

Die Wesenszüge der Quantenphysik unterrichten

Rainer Müller

TU Braunschweig

Osnabrück, 12. 9. 2007

1. Traditionelle Unterrichtsinhalte

Inhaltsübersicht
aus einem
LK-Schulbuch:

Schwerpunkt:
(Bohr-)Atomphysik

Deutungsfragen
kaum thematisiert

1. Photoeffekt, Lichtquantenhypothese, Compton-Effekt, h-Bestimmung mit Gegenfeldmethode	42 S.
2. Elektronenbeugung, de-Broglie-Wellenl.	11 S.
3. Doppelspaltversuch, Welle-Teilchen-Dualismus, Unbestimmtheitsrelation	18 S.
4. Klassische Atommodelle Linienspektren, Franck-Hertz-Versuch Bohrsches Atommodell Höhere Atome	63 S.
5. Potentialtopf, quantenmech. Atommodell	10 S.

2. Das „Bildende“ an der Quantenmechanik

Die Quantenmechanik hat unser **Bild vom Wesen der Natur verändert** wie keine andere Theorie seit Newton.

Wenn die Schule die Aufgabe hat, den Schülerinnen und Schülern die **Grundlagen eines physikalischen Weltbilds** zu vermitteln, muss sich das auch im Unterricht niederschlagen.

„Für junge Menschen, die keinen naturwissenschaftlichen Beruf wählen, ist der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht in der Schule praktisch die einzige Chance zur systematischen Begegnung mit einem zentralen Teil unserer Kultur“

(BLK-Gutachten 1997)

These:

Das traditionelle Quantenphysik-Curriculum umfasst gar nicht das „Neue“, das physikalisch weltbildprägend wirkt.

Das „Neue“, physikalisch „Spannende“ kann man qualitativ formulieren

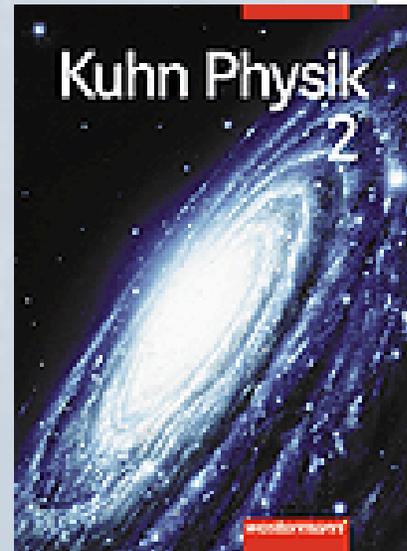
→ Wesenszüge der Quantenphysik

3. Wesenszüge der Quantenphysik

Küblbeck & Müller (Aulis, 2002)

„Wesenszüge der Quantenphysik“

Das (für uns) Weltbild-Bestimmende der Quantenphysik wird in vier einprägsamen „Merksätzen“ zusammengefasst.



Wesenszüge der Quantenphysik

Wesenszug 1: **Statistisches Verhalten**

Wesenszug 2: **Fähigkeit zur Interferenz**

Wesenszug 3: **Eindeutige Messergebnisse**

Wesenszug 4: **Komplementarität**

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Determinismus in der Mechanik

Elementare Erfahrung
beim Bogenschießen:

Zielen hilft!



Determinismus in der Mechanik

Physikalischer ausgedrückt:

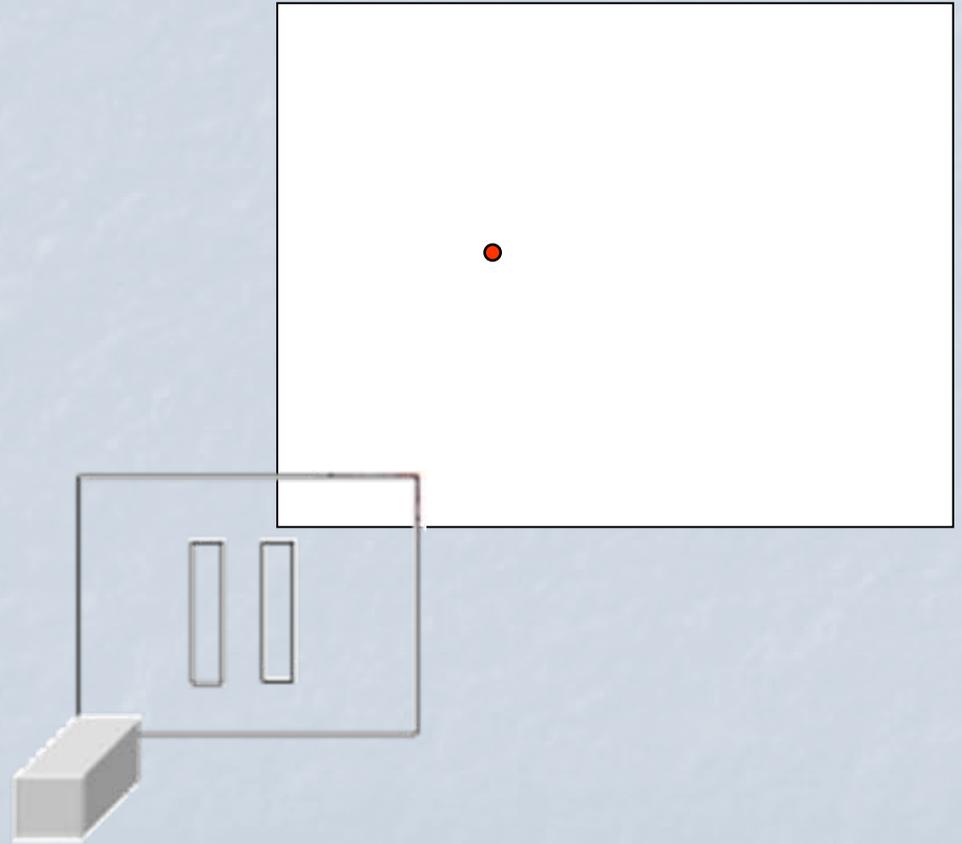
Wenn man den Pfeil mit der richtigen Geschwindigkeit und dem richtigen Winkel abschießt, kann man sicher sein, dass er ins Ziel trifft.

Zwei Pfeile mit **identischen Anfangsbedingungen** werden **identische Bahnen** durchlaufen.



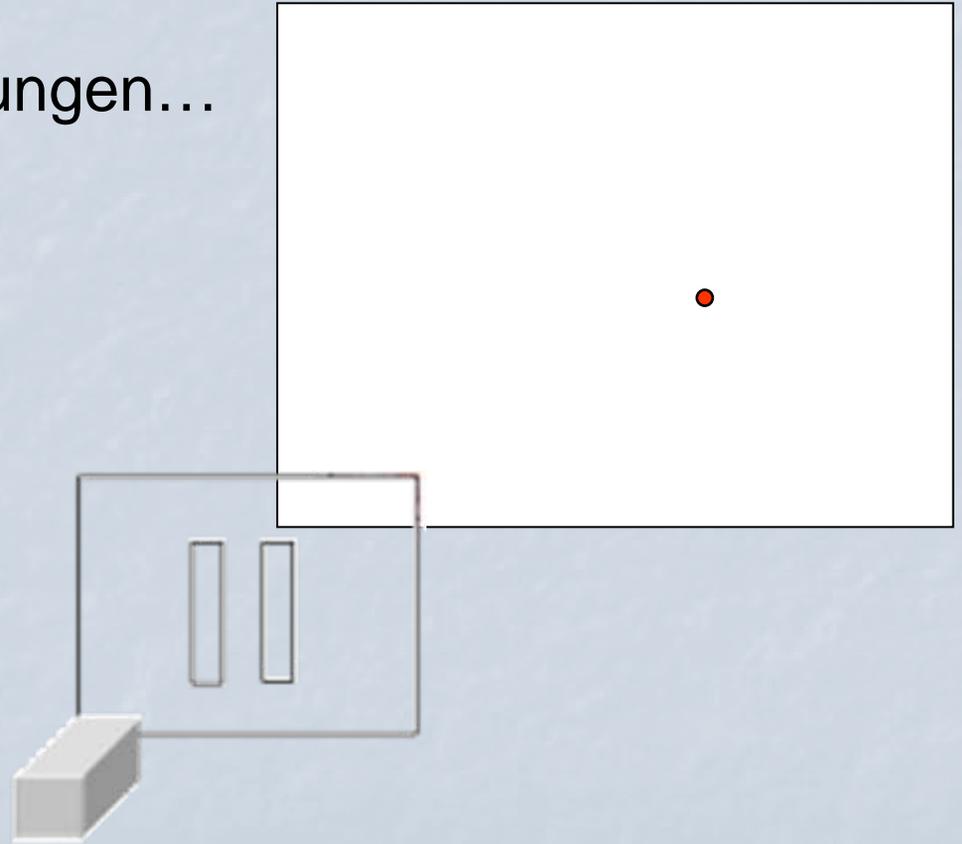
Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Illustriert am Beispiel des Doppelspaltexperiments



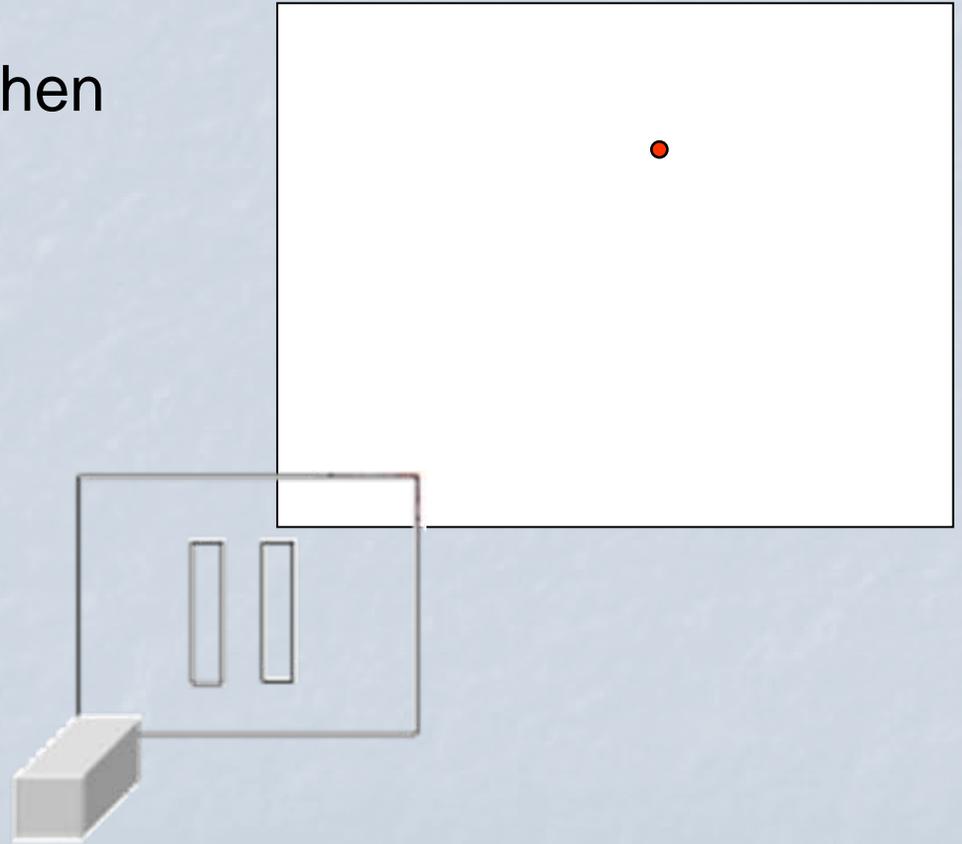
Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Identische Anfangsbedingungen...



Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

... führen zu unterschiedlichen
Messergebnissen



Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Den Nachweisort eines einzelnen Elektrons
können wir nicht vorhersagen.

Es handelt sich dabei nicht um eine unzureichende Kenntnis der Anfangsbedingungen, sondern um eine prinzipielle Grenze der Vorhersagbarkeit.

Zielen nützt nichts: Es ist nicht möglich, ein Elektron so zu präparieren, dass es an einer vorher bestimmten Stelle auf dem Schirm landet.

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Drängende Fragen:

Ist der Determinismus in der Physik damit zu Fall gebracht?

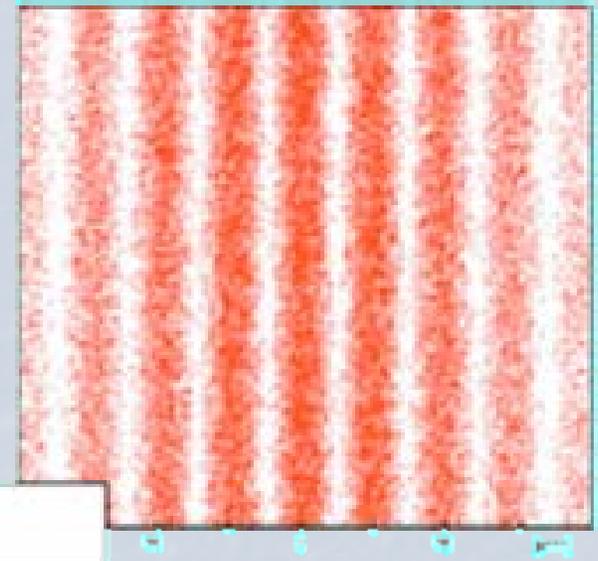
Herrscht in der Quantenphysik der pure Zufall?

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Nein!
Nein!

Die statistische Verteilung vieler
Einzelexperimente ist gesetz-
mäßig vorhersagbar.

Demonstration z. B. mit
Simulationsprogramm



Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Formulierung des Wesenszugs:

Wesenszug 1: „Statistisches Verhalten“:

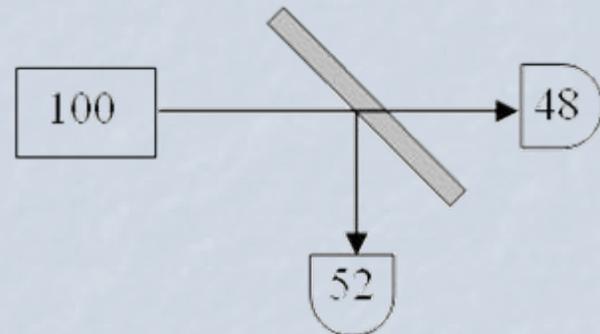
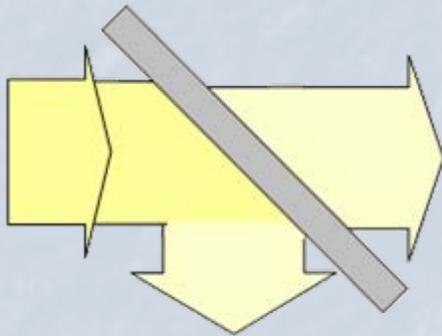
In der Quantenphysik können Einzelereignisse im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden.

Bei vielen Wiederholungen ergibt sich jedoch eine Verteilung, die – bis auf stochastische Schwankungen – reproduzierbar ist.

Beispiele für Wesenszug 1:

Einfachst denkbare Beispiel:

Einzelne Photonen an einem **Strahlteiler** (einer Glasscheibe)



Ob ein bestimmtes Photon durchgelassen oder reflektiert wird, lässt sich nicht vorhersagen.

Wohl aber lässt sich die relative Häufigkeit vieler durchgelassener Photonen vorhersagen.

Beispiele für Wesenszug 1:

Ein weiteres Beispiel: Kernzerfall

Ob ein einzelner radioaktiver Atomkern innerhalb der nächsten Stunde zerfällt, können wir nicht vorhersagen.

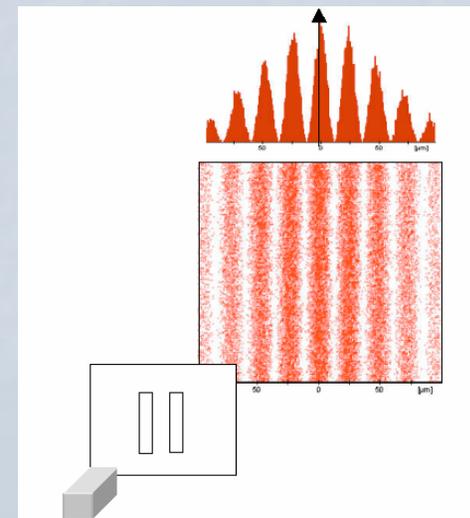
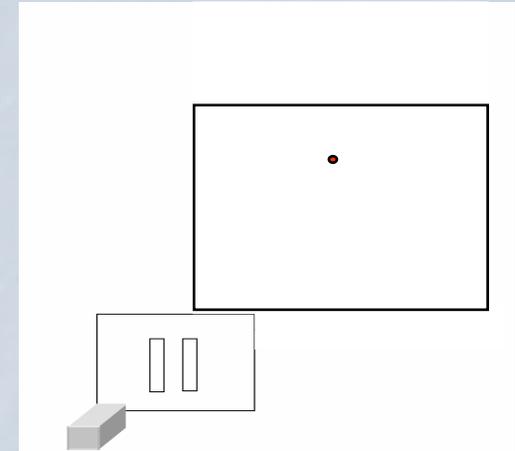
Wir können aber den Bruchteil sehr vieler Kerne vorhersagen, der innerhalb der nächsten Stunde zerfällt.

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Obwohl einzelne Quantenobjekte stets nur an einem Ort nachgewiesen werden,

bilden ihre Auftreffpunkte nach vielen Wiederholungen ein Interferenzmuster.



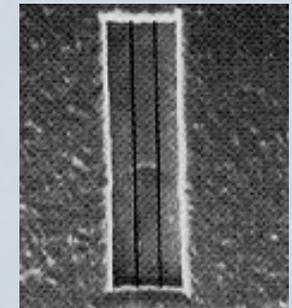
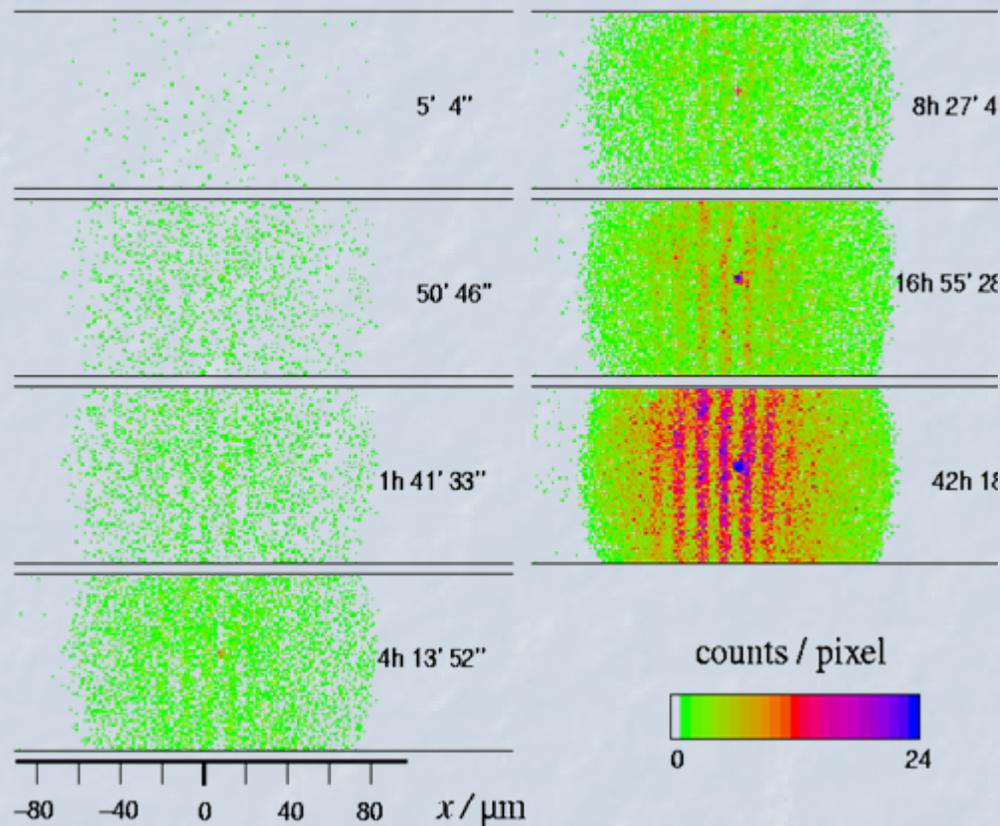
Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Warum ist das bemerkenswert?

Man kann Interferenzversuche durchführen, bei denen sich jeweils nur **ein einzelnes Quantenobjekt** in der Apparatur befindet.

Jedes einzelne Quantenobjekt wird am Schirm „fleckartig“ nachgewiesen. Aber aus vielen „Flecken“ baut sich das Interferenzmuster auf.

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz



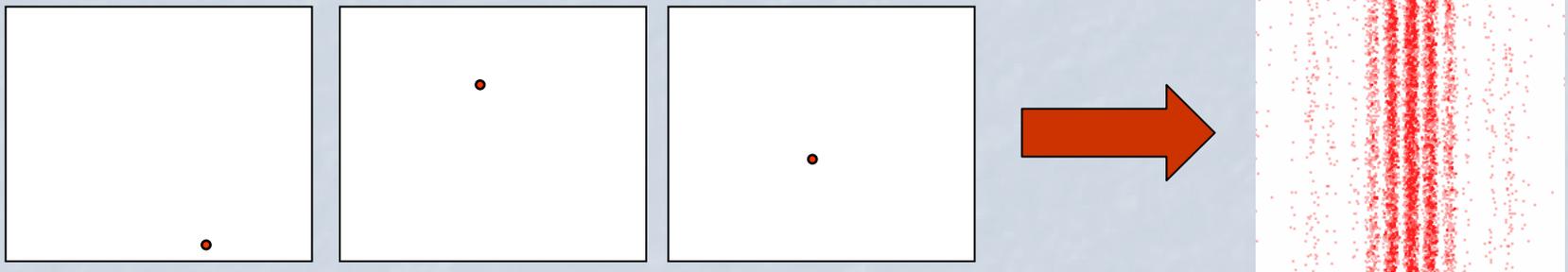
Verwendeter Doppelspalt

Experiment mit ganzen Helium-Atomen (Kurtsiefer u.a. 1998)
Messdauer: 42 Stunden

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Weitere gedankliche Verschärfung:

Viele Physiker führen zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Orten ein Experiment mit jeweils nur einem Elektron durch (mit identischen Apparaturen).



Beim Übereinanderlegen der Ergebnisse: Interferenzmuster

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Formulierung des Wesenszugs:

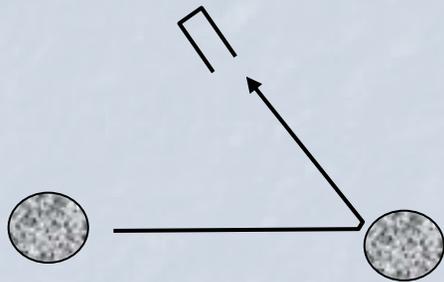
Wesenszug 2: „Fähigkeit zur Interferenz“:

Auch einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen. Voraussetzung ist, dass es für das Eintreten des gleichen Versuchsergebnisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.

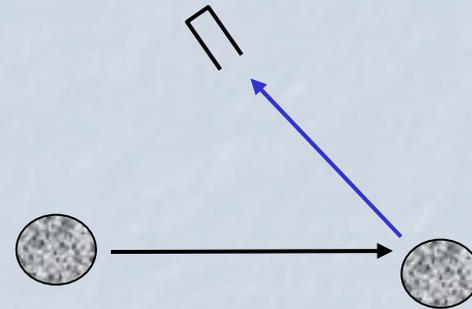
Klassisch denkbare Möglichkeiten?

Experiment zur Streuung von ^{12}C -Ionen an ^{12}C (Graphit)

Es gibt zwei klassisch denkbare Möglichkeiten, wie ein Ion am Detektor nachgewiesen werden kann:



1. Streuung



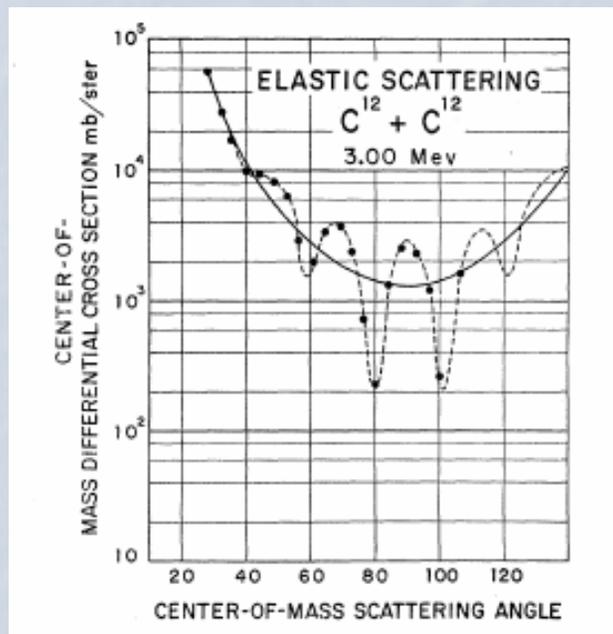
2. Herausschlagen eines Ions aus dem Graphit

Am Versuchsergebnis sind diese Möglichkeiten nicht unterscheidbar → Interferenz?

Klassisch denkbare Möglichkeiten?

Experimentelles Ergebnis

(Bromley u. a. Phys. Rev. **123**, 878, 1961)

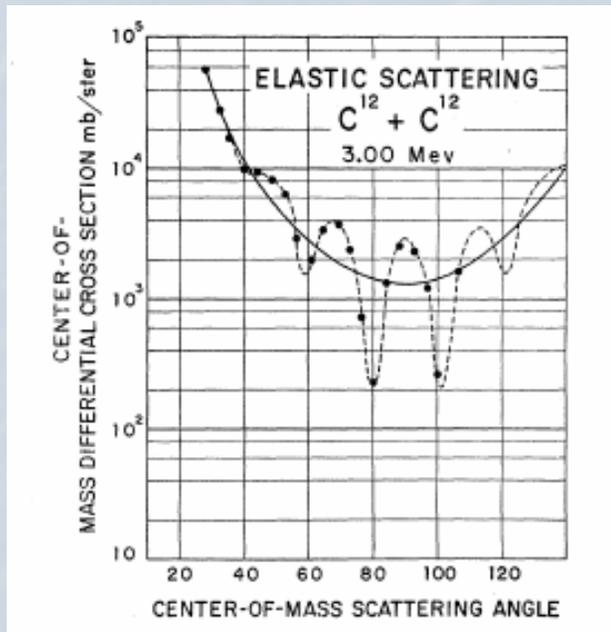


ununterscheidbare
Alternativen (C → C)

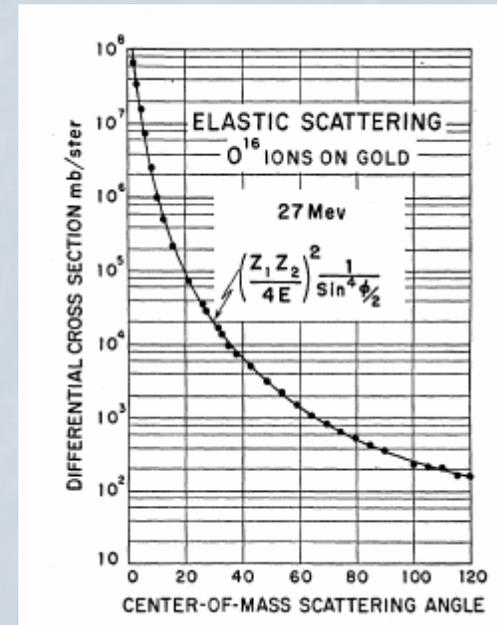
Klassisch denkbare Möglichkeiten?

Experimentelles Ergebnis

(Bromley u. a. Phys. Rev. **123**, 878, 1961)



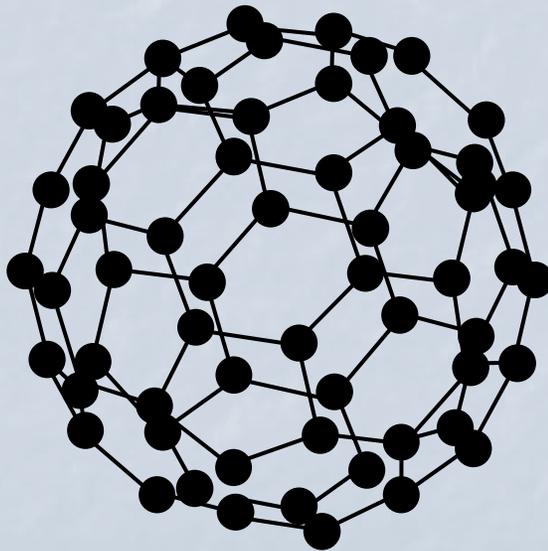
ununterscheidbare
Alternativen ($C \rightarrow C$)



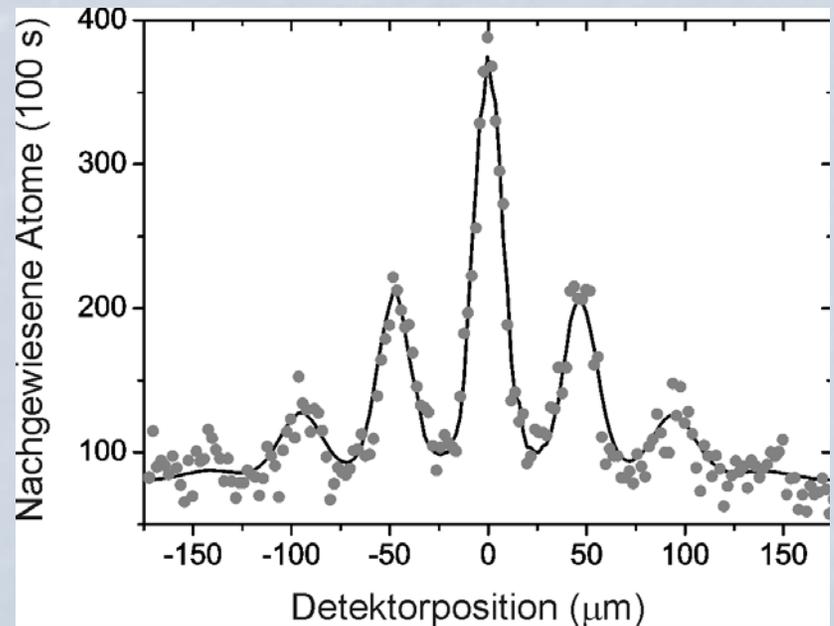
unterscheidbare
Alternativen ($O \rightarrow Au$)

Interferenz „großer“ Objekte

Arndt u. a. (1999):
Interferenz von C_{60} -Molekülen

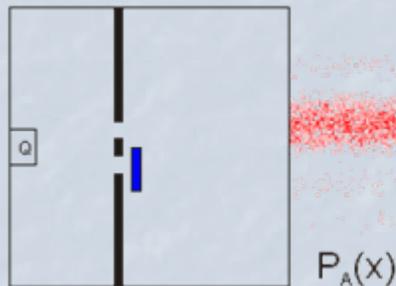


C_{60} -Molekül

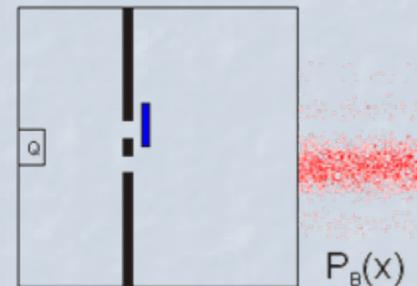


Elektronen ohne Ortseigenschaft

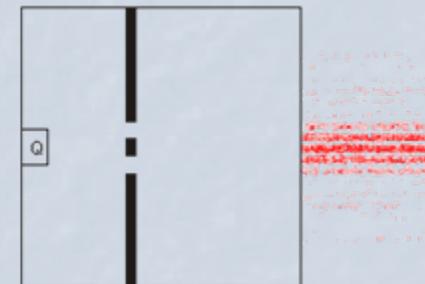
(a) Spalt A geöffnet



(b) Spalt B geöffnet



(c) beide Spalte geöffnet



Summe der
beiden Ver-
teilungen aus
(a) und (b)



$$P(x) = P_A(x) + P_B(x)$$

Man kann die Elektronen nicht in solche sortieren, die durch Spalt A und solche, die durch Spalt B gegangen sind.

Elektronen ohne Ortseigenschaft

In der klassischen Physik kann man Gegenständen jederzeit einen wohldefinierten Ort zuordnen.

In der Quantenphysik darf man sich ein Elektron nicht mehr unbedingt als lokalisiertes Objekt vorstellen
(weder Spalt A noch Spalt B).

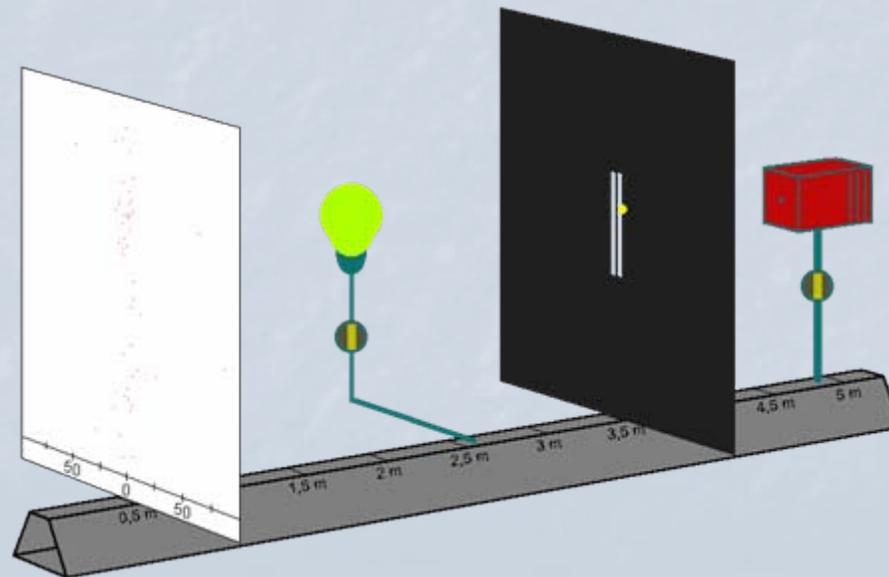
→ weitreichende Konsequenzen für die Vorstellung von Elektronen in Atomen („Orbitale“).

Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse

Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse

Naheliegende Frage:

Wenn wir uns ein Elektron nicht mehr lokalisiert vorstellen dürfen, was geschieht dann bei einer **Ortsmessung**?



Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse

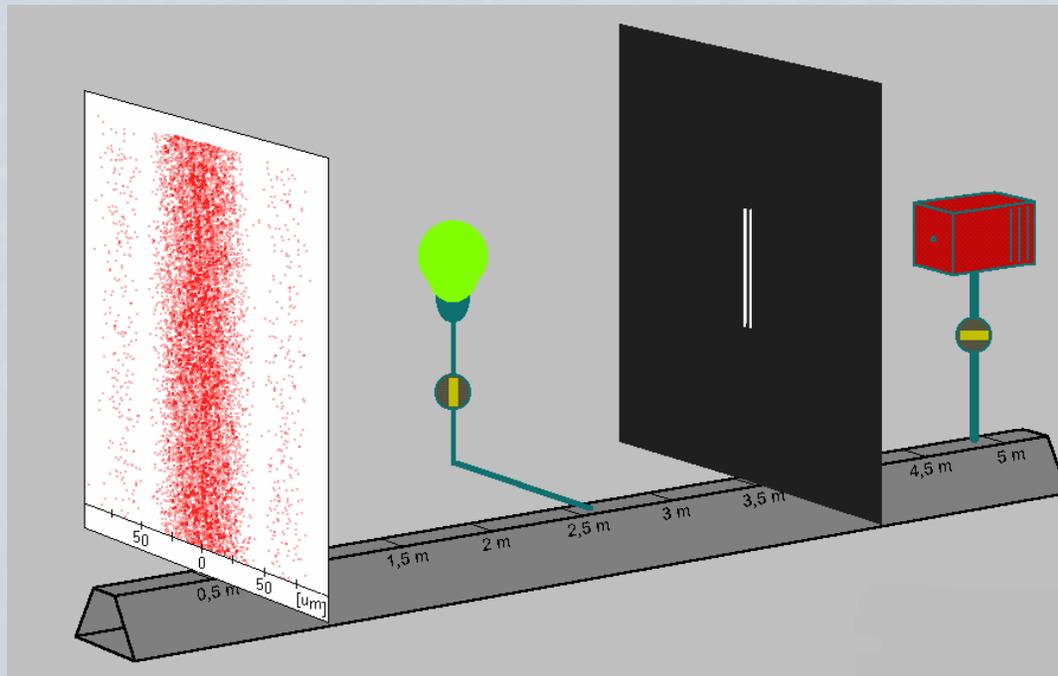
Formulierung des Wesenszugs:

Wesenszug 3: „Eindeutige Messergebnisse“:

Messergebnisse sind stets eindeutig, auch wenn sich das Quantenobjekt in einem Zustand befindet, der unbestimmt bezüglich der gemessenen Größe ist.

Wesenszug 4: Komplementarität

Kein (Doppelspalt-)Interferenzmuster bei eingeschalteter Lampe



Wesenszug 4: Komplementarität

Formulierung des Wesenszugs:

Wesenszug 4: Komplementarität

Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der klassisch denkbaren Möglichkeiten schließen sich gegenseitig aus.

Nachwirkungen der „Wesenszüge“

z. B in den

EPA (Einheitliche Prüfungsanforderungen für die Abiturprüfung Physik),

(von der KMK 2004 beschlossen und für alle Bundesländer verbindlich).

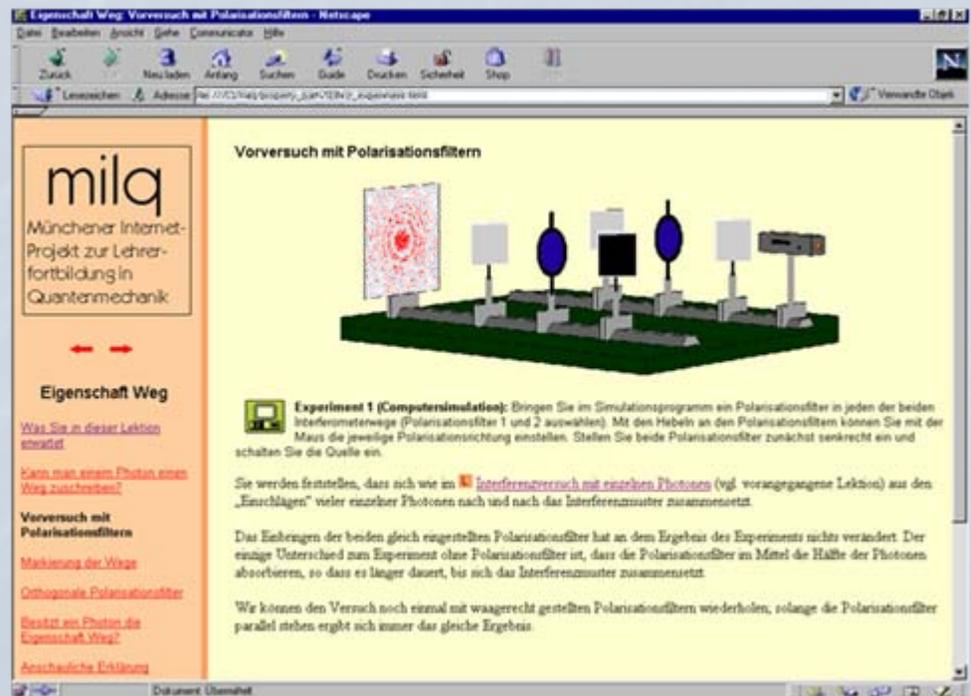
*Grundlegende fachliche Inhalte aus den Sachgebieten **Felder, Wellen, Quanten und Materie:***

- Grundlegende Merkmale von **Quantenobjekten** unter Einbezug erkenntnistheoretischer Aspekte
Wellenmerkmal, Quantenmerkmal, stochastisches Verhalten, Komplementarität, Nichtlokalität, Verhalten beim Messprozess
- Grundlegende Merkmale der Struktur der **Materie** und beispielhafte Untersuchungsmethoden

4. Weitere Lektüre

Online-Lehrerfortbildung milq

<http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/>

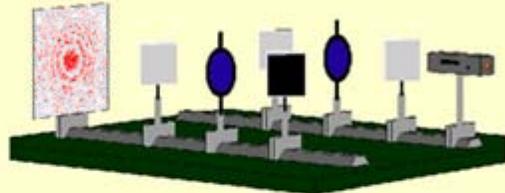


milq
Münchener Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik

Eigenschaft Weg
[Was Sie in dieser Lektion erwartet](#)
[Kann man einem Photon einen Weg zuschreiben?](#)

Vorversuch mit Polarisationsfiltern
[Markierung der Wege](#)
[Orthogonale Polarisationsfilter](#)
[Bleibt ein Photon die Eigenschaft Weg?](#)
[Anschauliche Erklärung](#)

Vorversuch mit Polarisationsfiltern



Experiment 1 (Computersimulation): Bringen Sie im Simulationsprogramm ein Polarisationsfilter in jeden der beiden Interferometerwege (Polarisationsfilter 1 und 2 auswählen). Mit den Hebeln an den Polarisationsfiltern können Sie mit der Maus die jeweilige Polarisationsrichtung einstellen. Stellen Sie beide Polarisationsfilter zunächst senkrecht ein und schalten Sie die Quelle ein.

Sie werden feststellen, dass sich wie im [Interferenzversuch mit einzelnen Photonen](#) (vgl. vorangegangene Lektion) aus den „Einschlägen“ vieler einzelner Photonen nach und nach das Interferenzmuster zusammensetzt.

Das Einbringen der beiden gleich eingestellten Polarisationsfilter hat an dem Ergebnis des Experiments nichts verändert. Der einzige Unterschied zum Experiment ohne Polarisationsfilter ist, dass die Polarisationsfilter an Mädel die Hälfte der Photonen absorbieren, so dass es länger dauert, bis sich das Interferenzmuster zusammensetzt.

Wir können den Versuch noch einmal mit waagrecht gestellten Polarisationsfiltern wiederholen, solange die Polarisationsfilter parallel stehen ergibt sich immer das gleiche Ergebnis.