



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der 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.



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Ziele:

- mehr „Verständnis“ in der QP
- ohne mehr Formalismus

Basis:

Standard-Darstellung fast aller mir bekannten Quantentheorie-Lehrbücher



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was Sie erwartet:

- 1. Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- 2. Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- **3. Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden**
- 4. Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- 5. Resümee



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Das sollte selbstverständlich sein:

- dass in der Schrödinger-Theorie Wellen vorkommen (Wellenfunktionen), allerdings in meist hochdimensionalen Konfigurationsräumen
- dass Schrödingersche Wellenfunktionen für Teilchen-Zustände gelten und **nur** Wahrscheinlichkeits-Vorhersagen für künftige Messungen machen
- dass Wellenfunktionen keine Wellen im Anschauungsraum sind (Zeilinger: „nur im Kopf der Physiker“)
- dass die Bornsche Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Schule behandelt sein und genutzt werden sollte



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was sind nach der Quantentheorie
Teilchen ?



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

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

**Quanten-Teilchen sind definiert als Quanten-Objekte,
die abzählbar sind.**

- Teilchen-Eigenschaft hat nichts mit Lokalisierung zu tun !
- Ein Elektron, Photon, ... ist eindeutig und ganz 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.



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

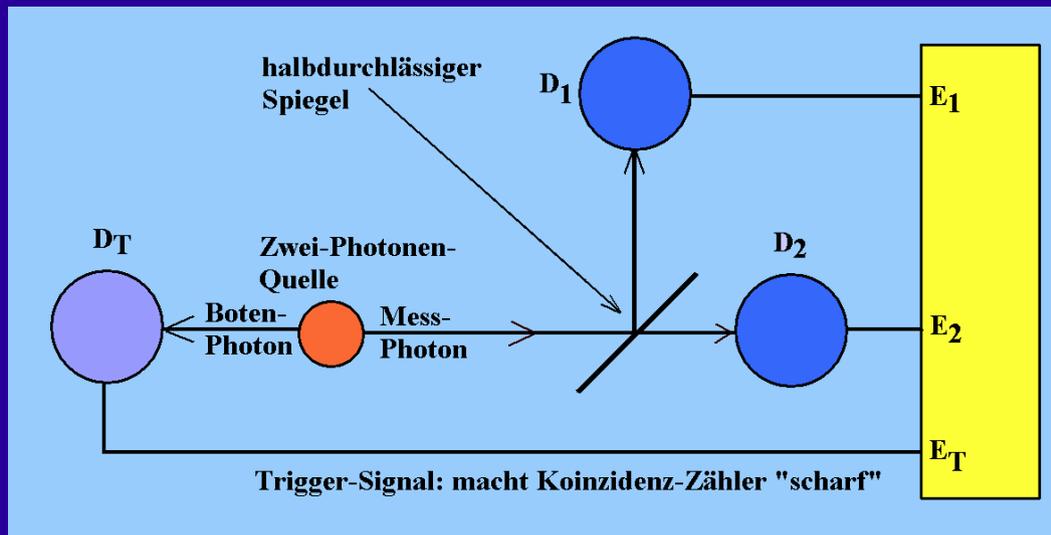
Millikan 1911: Es gibt keine (ungebundenen) Bruchteile von Ladungen,
insbesondere keine Bruchteile von Elektronen

Quantentheorie ca. 1930: Es gibt keine „verschmierten“ Elektronen
oder „Ladungswolken“, auch nicht im Atom

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Das Grangier-Experiment

(Grangier, Roger und Aspect 1986)



Simulation

Photonen treten – wie Elektronen - immer ungeteilt auf



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Teilchen-Zustände sind Zustände mit bestimmter Teilchenzahl.

Gegensatz dazu sind Zustände mit unbestimmter Teilchenzahl.



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was Sie erwartet:

- 1. Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- 2. Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- 3. Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- 4. Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- 5. Resümee



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Ich schlage also folgende Forderungen an "vernünftige" **heuristische Verfahren für die Schule** vor:

- 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.

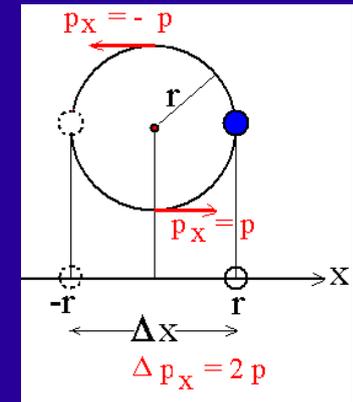
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

H-Atom: E aus einem Minimalprinzip ?

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

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

(3) E_{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.

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

H-Atom: E aus einem Minimalprinzip ? Wertung

- (1) $E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$ Widerspricht Quantenphysik: Gesamtenergie E und E_{pot} können nicht gleichzeitig existieren.
- (2) E_{pot} prop. $-1/r$ Wer sollte denn E_{pot} am Ort mit Radius r haben?
- (3) E_{kin} aus der HUR: klingt quantenmechanisch, aber Unbestimmtheit 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_{kin} prop. $1/r^2$ Das Elektron im Abstand r vom Kern soll diese kinetische Energie haben?



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was Sie erwartet:

- 1. Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- 2. Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- 3. Grundfakten der Quantenphysik und
heuristische Methoden
- 4. Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- 5. Resümee

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

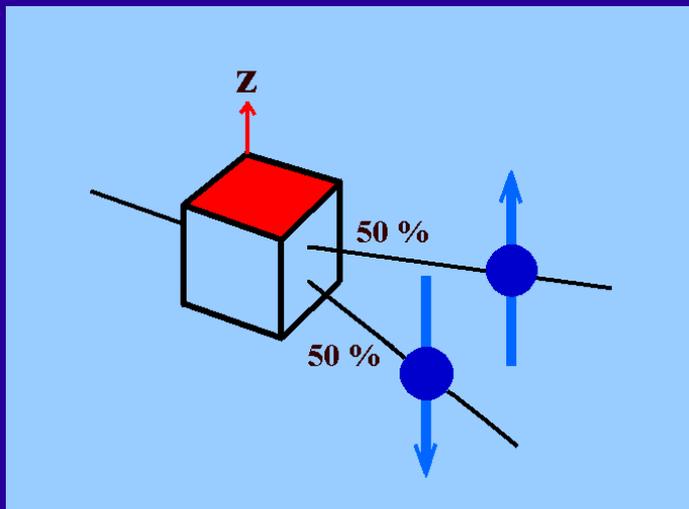
A Eine Messgröße erhält erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.

objektive Un-be-stimmtheit => objekt. Wahrscheinl.

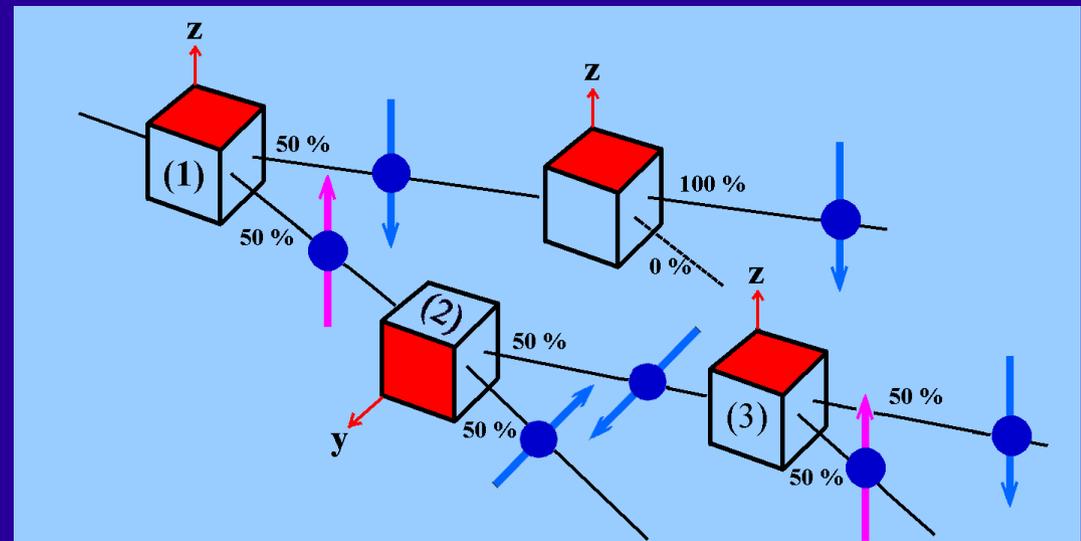
- Messgröße nicht nur unbekannt
- Sie existiert ohne Messung nicht als Eigenschaft des Systems
- Vor der Messung kann man weder sagen, dass das System die zugehörige Eigenschaft hat, noch dass es sie nicht hat.
- Beispiel: Ohne eine Messung **hat** ein Elektron keinen (be-stimmten) Ort und keine be-stimmte Geschwindigkeit.

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

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



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



Messergebnis ist reproduzierbar.



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

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

Komplementarität

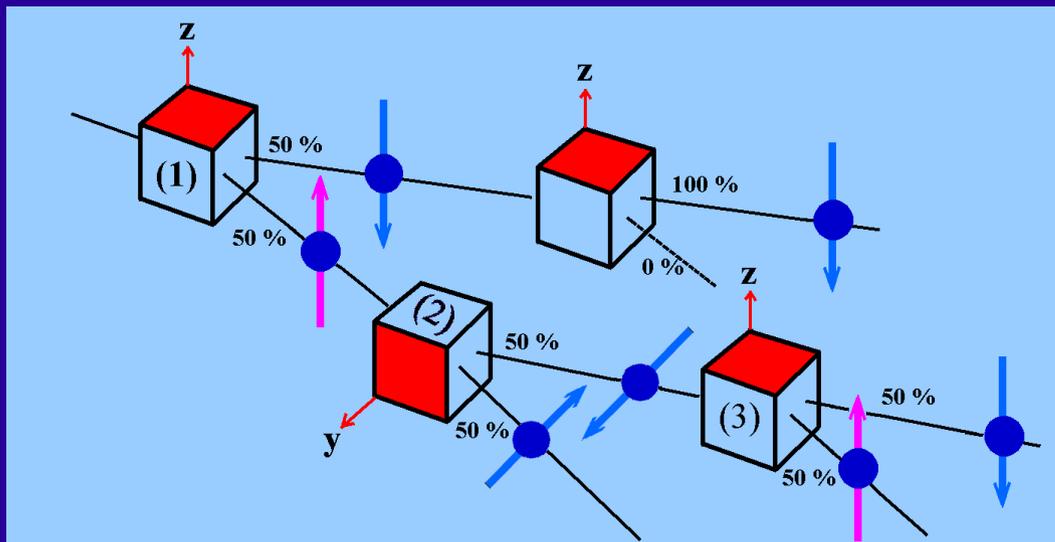
Beispiel: Ein Elektron hat nicht gleichzeitig Ort und Geschwindigkeit als Eigenschaft.

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der 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 vorher be-stimmte z-Komp. un-be-stimmt geworden.

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der 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?

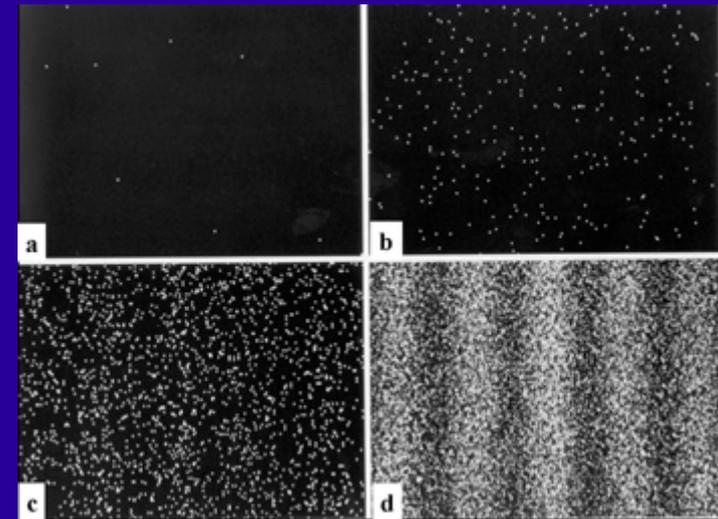
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

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.

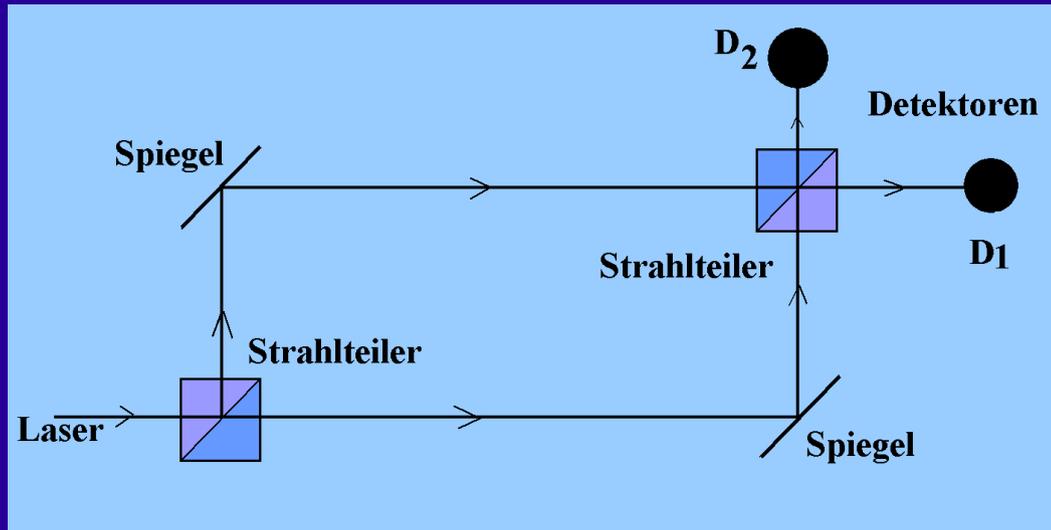
Bereits ein einzelnes Photon oder Elektron führt in einer solchen Situation zur Interferenz.

(Folge der Versuche von Taylor, Tonomura u.a.)



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Mach-Zehnder-Interferometer



Ein-Teilchen-Interferenz

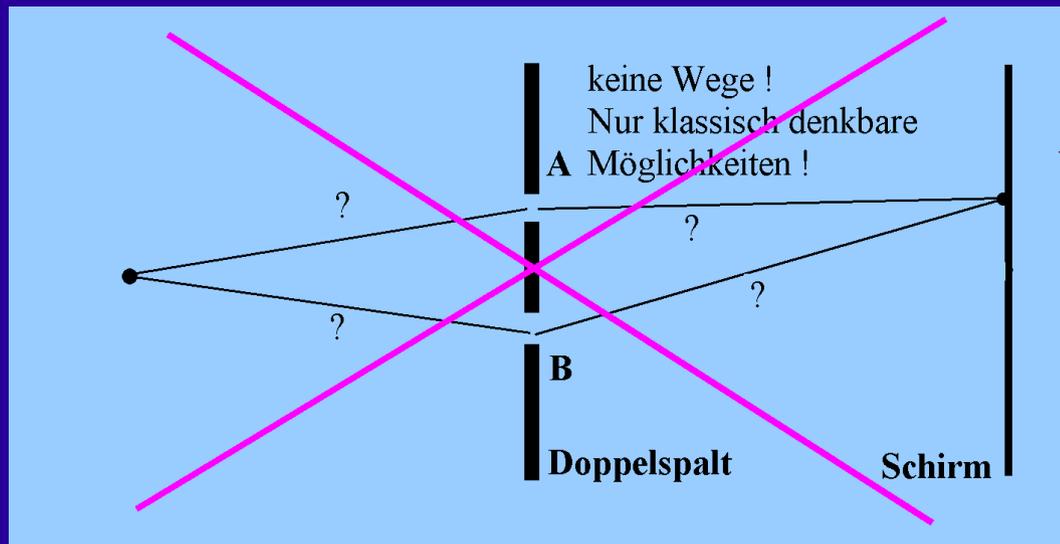
Interferenz mit einem einzelnen Photon findet statt, weil es zwei klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, zu einem Detektor zu gelangen, zwischen denen nicht unterschieden wird.

Nach der QP hat „Weg“ keinen Sinn!

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der 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.



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Abzulehnende Sprechweisen:

"Das Elektron interferiert am Doppelspalt mit sich selbst".

Kann nicht wörtlich genommen werden, da unterstellt würde, dass es "in Wirklichkeit" einen Durchtrittsort des Elektrons gibt, dass er jetzt sogar aufgespalten ist in zwei Orte.



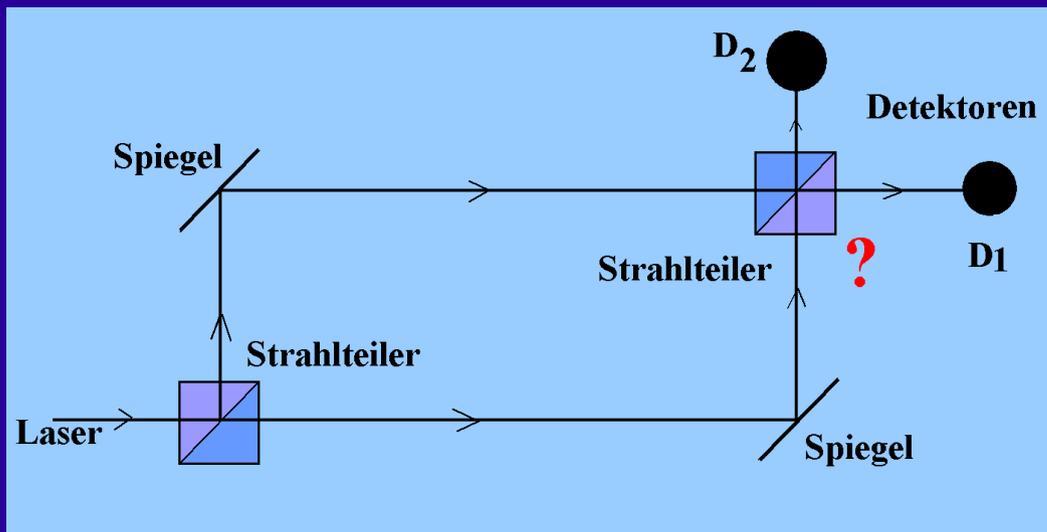
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

D WWI („Welcher-Weg-Information) zerstört Interferenz

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Mach-Zehnder-Interferometer



WWI und Interferenz ?

Zweiter Strahlteiler vorhanden:
Zweiter Strahlteiler fehlt:

keine WWI, aber Interferenz
WWI, aber keine Interferenz



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

E Heisenbergsche Un-be-stimmtheitsrelation HUR

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der 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. Innerhalb der Un-be-stimmtheiten ΔA und ΔB sind sie ungefähr be-stimmt.

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:

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq | \langle [A,B] \rangle / 2i |$$

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

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

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Un-be-stimmtheiten sind nicht:

- Schwankungsbereiche an sich bestimmter Messgrößen
- Bereiche der (subjektiven) Unkenntnis ("Ungewissheiten")
- Messungenauigkeiten

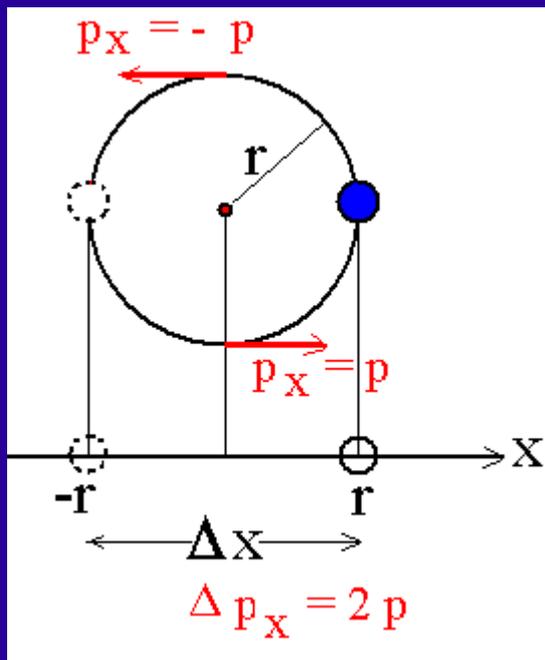
sondern Bereiche, in denen – im betreffenden Zustand - Messwerte komplementärer Messgrößen überwiegend realisiert werden (eintreten) werden,

obwohl sie nicht (gleichzeitig) Eigenschaften des Systems sein können

Keine Einschränkung der Kenntnis!

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Herleitung der HUR ?



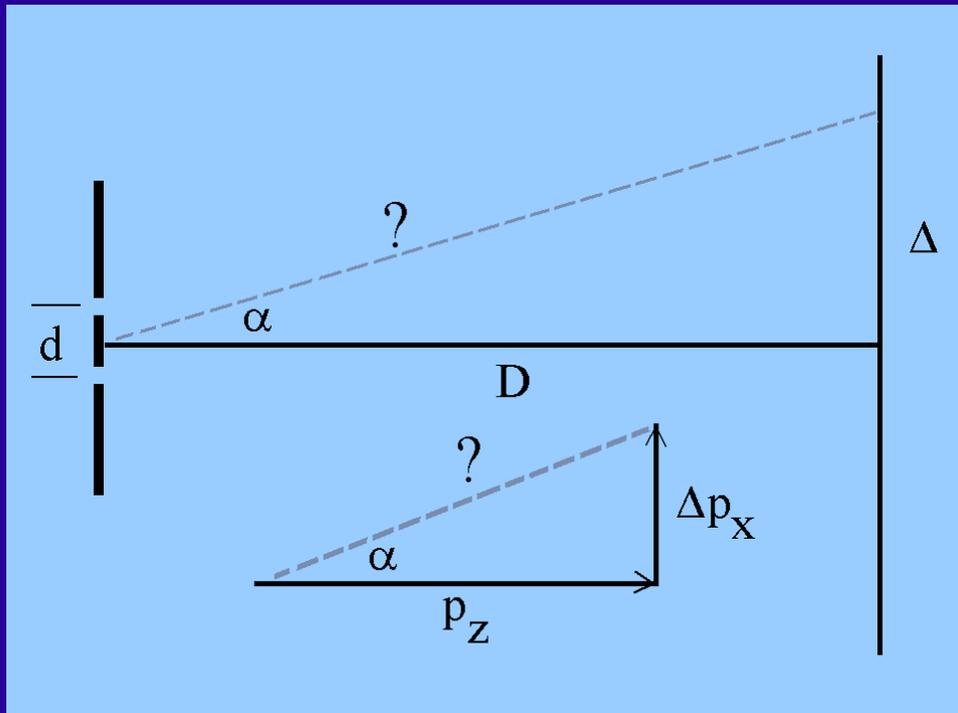
Quantenbedingung nach Bohr: $p \cdot r = n \cdot h / 2\pi$ ($n \in \mathbb{N}$).
 x -Koordinate schwankt zwischen $-r, r \Rightarrow$ Schwankung $\Delta x \approx 2r$
 Impuls-Koordinate p_x zwischen $-p, p \Rightarrow$ Schwankung $\Delta p_x \approx 2p$
 $\Rightarrow \Delta x \cdot \Delta p_x \approx 2r \cdot 2p = 4r \cdot p = 4n \cdot h / 2\pi$

Sieht wie eine HUR aus, ist aber keine:

Δx und Δp_x sind nicht die quantenphysikalischen Unbestimmtheiten, sondern Schwankungsbereiche.

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der 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. $\Delta p_x = \Delta/D h/\lambda$ mit der deBroglie-Wellenlänge $\lambda = h/p_z$

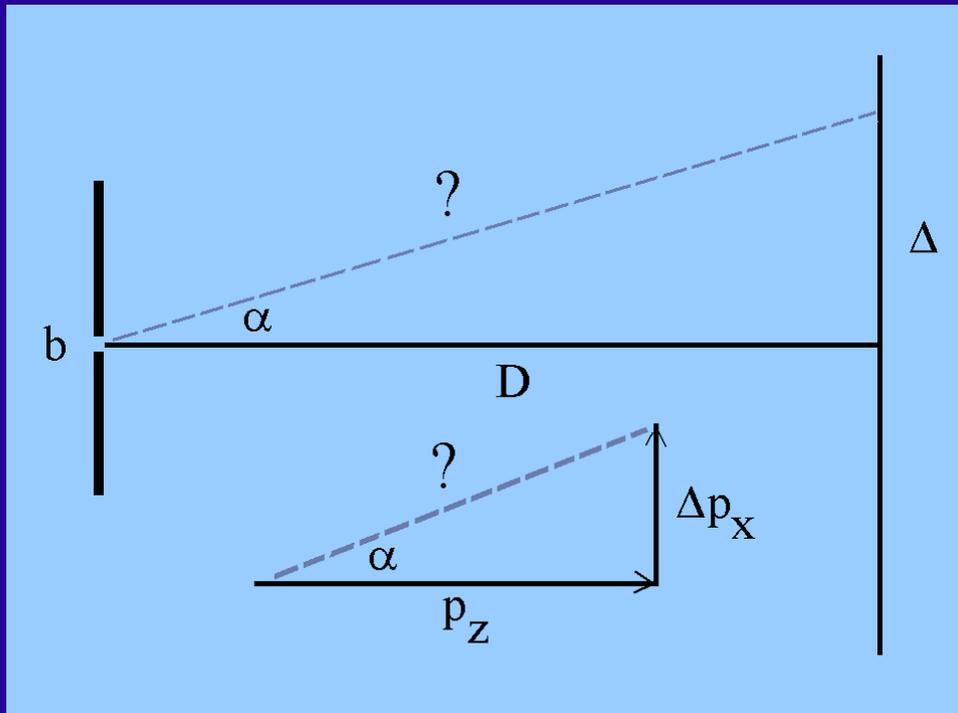
also: $\Delta x \Delta p_x = \Delta/D h/\lambda d$

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

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

Kein Zusatzimpuls!

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule



Beispiel einer Anwendung: **Einfachspalt**

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

Impuls-Unbestimmth. $\Delta p_x \geq \hbar/(2b)$

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:

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

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



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

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



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

F Revision des Teilchenbegriffs bei Mehr- oder Vielteilchen-Zuständen



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

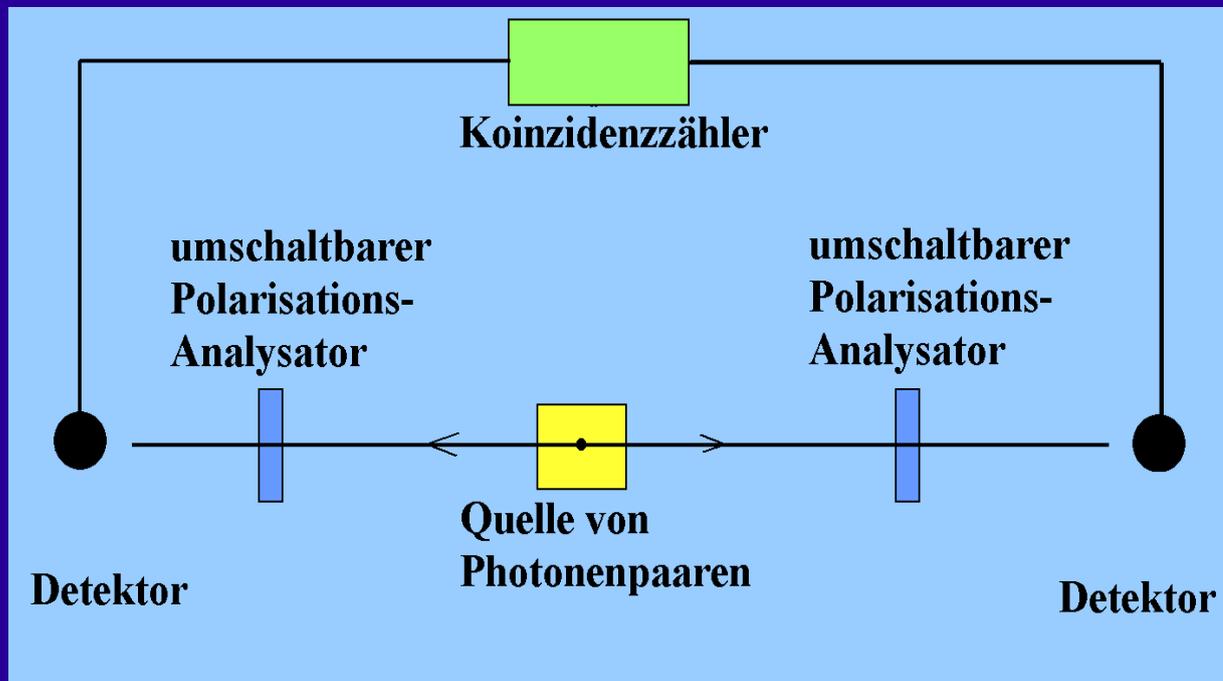
Ein Quanten-Teilchen **besitzt nicht** eine klassisch denkbare Eigenschaft ohne eine Messung und **nie** alle klassisch denkbaren Eigenschaften **gleichzeitig**.

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

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der 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“

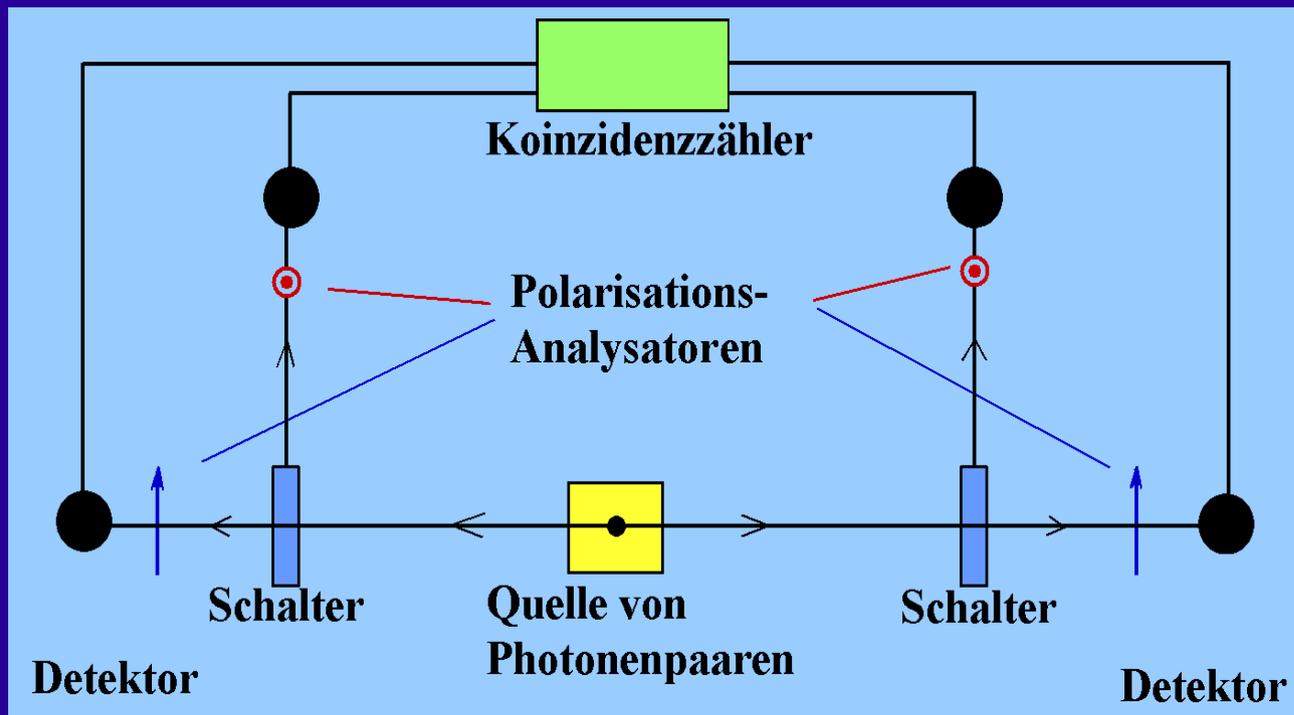
2. Beide Photonen hatten vor der Messung und Zerlegung in einzelne Photonen keine "be-stimmte Polarisation"

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Aspect, Dalibard und Roger 1982

Weih's-Zeilinger-Experiment 1998 und Gisin 1997/98



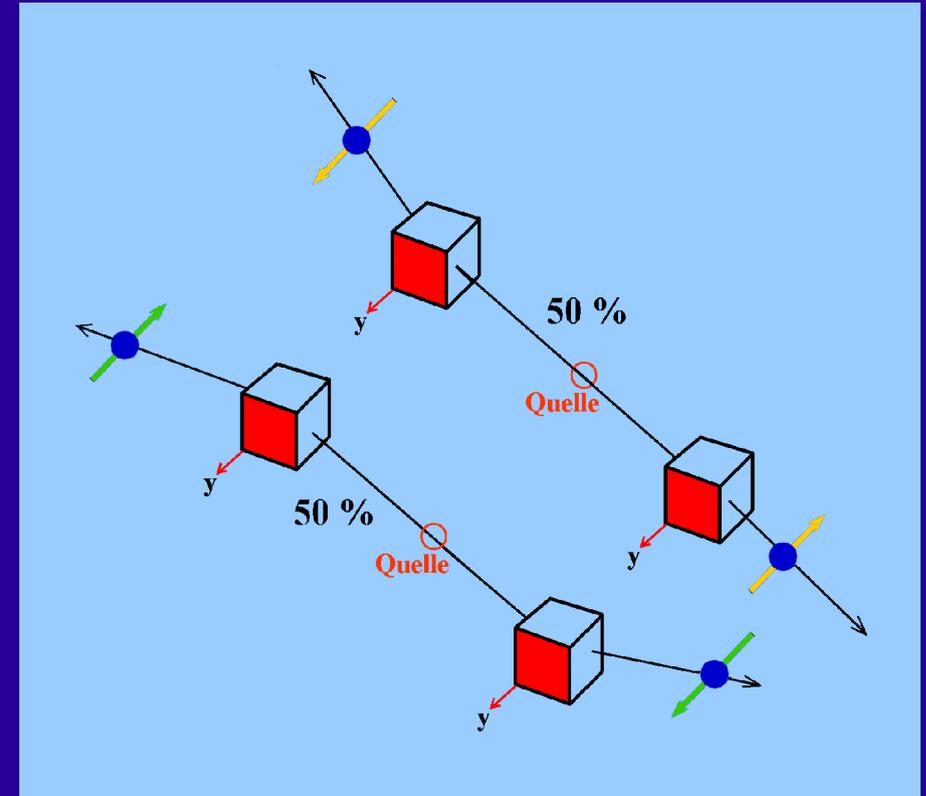
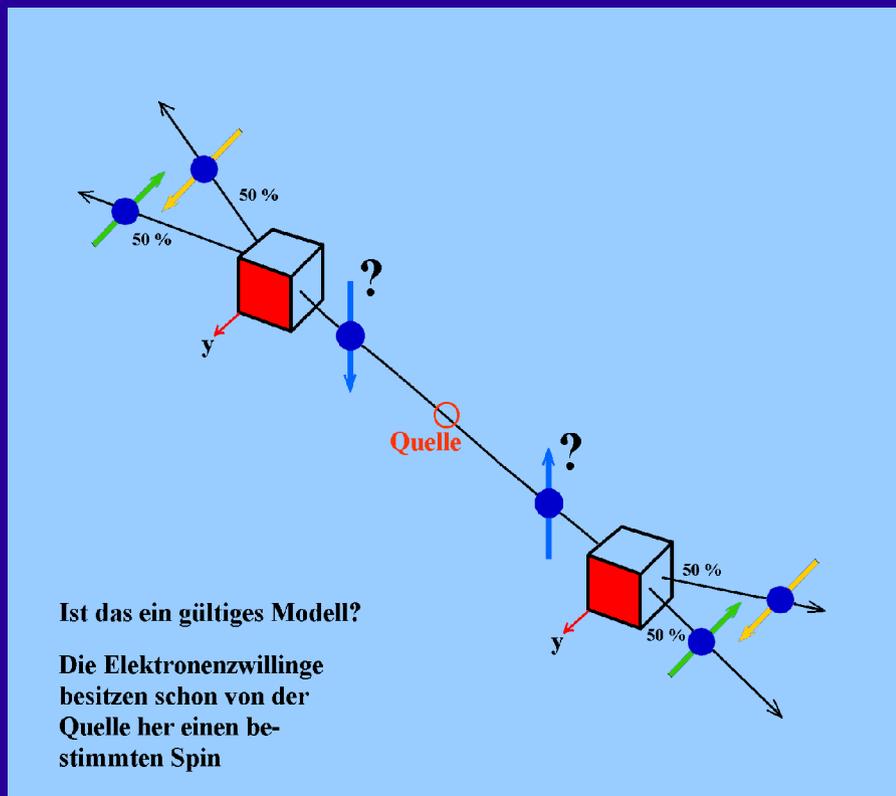
1. Beide Photonen immer streng miteinander korreliert, entspr. einem EPR-Exp.

2. Laufzeiten und Umschaltzeiten so, dass keine "Absprache" der Photonen untereinander möglich

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

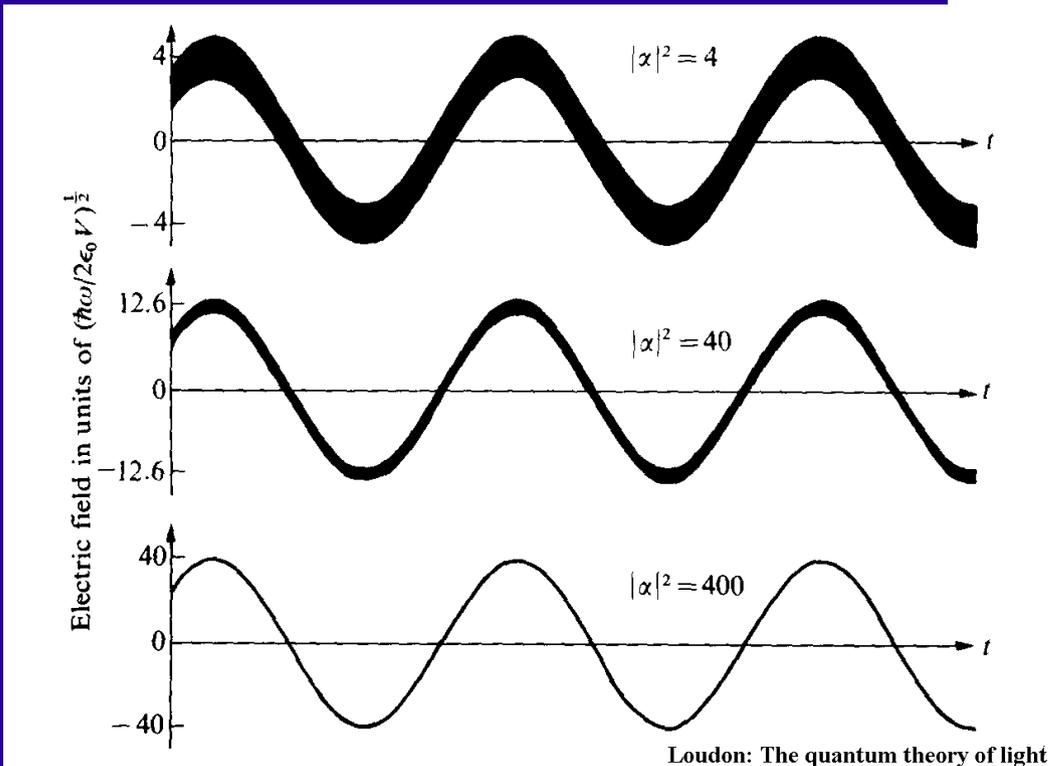
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Besitzen Elektronen eines Elektronenzwillings individuelle Eigenschaften ?



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Laser-Mode



146 The quantized radiation field

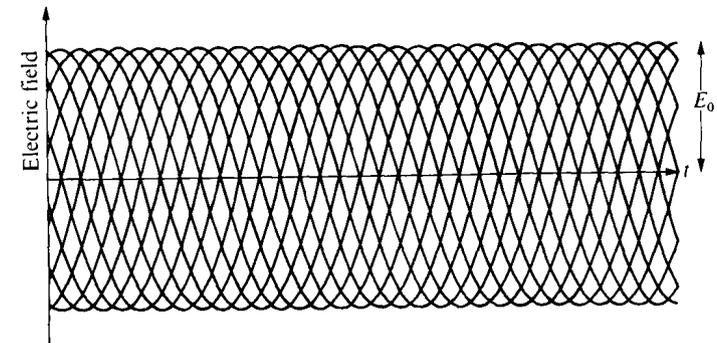


FIG. 4.2. Pictorial representation of the electric-field variation in a cavity mode excited to state $|n\rangle$. The sine waves should more accurately form a horizontal continuum. The amplitude E_0 is defined in the text.

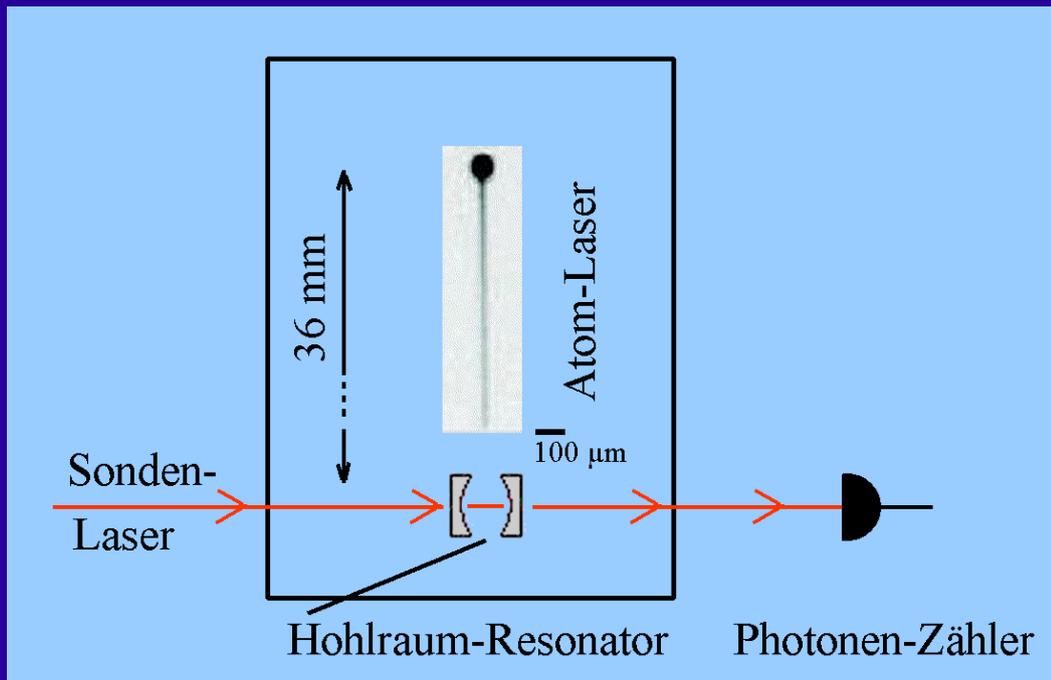
Loudon: The quantum theory of light

Glauber 1963 (Nobelpreis 2005)

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Atomzähler von Esslinger u. Mitarbeitern 2005



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

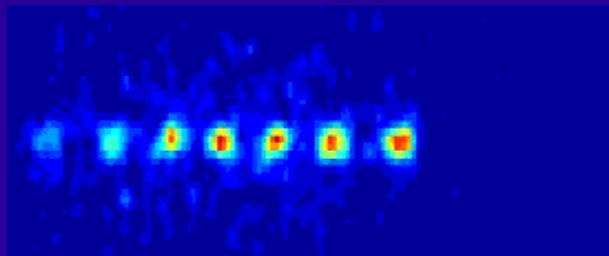
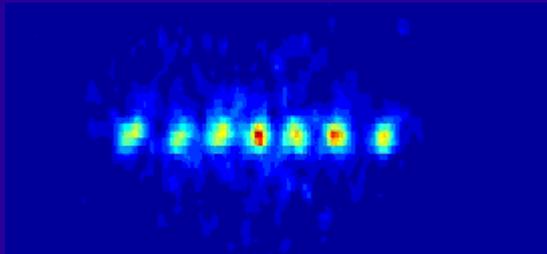
=> Zählrate sinkt

25 % der Atome werden gezählt

Poisson-Verteilung !

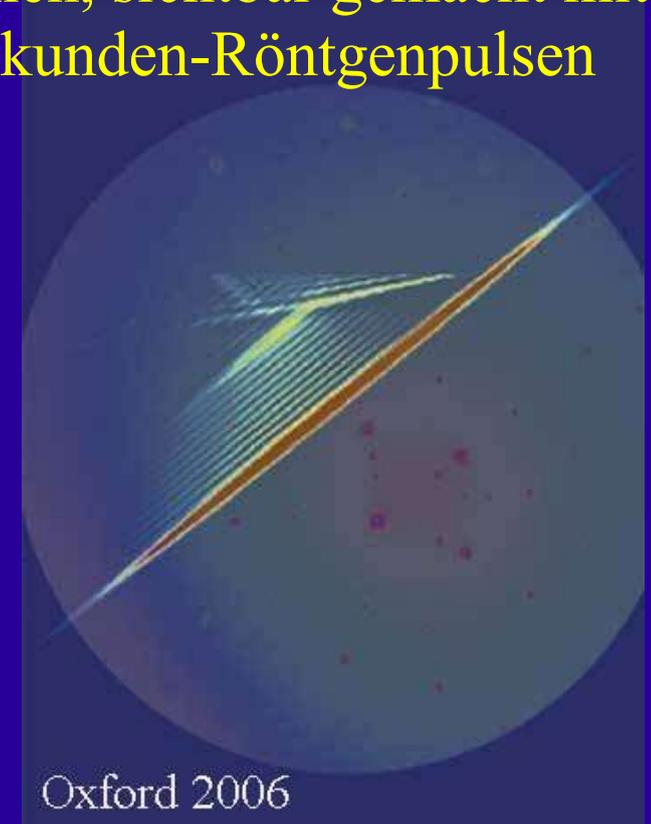
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Schwingungen von Ca^+ -Ionen in einer Falle



Nägerl et al. Innsbruck
1998

Polaritonen, sichtbar gemacht mit Femtosekunden-Röntgenpulsen



Oxford 2006
Cavalleri et. al. 2006



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Quantenteilchen sind anders!

Aber sie sind Teilchen!



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was Sie erwartet:

- 1. Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- 2. Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- 3. Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- 4. Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- 5. Resümee

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

WWI zerstört Interferenz

Doppelspalt: übliche Diskussion der „Elektronenbeleuchtung“

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

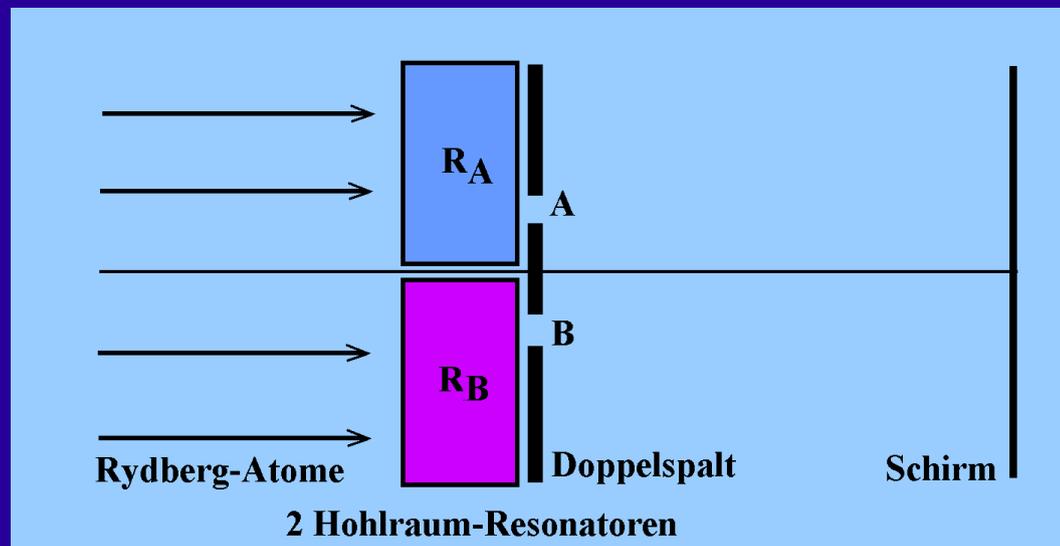
Doppelspaltversuch von Muthsam (Uni. M.)
Vgl. Doppelspaltversuch von Muthsam (Uni. M.)

Vorsicht: Das Modell von Photonenstößen ist sehr problematisch!

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Scully, Englert und Walther Vorschlag 1991

Dürr, Nonn und Rempe 1998 (#Seite 67)



Rückwirkungslose Messung des Durchtrittsorts: Interferenz?

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

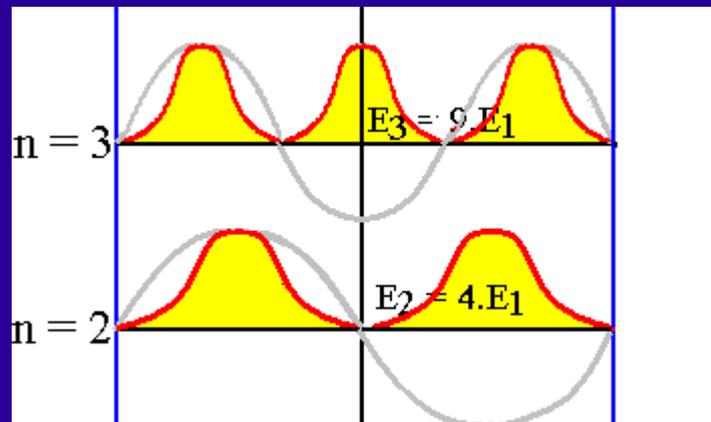
- „Komplementarität fundamentaler als HUR“ ?
- Hier Interferenz von 6-dimensionalen Wellen im Konfigurationsraum!

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Teilchen im linearen Potenzialkasten

2 klassisch denkbare Möglichkeiten für den Impuls (-p, p)

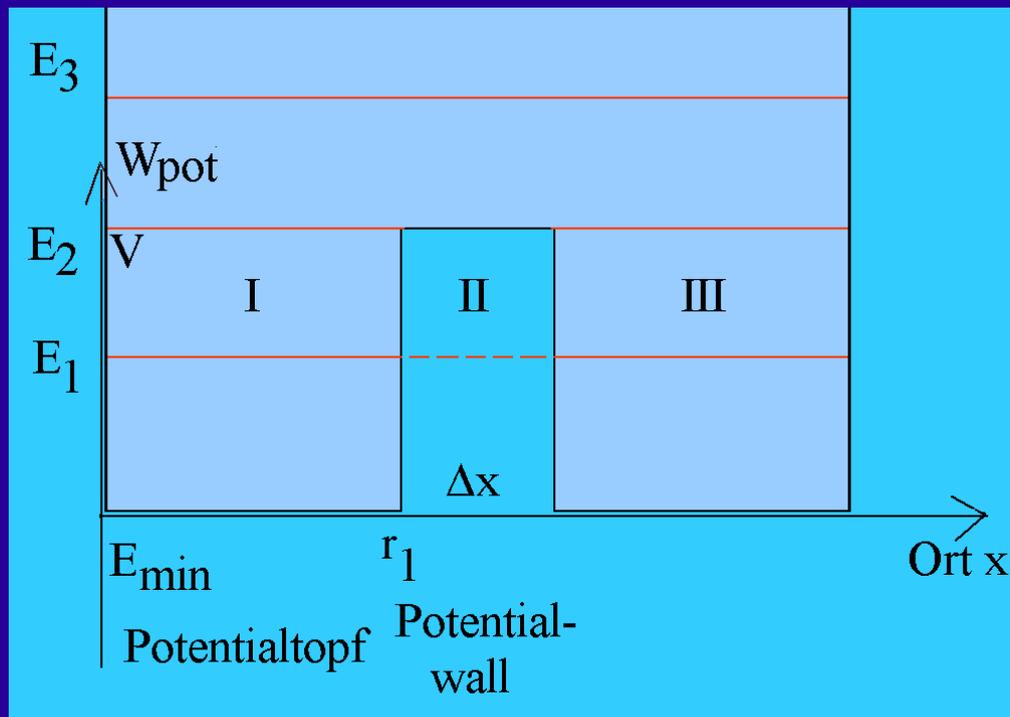
=> Interferenz, d.h. Minima und Maxima für die Nachweiswahrscheinlichkeit an einem Ort x



Verallgemeinerung für andere gebundene Zustände, im Atom z.B.?

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Der Tunnel-Effekt



Bild

Klassische und quantenmechanische Argumentation unterscheiden sich total!

Nicht-gleichzeitige Messbarkeit:

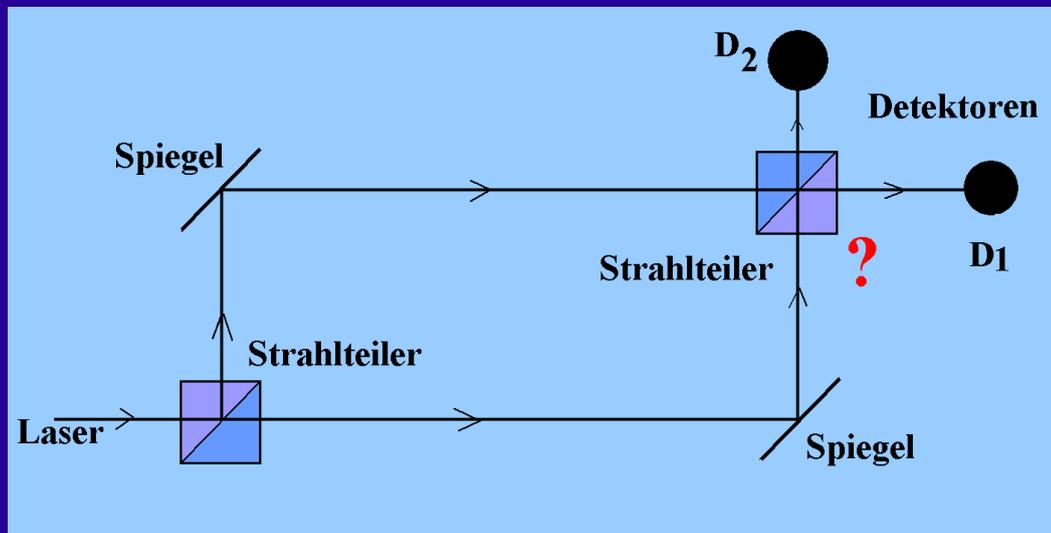
Klassisches Argument falsch!

HUR $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2 \Rightarrow$

in Bereich II ermöglicht Impuls-unbestimmtheit Unbestimmtheit der kinetische Energie und positive Messwerte von $E_{\text{kin}} = p^2/2m$

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

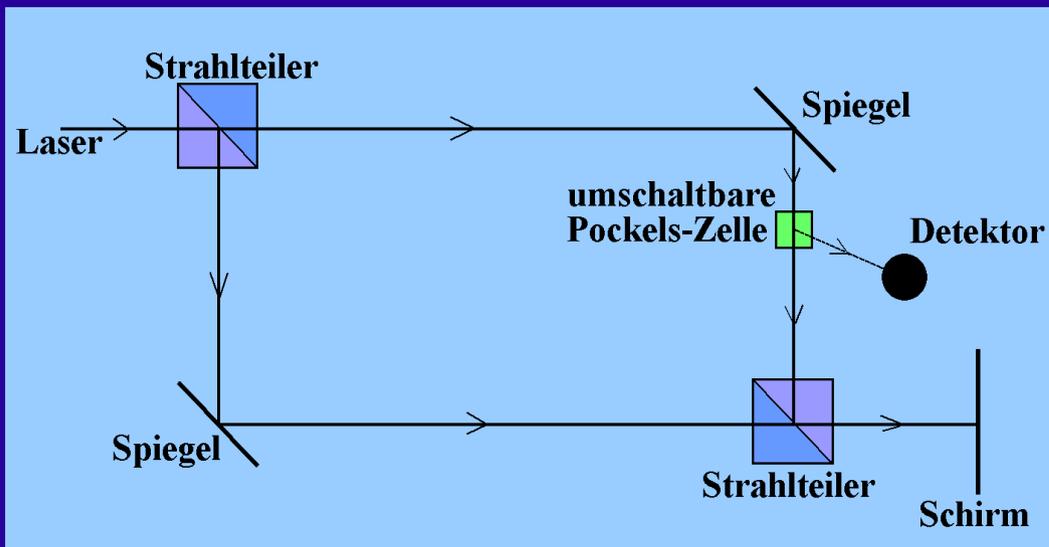
Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Entscheidung (Prinzip)



Kann nichts mit einem vermeintlichen „Wellen-“ oder „Teilchencharakter“ zu tun haben, sondern nur mit komplementären Fragestellungen an die Natur, auf die die Natur sinnvoll antwortet

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Mach-Zehnder-Interferometer mit verzögerter Entscheidung



Vorschlag von Wheeler 1978 ;

durchgeführt von

Hellmuth, Walther, Zajonc

(Uni München 1987)

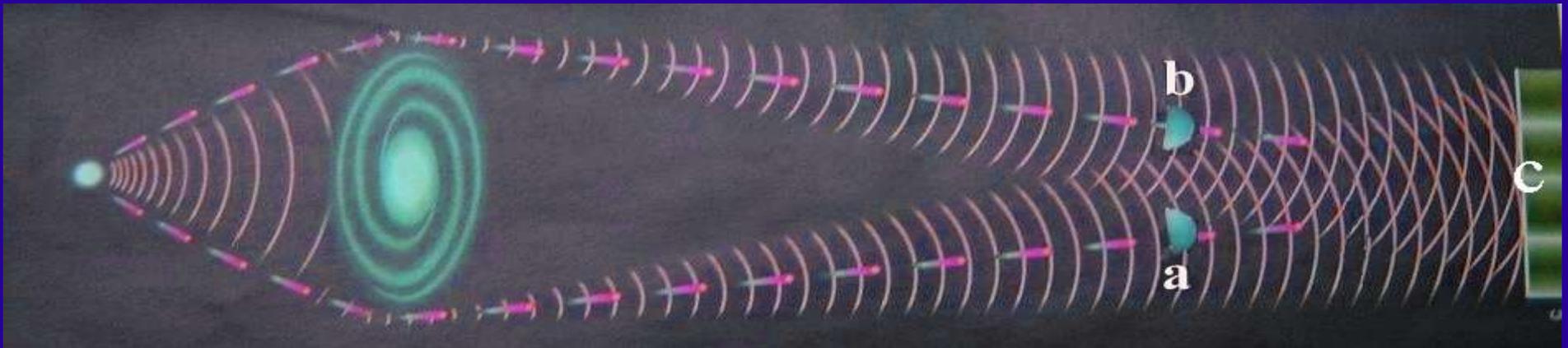
Alley, Jakubowicz, Wickes

(Univ. of Maryland)

Das "Verhalten" des Photons hängt nicht von seinem vermeintlichen "Wellen-" oder „Teilchen-Charakter" ab.

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Gravitationslinsen-Interferometer (Wheeler)

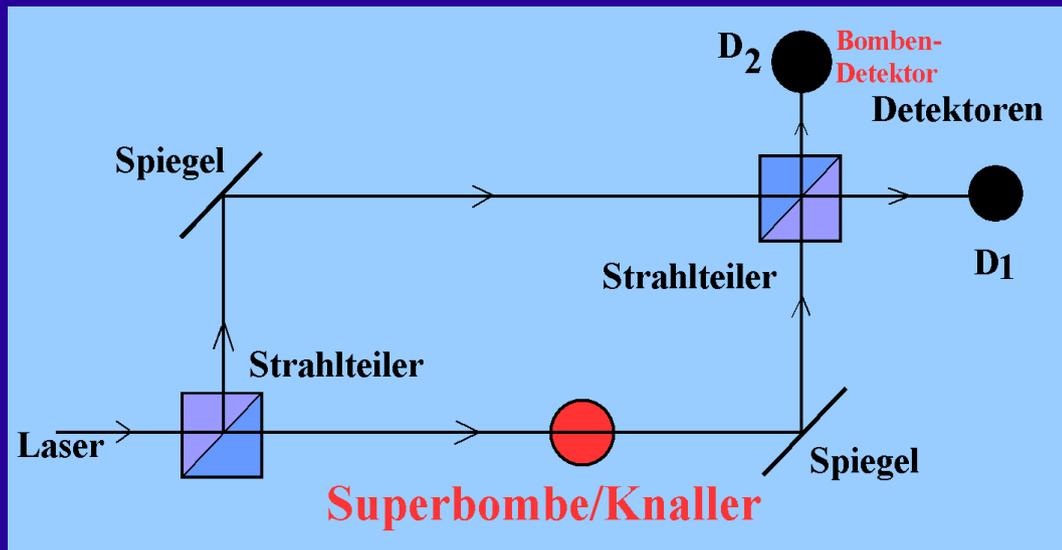


Der Beobachter trifft *jetzt* die Entscheidung, ob er ein WWE (a,b) oder ein Interferenz-Experiment (c) machen möchte.

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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Knaller-Test (Elitzur und Vaidman 1993)



Kwiat, Weinfurter und Zeilinger

Interferenz geht bereits dann verloren, wenn nur die Möglichkeit zu einer Wegmessung besteht, sie nur "angedroht wird" (das Photon trifft mit einer beträchtlichen Wahrscheinlichkeit gar nicht die Superbombe, obwohl sie vorhanden ist) — **Zusammenhang mit Information!**

Ideale nichtverbrauchende Messung (Quantum Nondemolition Measurement)

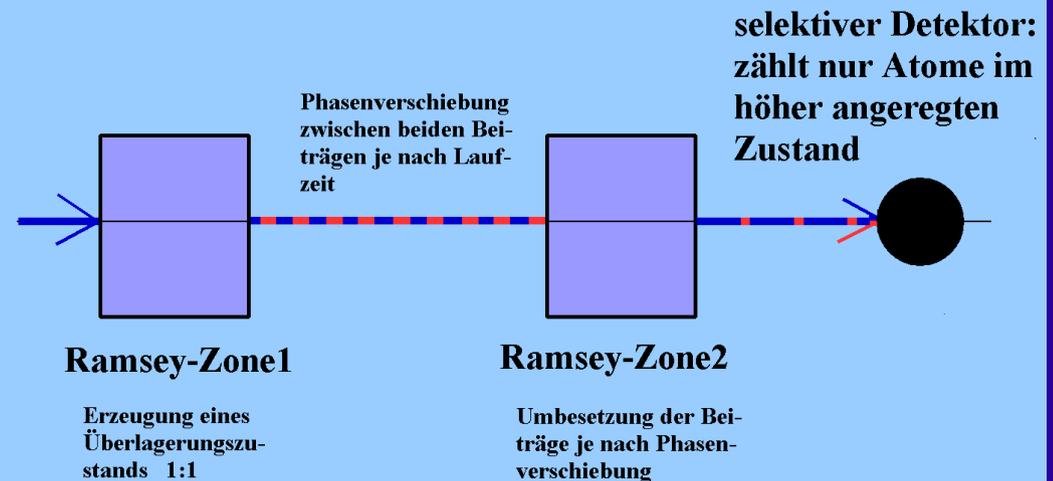
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Quantenschwebungen

Raimond, Brune, Haroche 2001

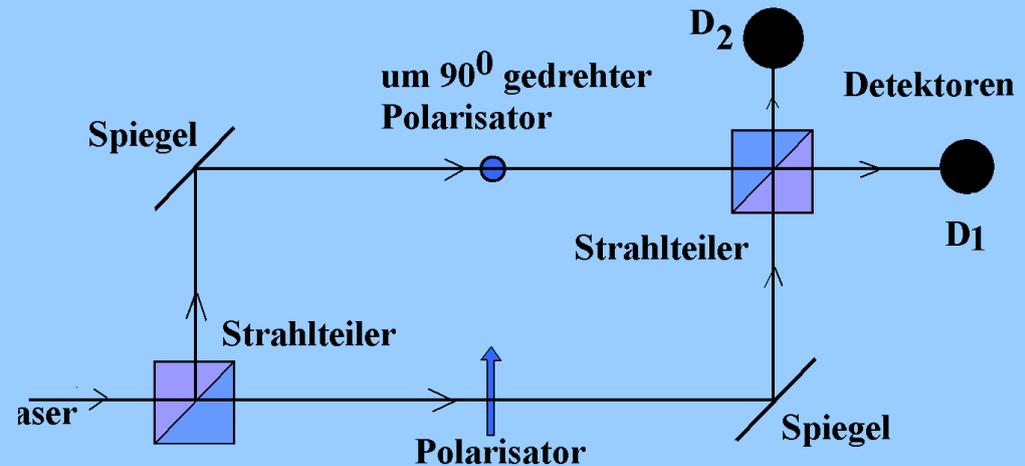
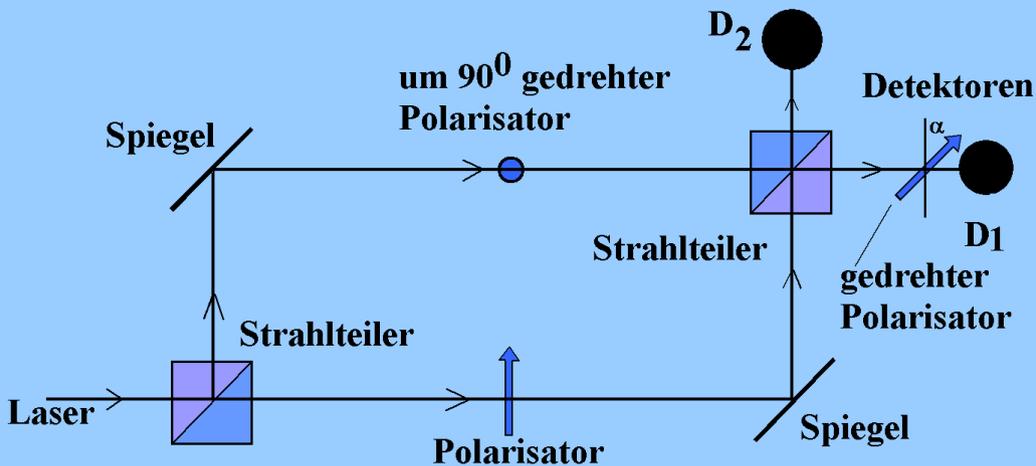
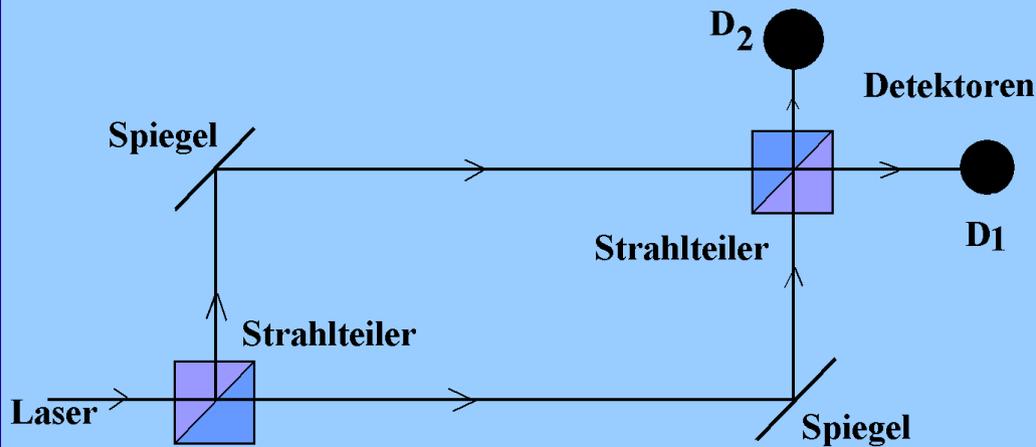


"Energieweg" zwischen beiden Ramsey-Zonen



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

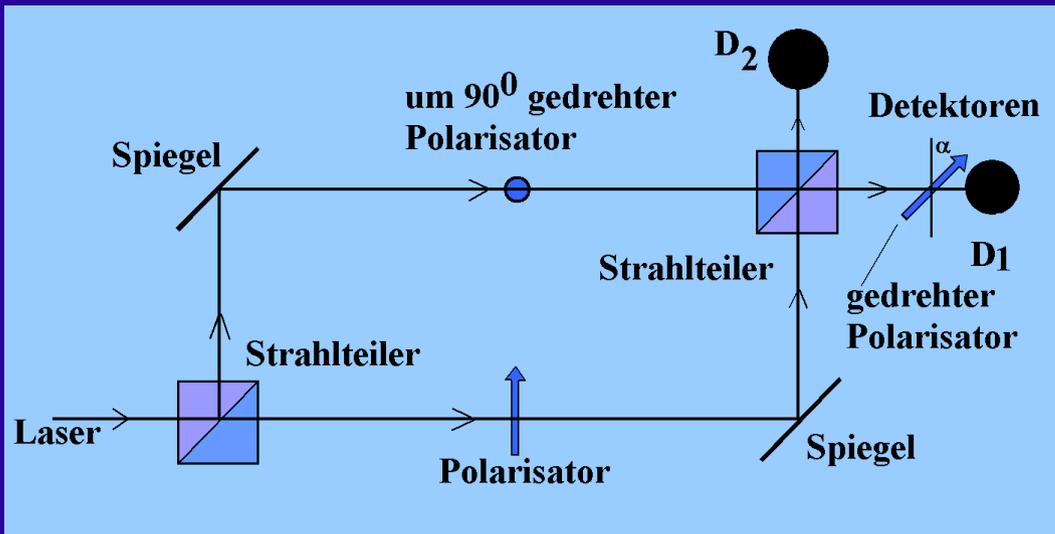
Quantenauslöcher



Vgl. Simulationsprogramm von Huber Interferometer

Horst Hübel 2007

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule



Quantenauslöcher

1. Welcher-Weg-Information zerstört Interferenz: beide sind komplementär zueinander.
2. Interferenz kann rückgewonnen werden, wenn Welcher-Weg-Information ausgelöscht wird.
3. kann nichts mit einem "Wellencharakter" oder "Teilchencharakter" zu tun haben / es gibt kein „Verhalten“ von Quantenteilchen



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was Sie erwartet:

- 1. Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- 2. Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- 3. Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- 4. Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- 5. Resümee



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

A objektive Un-be-stimmtheit: Eine Messgröße erhält erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.

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 komplementär

E HUR als Folge der Nicht-Gleichzeitigen-Messbarkeit



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Mögliche Erfolge:

- keine inneren Widersprüche (wie beim WTD),
- 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 Prinzipien und moderner Experimente

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der 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?



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der 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.



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule

<http://www.forphys.de>



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule

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

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://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/info/index1p01.html>



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule



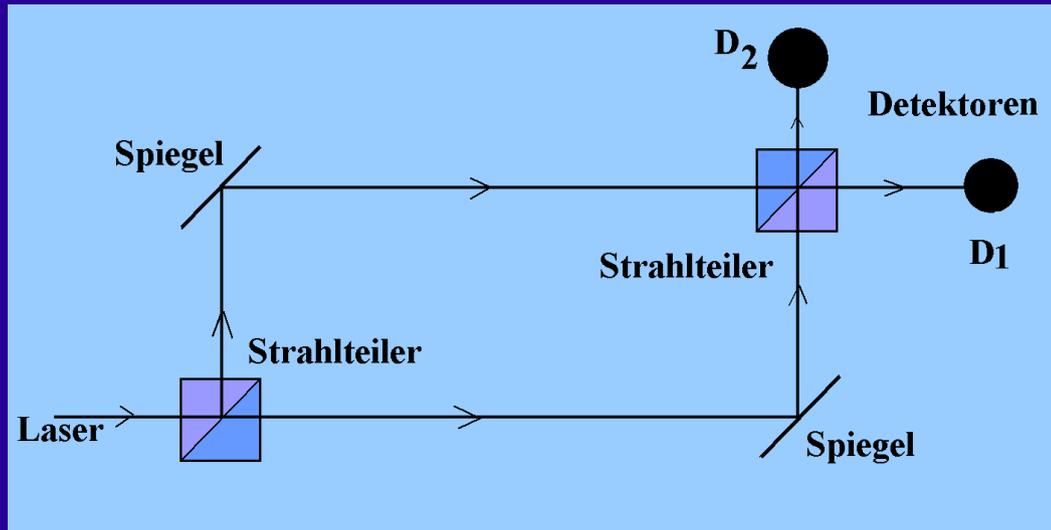
Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

Was Sie erwartet:

- 1. Sprachregelungen über Wellen und Teilchen in der Quantenphysik
- 2. Was meine ich mit heuristischen Methoden?
- 3. Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden
- 4. Anwendungen der heuristischen Methoden in der Schule
- 5. Resümee

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

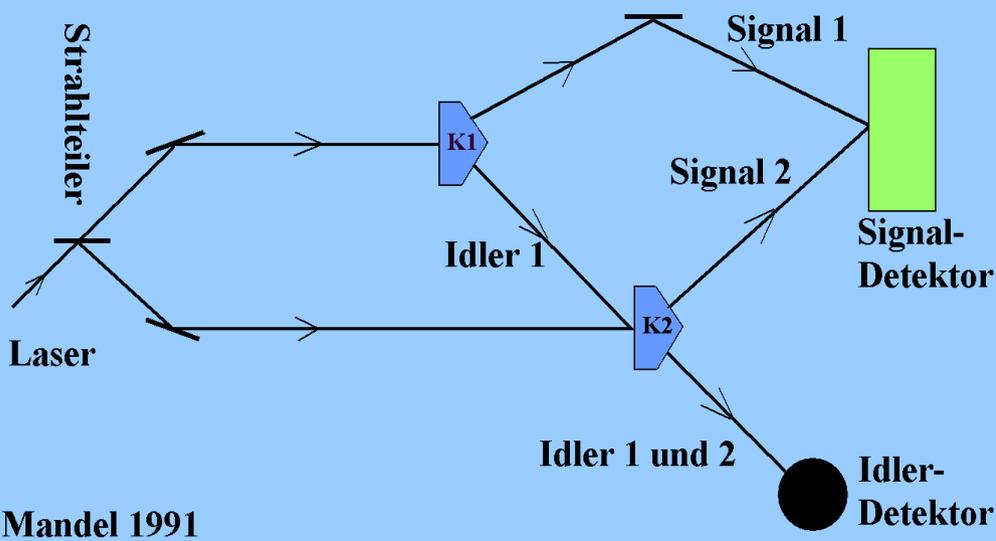
Mach-Zehnder-Interferometer



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

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden in der QP an der Schule

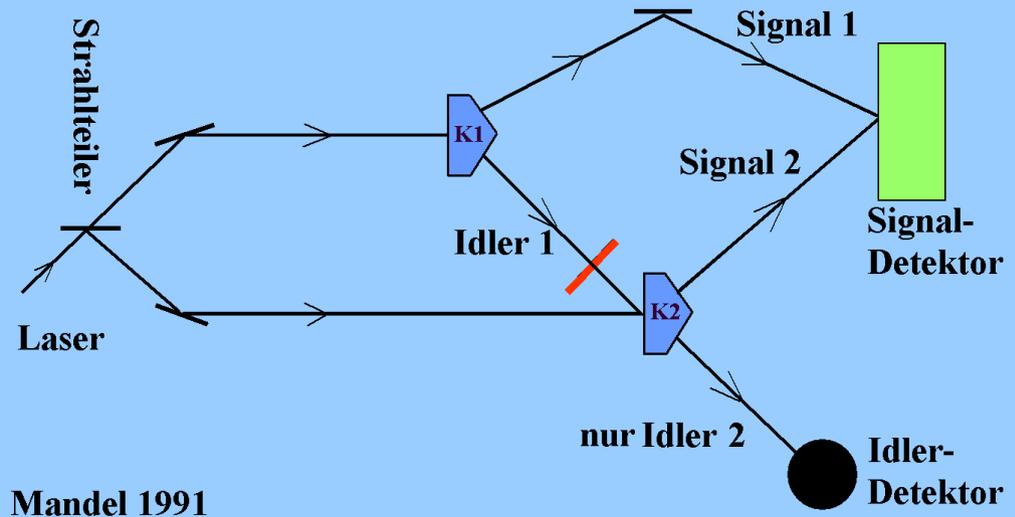
Das Mandel-Experiment 1991



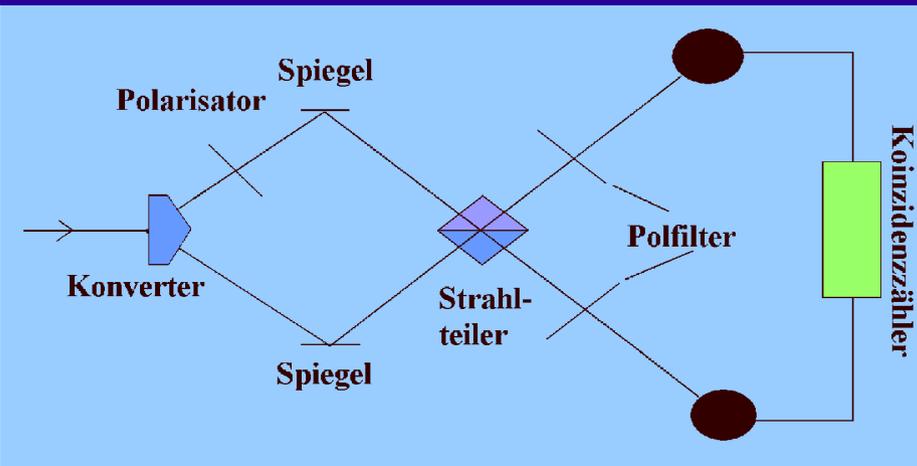
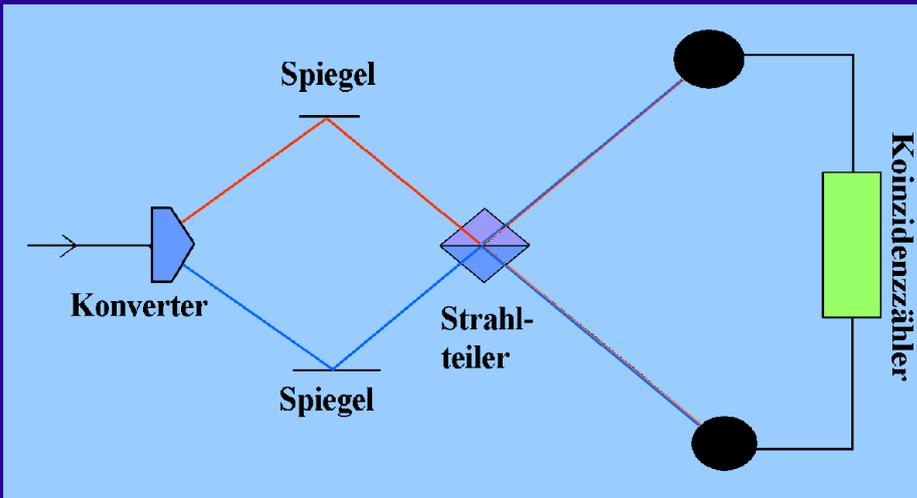
1. Interferenz, da keine WWI

2. WWI möglich => keine Interferenz

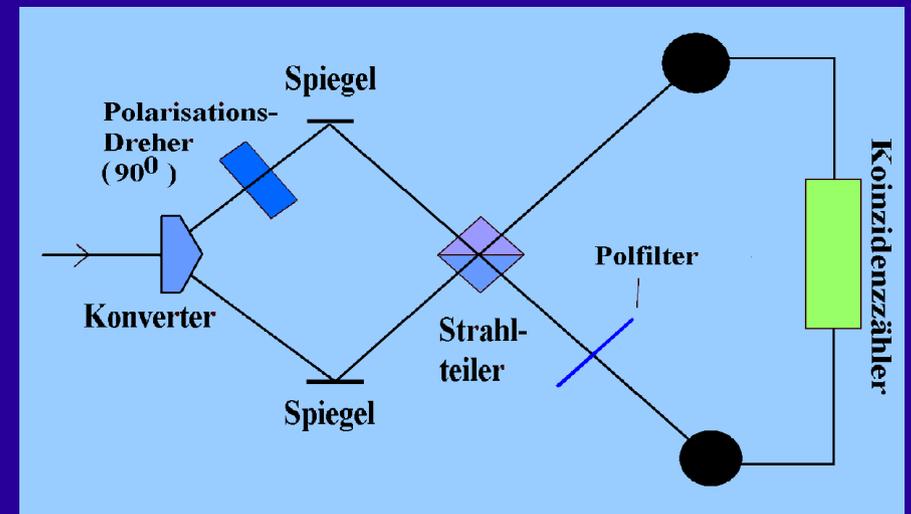
"Der Quantenzustand spiegelt nicht nur das wider, was wir von dem System wissen, sondern was im Prinzip erfahrbar ist."



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule



Der Berkeley-Quanten-Auslöser

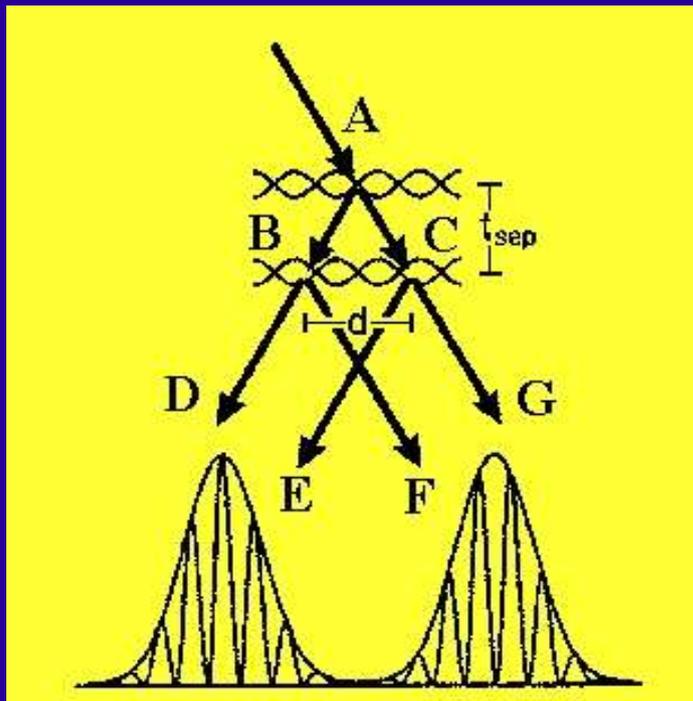


Kwiat, Steinberg, Chiao 1992

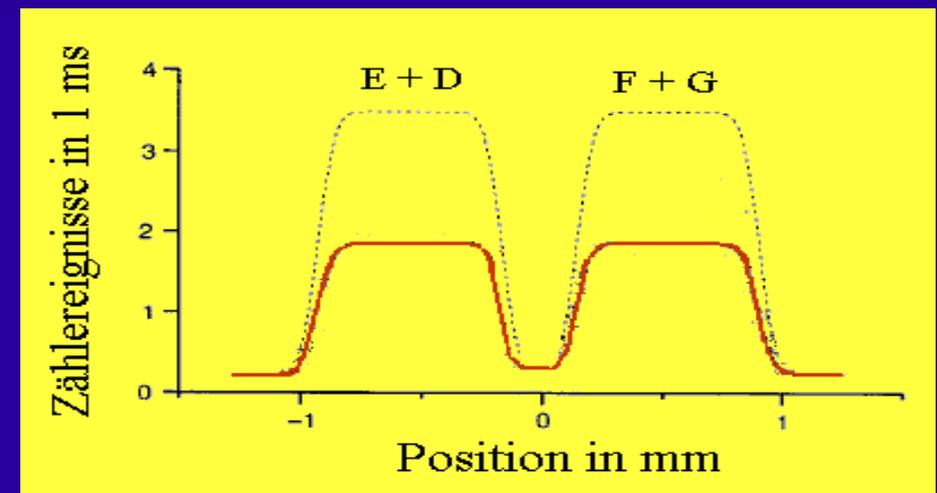
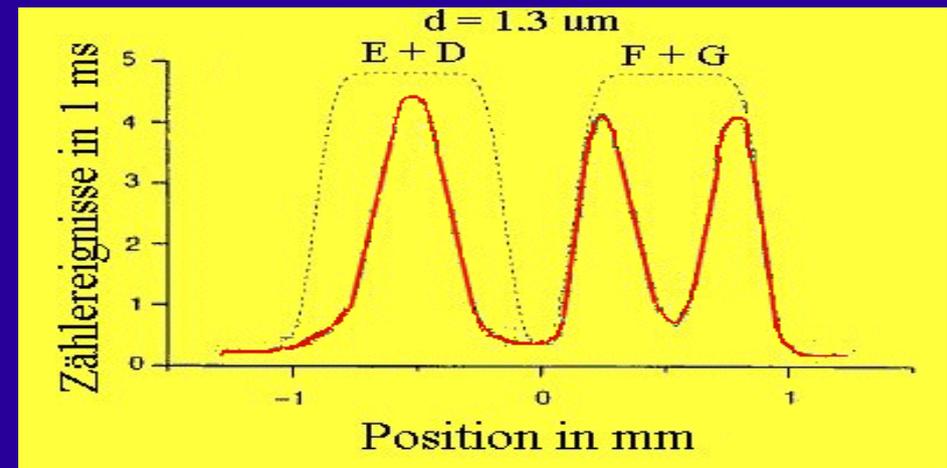
v15

Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule

Dürr, Nonn und Rempe 1998



zurück



Grundfakten der Quantenphysik und heuristische Methoden der QP in der Schule

#Seite 41

