

Script

Eigenschaften von Quantenobjekten

Inhalt

- 1. Der Äußere Lichtelektrische Effekt**
 - Licht als Welle, Interferenzen
 - Photoeffekt, Erklärung mit dem Wellenmodell
 - Bestimmung der kin. Energie der Photoelektronen (Gegenfeldmethode)
 - Widersprüche zum Wellenmodell
- 2. Das Photonenmodell des Lichts**
 - Formulierung der Photonenhypothese
 - Einsteinsche Gleichung, Einsteinsche Gerade
 - Interpretation der Einsteinschen Gleichung
 - Masse und Impuls von Photonen
- 3. Welleneigenschaften von Teilchen**
 - Elektronenbeugung nach DeBroglie
 - DeBroglie Hypothese
- 4. Wesenszüge der Quantenphysik**
 - 4.1 Quantenobjekte
 - Diracscher Spiegelversuch, Versuch von Taylor
 - Begriff Quantenobjekt
 - 4.2 Eigenschaften von Quantenobjekten
 - Heisenbergsche Unschärferelation
 - Mach-Zehnder-Interferometer
 - 4.3 Zeigerformalismus von Feynman
 - Geradlinige Lichtausbreitung
 - Intensitätsverlauf am Doppelspalt
 - 4.4 Formulierung der Wesenszüge
 - Überlagerungszustände von Quantenobjekten
 - Arbeitsblatt: 5 Wesenszüge mit Beispielen
 - EPR-Paradoxon

1. Der Äußere Lichtelektrische Effekt

Grundfakten:

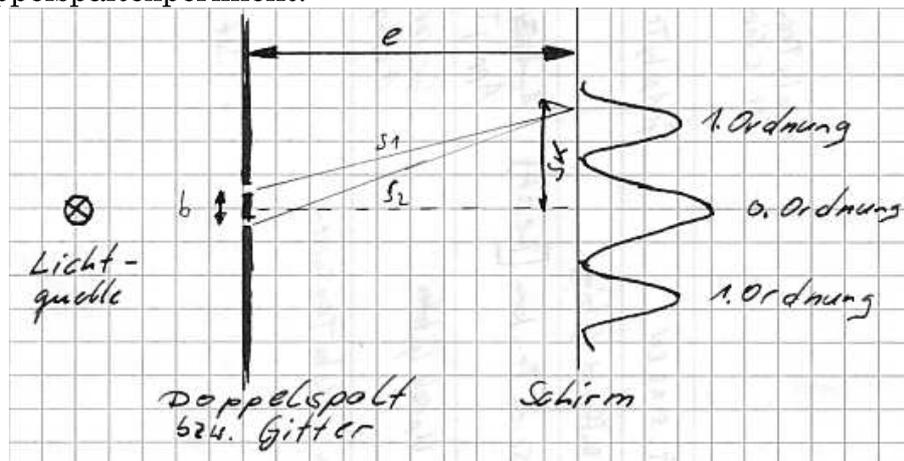
Ein Elektronenvolt (1eV) ist die Energie, die ein elektrisch einfach geladenes Teilchen erhält, wenn es eine Spannungsdifferenz von 1 V durchlaufen hat.

Einfach geladen = Eine Elementarladung
 Beschleunigungsarbeit im elektrischen Feld: $W = E_{\text{kin}} = U \cdot e$
 $1\text{eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Was ist Licht?

historisch: Streit: Licht = Welle oder Teilchen?
 Eigenschaften von Licht : Brechung, Beugung, Interferenz

Doppelspaltexperiment:



Gangunterschied: $\Delta s = s_2 - s_1$
 $\Delta s = k \cdot \lambda$ Verstärkung
 $\Delta s = (2k + 1) \cdot \lambda / 2$ Auslöschung

Am Doppelspalt / Gitter gilt: $\frac{s_k}{e} = \frac{k \cdot \lambda}{b}$ Verstärkung

$\frac{s_k}{e} = \frac{(2k+1) \cdot \lambda / 2}{b}$ Auslöschung

Vorläufige Entscheidung: **Nur Wellen können Interferieren**
Licht ist eine elektromagnetische Welle!

λ -Bereich des Lichts: 400 nm (blau) - 800 nm (rot)

Experiment (Hallwachseffekt):

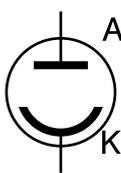
Bestrahlt man eine negativ geladene Metallplatte mit UV-Licht so entlädt sie sich. Eine positiv geladene Platte entlädt sich nicht.

Name heute: Lichtelektrischer Effekt, Fotoeffekt

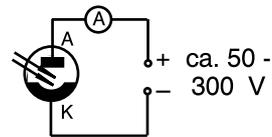
Das Herauslösen von Elektronen aus Metalloberflächen unter dem Einfluss von Licht bezeichnet man als Äußeren Lichtelektrischen Effekt.

Nachweis des Photoeffekts

Fotozelle:



K: Kathode, Alkali-Metall (Na, Cs)
"Fotokathode"
A: Anode (Metallring)
Elektronen werden emittiert, Stromfluss



Hypothesen zur Erklärung mit dem Wellenmodell
(Nachvollziehen, kein Lernstoff)

- Einfluss der Lichtintensität: (= E-Feldstärke)
 - hohe Intensität: \Rightarrow Elektronen haben hohe Geschwindigkeit, wegen Beschleunigung im E-Feld: $E_{\text{KIN}} \sim I$ evtl. viele Elektronen, Stromstärke steigt
- Einfluss der Wellenlänge (Frequenz, Farbe)
 - kleine Frequenz (großes λ , großes T)
 - \Rightarrow Viel Zeit für Beschleunigung
 - \Rightarrow Große Geschwindigkeit, $E_{\text{KIN}} \sim 1/f$
 - bei genügend hoher Intensität: Alle λ verwendbar
 - rotes Licht müsste besser funktionieren als blaues

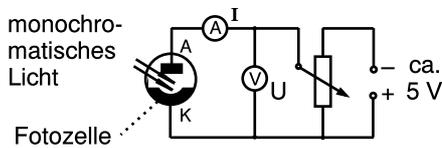
Experimentelle Ergebnisse:

- Weißes Licht: • Intensitätsabhängigkeit ist OK
- Farbiges Licht (rt, gn, bl)
- Intensitätsabhängigkeit ist OK
 - Wellenlängenabhängigkeit (rot geht nicht, blau geht gut) ist im Widerspruch zur Hypothese

Problem: Hypothesen liefern mehr Aussagen über E_{KIN} müssen E_{KIN} messen!

Bestimmung der kinetischen Energie der Fotoelektronen

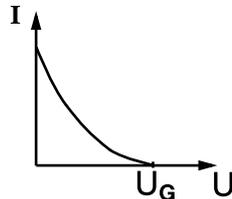
Experiment **Gegenfeldmethode** (komplett Lernstoff!)



- Empfindliches Amperemeter (nA)
- Lage des Voltmeters beachten
- Polung der Spannungsquelle beachten: **Gegenspannung**
- monochromatisches Licht nötig

Durchführung

- Ohne Gegenspannung rufen die Fotoelektronen einen Stromfluss durch das Amperemeter hervor.
- Die Gegenspannung erzeugt ein elektrisches Feld, dass die Fotoelektronen bremst. Langsame Elektronen erreichen die Anode nicht mehr und die Stromstärke sinkt ab.

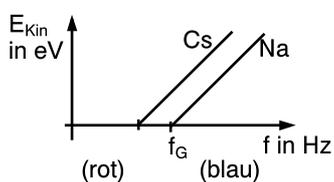


- Die Gegenspannung wird so lange erhöht, bis gerade kein Strom mehr fließt. Dann erreichen auch die schnellsten Fotoelektronen die Anode A gerade nicht mehr.
- Nun ist die Beschleunigungsarbeit des elektrischen Feldes genau so groß, wie die kinetische Energie der Fotoelektronen. Es gilt:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = U_G \cdot e$$

Experimentelle Ergebnisse:

1. Intensitätsabhängigkeit genauer: $v \neq f(I)$!
2. Wellenlängenabhängigkeit:



- Der Graph ist eine Gerade
- Anstieg ist für alle Metalle gleich
- Es gibt eine Grenze: Licht mit einer zu kleinen Frequenz (oder einer zu großen Wellenlänge) liefert keinen Fotoeffekt
- Die Grenze ist materialabhängig.

Was nun?

Der Äußere Lichtelektrische Effekt lässt sich nicht mit dem Wellenmodell des Lichtes erklären.

Welche Widersprüche treten konkret auf? (Lernstoff!)

1. Die kinetische Energie der Fotoelektronen ist nicht von der Intensität des Lichtes abhängig.
2. Es existiert eine vom Material abhängigen Grenzfrequenz f_G .
3. Nur Licht oberhalb dieser Grenzfrequenz kann Elektronen aus einem Metall herauslösen. Auch eine Erhöhung der Intensität führt bei Licht niedrigerer Frequenz nicht zum Herauslösen von Elektronen.
4. Mit steigender Lichtfrequenz wird die kinetische Energie der Fotoelektronen größer.

Zu klärende Probleme: Was ist Licht?
Wo kommt die Grenzfrequenz her?

2. Das Photonenmodell des Lichtes

Lösung: Einstein, 1905

Photonenhypothese

Licht besteht aus einzelnen Energieportionen, den Lichtquanten oder Photonen. Jedes Photon besitzt eine Energie E_{Ph} , die der Lichtfrequenz f proportional ist: $E_{\text{Ph}} = h \cdot f$. Die Intensität des Lichtes ist der Anzahl der Photonen proportional.

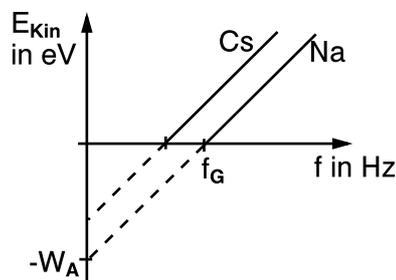
$$E_{\text{Ph}} = h \cdot f$$

f : Lichtfrequenz

h : Plancksches Wirkungsquantum

$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Energiebilanz des Photoeffekts



Einsteinsche Gleichung:

$$h \cdot f = E_{\text{Kin}} + W_A$$

W_A : Austrittsarbeit

f_G : Grenzfrequenz

E_{Kin} : kinetische Energie der
Fotoelektronen

Interpretation der Einsteinschen Gleichung:

- Jedes Photon wechselwirkt mit genau einem Elektron.
- Das Photon gibt seine gesamte Energie an das Elektron ab. Damit hört es auf zu existieren.
- Ein Teil der Energie wird als Austrittsarbeit benötigt.
- Den Rest besitzt das Fotoelektron als kinetische Energie.

Folgende drei Fälle sind möglich:

1. $E_{\text{Ph}} < W_A$: Es werden keine Elektronen herausgelöst.
2. $E_{\text{Ph}} = W_A$: Elektronen werden herausgelöst, aber sie besitzen keine kinetische Energie.
3. $E_{\text{Ph}} > W_A$: Elektronen werden herausgelöst. Sie besitzen eine kinetische Energie $E_{\text{Kin}} > 0$.

Sonderfall: Für Grenzfrequenz gilt:

$$h \cdot f_G = W_A, E_{\text{Kin}} = 0$$

Masse und Impuls eines Photons

Photon ist ein Teilchen. Bekannte Beziehungen:

$$E_{\text{ph}} = h \cdot f$$

$$p = m \cdot c$$

$$E_{\text{ph}} = m \cdot c^2$$

Photonenimpuls ist exp. gesichert
Masse-Energie-Äquivalenz

Licht muss auch Welleneigenschaften haben, wegen Interferenz.
Licht wird weiterhin über die Wellenlänge charakterisiert.

$$c = \lambda \cdot f$$

Daraus folgt:

$$m = \frac{h}{\lambda \cdot c}$$

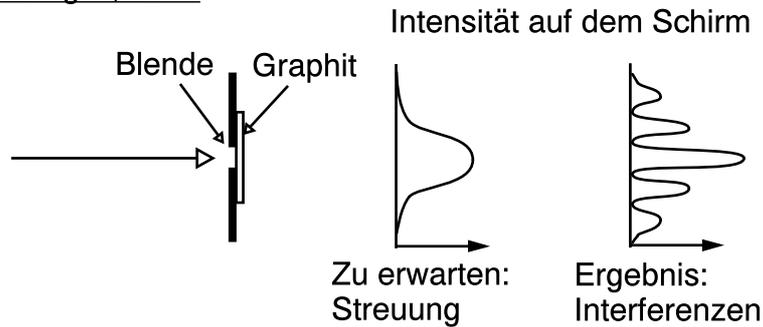
Masse eines Photons

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Impuls eines Photons

3. Welleneigenschaften von Teilchen

DeBroglie, 1923



Bezeichnungen:

- DeBroglie-Wellen
- Materiewellen

DeBroglie-Hypothese

Zu jedem bewegten Teilchen gehört eine Welle, deren Wellenlänge gegeben ist durch:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{DeBroglie-Wellenlänge}$$

mit $p = m \cdot v$, Impuls des Teilchens

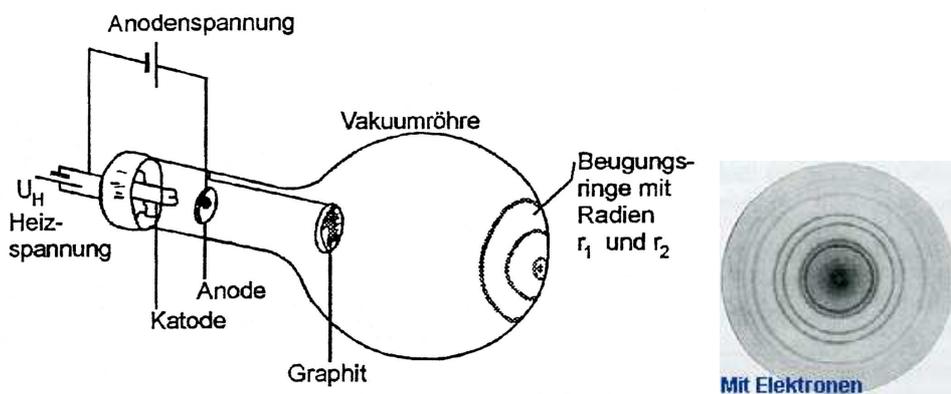
Hinweise: Analogie zum Photonenimpuls beachten

Im relativistischen Fall relativistische Masse einsetzen.

Für makroskopische Objekte werden die Wellenlängen so klein, dass sie keine Relevanz mehr haben.

Anmerkung: $E = h \cdot f$ wurde von DeBroglie ebenfalls postuliert, funktioniert aber nicht.

Prinzipieller Versuchsaufbau ([1], [2]):

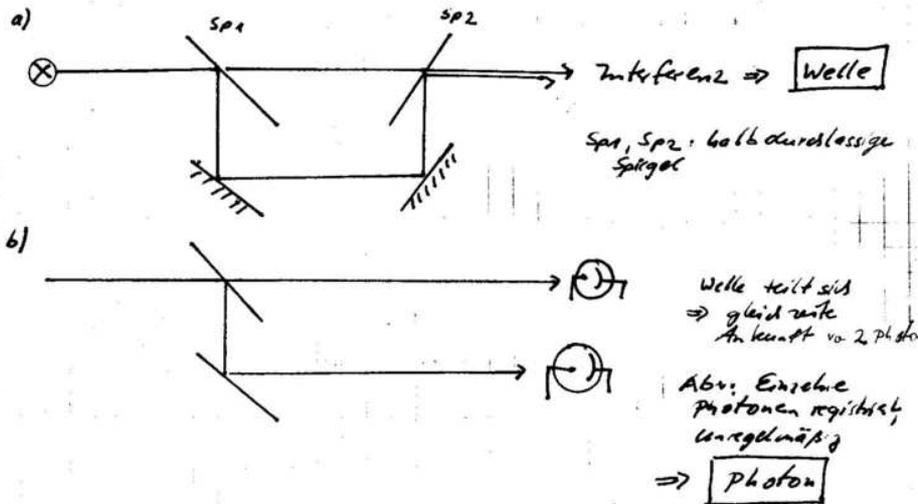


4. Wesenszüge der Quantenphysik

4.1 Quantenobjekte

Offensichtlich: Licht hat Welleneigenschaften (Interferenz)
 Licht hat Teilcheneigenschaften (Photonen)

Entscheidungsversuch: **Dirac'scher** **Spiegelversuch**
 (Einzelphotonen!)

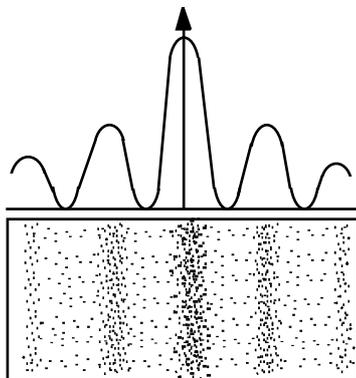


"Entscheidung" wird am Spiegel 1 getroffen.
 Ergebnis hängt trotzdem von Auswertemethode ab.
 Licht will sich nicht entscheiden!

Licht ist offensichtlich weder klassische Welle noch klassisches Teilchen. Licht ist etwas anderes.

Weiteres Experiment Interferenzexperiment nach **Taylor**

Beugung am Doppelspalt mit sehr geringer Lichtintensität
 (einzelne Photonen)
 Auffangschirm: Fotografischer Film



Schwärzung entspricht Intensität
 Ergebnis: **Interferenzen**

Aber: Einzelne Photonen können doch nicht "mit sich selbst interferieren"?

Unter dem Mikroskop: einzelne schwarze Punkte. Jeder Punkt stellt einen Auftreffort eines Photons dar.

Folgerung:

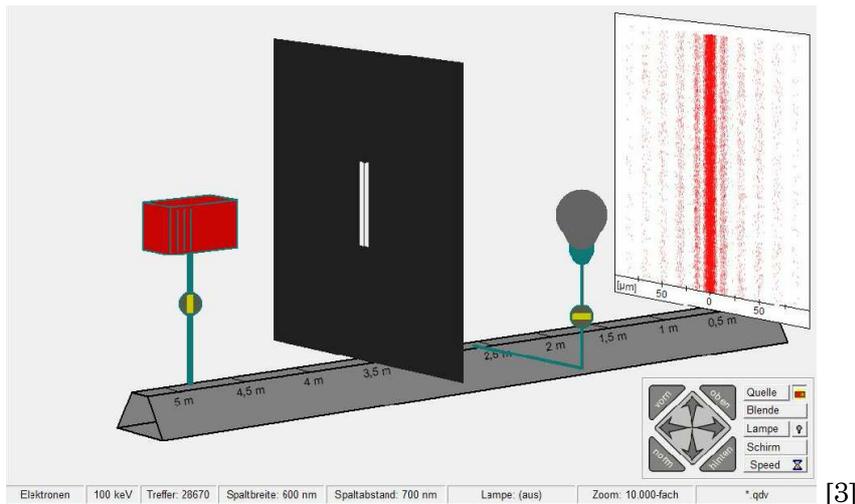
Der Intensitätsverlauf gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass an einem bestimmten Ort Photonen auftreffen.

Licht ist weder eine klassische Welle noch ein klassisches Teilchen. Je nach der physikalischen Situation verhält es sich wie eine Welle oder wie ein Teilchen.

Resultat: Licht ist etwas ganz eigenes, ein **Quantenobjekt**

⇒ Was ist mit Elektronen (DeBroglie, Jöhnson) ?

Experimente mit einzelnen Elektronen



⇒ Offensichtlich trifft das auch auf Elektronen zu

Licht und andere Mikroobjekte sind weder Welle noch Teilchen, sondern etwas eigenes. Wir bezeichnen sie als **Quantenobjekte**. Je nach physikalischer Situation verhalten sie sich wie eine Welle oder wie ein Teilchen.

Konsequenz:

Sie haben Eigenschaften, die klassische Wellen / Teilchen nicht haben.

Frage:

Welche Eigenschaften von Wellen / Teilchen haben sie und **welche nicht?**

Masse ja
Impuls ja
Energie ja
Ort (Bahn) Durchfliegt ein Photon beide Spalte gleichzeitig?
?? zu klären

4.2 Eigenschaften von Quantenobjekten

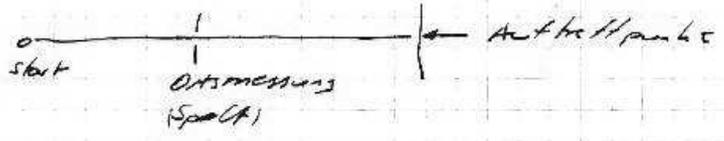
Erster Hinweis darauf, dass Quantenobjekte "komisch" sind:

Die Heisenbergsche Unschärferelation

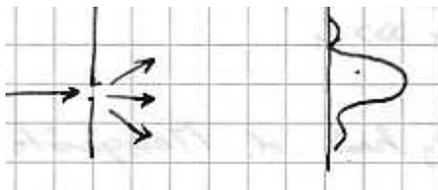
Zu lernen: Grundidee, Gleichung, Merksätze

Idee: Ortsmessung am Photon

genaue Ortsmessung \rightarrow Auftreffpunkt genau bekannt



Aber: Interferenzen am Spalt



schmalere Spalt

\rightarrow Interferenzmaxima und

-minima rücken auseinander

\rightarrow 0. Maximum wird **breiter**

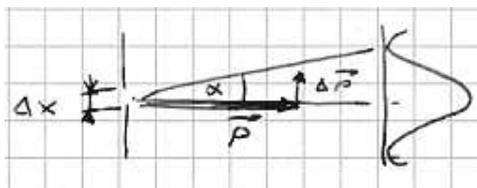
Je genauer die Ortsmessung, desto weniger genau bekannt ist der Auftreffpunkt!

Es existiert offensichtlich keine "Flugbahn"

Gleiches gilt z.B. für Elektronen (DeBroglie-Wellen)

Der Bahnbegriff ist für Quantenobjekte nicht anwendbar.

Qualitative Beschreibung



- verwenden Impulsvektor zur Beschreibung der Bewegung
- Genauigkeit der Ortsmessung: Spaltbreite Δx
- Maß für Ablenkung: Lage des 1. Minimums
- Ablenkung führt zu: Impulsänderung Δp

Je genauer man den Ort eines Quantenobjekts (z.B. Photons) ermittelt, desto weniger kann man über den Impulsvektor aussagen.

Laut Skizze gilt: Δp entspricht Maximale Ablenkung.

• Lage 1. Minimum am Spalt $\sin \alpha = k \cdot \frac{\lambda}{\Delta x}$ mit $k=1$

• Impulsvektor $\tan \alpha = \frac{\Delta p}{p}$

$\alpha \ll 50^\circ \Rightarrow \sin \alpha = \tan \alpha$

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\lambda}{\Delta x}$$

$$\Delta p \cdot \Delta x = p \cdot \lambda$$

$$\Delta p \cdot \Delta x = h$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Interpretation der Gleichung $\Delta x \cdot \Delta p = h$

- Δx ist Unwissen über Position, quasi Orts-Messfehler "Ortsunschärfe"
- Δp ist Unwissen über Impuls, quasi Impuls-Messfehler "Impulsunschärfe"

• **Ungenauere Messungen sind jederzeit möglich**

-> Gleichung stellt Grenze für Messgenauigkeit dar.

- Versuch x genauer zu messen (Δx sinkt) führt zu mehr Unwissen über den Impuls (Δp steigt)

• Ungenauere Messung (jederzeit möglich) heißt

Δx kann größer sein

Δp kann größer sein -> Produkt kann größer sein

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Heisenbergsche Unschärferelation
(auch: ~ Unbestimmtheitsrelation)

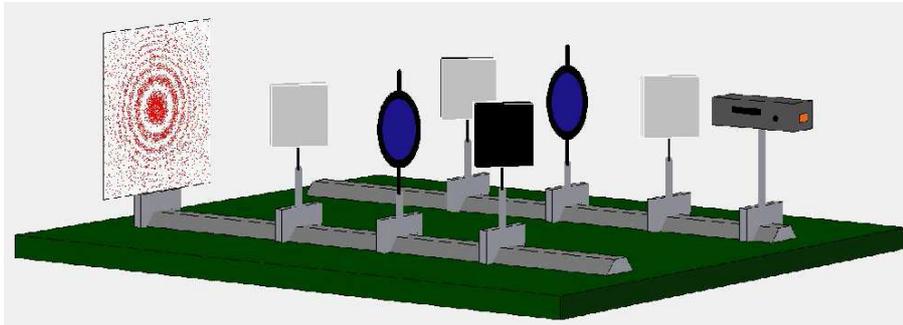
Ort und Impuls eines Mikroobjekts sind prinzipiell nicht **gleichzeitig** beliebig genau messbar. Der Versuch, eine der Größen genauer zu erfassen führt automatisch zu einer Veränderung der anderen Größe.

Ergänzungen / Bedeutung

1. In der Makrophysik ist die Gleichung ohne Konsequenzen da Δx und Δp sehr groß sind. Allein die Genauigkeit der Messgeräte führt zu $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$.
2. Unschärferelation gilt unabhängig von der Genauigkeit der Messgeräte. Sie überlagert die Messung / Genauigkeit der Messgeräte.
3. Beziehung gilt nicht nur für Interferenzen. Sie ist übertragbar auf alle Situationen, in denen p und x **gleichzeitig** gemessen werden.
Beispiel: Proton unter "Mikroskop"
Proton ist sehr klein -> brauchen harte γ -Strahlung um es "zu sehen" ($\lambda \approx d$)
--> "Stoßprozess"
--> Proton "Schnipst weg" (Impuls unbekannt)
4. Unschärferelation gilt sogar für alle Größenpaare, deren Einheitenprodukt J_s ("Wirkung") ist, z.B. Energie und Zeit.

Experimente mit dem Mach-Zehnder Interferometer

Wichtig: **Einzelphotonen**



[4]

Details: siehe Arbeitsblatt

Beobachtung:

- Obwohl einzelne Photonen verwendet werden, kommt es zu Interferenz.
- Kreuzt man die Polarisationsfilter, so verschwindet die Interferenz.

Fazit 1:

Man kann Quantenobjekten die Eigenschaften „Ort“ und „Weg“ nicht zuordnen. Sie durchlaufen alle klassisch möglichen Wege gleichzeitig. Man nennt das **Nichtlokalität**.

Interferenzbildern kann man nicht entnehmen, ob

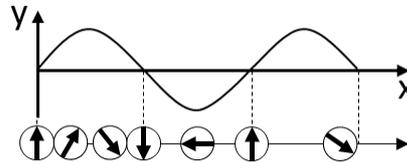
- es sich um klassische Wellen oder Teilchen handelt
- sie bei hoher Intensität oder aus Einzelphotonen entstanden sind

Fazit 2:

Einzelne Teilchen verhalten sich genau so, als ob es sich um Wellen handeln würde. Mit den Gleichungen der Wellenlehre kann man auch das Verhalten von einzelnen Photonen beschreiben.

4.3 Der Zeigerformalismus

Der Zeigerformalismus von Richard P. Feynman ist ein Modell, das die komplexe Mathematik der Quantenphysik anschaulich darstellt und dabei qualitative Vorhersagen über das Verhalten von Quantenobjekten ermöglicht.



Grundregeln

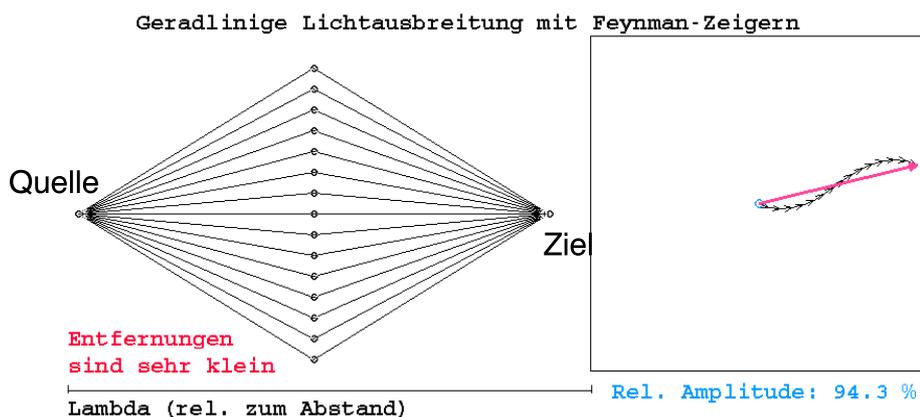
1. Jeder mögliche Weg eines Quantenobjekts zu einem Ziel wird durch einen rotierenden Zeiger (Phasenpfeil) beschrieben.
2. Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Ereignisses (z.B. Auftreffen am Ziel) ist gleich dem Quadrat der Länge des Pfeils.
3. Für den Fall, dass ein Ereignis auf mehrere Weise eintreten kann, sind alle Pfeile zum Gesamtpfeil zu addieren.

Man erhält korrekte Ergebnisse, wenn man zulässt, dass jedes Quantenobjekt jeden der möglichen Wege gleichzeitig geht.

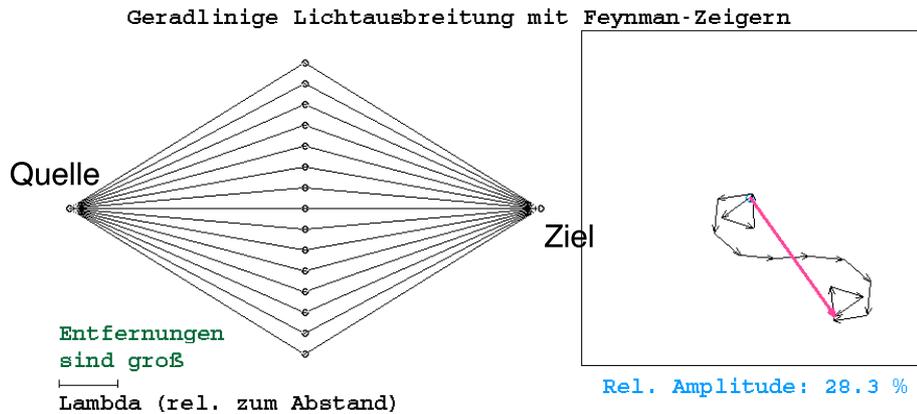
Details: Siehe Arbeitsblatt

Anwendungen der Feynman-Zeiger - Auswahl

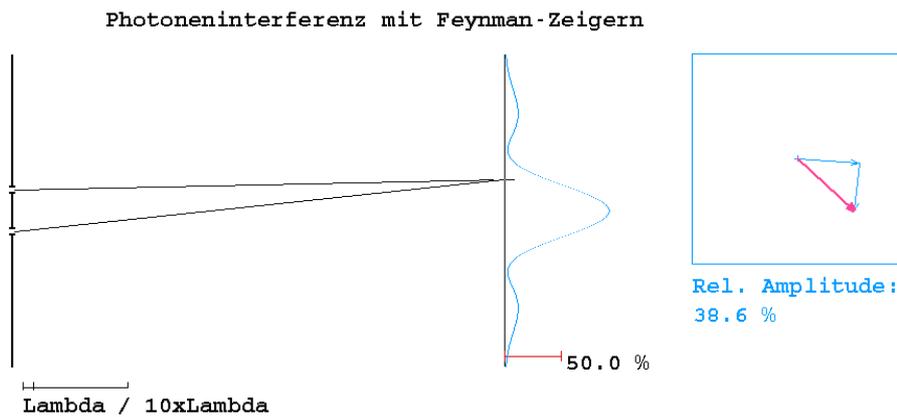
In der Quantenwelt geht das Licht alle möglichen Wege. Auch "Umwege" liefern einen Beitrag zu Gesamtamplitude.



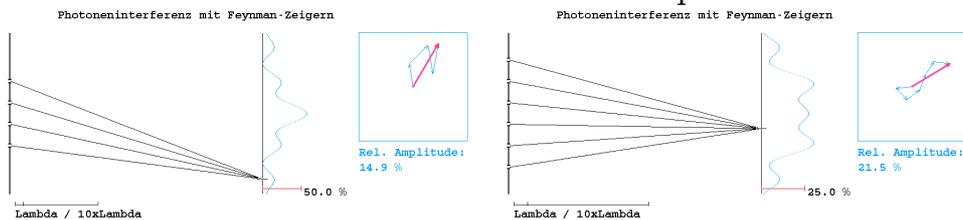
In der Makowelt breitet sich Licht geradlinig aus. Die Zeiger, die zu "Umwegen" gehören, interferieren sich weg - d.h. sie addieren sich zu Null und liefern so keinen Beitrag - scheinbar geht das Licht diese Wege nicht.



Der Amplitudenverlauf beim Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen lässt sich bestimmen.



Interferenzbilder für 4 und 6 Spalte



Weitere Möglichkeiten z.B.

- Herleitung Reflexions- und Brechungsgesetz
- Intensitätsverteilung bei Interferenz am Einzelspalt
- Interferenz an dünnen Schichten ...

4.4 Formulierung der Wesenszüge

Beobachtung Experiment mit mehreren möglichen Ergebnissen

z.B. Doppelspalt

Dirac'scher Spiegelversuch

⇒ exaktes Versuchsergebnis (Auftritt des Photons) kann nicht vorhergesagt werden

⇒ nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich

Interpretation durch Quantenphysik: Zustände sind "überlagert"

Sind bei einem quantenphysikalischen Vorgang mehrere Messergebnisse möglich, so befindet sich das Quantensystem vor der Messung in einem **Überlagerungszustand** aller möglichen Ergebnisse. Erst durch die Messung manifestiert sich genau ein Zustand.

Wesenszüge:

Eigenschaften, die allen Quantenobjekten gemeinsam sind

1. Wesenszug: _____

Beispiele:

2. Wesenszug: _____

Beispiele:

3. Wesenszug: _____

Beispiele:

4. Wesenszug: _____

Beispiele:

5. Wesenszug: _____

Vorhersage und _____ durch:

Bezeichnungen für ihr Gedanken-Experiment

Bildquellen

- [1] www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/roehre_quantenobjekte_ver.gif
- [2] www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/beug_elektr_quantenobjekte_ver.gif
- [3] Screenshot Program "Der quantenmechanische Doppelspalteversuch"
by Klaus Muthsam, Version 3.3, 1999
- [4] Screenshot Program "Quantum Eraser"
by Albert Huber, Version 1.6, 1998-2001

Copyright

Hier nicht ausgewiesene Bilder, Grafiken, Texte und Berechnungen sind
(c) Rainer Bettsteller, Werner-von-Siemens-Gymnasium Magdeburg.

Das Script darf unter der Bedingung für Unterrichtszwecke verwendet werden, dass die Herkunft nicht verschleiert wird. Insbesondere dürfen der Name des Autors und die Copyright-Vermerke nicht entfernt werden.
Werden Teile des Scripts, die nicht Allgemeingut sind (insbesondere Grafiken oder Diagramme), in eigenen Unterrichtsmaterialien verwendet so ist eine Quellenangabe erforderlich.

Eine Verwendung dieses Dokuments zu anderen als Lehrzwecken ist untersagt.

Haftungsausschluss

Die in diesem Dokument enthalten Informationen werden ohne Garantie auf Vollständigkeit oder vollständige Richtigkeit zur Verfügung gestellt. Sie dienen ausschließlich Lehrzwecken. Der Autor versichert alle Quellen nach bestem Wissen und Gewissen angegeben zu haben.

Magdeburg, Dezember 2014 bis Januar 2020