

Lichtteilchen, Quantensprünge und Materiewellen

- eine experimentelle Reise in die Quantenwelt -

Prof. Dr. Lutz Feld

1. Physikalisches Institut, RWTH Aachen
Novembervorlesung am 24. 11. 2007

Worum geht es?

- Wo befindet sich die Quantenwelt?
 - Was ist dort anders als in unserer Alltagsumgebung?
 - Welche Auswirkungen hat das?
 - Welche Anwendungen gibt es?
- Licht
 - Teilchen
 - Die Gesetze der Quantenwelt
 - Atome
 - Spektrallinien

In dieser Vorlesung geht es um die Grundlagen!

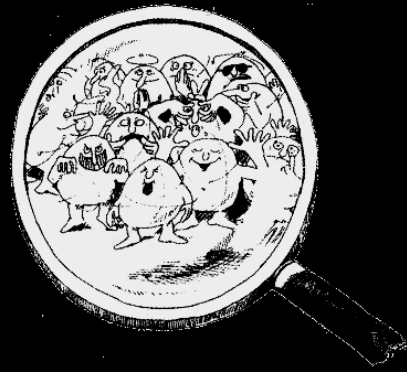
- Röntgenstrahlung
- Laser

Ich glaube, mit Sicherheit sagen zu können, daß niemand die Quantenmechanik versteht. (R.P. Feynman, 1973)

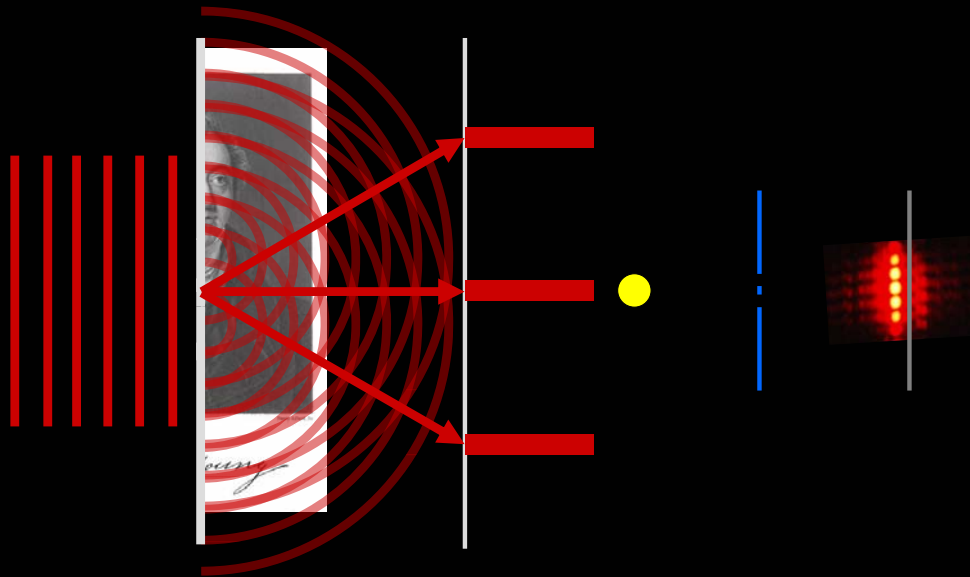
Wo befindet sich die Quantenwelt

HIER

...sobald wir die kleinsten Bausteine
der Materie untersuchen



Der Young'sche Doppelspaltversuch von 1802



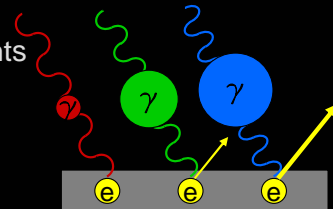
Interferenzmuster, wenn beide Spalte offen sind
→ Licht ist eine (elektromagnetische) Welle

Experimente:

- Interferenz am Doppelspalt mit Laser
- Wellenwanne mit Doppelspalt
- Interferenz mit rotem und grünem Laserpointer an CD und DVD

Der Photoeffekt

- erste Beobachtung 1893 durch Alexandre Edmond Becquerel
- heutige Interpretation: Licht kann Elektronen aus Metalloberflächen herausschlagen
- Beobachtung: die Energie der Elektronen hängt nur von der Frequenz f (Farbe) des Lichts ab, nicht von dessen Intensität



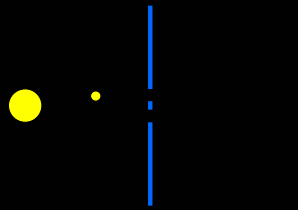
- Einstein (1905): **das Licht besteht aus "Teilchen" mit Energie $E = hf$**
→ **Photonen γ**
- $h = 6,626069 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ist das **Planck'sche Wirkungsquantum**

Experimente:

- Photoeffekt nach Hallwachs
- Photoeffekt mit LEDs und Photozelle, Gegenspannung so eingestellt, dass grünes und blaues Licht Elektronen auslösen kann

Teilchen-Welle-Dualität

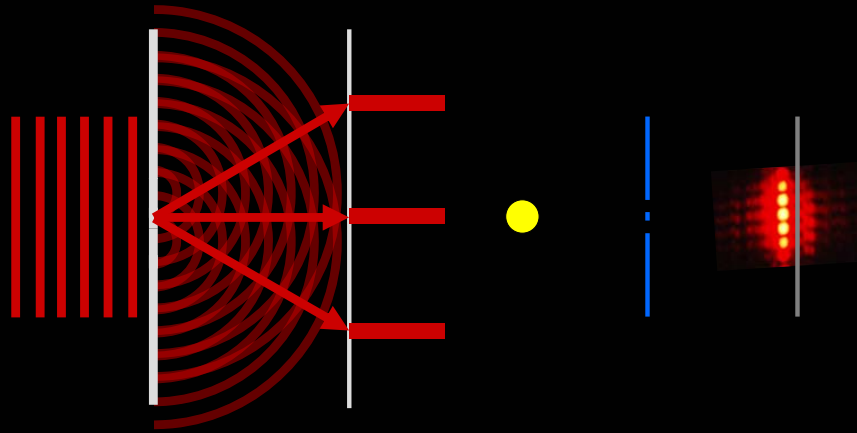
- Licht kann als Welle oder als Strom von Teilchen erscheinen
- Ist das so wie beim Wasser: besteht aus Molekülen und macht Wellen?
NEIN!
- Betrachten wir einzelne Photonen auf dem Weg durch den Doppelspalt:



→ jedes einzelne Photon ist Teilchen und Welle

Teilchen-Welle-Dualität

- jedes einzelne Photon ist Teilchen und Welle



→ neue Interpretation: die Welle gibt die **Wahrscheinlichkeit** dafür an, das Photon an einem bestimmten Ort zu finden

→ Wellenfunktion $\Psi(x,t)$ Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\Psi(x,t)|^2$

Wahrscheinlichkeit und Zufall

- In der Quantenphysik können wir über das Ergebnis einer Messung (z.B des Orts) prinzipiell nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen:

Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\Psi(x,t)|^2$

Beispiel:

„das Teilchen geht mit 15% Wahrscheinlichkeit durch den Spalt“
ob ein bestimmtes Teilchen hindurchgeht ist unvorhersehbar und damit zufällig

- „Zufall“ in der klassischen Physik beruht auf einer ungenügenden Kenntnis des Anfangszustands

Wenn wir die Würfel, die Hand, die Wurfbewegung, den Tisch etc. genau kennen würden (prinzipiell möglich), dann wäre das Ergebnis eines Wurfes vorhersehbar

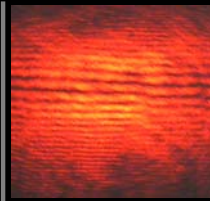


- In der Quantenphysik ist das anders:
 - auch bei bestmöglicher Kenntnis des Ausgangszustands ist das Resultat zufällig
 - die statistische Verteilung der Ergebnisse bei vielen gleichartigen Messungen kann jedoch sehr genau berechnet werden

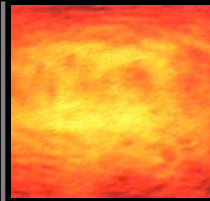
Komplementarität

- jedes einzelne Photon ist Teilchen und Welle
- beide Aspekte sind notwendig und ergänzen sich:
sie sind **komplementär**
- die Art des Experiments entscheidet darüber, ob es uns als Welle oder Teilchen erscheint
- wir können nicht sagen was das Photon ist, wenn wir nicht hinschauen
- im folgenden Experiment können wir zwischen Teilchen- und Wellenbeobachtung hin- und herschalten

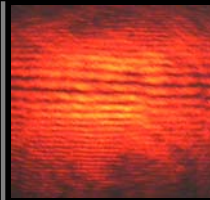
Der Quantenradierer



Die Auftreffwahrscheinlichkeit auf dem Schirm wird durch die Photon-Welle beschrieben
→ Interferenz



Das Photon-Teilchen wird beim Durchgang durch den Spalt markiert
→ es geht nur durch einen Spalt
→ keine Interferenz



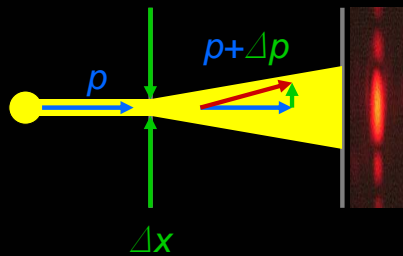
Ein Filter hinter dem Doppelspalt löscht die Weginformation aus
→ das Photon kann durch jeden Spalt gegangen sein
→ Interferenz

Experiment:

- Quantenradierer

Die Unschärferelation

- das Photon wird durch eine Wellenfunktion $\Psi(x,t)$ beschrieben
→ $|\Psi(x,t)|^2$ ist die Wahrscheinlichkeit, das Photon zur Zeit t am Ort x zu finden
- das Photon ist "überall und nirgends"
- Was passiert, wenn wir den Ort des Photons einschränken?



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Heisenbergsche
Unschärferelation

→ eine Einschränkung des Orts Δx erzeugt eine Unschärfe im Impuls Δp

Experiment:

- Beugung von Laserlicht am Einzelspalt veränderlicher Breite

Die Unschärferelation

- wenn der Ort eines Teilchens eingeschränkt ist, dann hat es einen minimalen Impuls

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta p \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta x}$$

→ ein eingesperrtes Teilchen hat immer einen minimalen Impuls und damit eine minimale Energie: "Nullpunktsenergie"

- weil das Planck'sche Wirkungsquantum h so klein ist, merken wir davon im Alltag nichts, die Minimalenergie ist winzig klein

- es gibt eine entsprechende Unschärferelation für Energie E und Zeit t

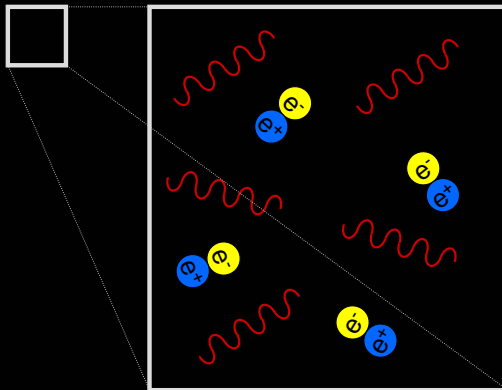
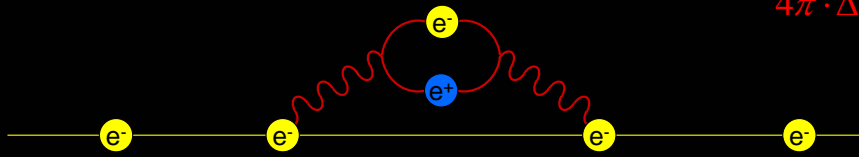
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

→ in kleinen Zeiträumen wird die Energieunschärfe groß

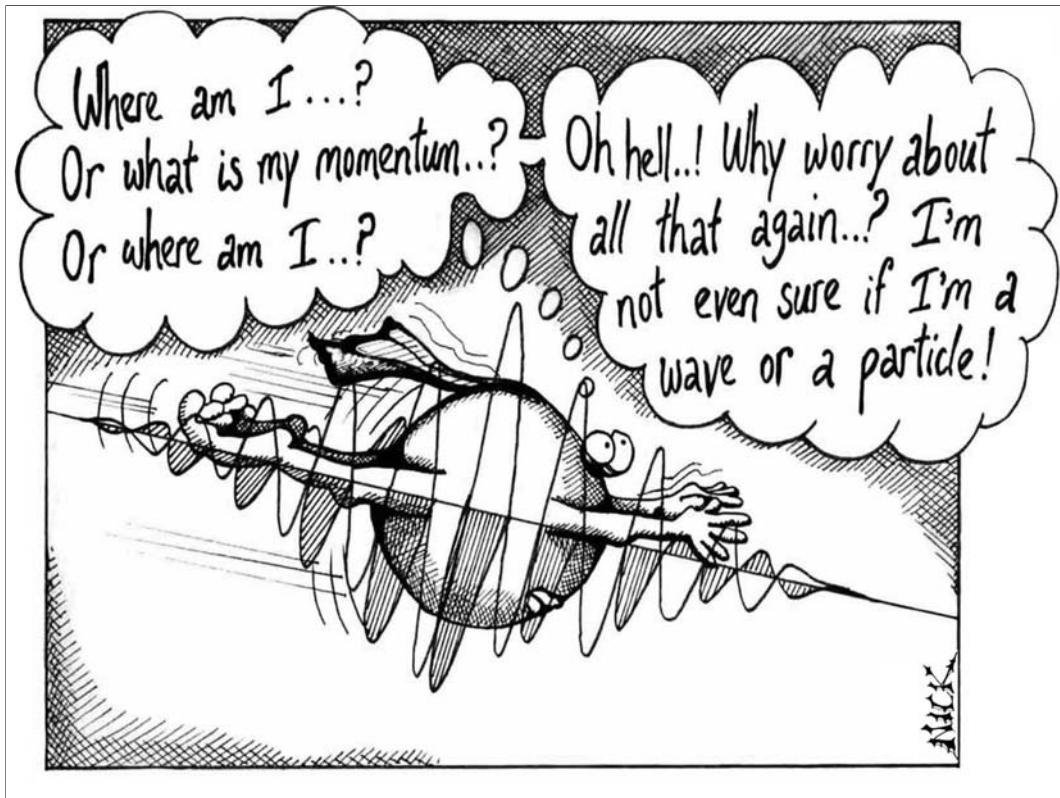
$$\rightarrow \Delta E \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta t}$$

Quantenfluktuationen

$$\Delta E \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta t}$$



Das Vakuum ist nicht leer!



Vom Licht zu den "Teilchen"

- die Teilchen der Quantenwelt sind Elektronen, Protonen, Quarks, Neutrinos ...
- sie sind viel zu klein, um sie direkt zu sehen

Durchmesser des Protons = 0,000000000000001 Meter

- wir können sie aber mit Detektoren nachweisen: Geigerzähler, Nebelkammer, ...
- die entscheidende Frage:
wenn Lichtwellen auch Teilchen sind,
sind dann Teilchen auch Wellen?

das Experiment muss diese Frage entscheiden

Experimente:

- Geigerzähler
- Nebelkammer

Haben Elektronen Welleneigenschaft?

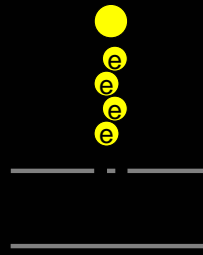
das Doppelspaltexperiment mit
Elektronen zeigt ein Interferenzmuster

→ Elektronen haben Welleneigenschaft

In der Quantenphysik werden
auch die Teilchen durch ein
Wellenfunktion beschrieben,
die ihre Aufenthaltswahrschein-
lichkeit angibt.

Wellenlänge durch Impuls
gegeben:

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



Experiment:

- Elektronenbeugung an Graphitkristallen

Hat auch ein Fussball eine Wellenfunktion?

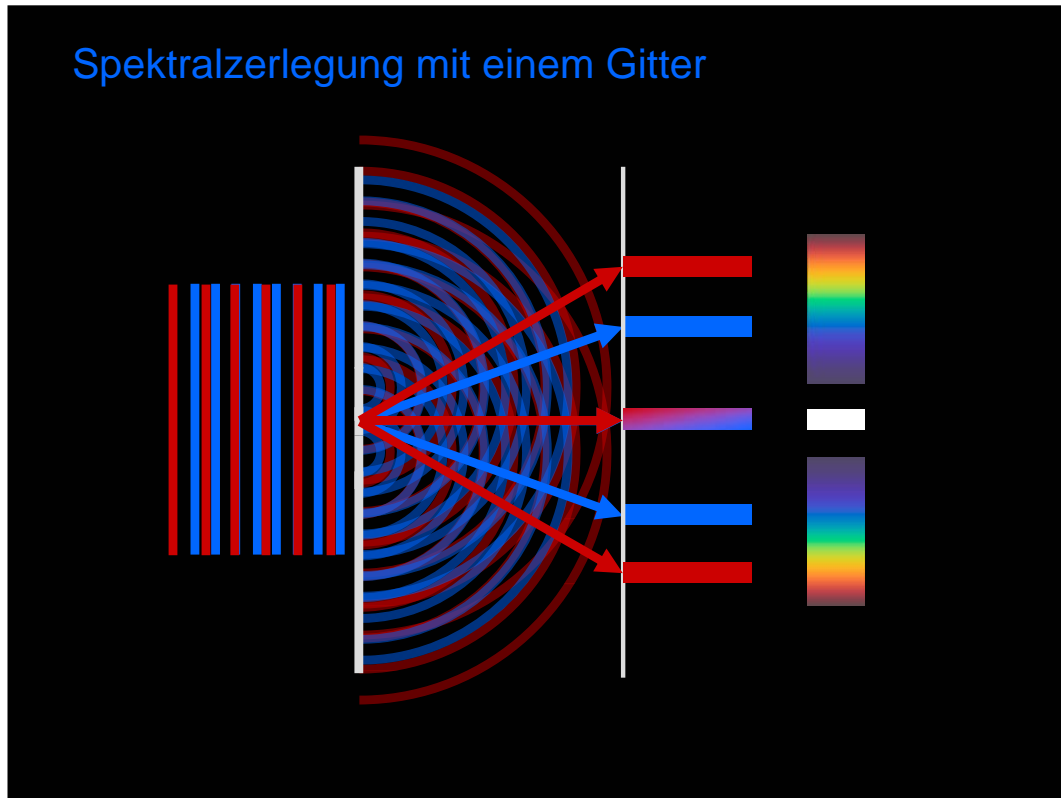
JA! $\Psi(\text{Fussball})$

- auch die Wellenlänge des Fussballs berechnet sich nach

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

- h ist winzig
- der Impuls p des Fussballs ist sehr groß

→ seine Wellenlänge ist so winzig, dass wir sie nicht sehen oder bemerken können

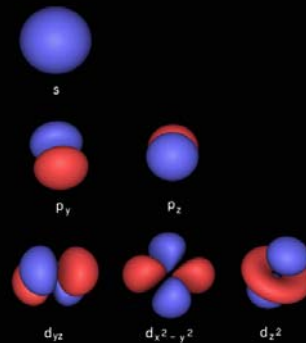
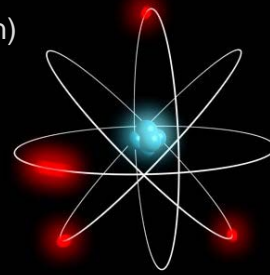


Experimente:

- Spektrum einer Halogenlampe
- Spektrum des Wasserstoffatoms

Atome

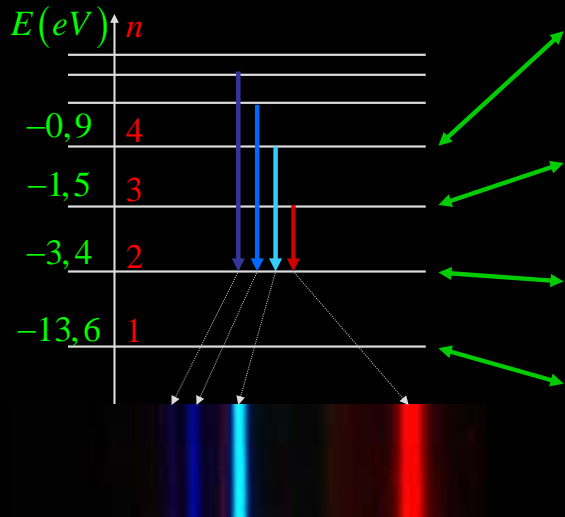
- bestehen aus einem Kern (Protonen, Neutronen) und einer Hülle aus Elektronen
- **klassische Physik:**
 - Elektronen fliegen auf Bahnen um den Kern
 - dabei strahlen sie Licht ab
 - und fallen schließlich in den Kern: kleinste Energie für Elektron im Kern
 - Atome sind nicht stabil!
- **Quantenphysik:**
 - Elektronen durch Wellenfunktion beschrieben
 - nur ganz bestimmte Wellenfunktionen "stehende Wellen"
 - nur ganz bestimmte Energien
 - kleinste Energie für Elektron in endlichem Abstand, denn das Elektron im Kern hätte nach der Unschärferelation sehr hohen Impuls und damit sehr hohe Energie
 - Atome sind stabil!



Das Wasserstoffatom

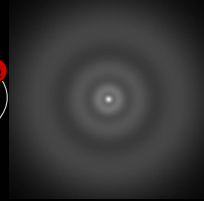
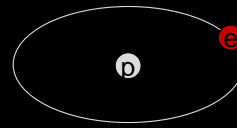
$$E = -13,6 \text{ eV} \frac{1}{n^2}$$

n Hauptquantenzahl



klassisch

quantenmechanisch

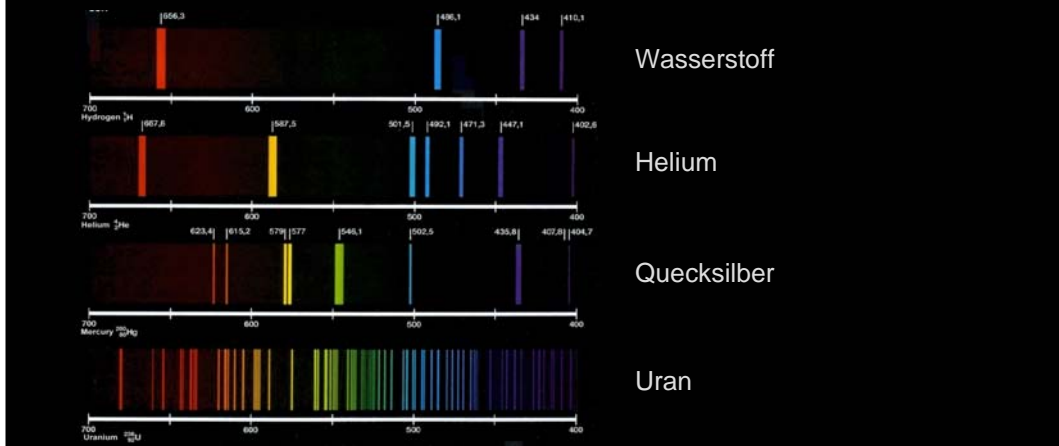


Spektrallinien

Beim Übergang zwischen zwei Energieniveaus E_1 und E_2 senden Atome Licht mit der zugehörigen Frequenz f aus:

$$E_1 - E_2 = h \cdot f$$

Für das Wasserstoff-Atom:
$$f = \frac{13,6 \text{ eV}}{h} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

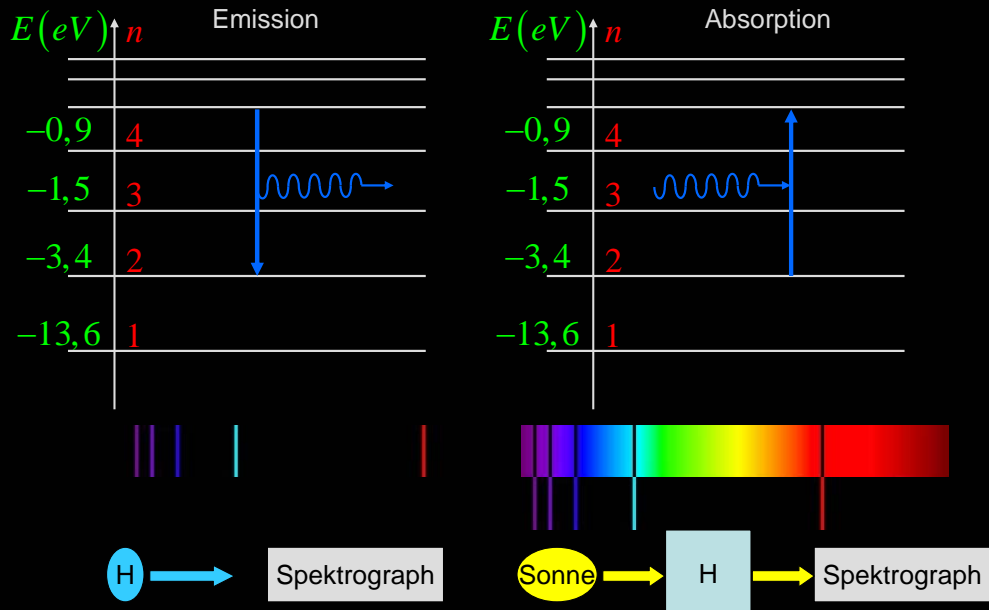


Experimente:

- Spektrum einer Halogen-, Hg- und Natrium-Lampe mit Spektralapparat

Emission und Absorption

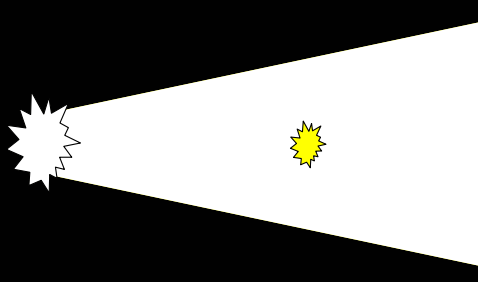
Atome emittieren und absorbieren Licht bei den gleichen Frequenzen



Wenn Flammen Schatten werfen

Wenn Kochsalz (NaCl) verbrennt, sieht man die gelbe(n) Natrium-Spektrallinie(n)

Die Kochsalzflamme sollte also auch diese Linien absorbieren können.



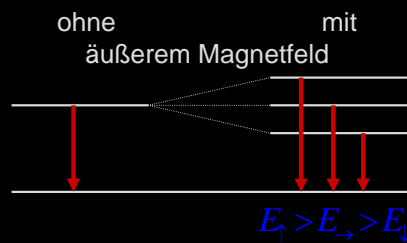
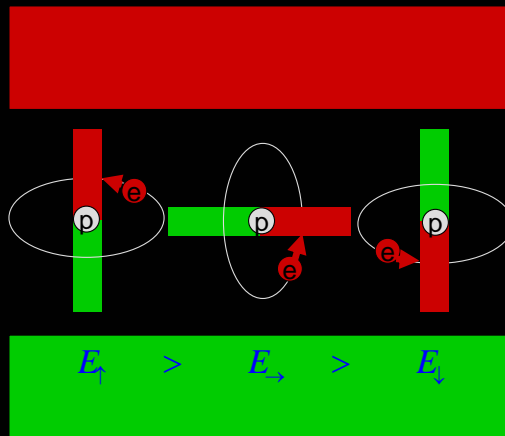
Experiment:

- Schatten der NaCl-Flamme im Na-Licht

Der Zeeman-Effekt

- Elektronenbewegung im Atom erzeugt ein Magnetfeld
- in einem äußeren Magnetfeld haben die drei Einstellungen verschiedene Energie

→ Spektrallinie muss sich aufspalten



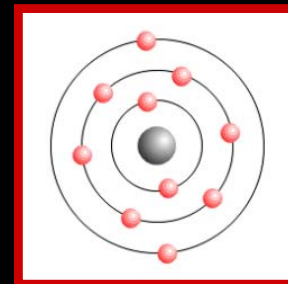
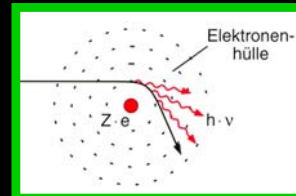
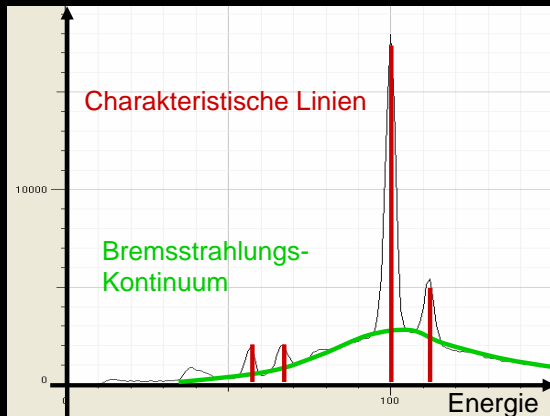
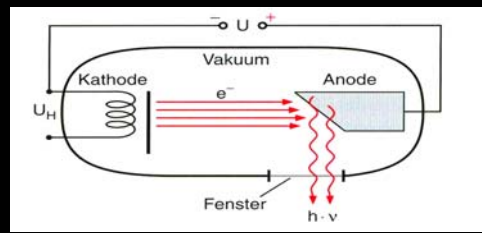
Experiment:

- Zeeman-Effekt

Röntgenstrahlung

Elektronen werden beschleunigt und auf eine "Anode" geschossen

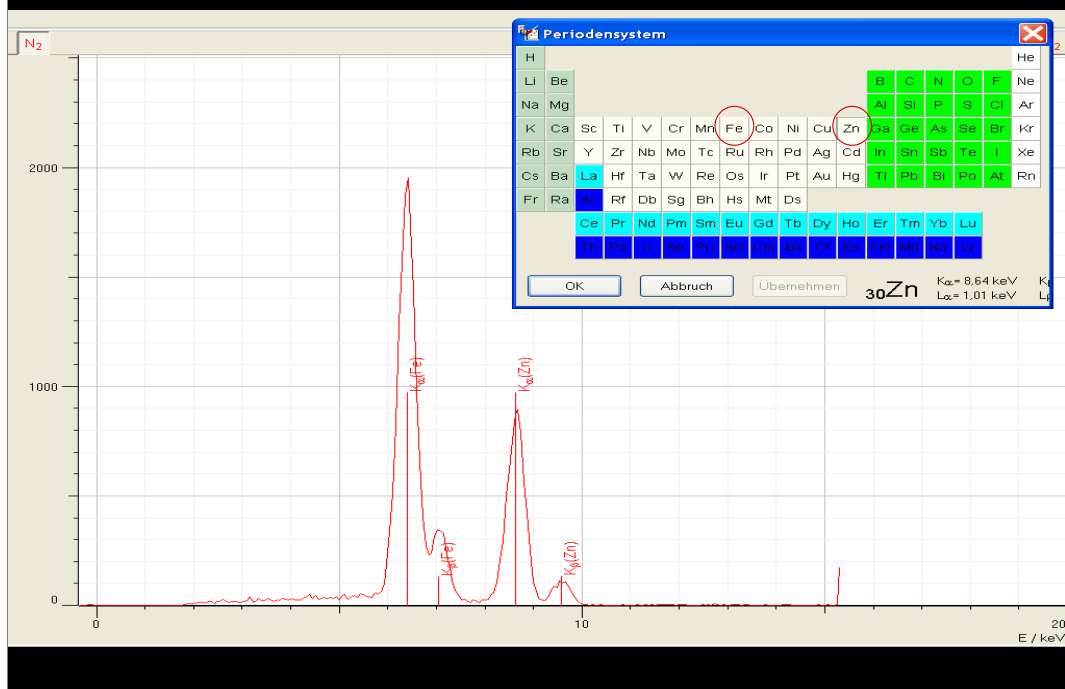
Charakteristische Linien sind charakteristisch für die Atomsorte



Experimente:

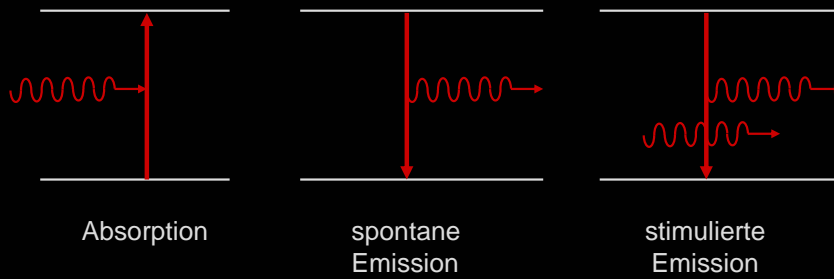
- Spektrum der Röhre mit Energiedetektor
- Durchleuchtung mit Fluoreszenzschirm
- Röntgen-Fluoreszenz

Röntgenfluoreszenz



LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



In einem LASER werden Photonen kopiert

→ **paralleles Licht einer Farbe**

→ **Wellen addieren sich zu einem langen Wellenzug: Kohärenz**

→ mit einem Laser können Interferenzeffekte
besonders einfach beobachtet werden

LASER



Offener He-Ne-Laser

- Komponenten erklären
- Gefahren erklären
- durch Spiegeljustage den Laser einschalten

Zusammenfassung

- wir leben in der Quantenwelt
meistens bemerken wir es aber nicht, da die Quanten so klein sind
- Quantenteilchen verhalten sich ungewohnt:
 - sie sind Teilchen oder Welle, je nach Experiment
 - sie nehmen gleichzeitig viele Wege
 - über ihr Auftreten können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden
 - das genaue Messergebnis ist prinzipiell zufällig
(selbst bei bestmöglicher Kenntnis des Ausgangszustands)
mit festgelegter Wahrscheinlichkeit
 - ihr Ort und Impuls kann nicht gleichzeitig genau bestimmt werden
 - in gebundenen Systemen (z.B. Atom) bilden sich "stehende Wellen" und es sind nur bestimmte Energiezustände möglich
- nur mit den Gesetzen der Quantenmechanik können wir Atome, Röntgenstrahlung, Laser, Computer etc. verstehen