interferenz

**Für D<sub>1</sub>:** beide Wege gleich:  
Konstruktive Interferenz

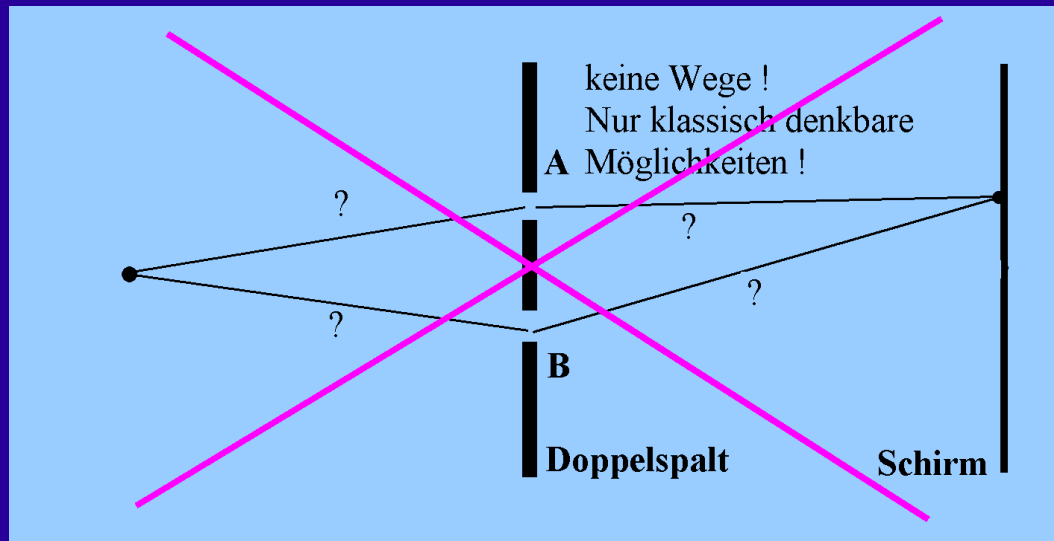
**Für D<sub>2</sub>:** Phasensprung auf  
einem Weg: Destruktive  
Interferenz

Interferenz mit einem einzelnen Photon findet statt, weil es zwei klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, zu einem Detektor zu gelangen, zwischen denen nicht unterschieden wird.

**Nach der QP hat „Weg“ ohne Messung keinen Sinn!**

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Doppelspalt-Versuch



## Ein-Teilchen-Interferenz



Interferenz mit einem einzelnen Teilchen findet statt, weil es zwei klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, zu einem Detektor zu gelangen, zwischen denen nicht unterschieden wird.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Abzulehnende Sprechweisen:

"Das Elektron interferiert am Doppelspalt mit sich selbst".

Kann nicht wörtlich genommen werden,

1. da unterstellt würde, dass es "in Wirklichkeit" einen Durchtrittsort des Elektrons gibt, dass er jetzt sogar aufgespalten ist in zwei Orte,

2. da es keine Bruchteile von Elektronen gibt.

DeBroglie-Wellenlänge  $\lambda = h/p$  ist nicht „Wellenlänge des Elektrons“, sondern „dem Elektron zugeordnete Wellenlänge“.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

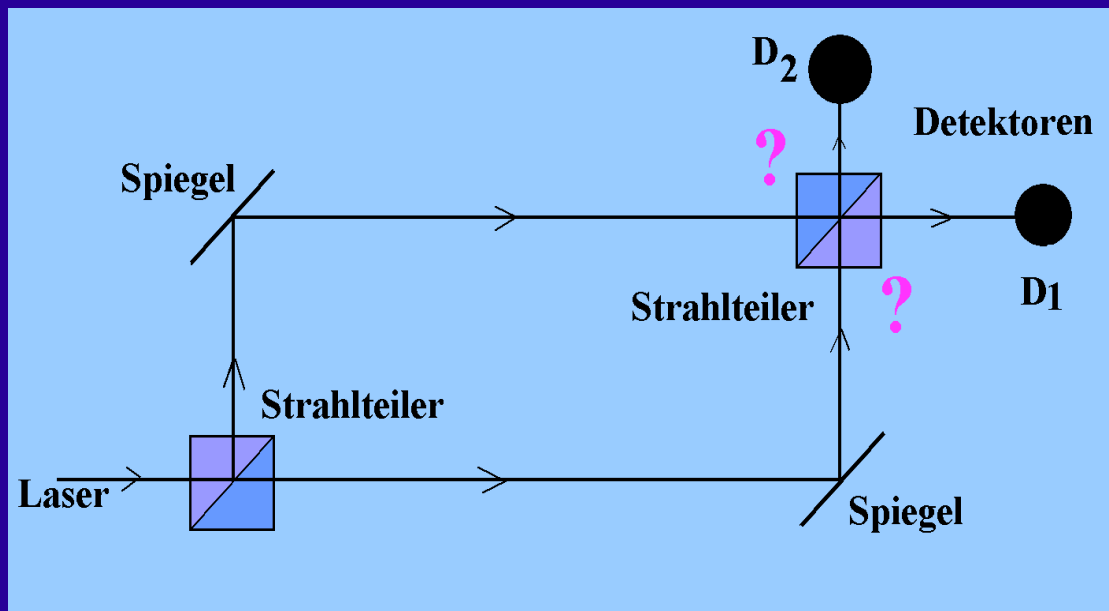
**D** WWI („Welcher-Weg-Information“) und Interferenz sind komplementär

(Küblbeck und Müller nennen nur das - wie mir scheint - Komplementarität, obwohl Komplementarität (gemäß B) eher allgemeiner erscheint).



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Mach-Zehnder-Interferometer



WWI und Interferenz ?

Zweiter Strahlteiler fehlt:

WWI, aber keine Interferenz

Zweiter Strahlteiler vorhanden:

keine WWI, aber Interferenz



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### **E Heisenbergsche Un-be-stimmtheitsrelation**

### **HUR**

Sie ist eine direkte Folge der Nicht-Gleichzeitigen-Messbarkeit (Komplementarität) zweier physikalischer Größen (Ausnahme: Energie-Zeit-Unschärfe).

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## HUR

Ein Quanten-System sei in einen bestimmten Zustand präpariert worden.  
Für diesen Zustand seien **A** und **B** zwei nicht gleichzeitig messbare Größen.  
Dann ist mindestens eine der Größen un-be-stimmt, häufig auch beide inner-  
halb bestimmter Bereiche, innerhalb der Un-be-stimmtheiten  $\Delta A$  und  $\Delta B$ .

Zukünftige Messwerte von **A** und **B** werden für den betrachteten Zustand  
so realisiert werden, dass sie innerhalb der Un-be-stimmtheiten streuen.

Ihr Produkt lässt sich nicht unter eine bestimmte Schwelle drücken:

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq | \langle [A,B] \rangle / 2i | \quad ( \Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi )$$

Dass die Messwerte streuen müssen, ist klar, wenn man akzeptiert, dass die zugehörigen  
Messgrößen in diesem Zustand nicht (gleichzeitige) Eigenschaften des Systems sind.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Beispiele **komplementärer Größen**, für die also eine **Un-be-stimmtheitsrelation** gelten muss:

- Orts- und gleichgerichtete Impuls-/Geschwindigkeitskoordinate  $x, p_x$
- $E_x$  und  $B_x$
- $E_x$  und  $E_y$
- verschieden orientierte Drehimpulskomponenten (Spin-Komponenten)
- bei einer elektromagnetischen Welle oder Schallwelle Amplitude / Teilchenzahl und Phase
- Gesamtenergie und kinetische Energie (potenzielle Energie) im H-Atom
- kinetische und potenzielle Energie im H-Atom.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Un-be-stimmtheiten sind nicht:

- Schwankungsbereiche an sich be-stimmter Messgrößen
- Bereiche der (subjektiven) Unkenntnis ("Ungewissheiten")
- Mess-Ungenauigkeiten / „Unschärfen“

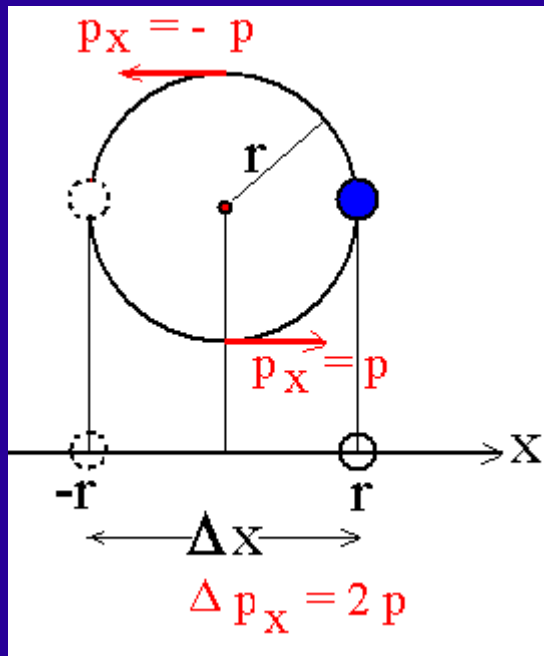
sondern Bereiche, in denen bei einer Messung – im betreffenden Zustand - Messwerte komplementärer Messgrößen überwiegend realisiert werden werden

obwohl sie nicht gleichzeitig Eigenschaften des Systems sein können

Keine Einschränkung der Kenntnis, sondern Geschenk!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Herleitung der HUR ?



Quantenbedingung nach Bohr:  $p \cdot r = n \cdot h / 2\pi \quad (n \in \mathbb{N})$ .  
 $x$ -Koordinate schwankt zwischen  $-r, r \Rightarrow$  Schwankung  $\Delta x \approx r$   
 Impuls-Koordinate  $p_x$  zwischen  $-p, p \Rightarrow$  Schwankung  $\Delta p_x \approx p$   
 $\Rightarrow \Delta x \cdot \Delta p_x \approx r \cdot p = n \cdot h / 2\pi$

Sieht wie eine HUR aus, ist aber keine:

$\Delta x$  und  $\Delta p_x$  sind hier nicht die quantenphysikalischen Unbestimmtheiten, sondern **Schwankungsbereiche**.

**Einziger Sinn für die Schule: zu zeigen, was die HUR nicht ist.**

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

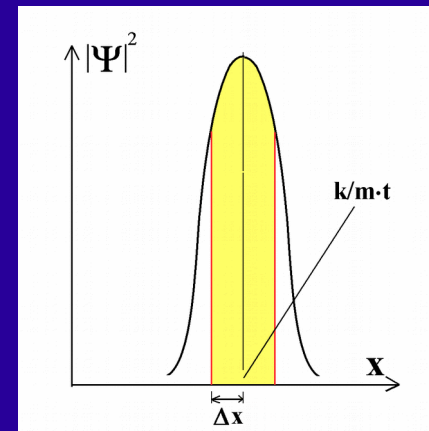
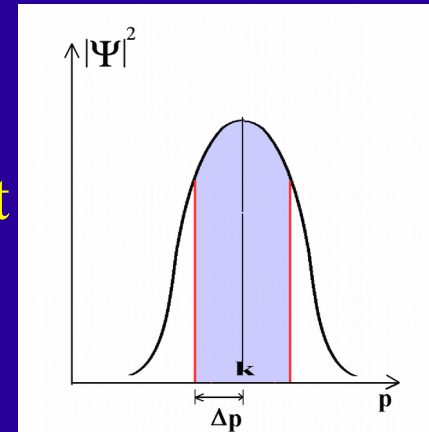
## Bedeutung der HUR ?

Beispiel: betrachteter Zustand: frei laufendes Gauß-Paket

Ein Teilchen wird in diesen Zustand präpariert;  
dann wird eine Ortsmessung durchgeführt;  
das Teilchen (oder identisches) wird wieder in den  
Zustand präpariert;  
dann Impulsmessung.

Das wird sehr oft wiederholt.

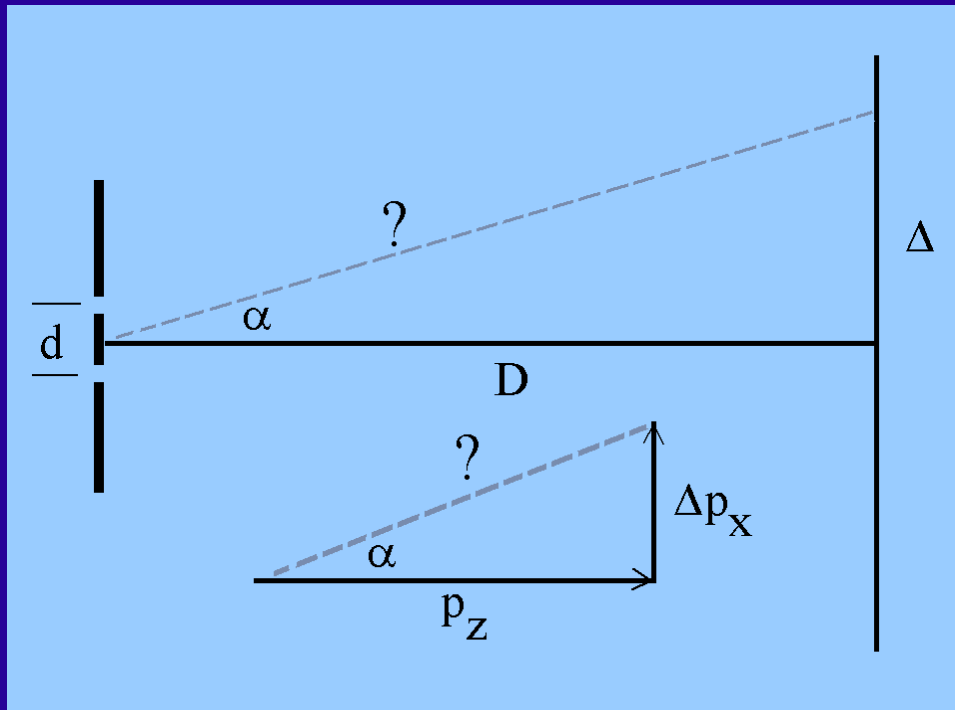
Die Impulse streuen dann um einen Wert  $k$ ,  
die Orte um einen Wert  $x = k/m \cdot t$ .



$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$$

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule



Halbklassische Plausibilität:

Orts-Unbestimmtheit  $\Delta x = d$  (od.  $d/2$ )

Streuungen des Nachweisorts gemäß  
 $\Delta/D = \Delta p_x / p_z$ , also

Impuls-Unbestimmth.  $\Delta p_x = \Delta/D \cdot h/\lambda$   
 mit der deBroglie-Wellenlänge  $\lambda = h/p_z$

also:  $\Delta p_x \cdot \Delta x = \Delta/D \cdot h/\lambda \cdot d$

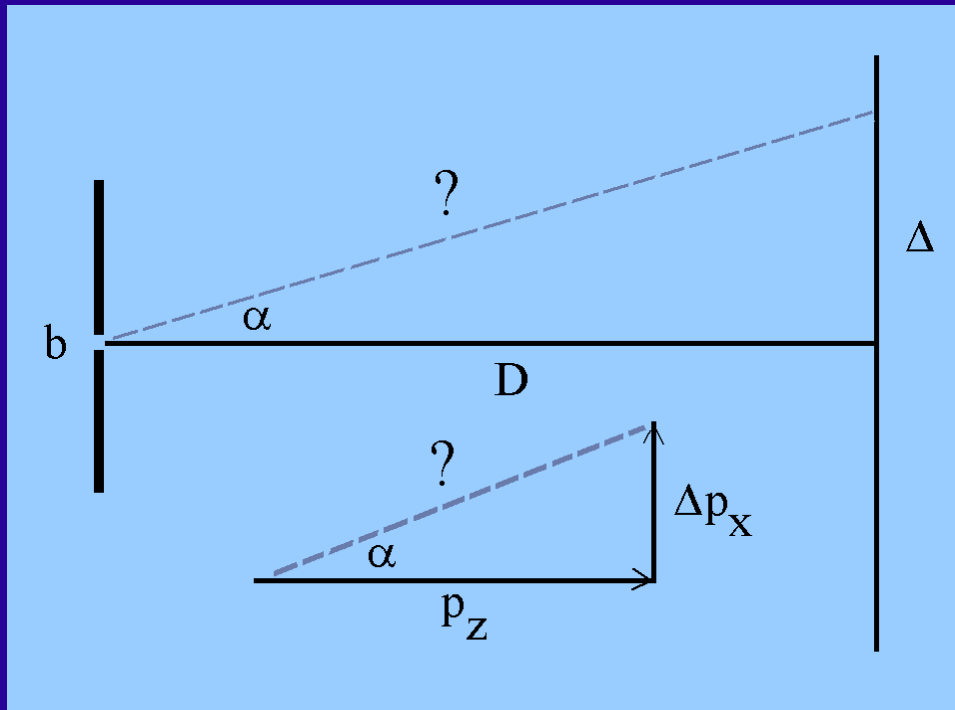
Als Maß für die Impuls-unbestimmtheit wird die (halbe) Breite  $\Delta$  des zentralen Maximums gewählt (Kleinwinkelnäherung):  $\Delta/D = \lambda/2d \Rightarrow$

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = \lambda/2d \cdot h/\lambda \cdot d = h/2$$



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule



Beispiel einer Anwendung: **Einfachspalt**

Orts-Un-be-stimmtheit  $\Delta x = b$  (od.  $b/2$ )

Impuls-Un-be-stimmth.  $\Delta p_x \geq \hbar/(2b)$

Streuungen des Nachweisorts gemäß

$$\Delta/D = \Delta p_x / p_z, \text{ also } \Delta = D \hbar / (2b p_z)$$

$$[ \Delta = D \hbar / 2b / (h/\lambda) = D \lambda / (b 4\pi) ]$$

mit der deBroglie-Wellenlänge  $\lambda = h/p_z$

=> zentrales Maximum um so breiter, je geringer Spaltbreite  $b$  und Impuls  $p_z$   
 Lage des 1. Minimums in Kleinwinkelnäherung nach Wellentheorie:

$$\lambda/b = \Delta/D, \text{ also}$$

$$\Delta = D \lambda / b$$



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Klassische Veranschaulichungen?

### “Heisenberg-Mikroskop“, „Feynmans Elektronenbeleuchtung“ ?

Zusätzlicher Effekt, der mit der HUR nichts zu tun hat!

2010/2012 experimentelle Trennung beider Effekte, z.B. an TU Wien

Zitat: „Die Unschärfe (eigentl.: Un-be-stimmtheit) kommt nicht vom störenden Einfluss der Messung auf das Quantenobjekt, sondern von der Quanten-Natur der Teilchen selbst.“



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Das sollte der Lehrer im  
Hinterkopf haben:**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### **F** Revision des Teilchenbegriffs, besonders bei Mehr- oder Vielteilchen-Zuständen

(Eigenzustände des Teilchenzahl-Operators:

Wenn  $n = 1$  : Quantenteilchen,

Wenn  $n = 2$  : Teilchenzwilling, Biphoton, ...

Allgemein: Quantenobjekt: Gegenstand der Quantenphysik )



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Ein Quanten-Teilchen besitzt nicht alle klassisch denkbaren Eigenschaften gleichzeitig.

In **Mehrteilchenzuständen** (also z.B. einem Photonen-Zwilling, oder dem He-Atom mit zwei Elektronen oder anderen Mehrelektronen-Atomen) liegen ohne eine Messung **keine individuellen Teilchen** vor. **EPR!**

Nicht alle Materie kommt in Zuständen mit be-stimmter Teilchenzahl vor.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

In **Mehrteilchenzuständen** (also z.B. einem Photonen-Zwilling, oder einem He-Atom mit zwei Elektronen oder anderen Mehrelektronen-Atomen) liegen ohne eine Messung **keine individuellen Teilchen** vor.

In solchen Mehrteilchen-Zuständen (z.B. Teilchenzwillingen, ... ) sind die Teilchen häufig „**verschränkt**“.

Ich las einmal eine klassische Veranschaulichung der Verschränkung **mit klassischen Würfeln**.

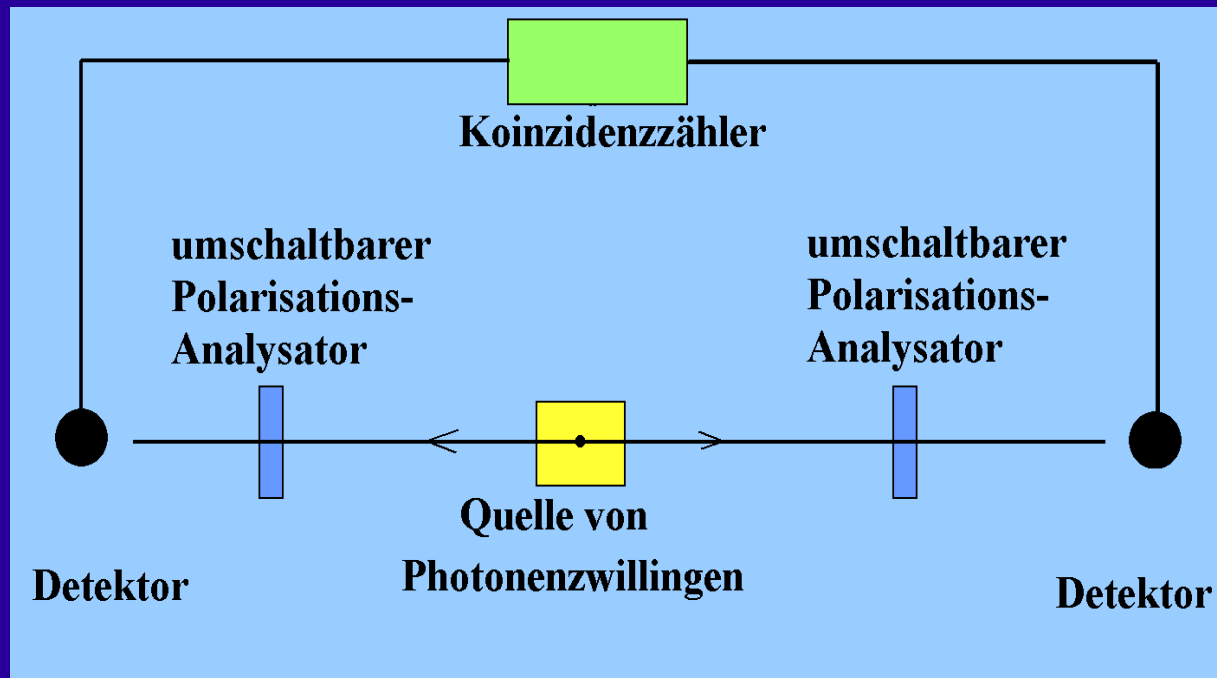
In der Quantenphysik ist das etwas ganz Normales!

Schlagwort: Holismus  $\Leftrightarrow$  Reduktionismus

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

EPR-Experiment von Clauser und Freedman (1972): verschränkte Zustände



1. Bei der Messung an einem Teilchen werden instantan auch entsprechende Eigenschaften des anderen Teilchens bestimmt ohne jede Wechselwirkung zwischen beiden Teilchen („Lichtjahre“)

"Fernwirkungslosigkeit"

„Be-stimmt-Werden einer Kenntnis“

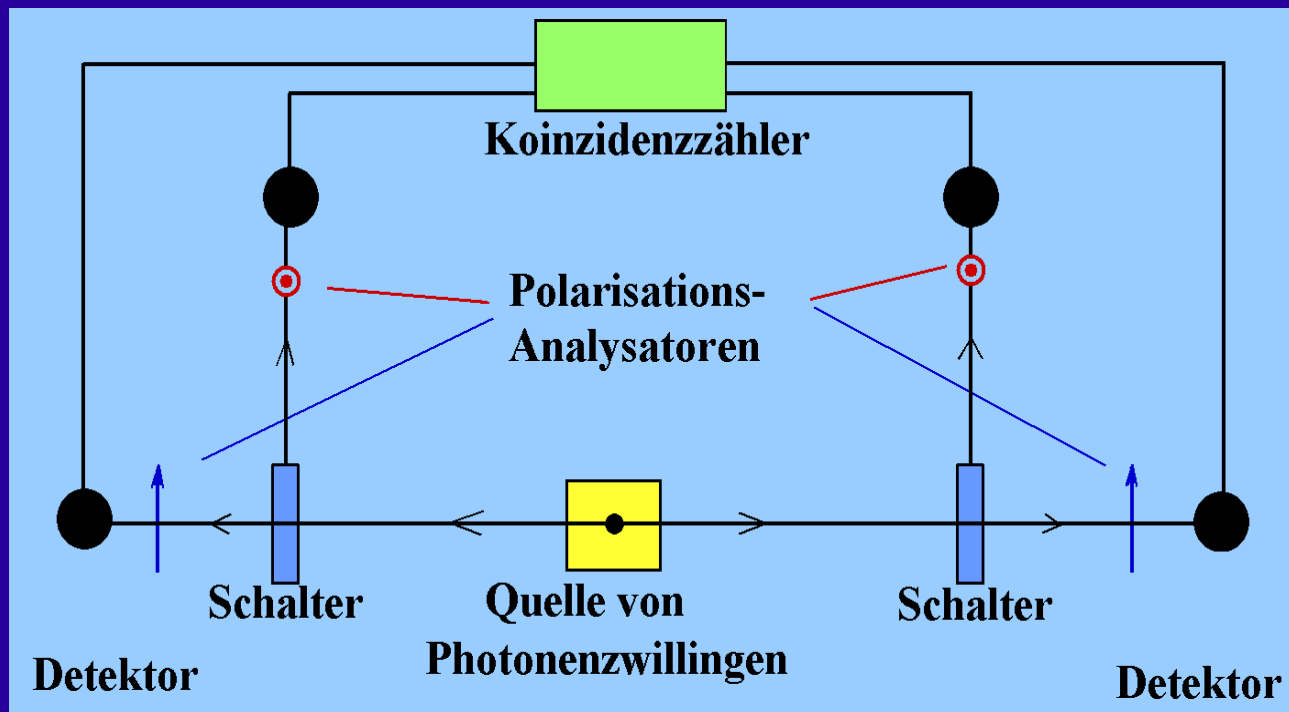
2. Beide Photonen hatten keine "be-stimmte Polarisation" vor der Messung und Zerlegung in einzelne Photonen

(Analog beim Doppelspalt: kein "be-stimmter Durchtrittsort")

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

EPR-Experiment: Aspect, Dalibard und Roger 1982  
Weihs-Zeilinger-Experiment 1998 und Gisin 1997/98



1. Beide Photonen immer streng miteinander korreliert

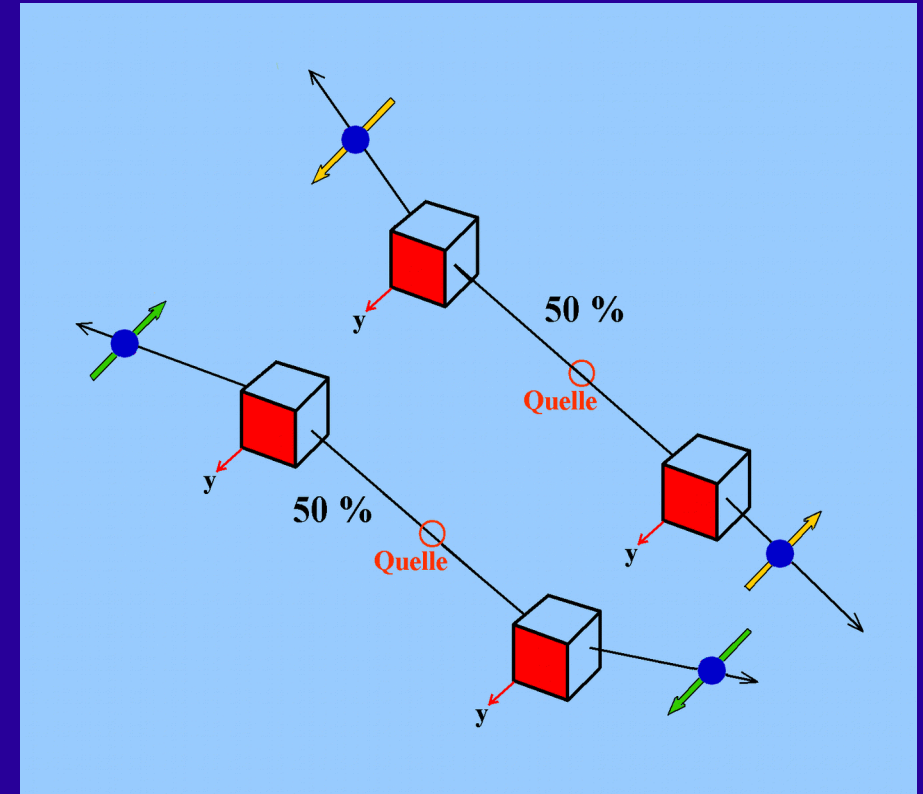
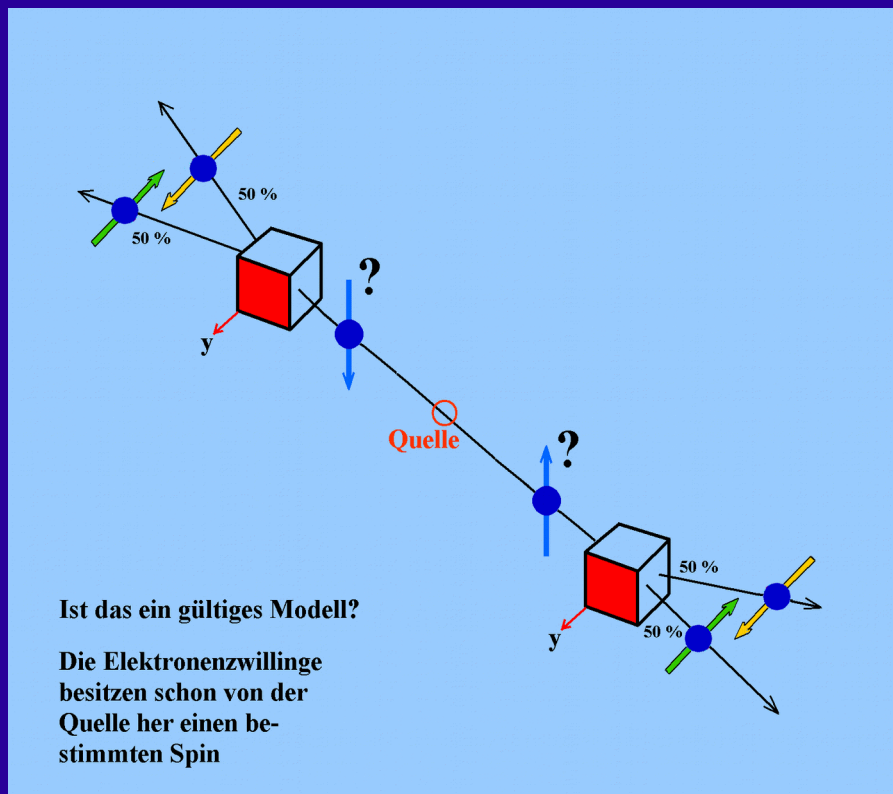
2. Keine "Absprache" der Photonen untereinander möglich – wie nach der Theorie verschränkter Zustände

3. "lokale Theorie mit verborgenen Variablen" (weitestgehend) ausgeschlossen.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Besitzen Elektronen eines Elektronenzwillings individuelle Eigenschaften ?



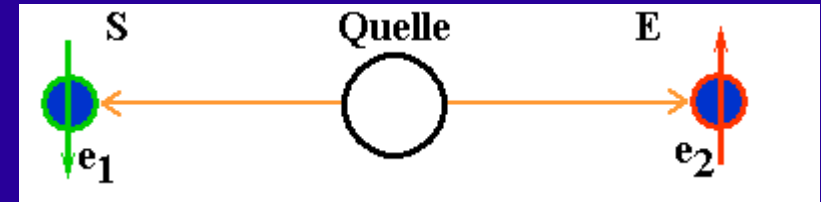
# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Anwendung von Teilchenzwillingen:

Abhörsichere Nachrichtenübertragung am Beispiel eines Elektronenzwillingings:

Es werden viele Elektronenzwillinge mit Gesamtspin 0 erzeugt – mit ihnen Erzeugung eines Verschlüsselungscodes

- Jeweils  $e_1$  an Sender,  $e_2$  an Empfänger



- Wenn Sender den Spin von  $e_1$  misst, wird gleichzeitig Spin von  $e_2$  bestimmt
- Aus der Folge der Spineinstellung berechnen beide gleiche Schlüssel zur Codierung:

01001110**1**... bzw. 01001110**1**...

Nachweis: Regensburg 2010      Reicht noch nicht aus!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Kohärente Zustände (Glauber 1963, Nobelpreis 2005):

Größte Annäherung zwischen elektromagnetischen Wellen (Laser-Mode) und quantenphysikalischen Zuständen:

- Anzahl der Photonen  $N$  ist un-be-stimmt / auch die Amplitude von  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{B}$   
Die Phase  $\varphi$  ist un-be-stimmt:  $\implies$  streuende Messwerte

Es gilt für beide Größen eine HUR

Die Erwartungswerte von  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{B}$  verhalten sich – unabhängig von der mittleren Photonenzahl - wie bei einer klass. elm. Welle.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Kohärente Zustände (Glauber 1963, Nobelpreis 2005):

Zustände mit **un-be-stimmter** Photonenzahl:

Die Erwartungswerte von **E** und **B** verhalten sich – unabhängig von der mittleren Photonenzahl - wie bei einer klass. elm. Welle.

### Warnung:

Bei Zuständen mit **be-stimmter** Photonenzahl: Erwartungswerte von **E** und **B** stets 0! => Niemals klassisches Verhalten!

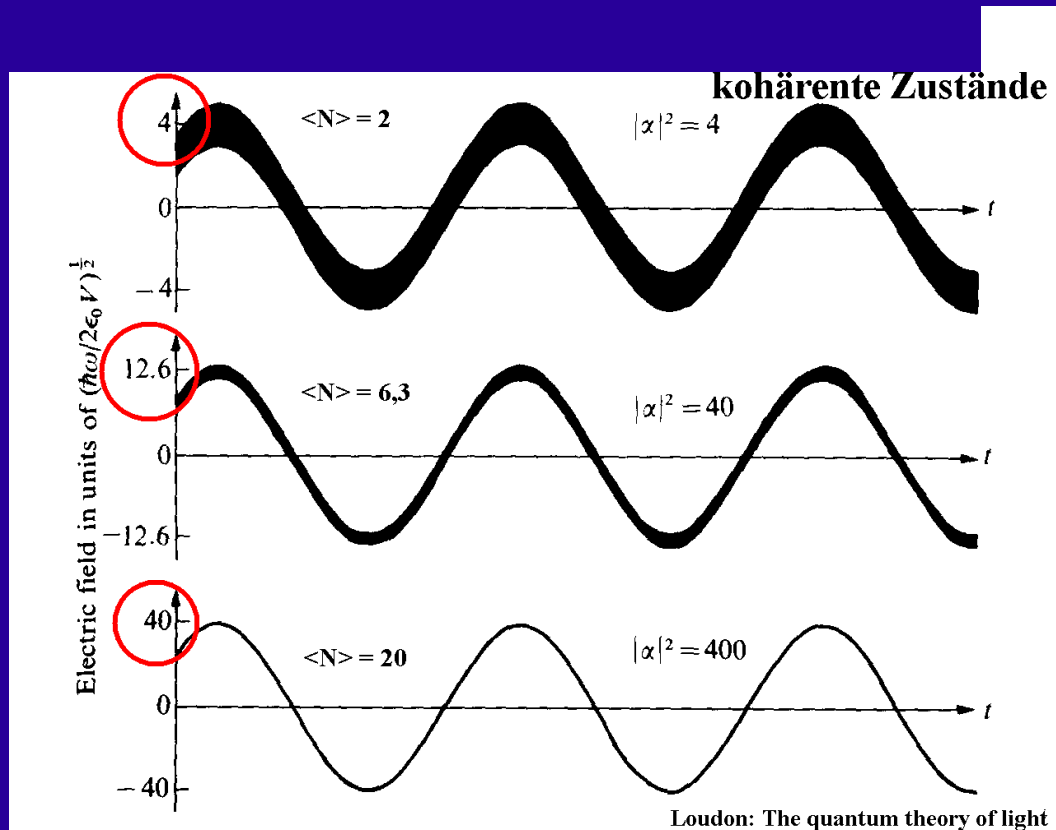
=> Keine 1-Photon-Zustände aus Laser mit Graufilter!

=> Kein klassisches Verhalten auch wenn  $N \Rightarrow \infty$  !

**Übergang zu klassischen Wellen:** Mit zunehmender mittl. Teilchenzahl  $\langle N \rangle$  streben die relativen Un-be-stimmtheiten  $\Delta N / \langle N \rangle = \sqrt{\langle N \rangle} / \langle N \rangle$  gegen Null.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Laser-Mode – kohärenter Zustand (Glauber 1963, NobP. 2005)



146

The quantized radiation field

Teilchenzustand

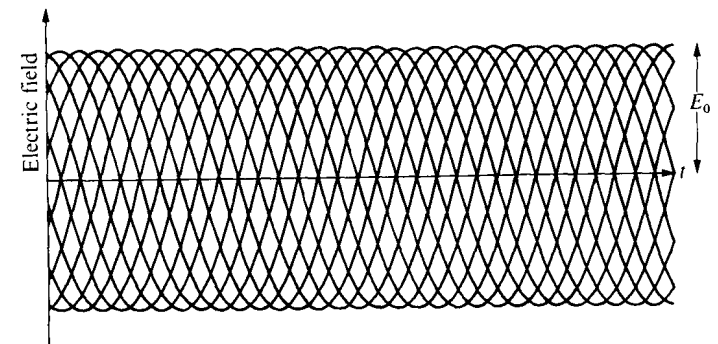


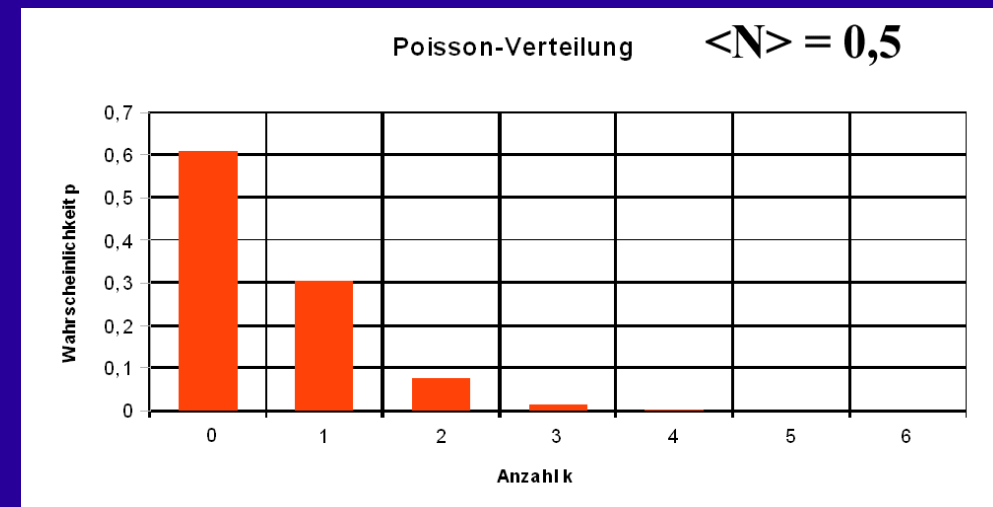
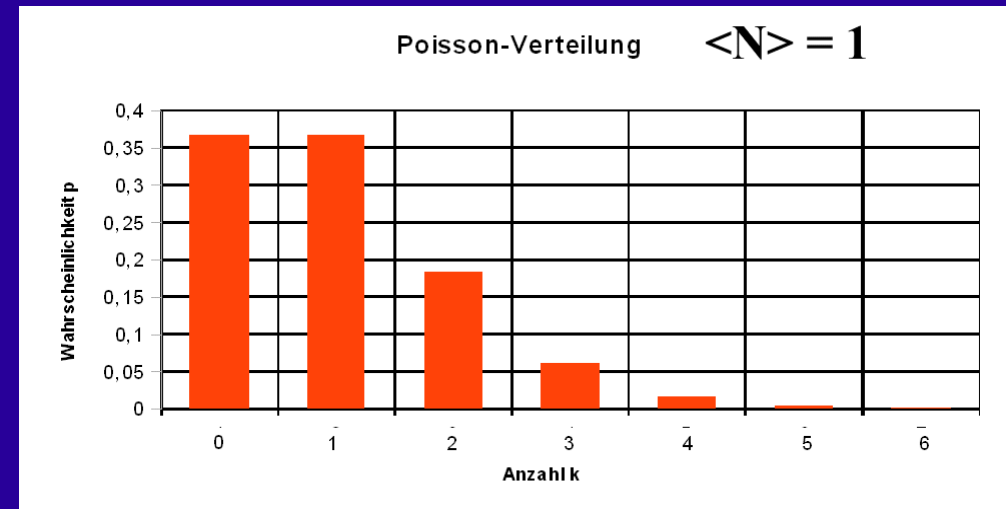
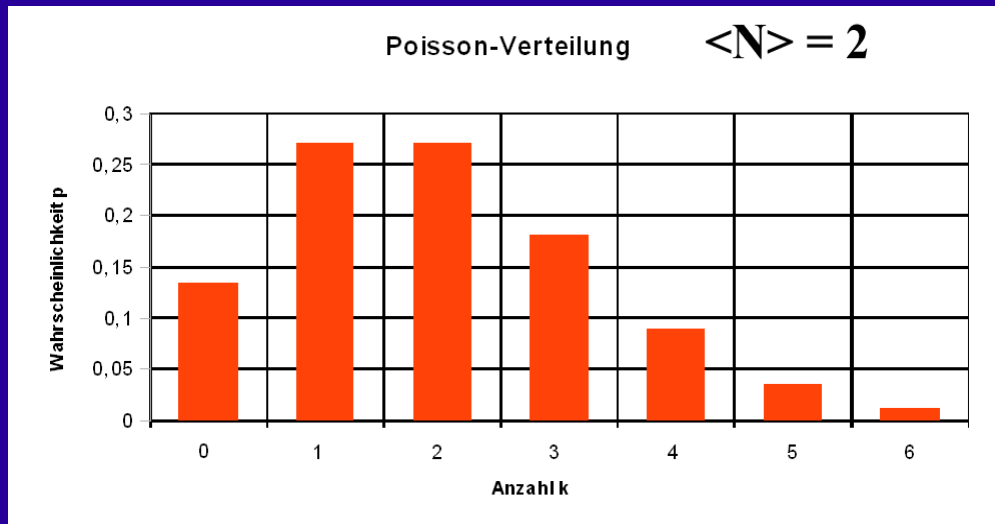
FIG. 4.2. Pictorial representation of the electric-field variation in a cavity mode excited to state  $|n\rangle$ . The sine waves should more accurately form a horizontal continuum. The amplitude  $E_0$  is defined in the text.

Loudon: The quantum theory of light

Zählt man in einer Laser-Mode in jeweils gleich langen Zeitintervallen die Photonenzahl, so ergibt sich eine Poisson-Verteilung.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Kohärente Zustände:



Keine 1-Photon-Zustände aus Laser mit Graufilter! Es gibt Einzelphotonenqu.!



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Kohärente Zustände:**

**elm. oder Schallwellen (Phononen) im  
3-dim. Anschauungsraum !**

Jetzt endlich (Glauber 1963) Zusammenhang  
zwischen Wellen im Anschauungsraum und  
Quantenphysik verstanden!

**(Ein-Teilchen-Interferenz => Welleninterferenz)**

Aber: Schrödinger'sche Wellenfunktionen:

Wellen im abstrakten  
Konfigurationsraum

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Gibt es Materiewellen?

Elektromagnetische Welle / Schallwelle : Wellen im Anschauungsraum:  
QP: kohärente Zustände

Schrödinger'sche Wellenfunktionen: Wellen im abstrakten viel-  
dimensionalen Konfigura-  
tionsraum

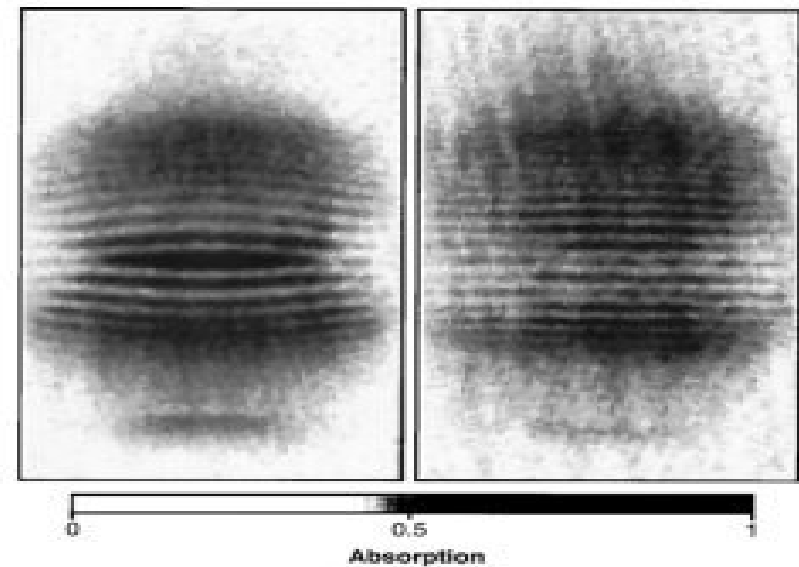
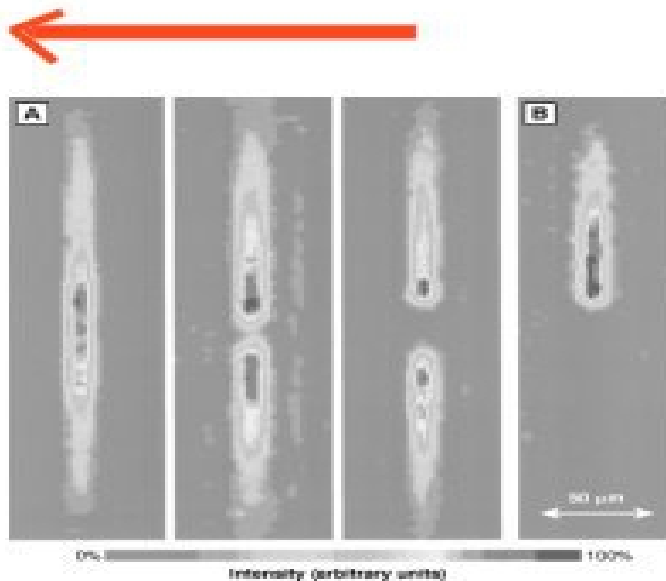
Atomlaser : auch Wellen im 3-dim. Anschauungsraum ??????



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

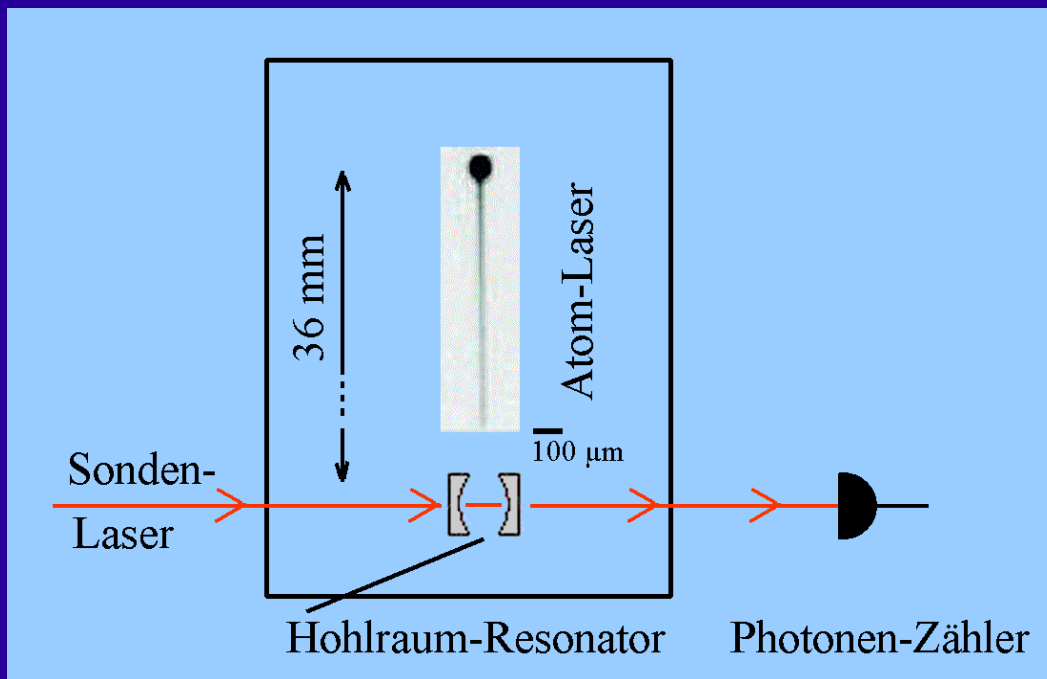
## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Ketterle, W ——. **Observation of interference between two Bose condensates**.  
*Science*, vol.275, (no.5300), American Assoc. Adv. Sci, 31 Jan. 1997. p.637-41.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Atomzähler von Esslinger u. Mitarbeitern 2005



Ein Atom verstimmt den Resonator so, dass er Laser-Photonen einfängt

=> Zählrate der Laser-Photonen sinkt

Nachweis einzelner Atome (1) !  
(25 %)

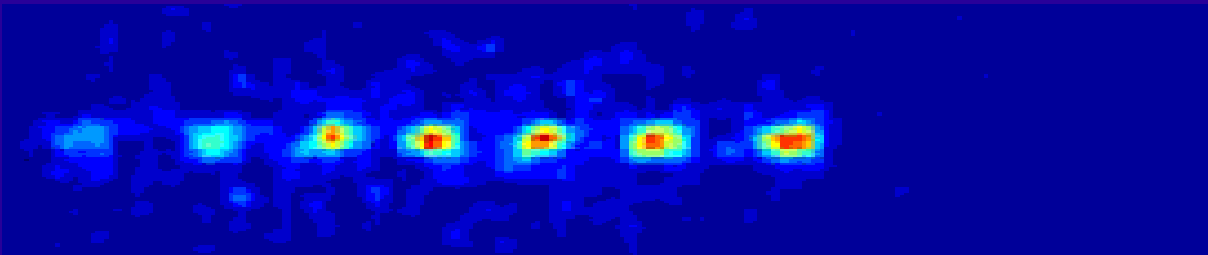
Wie beim Licht-Laser wird eine Poisson-Verteilung nachgewiesen! =>  
Zustand un-be-stimmter Atomzahl

Starke WW der Atome!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

H.C. Nägerl, D. Leibfried,  
F. Schmidt-Kaler, J.  
Eschner, R. Blatt:  
(Innsbruck 1998)



Mit freundl.  
Erlaubnis durch Dr.  
Nägerl

Kohärente Phononen !

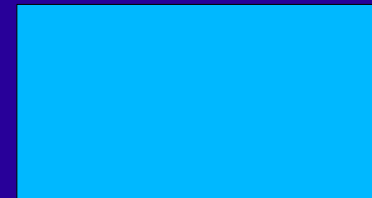
Nebenbei: Kann man einzelne  
Atome sehen? (2)



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Schnell noch eine Zusammenfassung der  
heuristischen Methoden der Quantenphysik





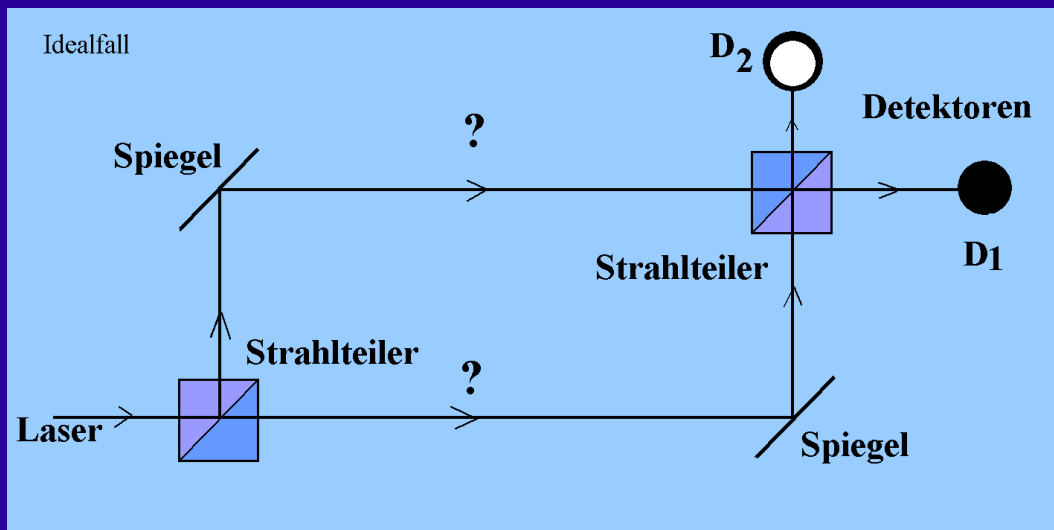
## Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Was Sie erwartet:

- I Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- II Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- III Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- **IV Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule**
- V Resümee

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Mach-Zehnder-Interferometer



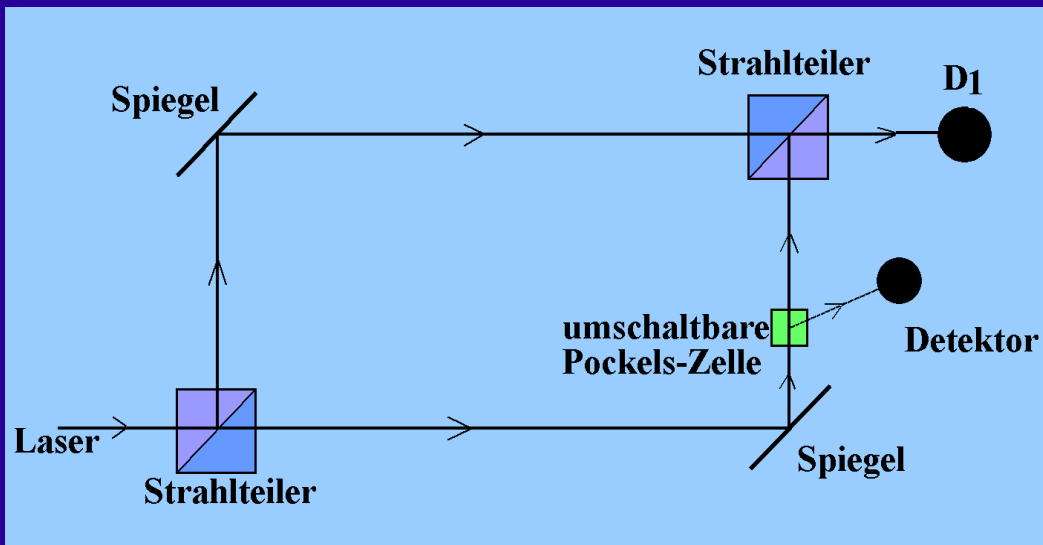
Interferenz mit einem einzelnen Photon findet statt, weil es zwei klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, zu einem Detektor zu gelangen, zwischen denen nicht unterschieden wird.

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Entscheidung

Es geht um Fragestellung!



Vorschlag von Wheeler 1978 ;

durchgeführt von

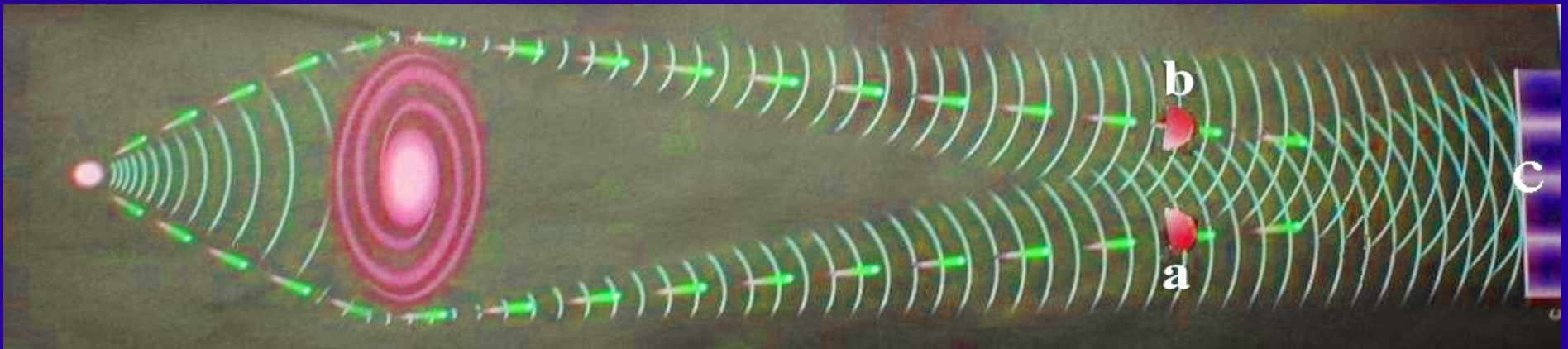
Hellmuth, Walther, Zajonc  
(Uni München 1987)

Alley, Jakubowicz, Wickes  
(Univ. of Maryland)

Das "Verhalten" des Photons hängt nicht von einem vermeintlichen "Wellen-" oder „Teilchen-Charakter" ab. Begriff „Verhalten“ sinnlos!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Gravitationslinsen-Interferometer (Wheeler)



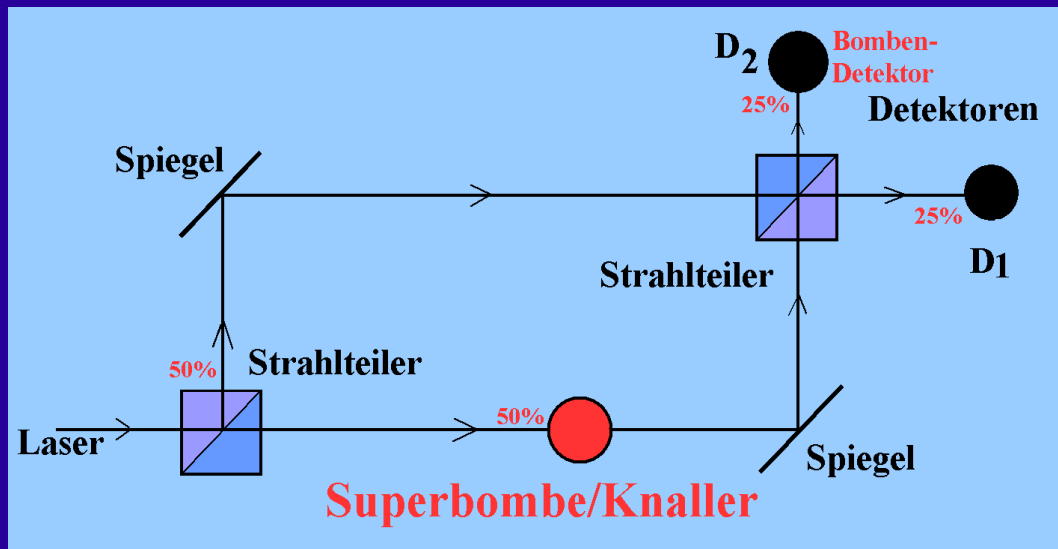
Der Beobachter trifft *jetzt* (Mrd. Jahre) die Entscheidung, ob er ein WWE (a,b) oder ein Interferenz-Experiment (c) machen möchte.

„Wann entscheidet sich das Photon, ob es als Teilchen auf einem bestimmten Weg oder als Welle auf beiden Wegen gleichzeitig die Galaxie passieren möchte?“



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Knaller-Test (Elitzur und Vaidman 1993)



Kwiat, Weinfurter und Zeilinger

1. kein Weg der Teilchen ohne eine Messung (Hindernis)

2. Interferenz geht bereits dann verloren, wenn nur die Möglichkeit zu einer Wegmessung besteht, sie nur "angedroht wird", aber tatsächlich nicht durchgeführt wird (das Photon trifft mit einer beträchtlichen Wahrscheinlichkeit gar nicht die Superbombe, obwohl sie vorhanden ist).

3. Ideale nichtverbrauchende Messung

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Sind das sinnvolle Fragen?

- Wie kommt ein Elektron von der Quelle zum Nachweisort?
- Wie „verhält sich“ ein Elektron beim Durchtritt durch einen Doppelspalt?
- Wie „verhält sich“ ein Elektron im MZI, als Welle oder als Teilchen?
- Wo hält sich ein Elektron auf, wenn man seinen Ort nicht gemessen hat?
- Wie schnell bewegt sich ein Elektron, wenn man seine Geschwindigkeit nicht gemessen hat?
- Ist ein Elektron ein Teilchen oder eine Welle?
- Wie kommt ein Elektron im linearen Potenzialkasten über einen Knoten hinweg, wenn es sich dort „nicht aufhalten“ darf?

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Experimente mit Rydberg-Atomen:

Hoch angeregte wasserstoffähnliche Atome, meist Alkaliatome mit einem Außenelektron, z.B. Rb

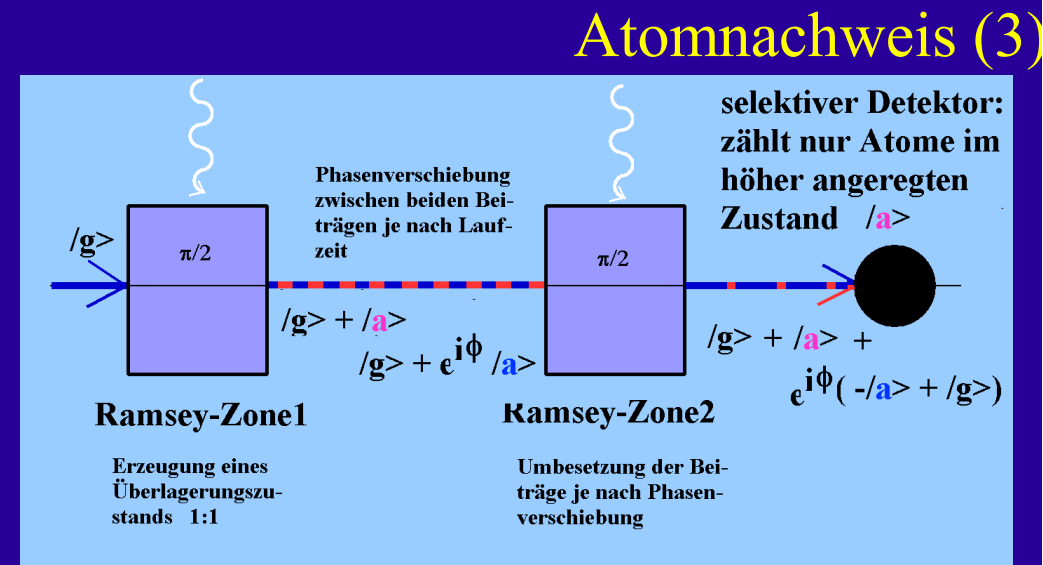
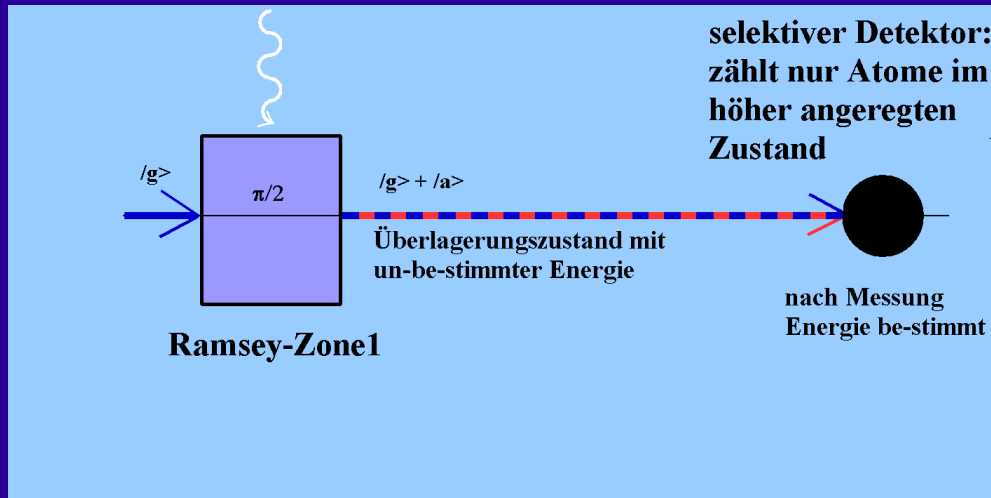
- $n$  im Labor typisch 50, im Weltall bis zu 350
- Verhalten sich weitgehend klassisch
- Atomradius riesig (typisch 2500 mal Radius des H-Atoms)
- Erfordern sehr gutes Vakuum, um sich nicht gegenseitig zu behindern
- Übergangsfrequenzen zwischen benachbarten Energieniveaus im Mikrowellenbereich

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Quantenschwebungen

Raimond, Brune, Haroche 2001

Zwei "Energiewege" zwischen  
beiden Ramsey-Zonen



Interferenz findet statt, ...

Ramsey: Nobelpreis 1989

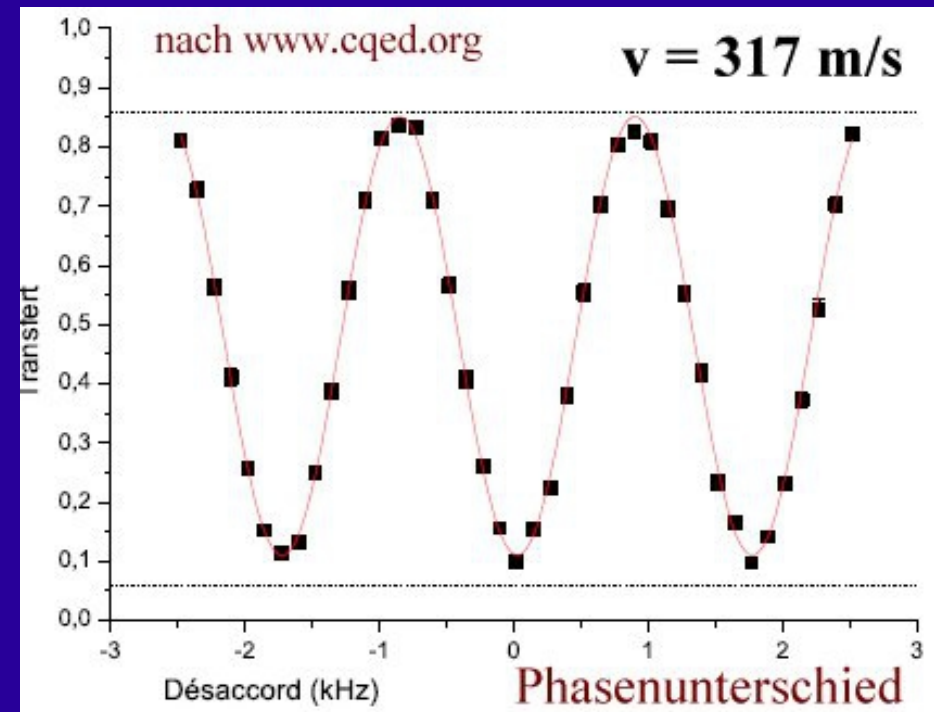
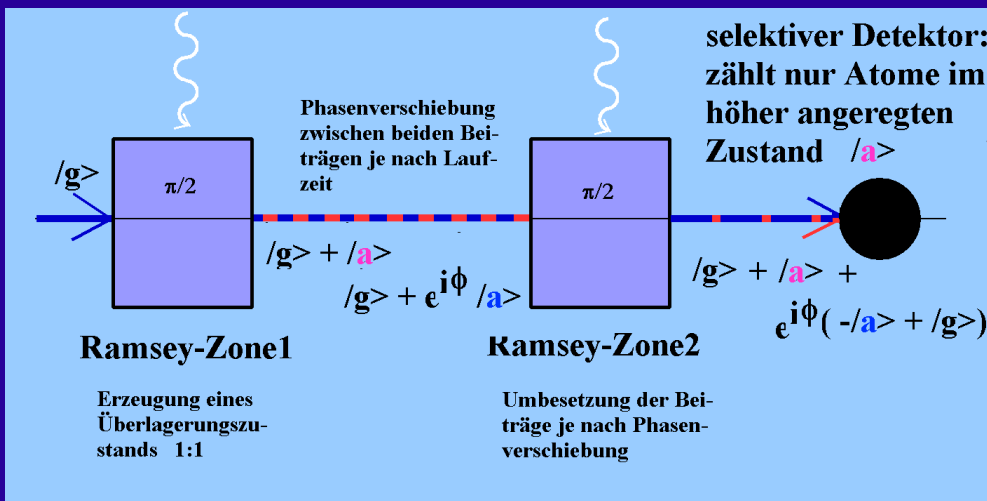
Haroche: Nobelpreis 2012

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Quantenschwebungen

Raimond, Brune, Haroche 2001



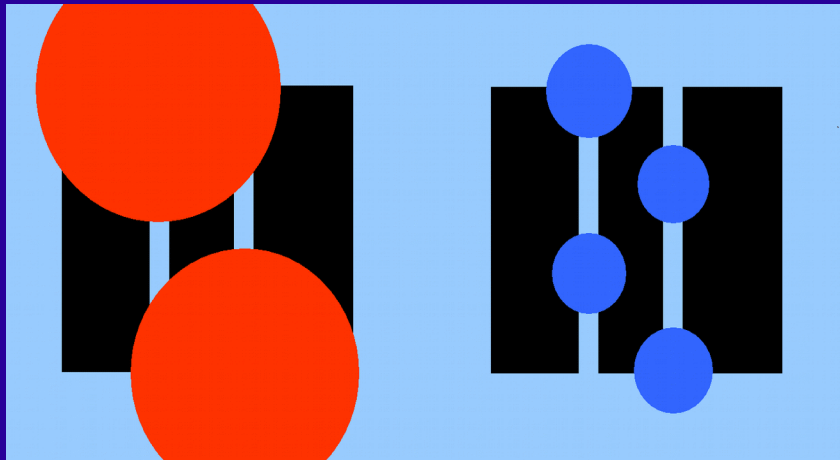
Ramsey: Nobelpreis 1989

Haroche: Nobelpreis 2012

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## WWI zerstört Interferenz

Doppelspalt: übliche Diskussion der „Elektronenbeleuchtung“ (Feynman)



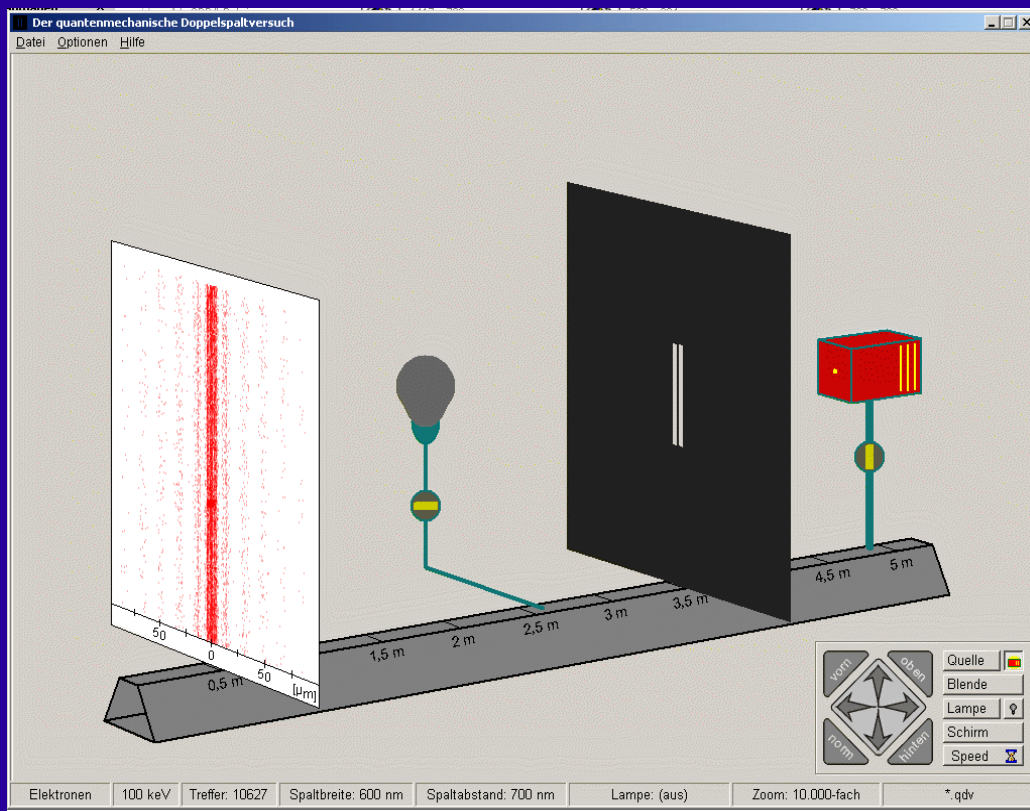
- Ein Durchtrittsort ist messbar (WWI); dann verschwindet aber die Interferenz.
- Je bestimmter der gemessene Durchtrittsort, desto „verwaschener“ wird die Interferenzfigur.

Vgl. Doppelspaltversuch v. Muthsam (Uni. M.)

Vorsicht: Das (klass.) Modell von Photonenstößen ist sehr problematisch!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## WWI und Interferenz komplementär



Wird Interferenz durch eine mechanische „Störung“ bei der Messung des Durchtrittsorts zerstört?

Doppelspaltversuch v. Muthsam

(Uni. München)

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

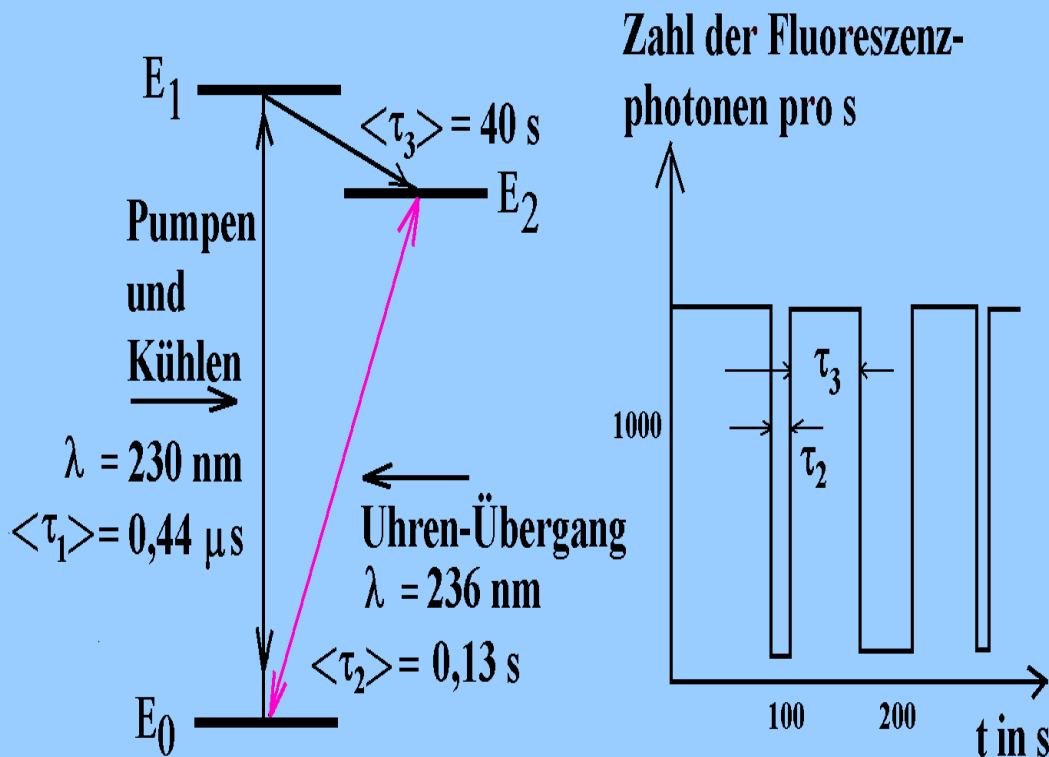
### CQED : Hohlraum-Quanten-Elektrodynamik

- Hohlraum-Resonator kann ein Photon nur aufnehmen, wenn eine seiner Eigenfrequenzen mit der Lichtfrequenz übereinstimmt
- Wenn ja, wird die Lebensdauer des angeregten Zustands eines Atoms verringert. („Photonenraub“)
- Andernfalls wird die Lebensdauer des angeregten Zustands verlängert (bis zu 40 s statt  $10^{-8}$  s; „Photonenphobie“)
- Spontane Emission als Folge von zugelassenen Vakuumfluktuationen
- Bereits ein Rydberg-Atom kann u.U. die Eigenfrequenz des Hohlraum-Resonators verstimmen => Durchgang von resonanter Laser-Strahlung?



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule



## Quantensprünge

Dehmelt, ... 1986: Ba<sup>+</sup>

Sauter, ... 1986

Walther, ... 1986: In<sup>+</sup>

Atom / Ion + 2 Laser

Wenn der Resonator das Photon nicht aufnehmen kann:

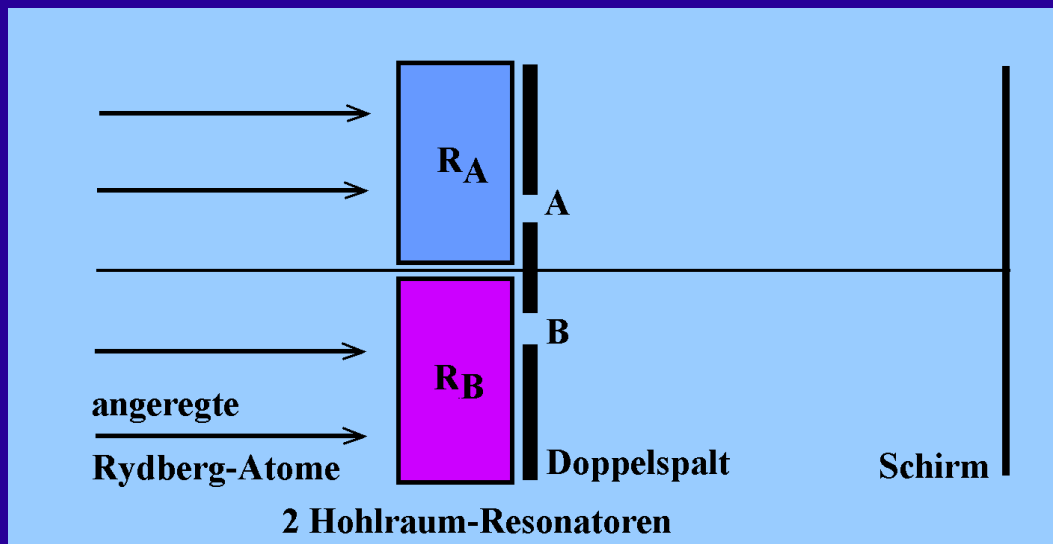
„Uhrenübergang“ erschwert,  
Linienbreite verkleinert.

$$(\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar)$$

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Scully, Englert und Walther Vorschlag 1991



Rückwirkungslose Messung  
des Durchtrittsorts:  
Interferenz?

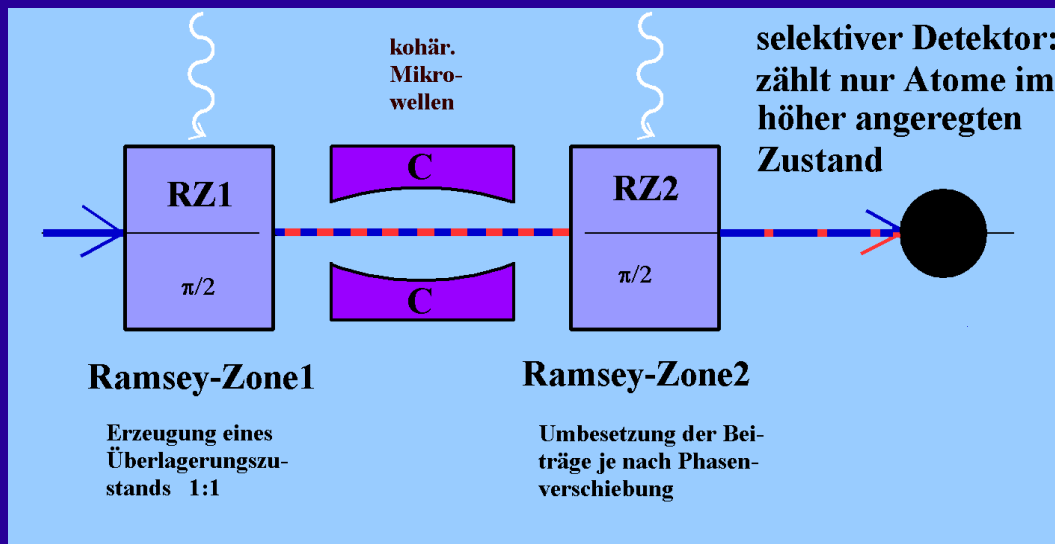
Wird Interferenz durch eine  
mechanische „Störung“ bei der  
Messung des Durchtrittsorts  
zerstört? („Elektronenbeleuchtung“ ?)

- „Komplementarität fundamentaler als HUR“ ?
- Hier Interferenz von 6-dimensionalen Wellen im Konfigurationsraum!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Haroche (Nob.Pr. 2012)



1. Ohne C: Angeregte Rydberg-Atome treten ein; keine Energiemessung in C  $\Rightarrow$  Interferenz-Minima und Maxima bei Abstandsvariation

2. Mit kohärentem elm. Feld in C: WWI durch Photon, das ein höher angeregtes Rydberg-Atom in C hinterlässt

$\Rightarrow$  Bei kleiner Feldstärke in C Photon feststellbar, nicht bei größerer

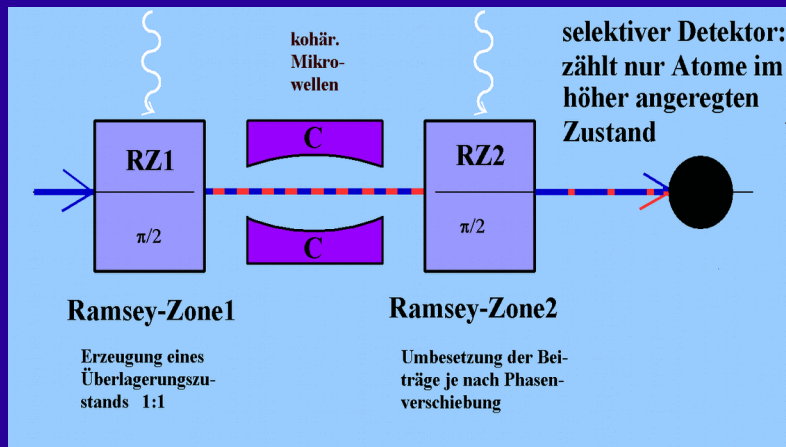
$\Rightarrow$  Interferenz verschwindet oder nicht

WWI und Interferenz schließen sich gegenseitig aus (sind komplementär)

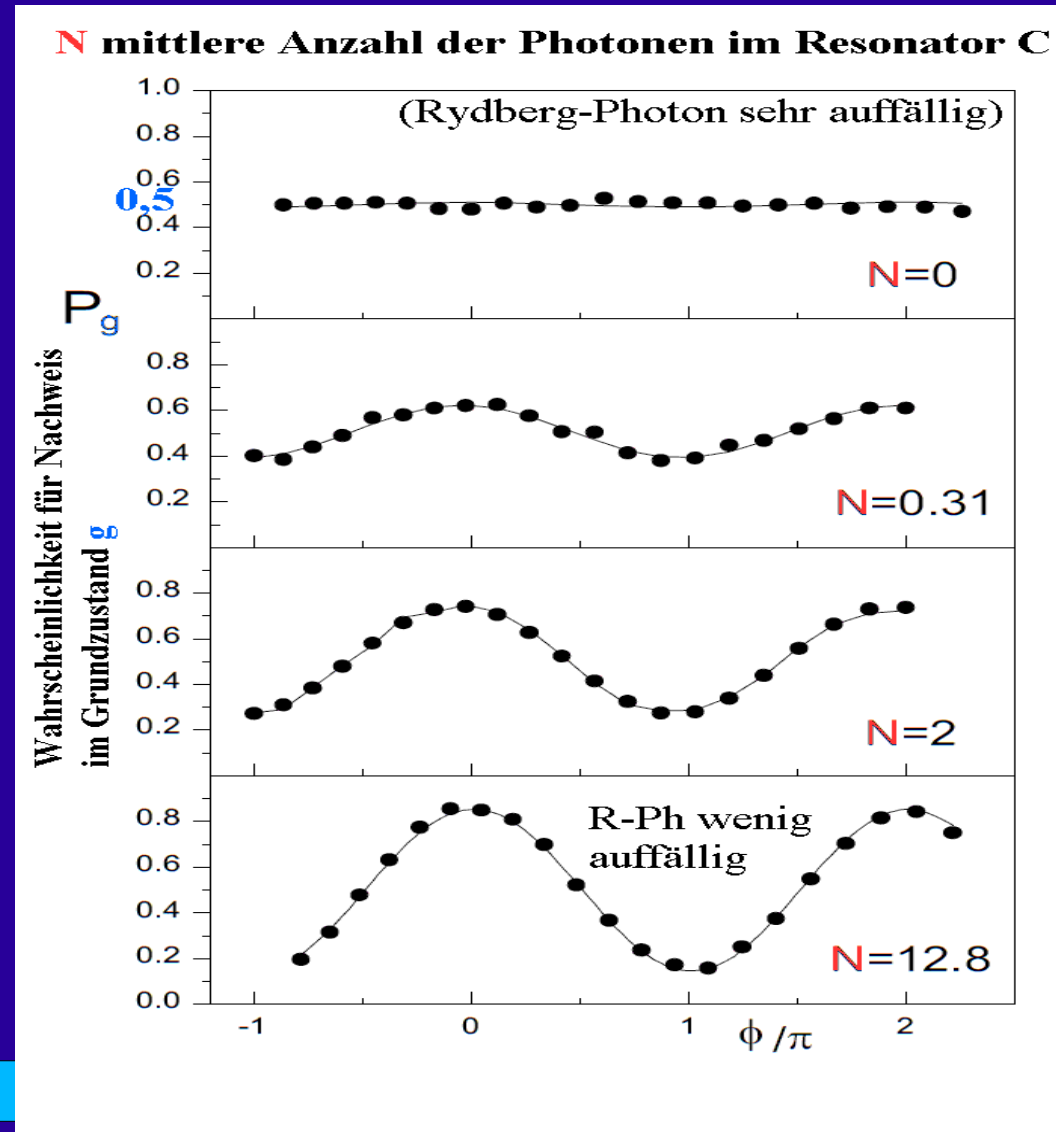
# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Haroche



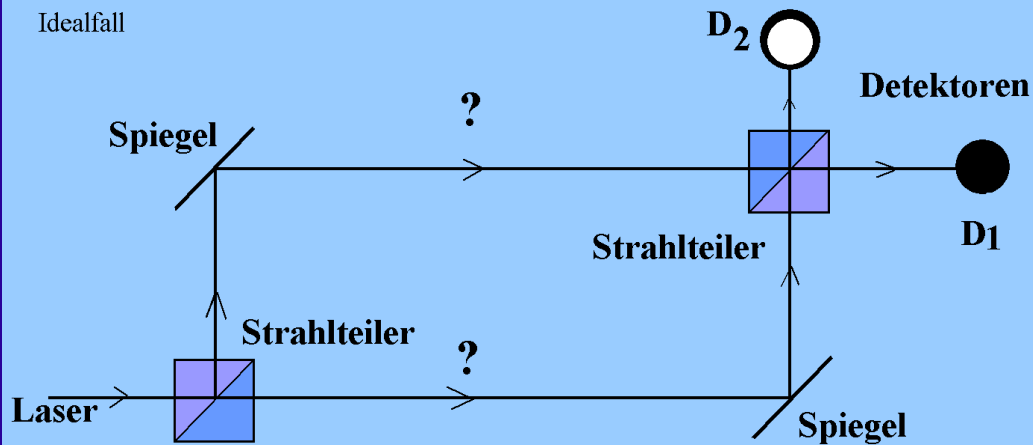
WWI und Interferenz sind komplementär, aber keine Schwarz-Weiß-Malerei



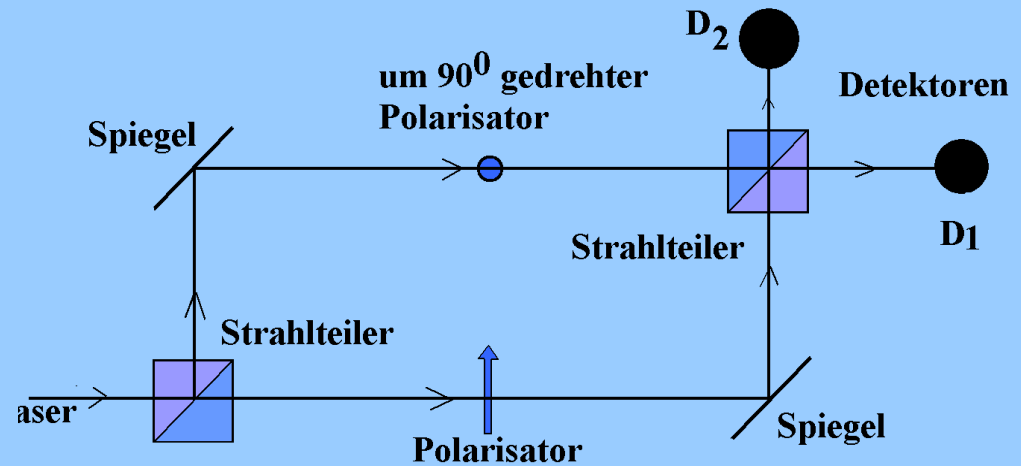
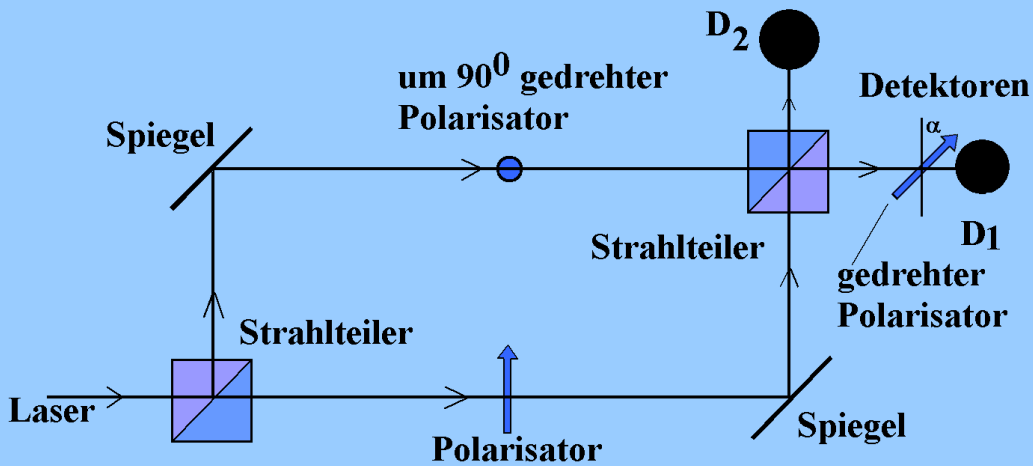
# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Idealfall



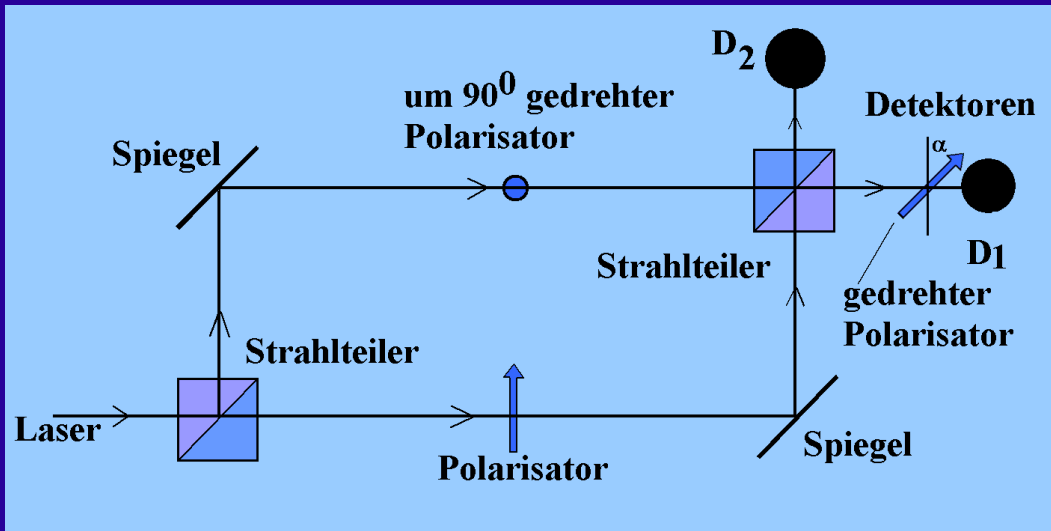
## Quantenauslöcher



Vgl. Simulationsprogramm von  
Huber (Uni München)

Hübel 2014

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

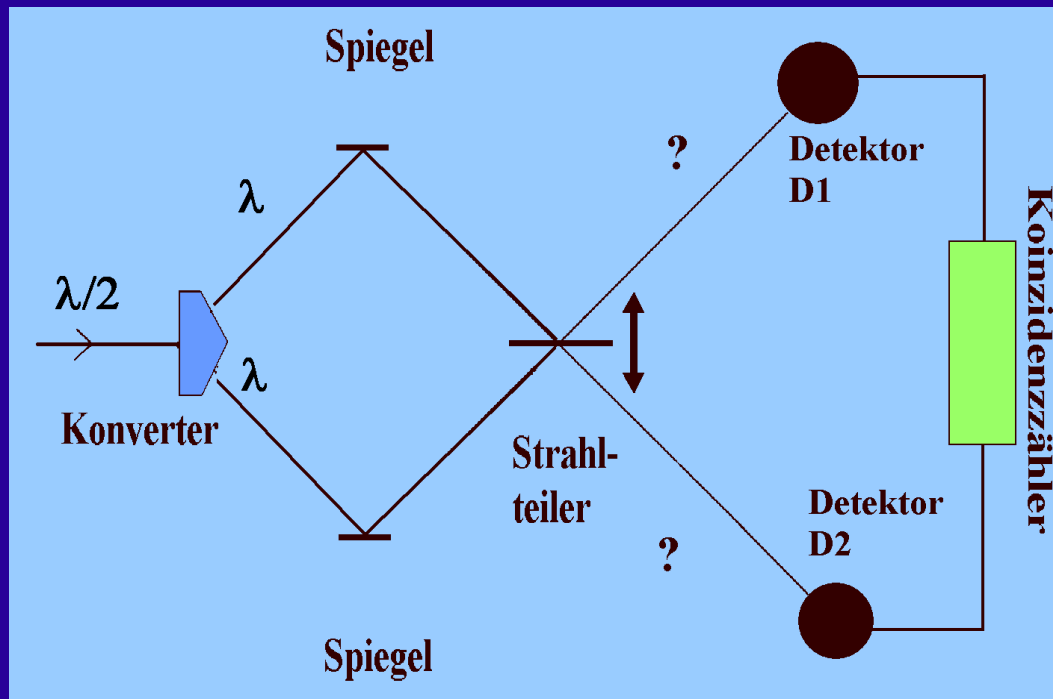


## Quantenauslöcher

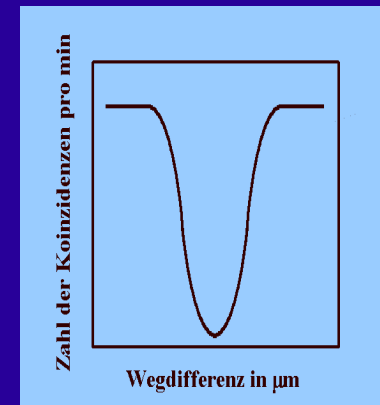
1. Welcher-Weg-Information zerstört Interferenz: beide sind komplementär zueinander.
2. Interferenz kann nachträglich rückgewonnen werden, wenn Welcher-Weg-Information ausgelöscht wird.
3. kann nichts mit einem "Wellencharakter" oder "Teilchencharakter" zu tun haben

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Die Lichtquelle HOM mit Photonenzwillingen (Biphotonen)



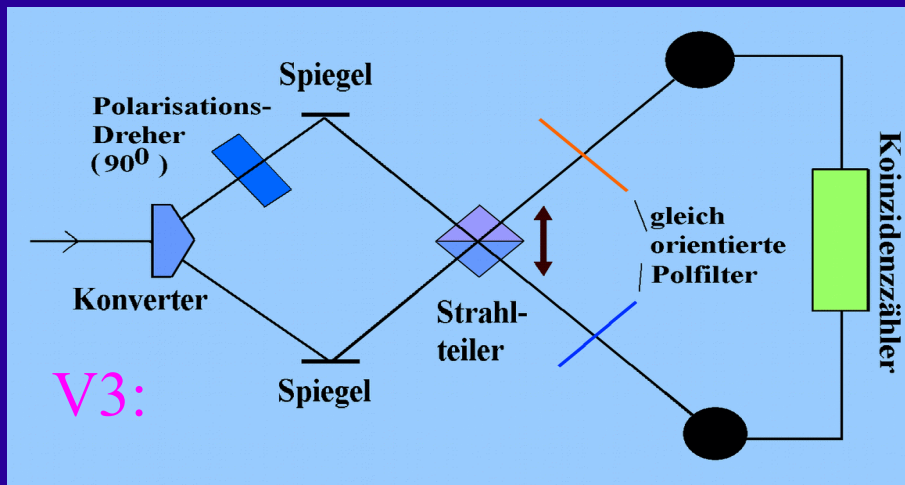
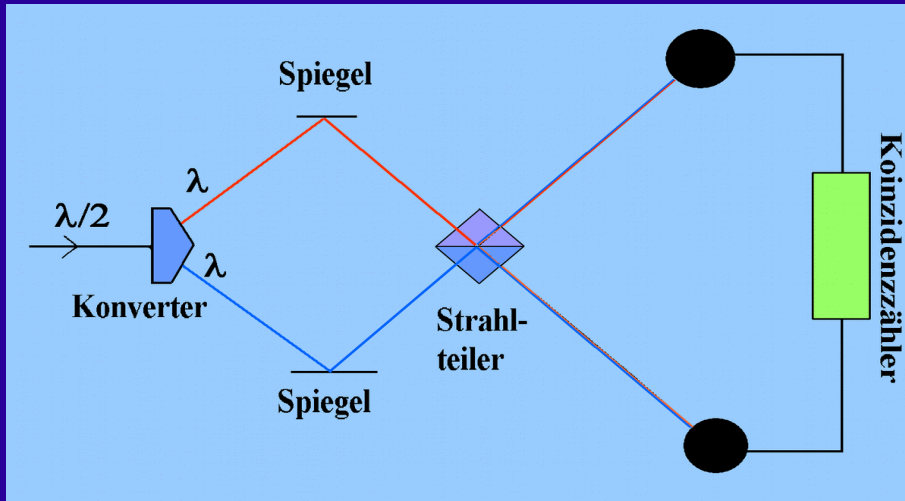
Hong, Ou und Mandel  
1987



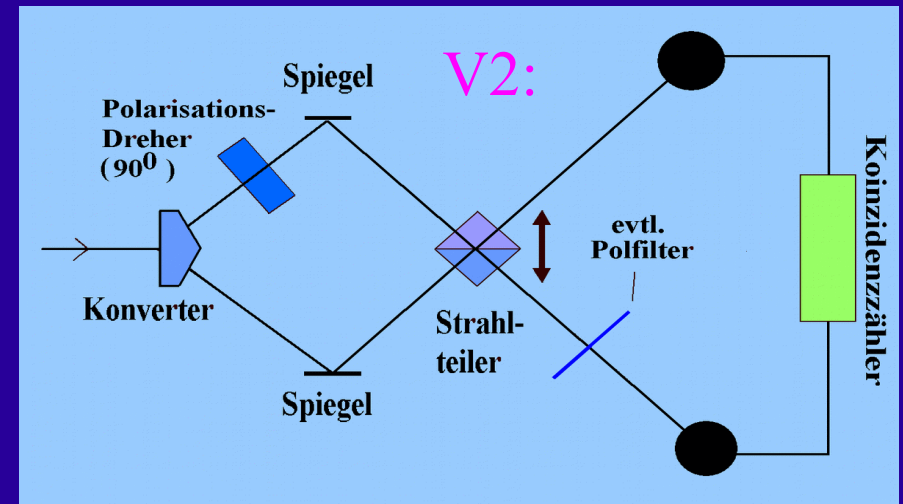
Bei idealer Einstellung keine Koinzidenzen  
=> Nachweis eines Photonenzwillings  
Beide Photonen in den gleichen Detektor

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule



## Der Berkeley-Quanten-Auslöser



Kwiat, Steinberg, Chiao 1992

Hong, Ou und Mandel 1987

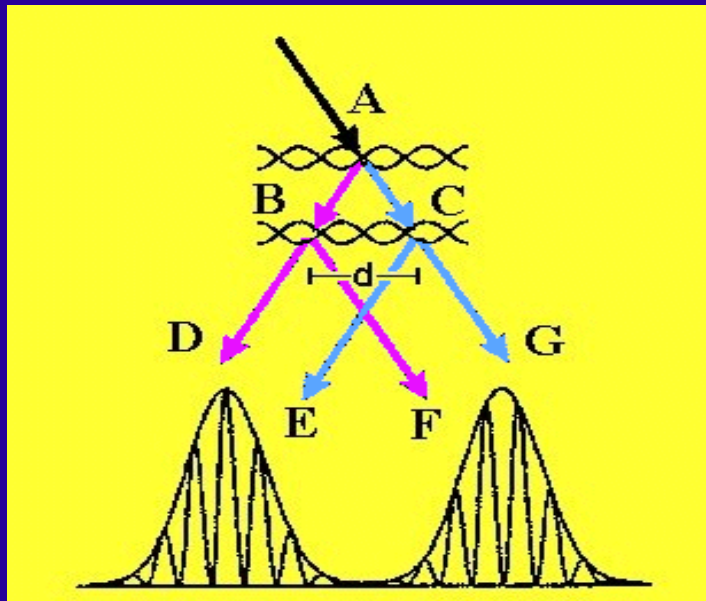
Sogar lange nach Registrierung der Photonen ist Entscheidung („W-T“) mögl.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

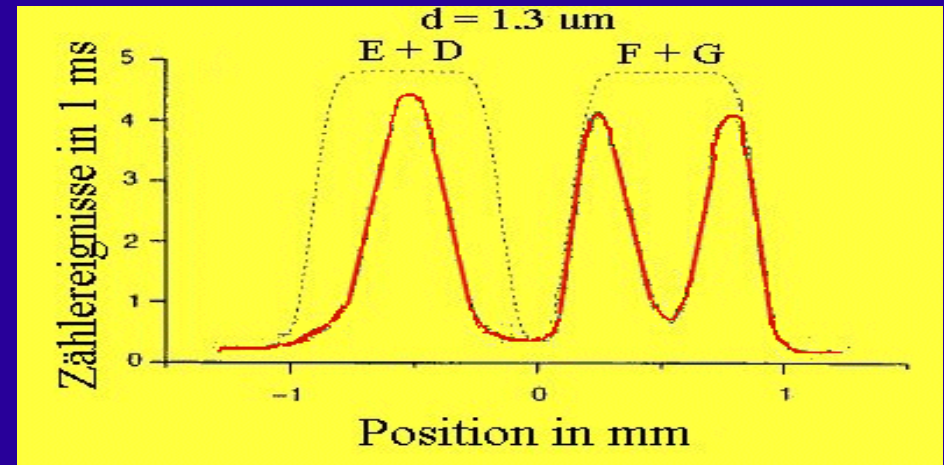
## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Dürr, Nonn und Rempe  
1998



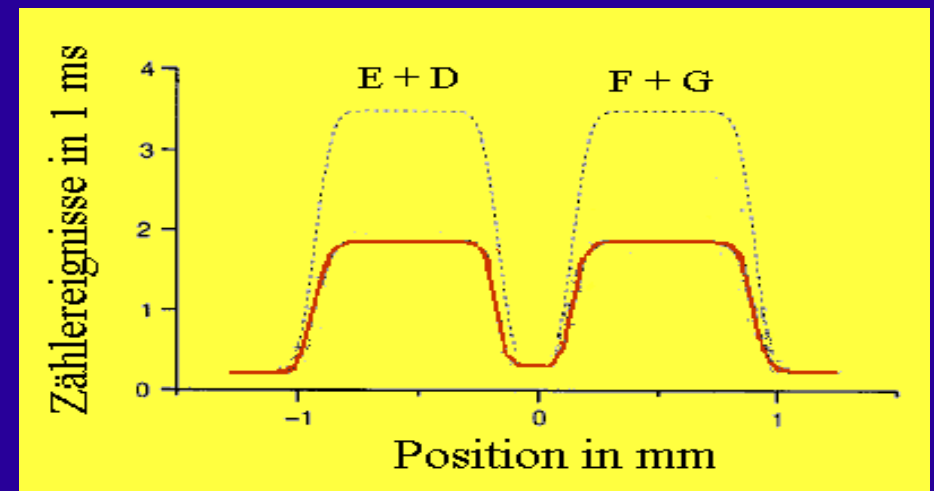
Beugung von Rb-Atomen an  
stehenden Lichtwellen

V1:



V2:

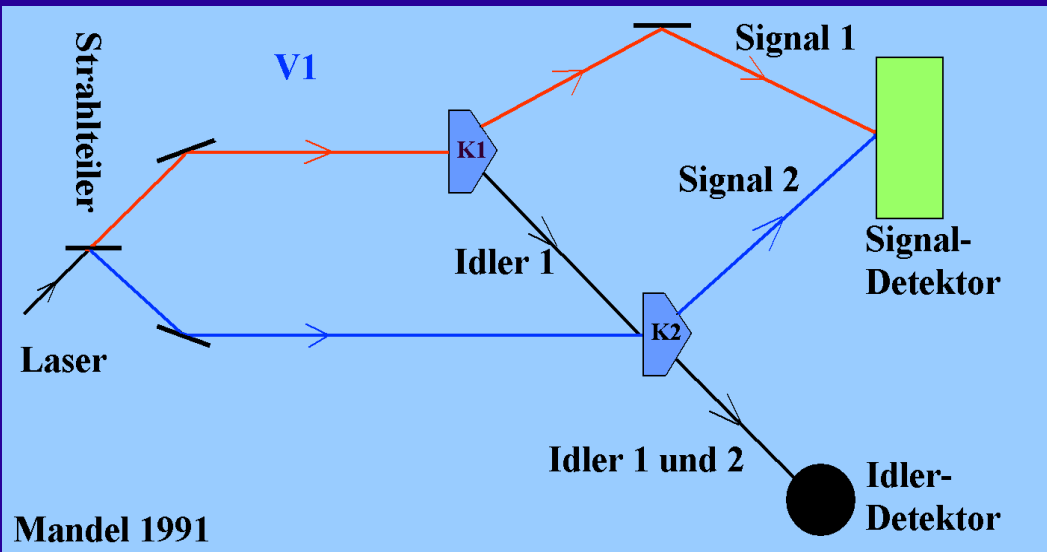
B und C:  
Rb-Atome  
mit Mikro-  
wellen un-  
terschiedlich  
angeregt



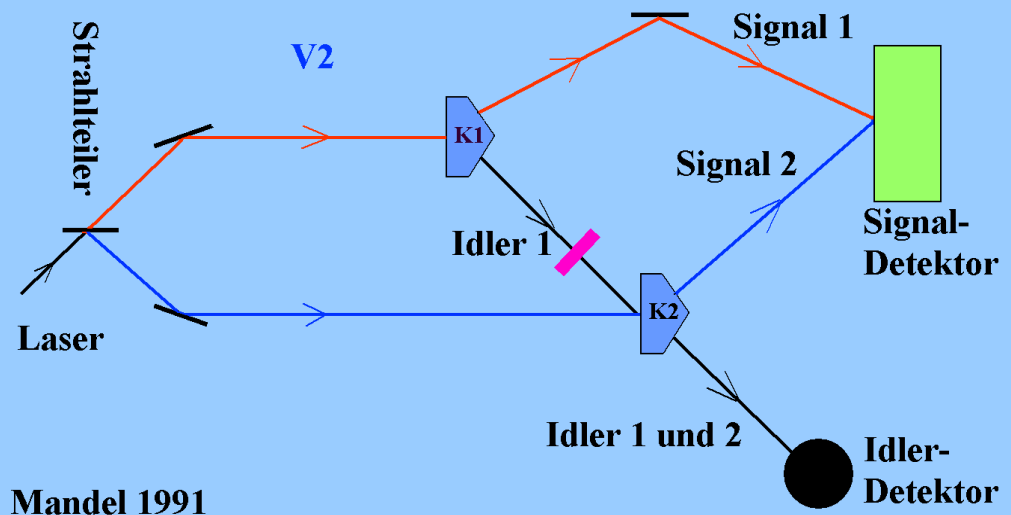
Keine  
mech.  
Störung!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## Das Mandel-Experiment 1991



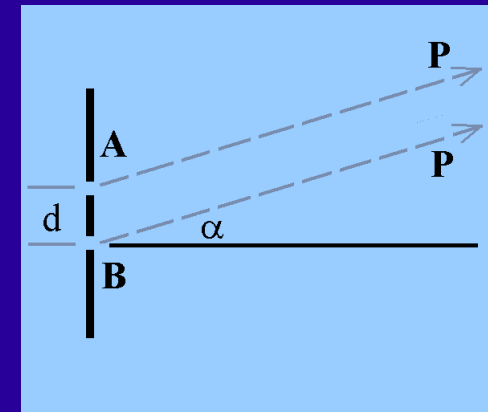
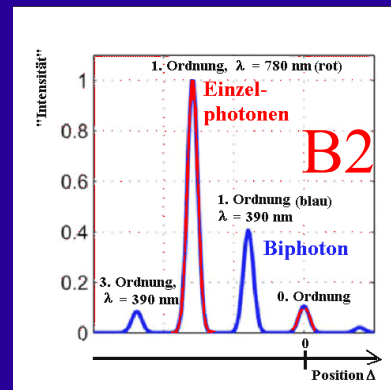
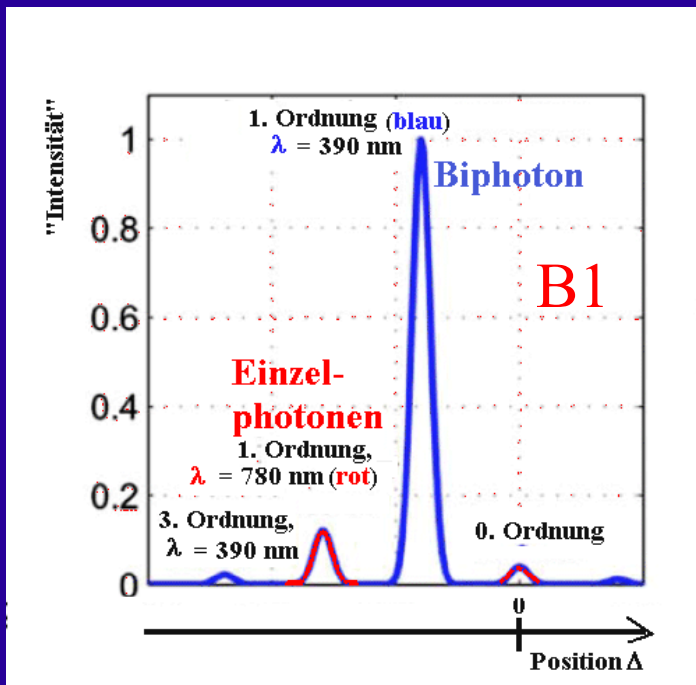
V1: Interferenz, da keine WWI  
V2: WWI möglich => keine Interferenz



"Der Quantenzustand spiegelt nicht nur das wider, was wir von dem System wissen, sondern was im Prinzip erfahrbar ist."

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

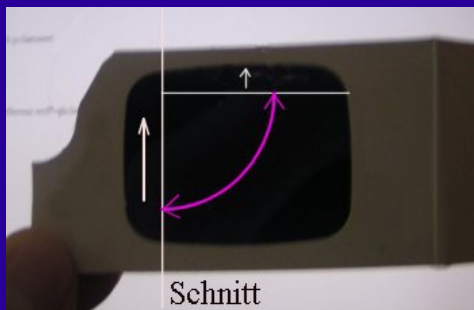
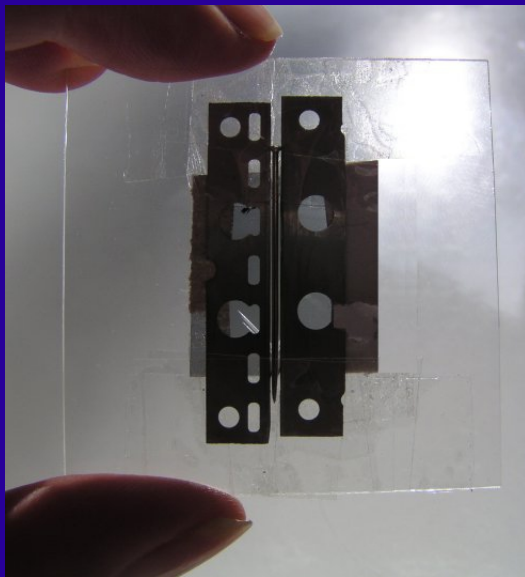
Es gibt Photonenzwillinge:  
Biphotonen aus **HOM** (Ostermeyer 2009)



- Maxima 1. und 3. Ordnung, die zur halben Wellenlänge ( $\lambda = 390$  nm, blau) gehören.
- Biphoton passiert als Ganzes d. Dopp.Spalt
- Nur für „Wellen“ im 6-dim. Raum erklärbar

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

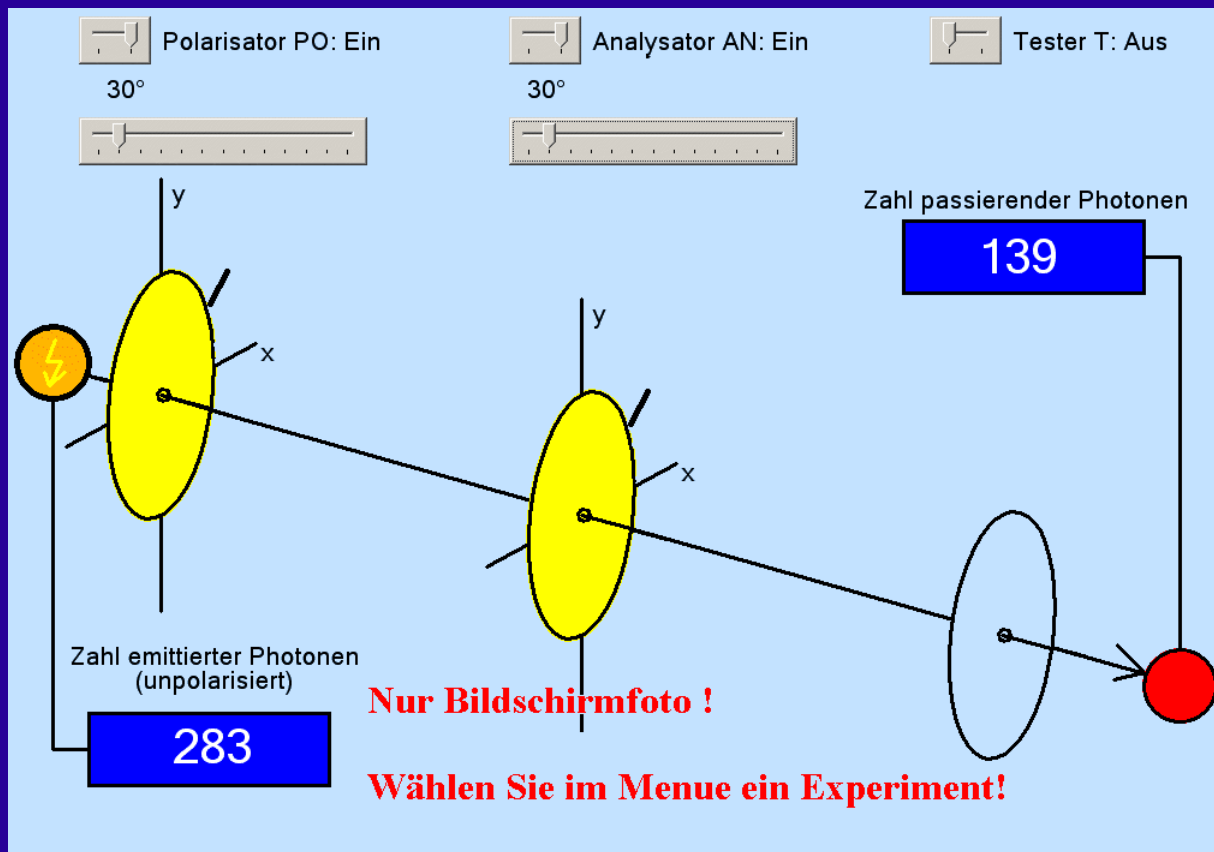
## Der modifizierte Doppelspalt



- Je nach Einstellung eines nachfolgenden Polarisators: Entscheidung über Interferenzlänge nach Durchtritt durch Doppelspalt
- Kein Indiz für Wellen- oder Teilchen“charakter“



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

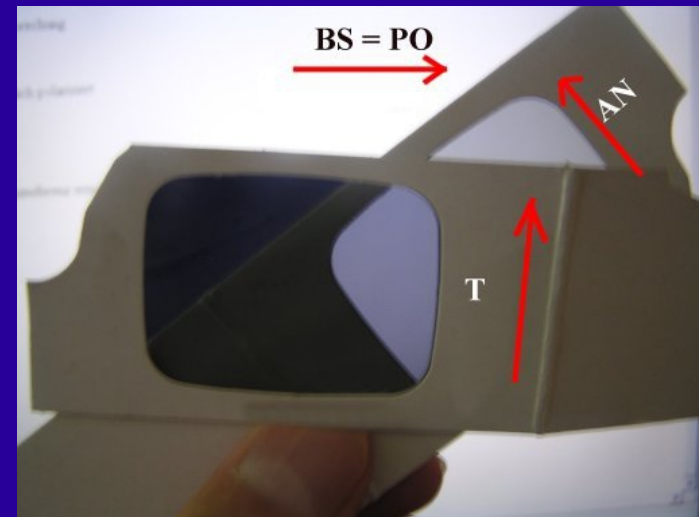
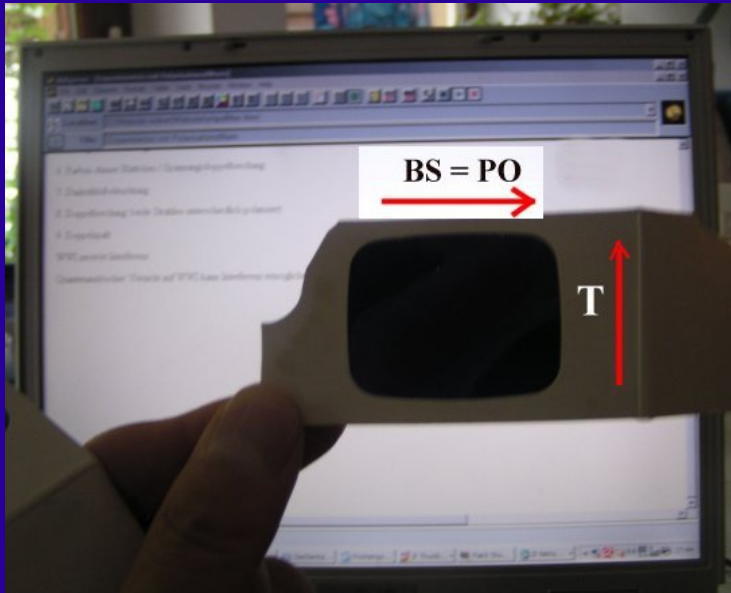


Simulation

12\_1\polaris.Exe

# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

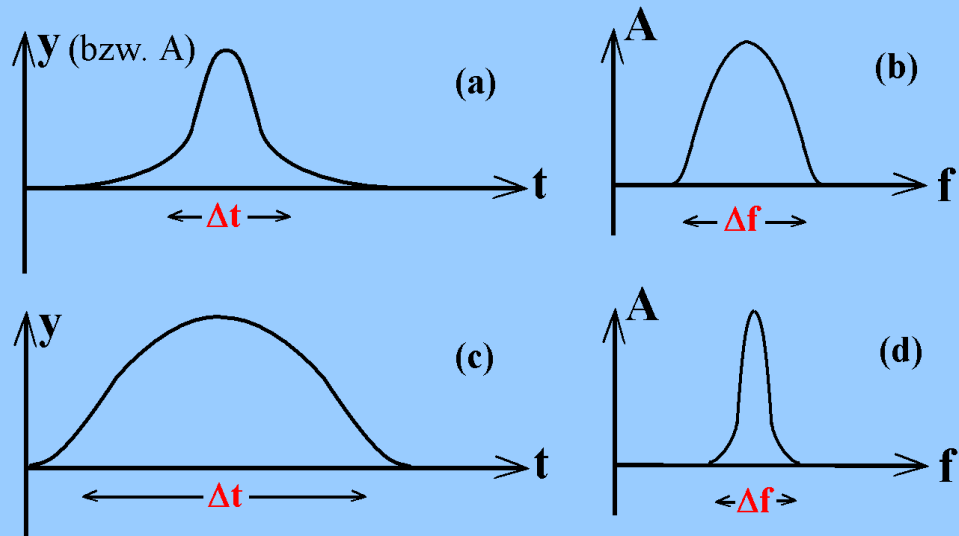
## Ein Schülerversuch zu Un-be-stimmtheit, Reproduzierbarkeit einer quantenphysikalischen Messung, Komplementarität



Kein Beweis! Nur Veranschaulichung!

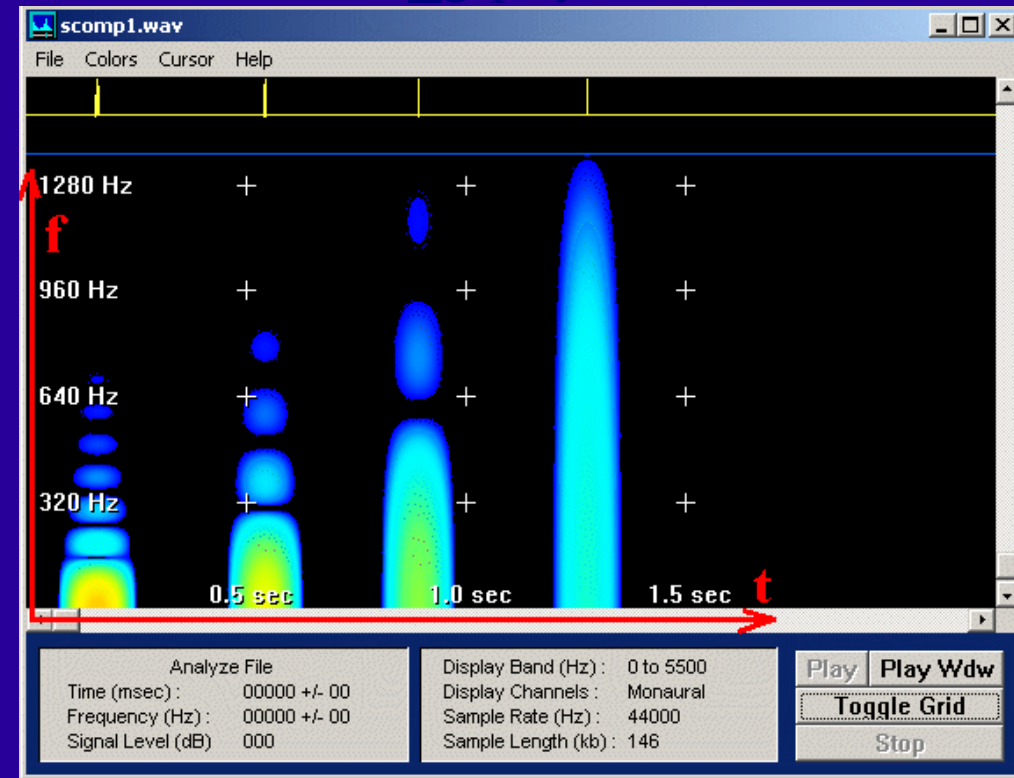
# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## „Schülerversuche“ zur HUR – akustische Analoge



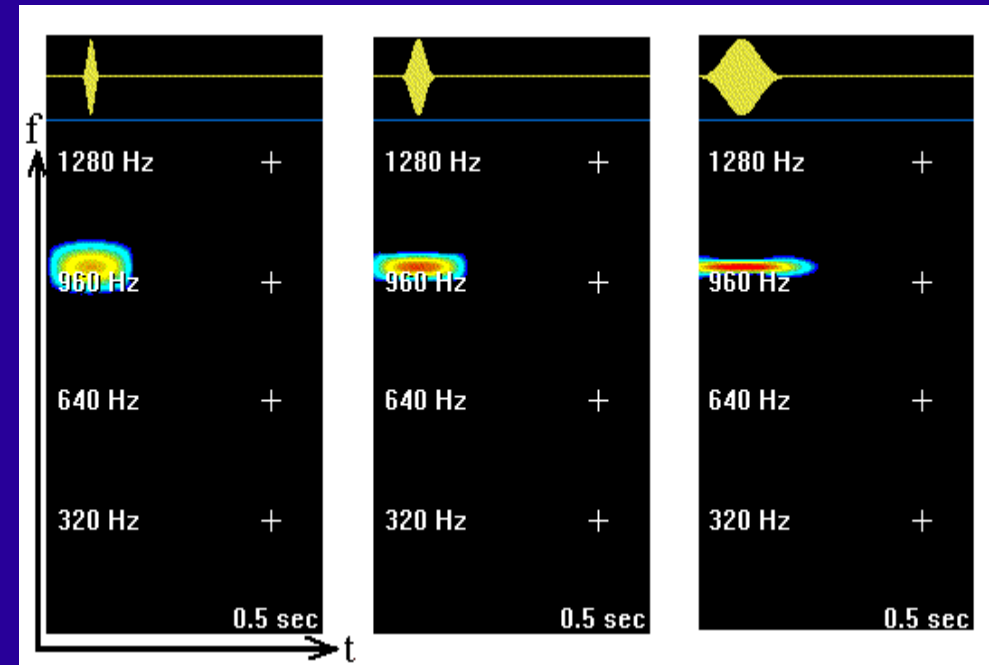
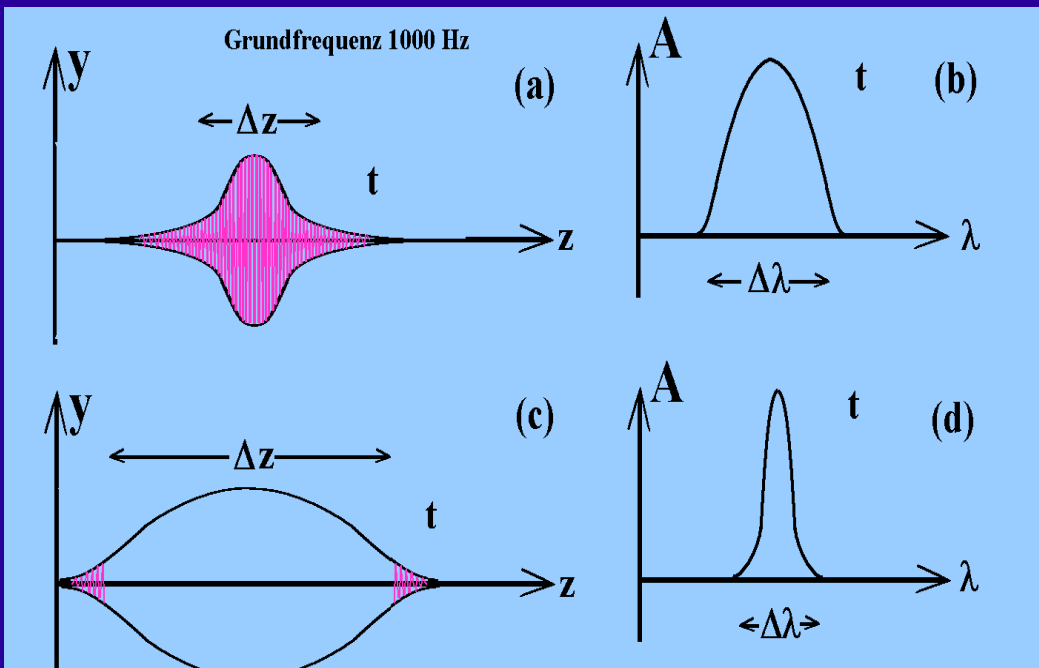
Goldwave.exe / Gram.exe

Große Zeit"unschärfe"  $\Delta t$  bedingt geringe  
Frequenz"unschärfe"  $\Delta f$  und umgekehrt.



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

## „Schülerversuche“ zur HUR – akustische Analoga



Je enger das Wellenpaket ist (je geringer seine Orts"unschärfe"  $\Delta z$ ), desto größer ist der Bereich der beteiligten Wellenlängen, desto größer ist die Wellenlängen"unschärfe"  $\Delta \lambda$ .





## Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Was Sie erwartet:

- I Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- II Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- III Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- IV Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- **V Zusammenfassung der heuristischen Methoden**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**A objektive Un-be-stimmtheit:** Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.=> „Wahrscheinlichkeitsdeutung“

**B Komplementarität (Nicht-Gleichzeitige-Messbarkeit):** Nicht alle klassisch denkbaren Eigenschaften eines Systems sind *gleichzeitig* realisiert / haben *gleichzeitig* einen physikalischen Sinn / sind *gleichzeitig* messbar.

**C Einteilchen-Interferenz** ist die Interferenz von nicht unterschiedenen klassisch denkbaren Möglichkeiten.

**D WWI und Interferenz sind komplementär**

**E HUR** als Folge der Nicht-Gleichzeitigen-Messbarkeit

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### **F** Revision des Teilchenbegriffs, besonders bei Mehr- oder Vielteilchen-Zuständen

Quantenobjekt: Gegenstand der QP (Oberbegriff)

Eigenzustände des Teilchenzahl-Operators (bestimmte Teilchenzahl - Fock-Zustände):

wenn  $n = 1$  : Quantenteilchen,

wenn  $n = 2$  : Teilchenzwilling, Biphoton, Atom+Photon, ...

Unbestimmte Teilchenzahl: Laser-Mode, Atomlaser, kohärente Phononen, Polaritonen, ...

zurück



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Erfolge:

- keine inneren Widersprüche (wie beim sog. Welle-Teilchen-Dualismus),
- Wesentliches der QP kommt besser heraus, insbesondere durch das Herausstellen der (objektiven) Un-be-stimmtheit,
- Entlastung der Schulphysik durch weitgehenden Verzicht auf Wellenformalismen und „Philosophieren“ über „Wellen-“ oder „Teilchen-Charakter“, und doch
- „Verständnis“ grundlegender moderner Experimente

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Sind das sinnvolle Fragen?

- Wie kommt ein Elektron/Photon von der Quelle zum Nachweisort?
- Wie „verhält sich“ ein Elektron beim Durchtritt durch einen Doppelspalt?
- Wie „verhält sich“ ein Photon im MZI, als Welle oder als Teilchen?
- Muss das Elektron/Photon erst nachschauen, ob beide Wege offen sind?
- Wo hält sich ein Elektron auf, wenn man seinen Ort nicht gemessen hat?
- Wie schnell bewegt sich ein Elektron, wenn man seine Geschwindigkeit nicht gemessen hat?
- Ist ein Elektron ein Teilchen oder eine Welle?
- Wie kommt ein Elektron im linearen Potenzialkasten über einen Knoten hinweg, wenn es sich dort „nicht aufhalten“ darf?



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

**Es gibt keinen Welle-Teilchen-Dualismus im ursprünglichen Sinn!**

Wenn Sie irgendwas sagen von der Art:

„Je nach Experiment verhält sich das Elektron/Photon wie eine Welle oder wie ein Teilchen“

dann vertreten Sie eine historische Hypothese, die seit den 30-er Jahren des letzten Jahrhunderts als **überholt** gilt!

Die Physik kann auch nichts zu einem „Verhalten“ sagen. Siehe Zeilinger-Zitat!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

### Bemerkung zur „Modellphilosophie“ (Welle-Teilchen)

- Als didaktisches Modell nicht eigentlich falsch
- Aber kein wissenschaftliches Modell (aus QM nicht begründbar)
- Nicht Gegenstand der QM
- Versagt bei Mehrteilchen-Zuständen: Wellen nur in abstrakten Räumen
- Versagt bei klassischen elm. Wellen: un-be-stimmte Photonenzahlen
  
- Manchmal zweckmäßig zur qualitativen „Erklärung“
- Aber: Es gibt nur wenige Experimente, die zu einem bestimmten Modell zwingen (GRA-Versuch, Millikan-Versuch;  
• aber nicht: Interferenz, Gitterbeugung, Photoeffekt, ... )



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

Anton Zeilinger

**Indeed, following Bohr, I would argue that we can understand quantum mechanics, if we realize that science is not describing**

**how nature is**

**but rather expresses**

**what we can say about nature.**

**Das Wesen von Elektronen, Photonen ... ist nicht Gegenstand der Physik!**



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

## Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

J. Küblbeck, R. Müller, Die Wesenszüge der Quantenphysik, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2003/2006

E. Fick, Einführung in die Grundlagen der Quantentheorie, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1972

J.J. Sakurai, Modern quantum mechanics, Addison-Wesley, Redwood City, 1985

M. Le Bellac, Quantum Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006

A. Zeilinger, Einsteins Schleier, Die neue Welt der Quantenphysik, Beck, München, 2003

R. Loudon, The quantum theory of light, Clarendon Press, Oxford, 2000

Münchener Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik (Milq)

[http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/milq\\_basiskursp01.html](http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/milq_basiskursp01.html)

<http://www.muthsam.de/doppelspalt.htm>

<http://milq.tu-bs.de/index.php/hinweise/downloads/118-simulationsprogramme-download.html>



# Würzburger Quantenphysik-Konzept Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule

<http://www.forphys.de>

Hier finden Sie u.a. auch den ausführlichen  
Text dieses Vortrags (und früherer) und Vieles  
mehr.

# Das Würzburger Quantenphysik-Konzept

Was ist das Besondere des didaktischen Würzburger Quantenphysik-Konzepts?

**Vorwiegend für Lehrer:**

Unterrichtsmaterialien:

**Vorwiegend für Schülerinnen und Schüler:**

## Online-Lehrtext

### Was Sie schon immer über Quanten wissen wollten

(Druckversion des Lehrtexts)

ISBN 978-3-8370-8714-7

### Schulversuche zur Quantenphysik

(noch unvollständig)

### Grundfakten der Quantenphysik

### Weitere Online-Materialien zur Quantenphysik

### Schüleraktivierende Unterrichtsmaterialien zur Quantenphysik

#### - Teil 1:

### Auf dem Weg zur Quantenphysik

ISBN 978-3-8370-1320-7

### Schüleraktivierende Unterrichtsmaterialien zur Quantenphysik

#### - Teil 2:

### Grundfakten der Quantenphysik und Heuristische Methoden

ISBN 978-3-8370-0630-8

### Schüleraktivierende Unterrichtsmaterialien zur Quantenphysik

#### - Teil 3:

### Grundlagen der Atomphysik

ISBN 978-3-8370-1321-4

### Grundlagen der Quantenphysik - Das Schülerbuch

ISBN 9783842347489

### Online-Glossar zur Quantenphysik

### Online: Wissenschaftliche Experimente zur Quantenphysik

### Online: Texte für Schüler

- Ungewiss - Un-be-stimmt
- Wellen-Interferenz und Einteilchen-Interferenz
- Müssen wir die klassische Physik ganz vergessen?



**Würzburger Quantenphysik-Konzept  
Grundfakten u. heuristische Methoden in d. Schule**

**ENDE**

**Vielen Dank!**