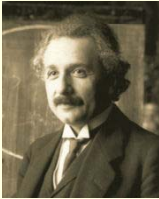


Grundlagen der Quantenphysik

$E = mc^2$



1

Gliederung

- [Teilchen- und Wellenmodell](#)
- [Äußerer lichtelektrischer Effekt](#)
- [Gegenfeldmethode](#)
- [Quantenmodell](#)
- [Quanteneigenschaften des Elektrons](#)
- [Heisenbergsche Unschärferelation](#)
- [Licht- und Elektronenmikroskop](#)
- [Spektren](#)
- [Atommodelle](#)
- [Energieniveauschema von Wasserstoff](#)
- [Laser](#)
- [Franck-Hertz-Versuch](#)

2

Modelle des Lichts

Teilchenmodell:

- Teilchen befinden sich zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort und haben eine bestimmte Geschwindigkeit
- bewegen sich auf bestimmten Bahnen
- Energie- und Impulserhaltungssatz gelten

Wellenmodell:

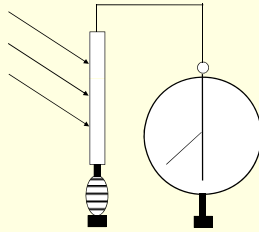
- örtlich und zeitlich periodische Veränderungen physikalischer Größen
- besitzen eine räumliche Ausdehnung
- Wellen werden an Hindernisse reflektiert oder gebeugt
- Interferenz führt zu Verstärkung oder Abschwächung

Modell Lichtstrahl

3

Äußerer lichtelektrischer Effekt

Experiment:



Eine negativ geladene Zinkplatte wird mit langwelligem Licht bestrahlt.
→ NICHTS

Bestrahlung mit kurzwelligem Licht (UV)
→ Ladung verringert sich

Die Platte wird positiv geladen und mit kurzwelligem Licht bestrahlt.
→ NICHTS

4

Äußerer lichtelektrischer Effekt

Ergebnis:

- Kurzwelliges Licht kann aus Metallen Elektronen herauslösen.
- Man nennt dies den **äußeren lichtelektrischen Effekt (Fotoeffekt)**.

Warum funktioniert das nur mit kurzwelligem Licht???

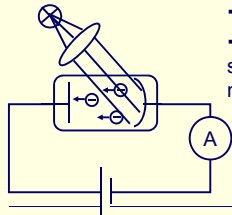
→ Nähere Untersuchungen notwendig.

5

Äußerer lichtelektrischer Effekt

Experiment:

Beleuchtung einer Fotozelle mit einer Glühlampe und Messung des Fotostroms



Annäherung der Glühlampe
→ Der Fotostrom wächst.

Bei geringer Beleuchtungsstärke werden verschiedene Filter in den Strahlengang gebracht.
→ Bei Blautönen fließt ein Fotostrom.
→ Bei Rottönen fließt kein Fotostrom, selbst bei Erhöhung der Lichtstärke nicht

WARUM???

6

Erklärungsversuche

Teilchenmodell:

- Je größer die Beleuchtungsstärke, desto mehr Teilchen treffen auf die Metalloberfläche
- mehr Elektronen werden herausgelöst

WIDERSPRUCH!

Wellenmodell:

- Je größer die Beleuchtungsstärke, desto größer die Amplitude
- höhere Energie der auftreffenden Welle
- mehr Elektronen können herausgelöst werden

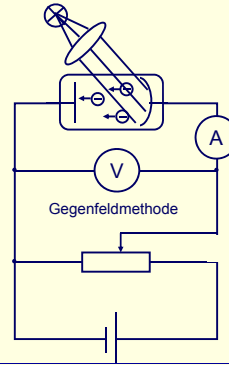
WIDERSPRUCH!

Wie lässt sich die Abhängigkeit von der Frequenz des Lichts erklären?



© Doris Walkowiak 2010

Weitere Experimente



Bestrahlung mit Licht verschiedener Frequenzen
 → Elektronen werden herausgelöst und beschleunigt
 → Fotostrom
 Bestimmung der Gegenspannung, so dass $I_{\text{Foto}} = 0$ (Elektronen erreichen die Anode nicht mehr)

[Genauere Untersuchungen](#)



© Doris Walkowiak 2010

Ergebnisse (Kalium)

- Gelb:** Selbst bei $U = 0$ fließt kein Fotostrom
 → Die kinetische Energie der Elektronen ist 0.
- Grün:** Es fließt ein Fotostrom. Bei $U = 0,02 \text{ V}$ wird dieser 0.
- Violett:** Bei $U = 0,59 \text{ V}$ wird die Anode nicht mehr erreicht.
- UV1: Die erforderliche Gegenspannung beträgt $1,15 \text{ V}$.
- UV2: Die erforderliche Gegenspannung beträgt $2,63 \text{ V}$.

- Je größer die Frequenz des eingestrahlt Lichts, desto größer ist die Spannung, die zum vollständigen Abbremsen der Elektronen notwendig ist.
- Liegt die Frequenz unter einem bestimmten Wert, so ist die kinetische Energie 0.



© Doris Walkowiak 2010

Einsteinsche Gerade

Spektralfarbe	U in V	f in THz	f in Hz
gelb	---	---	
grün	0,02	549	5,49E+14
violett	0,59	688	6,88E+14
UV1	1,15	821	8,21E+14
UV2	2,63	1180	1,18E+15

Aus der gemessenen Spannung kann die kinetische Energie berechnet werden:

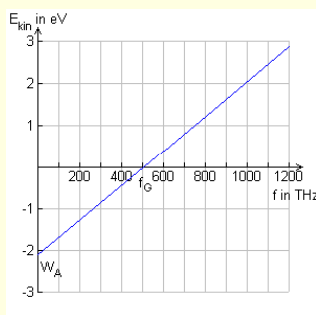
$$E_{\text{kin}} = E_{\text{el}} \Rightarrow \frac{m}{2} v^2 = e \cdot U$$

Einheit: eV $1 \text{ eV} = 1 \text{ V} \cdot e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



© Doris Walkowiak 2010

Einsteinsche Gerade



$$\frac{\Delta E_{\text{kin}}}{\Delta f} = \text{konstant} = h$$

h ... Plancksches Wirkungsquantum

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$h = \frac{\Delta U}{\Delta f} \cdot e = \frac{0,57 \text{ V}}{139 \cdot 10^{12} \text{ Hz}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 6,56 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



© Doris Walkowiak 2010

Ergebnisse

- Je größer die Beleuchtungsstärke, desto größer die Anzahl der heraus gelösten Elektronen.
- Die kinetische Energie der Elektronen ist unabhängig von der Beleuchtungsstärke.
- Sie wächst linear mit der Frequenz des eingestrahlt Lichts.
- Bei einer bestimmten Grenzfrequenz f_G (abhängig vom Metall) ist die kinetische Energie 0, das heißt die Elektronen können zwar aus der Metalloberfläche herausgelöst, aber nicht mehr beschleunigt werden.
- Die Grenzfrequenz ist abhängig von der Art des Metalls.



© Doris Walkowiak 2010

Quantenmodell

- Licht besteht aus einzelnen, nicht weiter zerlegbaren "Energieportionen", den Lichtquanten bzw. Photonen. Diese sind vorstellbar als unteilbare Wellenpakete endlicher Länge.
- Jedes dieser Photonen hat die Energie $E = h \cdot f$.
- Photonen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und besitzen keine Ruhemasse.
- Sie sind elektrisch neutral.
- Photonen haben sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften (Welle-Teilchen-Dualismus)



© Doris Walkowiak 2010

Erklärung im Quantenmodell

- Beim äußeren lichtelektrischen Effekt tritt jeweils ein Photon mit genau einem Elektron in Wechselwirkung und gibt an dieses seine gesamte Energie ab (und hört damit auf zu existieren).
- Nur wenn der Betrag $E = h \cdot f$ größer ist als die zum Austritt des Elektrons aus dem Metall notwendige Arbeit, wird es tatsächlich herausgelöst.
- Die dafür notwendige Frequenz ist die Grenzfrequenz.

$$W_A = h \cdot f_G$$

- Die kinetische Energie des Elektrons ergibt sich aus der Differenz aus der absorbierten Energie $h \cdot f$ und der Austrittsarbeit W_A :

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A \quad \text{bzw.} \quad h \cdot f = \frac{1}{2} m v^2 + W_A$$

(Einsteinsche Gleichung)

© Doris Walkowiak 2010

Erklärung im Quantenmodell

- Je größer die Beleuchtungsstärke, desto mehr Photonen, desto mehr Elektronen.
- Die Energie der Photonen wird nicht größer, deshalb auch keine größere kinetische Energie der Elektronen.

Richard Feynmann:

„Quantenobjekte sind weder Welle noch Teilchen, sondern etwas Drittes!“

© Doris Walkowiak 2010

Übung

1. Bei der Bestrahlung mit Frequenzen $f_1 = 6,88 \cdot 10^{14}$ Hz und $f_2 = 5,19 \cdot 10^{14}$ Hz waren Gegenspannungen von $U_1 = 0,83$ V und $U_2 = 0,13$ V erforderlich, um alle Fotoelektronen auf die Geschwindigkeit 0 abzubremesen. Berechnen Sie das Plancksche Wirkungsquantum! Wie groß ist die Austrittsarbeit? ($W_A = 3,2 \cdot 10^{-19}$ J)
2. Die Austrittsarbeit für Aluminium beträgt 4,20 eV. Entscheiden Sie, ob man mit sichtbarem Licht Elektronen aus dem Metall herauslösen kann. ($f = 1,01 \cdot 10^{15}$ Hz)
3. Mit welcher Wellenlänge wird eine Fotokathode bestrahlt, wenn die Austrittsarbeit 2,8 eV und die Geschwindigkeit der Elektronen 1200 km/s beträgt? (180 nm)??

© Doris Walkowiak 2010

Masse und Impuls eines Photons

Masse: $E = m \cdot c^2; E = h \cdot f \Rightarrow m \cdot c^2 = h \cdot f \Rightarrow m = \frac{h \cdot f}{c^2}$

Impuls: $p = m \cdot c = \frac{h \cdot f}{c^2} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$

Wellenlänge: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot c}$

© Doris Walkowiak 2010

Quanteneigenschaften des Elektrons

- Schickt man einen Elektronenstrahl durch einen Doppelspalt, so erhält man dieselben Überlagerungserscheinungen wie bei Licht
- ➔ Elektronen haben ebenfalls sowohl Teilchen als auch Wellencharakter
- ➔ Gültigkeit der Erkenntnisse über Photonen auch beim Elektron

[Video](#)

de-Broglie-Wellenlänge für ein Elektron mit der Geschwindigkeit v:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

- De-Broglie-Wellen sind keine elektromagnetischen Wellen, sondern werden als Wahrscheinlichkeitswellen bezeichnet.

Physik 2000 – Atomlabor - Interferenzexperimente [KworkQuark](#)

© Doris Walkowiak 2010

Vergleich Elektron - Photon

Elektron

- $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg
- negativ geladen
- Welle-Teilchen-Dualismus → ähnliche Ergebnisse beim Doppelspaltexperiment, allerdings andere Abstände, da unterschiedliche Wellenlänge
- Durch Photonen können Elektronen aus einem Metall herausgelöst werden (äußerer lichtelektrischer Effekt).
- In Halbleitern können durch Lichteinwirkung (Photonen) Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband gehoben werden → Verbesserung der Leitfähigkeit

Photon

- $m_0 = 0$
- elektrisch neutral



© Doris Walkowiak 2010

Licht- und Elektronenmikroskop

Lichtmikroskop:

- Es können nur Objekte ab einer Größe sichtbar gemacht werden, die der Wellenlänge des sichtbaren Lichts entsprechen ($7,8 \cdot 10^{-7}$ m ... $3,9 \cdot 10^{-7}$ m)

Elektronenmikroskop:

- de-Broglie-Wellenlänge: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$

- z. B. Elektron mit $v = 10^6$ m/s

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

- im Prinzip gleiche Funktionsweise wie beim Lichtmikroskop; Bündelung des Elektronenstrahls wird durch Ablenkplatten oder Spulen erreicht



© Doris Walkowiak 2010

Heisenberg'sche Unschärferelation

- Die Beschreibung des Auftreffpunktes eines Quants auf dem Schirm ist nur mittels Wahrscheinlichkeitsrechnung möglich.
- Heisenbergsche Unschärferelation: Ort und Impuls eines Mikroobjektes können gleichzeitig nur mit den Unschärfen Δx und Δp angegeben werden.
- Je genauer der Ort bestimmt werden soll, desto ungenauer wird die Aussage über den Impuls (Geschwindigkeit) $\Delta x \cdot \Delta p \approx \lambda \cdot \frac{h}{\lambda} \approx h$
- Die Messung der Position eines Quantenobjektes ist zwangsläufig mit einer Störung seines Impulses verbunden, und umgekehrt.



© Doris Walkowiak 2010

Wahrscheinlichkeitsfunktion

- In der Quantenmechanik müssen vielfach Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden
- Bornsche Regel: Wahrscheinlichkeit kann für unterschiedliche Eigenwerte einer bestimmten Observablen (Messgröße) berechnet werden
- eine Aussage über den genauen Aufenthaltsort des Teilchens ist nicht möglich
- Wahrscheinlichkeitsdichte, dass ein Quantenobjekt am Ort r zur Zeit t anzutreffen ist: $|\Psi(r, t)|^2$
- Schrödingergleichung:

$$i \cdot \hbar \cdot \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}, t) \cdot \psi(\mathbf{r}, t)$$



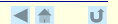
© Doris Walkowiak 2010

Kopenhagener Deutung

- Interpretation der Quantenmechanik
- um 1927 von Niels Bohr und Werner Heisenberg formuliert und basiert auf der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion
- Teilchen befindet sich nicht an einem bestimmten Ort, sondern gleichzeitig an allen Orten, an denen die Wellenfunktion nicht Null ist.
- Erst im Moment einer Ortsmessung bricht die Wellenfunktion zusammen (Kollaps) und es entsteht ein Teilchen an einer bestimmten Stelle.
- Schrödingers Katze



Bild: http://de.wikipedia.org/wiki/Schrödingers_Katze



© Doris Walkowiak 2010

Zitate

„Ich mag sie nicht, und es tut mir leid, jemals etwas damit zu tun gehabt zu haben.“ – Erwin Schrödinger

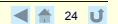
„Ich kann mir nicht vorstellen, dass der Liebe Gott mit Würfeln spielt!“ – Albert Einstein

„I think it is safe to say that no one understands quantum mechanics.“ – Richard Feynmann

„I am still confused, but on a higher level.“ – Enrico Fermi

Video: [Quantenphysik Teil 1](#) (9:05) und [Teil 2](#) (8:56) [Teil 3 \(Verschränkung\)](#) (7:10)

[Witz](#)



© Doris Walkowiak 2010

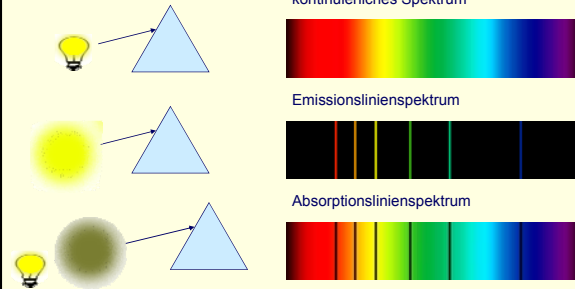
Physik der Atomhülle



© Doris Walkowiak 2010

Spektr

Folie: Elektromagnetisches Spektrum



© Doris Walkowiak 2010

Kontinuierliches Spektrum



- Teil des elektromagnetischen Spektrums im Bereich des sichtbaren Lichts
- ausgesendet durch glühende feste oder flüssige Körper sowie leuchtende Gase unter hohem Druck
- Bsp.: Sonneninneres, Xenon-Hochdrucklampe



© Doris Walkowiak 2010

Linienspektren



- Leuchtende Gase unter geringem Druck ergeben ein Emissionslinienspektrum, das aus farbigen Linien auf schwarzem Untergrund besteht.
- Bsp.: Natrium- oder Quecksilberdampflampe



- Das Sonnenlicht ergibt ein kontinuierliches Spektrum mit dunklen Absorptionslinien (Fraunhofersche Linien) → Absorptionslinienspektrum.
- Dieses entsteht, wenn die Strahlung durch schwächer oder nichtleuchtende Gase hindurchdringt.
- Bsp.: Sonnenlicht



© Doris Walkowiak 2010

Anwendungen

- Spektralanalyse
 - Entwicklung: Robert Bunsen (Chemiker) und Gustav Robert Kirchhoff (Physiker) Mitte 19. JH
 - zur Analyse von Stoffen in der Chemie oder des Randbereiches von Sternen in der Astronomie
- Bewegung von Sternen
 - Stern entfernt sich von Erde → Wellenlänge wird größer (Dopplereffekt) → Linien sind nach links verschoben, Abstand lässt Aussagen über die Geschwindigkeit zu



© Doris Walkowiak 2010

Fazit

- Die von den Atomen/Molekülen ausgesandte Strahlung hängt vom Aufbau des Atoms ab.
- Sie entsteht in der Atomhülle.
- Atome senden nur Licht bestimmter Frequenzen aus.
- Für genauere Untersuchungen sind Kenntnisse über den Atomaufbau nötig.

Physik 2000 – Science Trek - Quantenatom



© Doris Walkowiak 2010

Atommodelle

Antike (Leukipp, Demokrit):

- Atom als unteilbares Teilchen

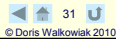
um 1800 (Dalton):

- Symbolschreibweise für Elemente
- Atome haben "Haftstellen", mit denen sie sich zu Molekülen verbinden können
- Jedes Element besteht aus gleichen und unteilbaren Atomen
- Die Atome verschiedener Elemente unterscheiden sich nur durch ihre Masse
- Atome sind Kugeln mit homogen verteilter Masse.
- Der Zusammenstoß zweier Atome ist vollständig elastisch.

um 1900 (Thomson):

- "Rosinenkuchenmodell": Die negativen Elektronen sind im "Atomteig" eingebettet wie Rosinen im Kuchen
- Unterscheidung von Atom, positivem Ion und Elektron
- Bis dahin war man der Meinung, dass Atome homogene Teilchen sind, die vollständig mit Atommasse gefüllt sind.

Folie



31

© Doris Walkowiak 2010

Atommodelle

1911 (Rutherford):

- **Streuversuch:** Alpha-Teilchen werden durch eine dünne Metallfolie geschossen → einzelne (sehr wenige) Teilchen werden stark von ihrer Bahn abgelenkt (teilweise mehr als 180°) → es muss einen Zusammenstoß mit anderen Teilchen größerer Masse gegeben haben (dem Atomkern)
- Atome haben einen Durchmesser von 10^{-10} m (**Ölfleck-Versuch**), nahezu die gesamte Masse ist im Atomkern ($d = 10^{-14}$ m) konzentriert.
- Die gesamte positive Ladung befindet sich im Kern.
- Die negativen Ladungen befinden sich in Form von Elektronen in der Atomhülle. Sie bewegen sich auf Kreisbahnen um den Kern. Es gibt elektrostatische Kräfte zwischen dem positiven Kern und den negativen Elektronen.

* Rutherford, Ernest, *) Neuseeland 30.8. 1871, †) 19.10. 1937, britischer Physiker. Einer der bedeutendsten Experimentalphysiker dieses Jahrhunderts., insbesondere zur Radioaktivität bzw. Kernphysik. Nobelpreis für Chemie 1908.

Folien: Atommodelle, Streuversuch



32

© Doris Walkowiak 2010

Atommodelle

Grenzen:

- Warum bewegen sich die Elektronen nur auf bestimmten Bahnen und nicht mit beliebigem Radius, wie es ja eigentlich möglich sein müsste?
- Ein Elektron auf einer Kreisbahn ist ein bewegter Ladungsträger → Aussenden einer elektromagnetischen Welle → Energieverlust → Das Elektron müsste sich eigentlich auf einer spiralförmigen Bahn dem Kern nähern
- Wie kommt es zu den elementspezifischen Spektrallinien (quantenhafte Emission)?



33

© Doris Walkowiak 2010

Atommodelle

1913 (Bohr)*:

- Ergänzung des Rutherford'schen Atommodells durch zwei Postulate:
- 1. **Quantenbedingung:**
Die Elektronen bewegen sich auf strahlungsfreien Bahnen. Diese Bahn wird durch die Quantenzahl n bestimmt. Auf jeder dieser Bahnen besitzt das Elektron eine bestimmte Energie E_n mit
 $E_n = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$.
- 2. **Frequenzbedingung:**
Beim Übergang von einer energiereicheren zu einer energieärmeren Bahn wird die Energie in Form eines Photons abgestrahlt:
 $\Delta E = E_n - E_m = h \cdot f$
Beim umgekehrten Vorgang wird dieses Energiequant aufgenommen (absorbiert).

*Bohr, Niels, *) Kopenhagen 7. 10. 1885, †) 18. 11. 1962, dänischer Physiker. Nahm für Atome im Periodensystem einen Schalenbau an. 1922 Nobelpreis für Physik.

Atomos



34

© Doris Walkowiak 2010

Linienpektrum und Bohrsches Atommodell

- Linienpektrale haben eine gesetzmäßiger Folge von Spektrallinien, die man auch berechnen kann.

$$f = R_Y \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

mit $n = 1,2,3, \dots$ $m = 2,3,4, \dots$ ($n < m$)
 $R_Y = 3,288 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ (Rydbergfrequenz)

- Jede dieser Frequenzen entspricht eine bestimmte Energie der Lichtquanten, durch die die Elektronen herausgelöst wurden.

$$\Delta E = h \cdot f \text{ (Bohrsche Frequenzbedingung)}$$

→ erstes Bohrsches Postulat



35

© Doris Walkowiak 2010

Linienpektrum und Bohrsches Atommodell

- Die Elektronen befinden sich innerhalb der Atomhülle in bestimmten Energiezuständen (Energieniveaus). Durch Energiezufuhr kann ein Elektron von einem niedrigen auf ein höheres Energieniveau gebracht werden (angeregter Zustand). Durch Abgabe der Energie kann es wieder in seinen Grundzustand zurückkehren. → zweites Bohrsches Postulat
Dies passiert in der Regel spontan und nach sehr kurzer Zeit (10^{-8} s). Die freigesetzte Energie wird in Form von Licht ausgestrahlt.

Physik 2000 – Science Trek - Quantenatom



36

© Doris Walkowiak 2010

Linienpektrum und Bohrsches Atommodell

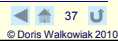
- Bohr berechnete die Energiezustände des Elektrons im Wasserstoffatom:

$$E_n = -\frac{1}{8} \frac{m_e e^4}{\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$E_1 = -13,6 \text{ eV}$ (Energie des Elektrons im Grundzustand)

- Befindet sich das Elektron auf der n . Bahn, so lassen sich alle weiteren Energien auch aus dem Grundzustand wie folgt berechnen:

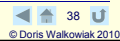
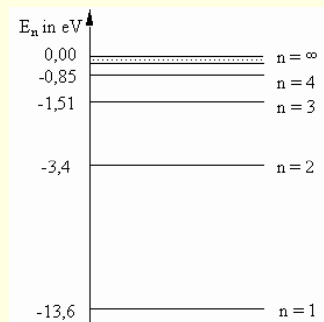
$$E_n = E_1 + \frac{1}{n^2}$$



© Doris Walkowiak 2010

Linienpektrum und Bohrsches Atommodell

Daraus ergaben sich die möglichen Energieniveaus, wie sie im nebenstehenden Schema eingezeichnet sind:



© Doris Walkowiak 2010

Linienpektrum und Bohrsches Atommodell

Lymen: $n = 1$

Balmer: $n = 2$

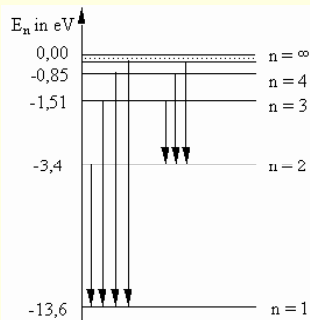
Paschen: $n = 3$

...

Balmerserie:

- Übergänge von $m = 3, 4, 5, \dots$ zu $n = 2$
- dabei ausgestrahltes Licht liegt zum Teil im sichtbaren Bereich

[Applet](#)



© Doris Walkowiak 2010

Verdienste Bohrs

- Bruch mit Vorstellungen der klassischen Physik an bestimmten Stellen (strahlungsfreie Bahnen, nur bestimmte Energiewerte)
- Möglichkeit, die Entstehung der Spektren zu erklären
- theoretische Herleitung des Wasserstoffspektrums wurde möglich



© Doris Walkowiak 2010

Grenzen des Bohrschen Atommodells

- Welleneigenschaften wurden nicht berücksichtigt
- theoretische Beschreibung ist nicht bei allen Atomen möglich (vor allem außer 1. Hauptgruppe)
- Kugelform der Atome wurde nicht erkannt, Bohr legte Kreisbahnen in einer Ebene zu Grunde
- exakte Bahnrechnungen stehen im Widerspruch zur Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation
- u. a. m.



© Doris Walkowiak 2010

Übung

- Wasserstoffatome sollen bis zum 4. Energiezustand angeregt werden. Wie viele verschiedene Wellenlängen sind zu erwarten? Durch welche Übergänge entstehen dabei die größte und die kleinste Wellenlänge? (1875 nm; 97 nm)
- Bei einem Atom finden Übergänge zwischen den Energiezuständen $E_5 > E_4 > E_3$ statt. Dabei werden gemessen:
 $4 \rightarrow 3$: 496 nm
 $5 \rightarrow 3$: 320 nm
 Wie groß ist die Wellenlänge beim Übergang $5 \rightarrow 4$? (902 nm)
- S. 411 (1-3)



Quelle: VuW, Physik Sek II

© Doris Walkowiak 2010

Resonanzabsorption

- Absorption einer Strahlung durch Atome oder Atomkerne, wenn die Energie der Strahlung mit den Anregungszuständen des absorbierenden Materials (*Resonanzenergie*) übereinstimmt.
- Atom nimmt genau den Energiebetrag auf, welcher der Differenz zweier Energieniveaus entspricht.
- Wenn die Energie eines Photos genau diesem Betrag entspricht, wird es absorbiert
→ Resonanzabsorption ($f_E = f_0$)



© Doris Walkowiak 2010

Franck-Hertz-Versuch

Ziel: Anregung von Gasatomen durch Energiezufuhr

Thermische Anregung:

- Durch hohe Temperaturen erhalten einige Gasatome eine so hohe E_{kin} , dass sie einen bestimmten Energiebetrag bei Stößen an andere Atome abgeben und diese so anregen.

Anregung durch Licht

- Bestrahlung mit Licht solcher Frequenzen, die die Atome bei Rückkehr in den Grundzustand aussenden würden. Bei Bestrahlung mit weißem Licht fehlen dann die entsprechenden Frequenzen (Absorptionsspektrum).

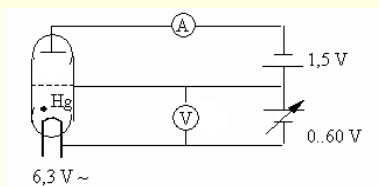
Anregung durch Elektronenstöße (Franck-Hertz-Versuch)

- Durch den Zusammenstoß von Elektronen mit Gasatomen können letztere einen bestimmten Energiebetrag aufnehmen.



© Doris Walkowiak 2010

Franck-Hertz-Versuch



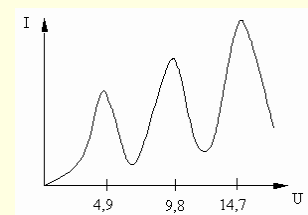
- Die Röhre mit dem Quecksilber wird auf etwa 500 K (bei uns 200°C) erwärmt → Das Quecksilber verdampft teilweise.
- Die aus der geheizten Katode heraustretenden Elektronen werden zum Gitter hin beschleunigt, wobei durch die Anode ein Gegenfeld eingestellt werden kann.
- Die Anzahl der zur Anode gelangten Elektronen kann an Stromstärke abgelesen werden.



© Doris Walkowiak 2010

Franck-Hertz-Versuch

Die Stromstärke steigt bis 4,9 V an. Bei einer Erhöhung über 4,9 V sinkt sie plötzlich wieder ab, steigt erst ab etwa 6 V wieder an, fällt dann bei 9,8 V erneut ab usw.

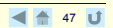


© Doris Walkowiak 2010

Franck-Hertz-Versuch

Erklärung:

- Die Elektronen treffen auf ihrem Weg zur Anode mit den Quecksilberatomen zusammen
- Jeweils in Schritten von 4,9 eV können sie diesen Energiebetrag an die Atome abgeben und in dadurch in den ersten angeregten Zustand bringen.
- Die dem Elektron verbleibende Energie reicht nicht mehr aus, um dieses zur Anode zu beschleunigen → Strom sinkt.
- Bei höherer Spannung reicht dann irgendwann die Energie wieder aus und der Strom steigt wieder.
- Bei 9,8 V geben einige Elektronen ihre Energie bei zwei Stößen an die Quecksilberatome ab.
- usw.
- Die angeregten Quecksilberatome kehren nach kurzer Zeit wieder in ihren Grundzustand zurück und senden dabei UV-Licht aus.



© Doris Walkowiak 2010

Bedeutung des FHV

- weiterer wichtiger Beleg für die Existenz diskreter Energiezustände in der Elektronenhülle
- Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

Aufgabe:

Bei der abgewandelten Durchführung des FHV fand an Stelle von Quecksilberdampf Argon Verwendung. Das erste Absinken der I-U-Kurve wurde bei 11,6 V festgestellt. Welche Frequenz besitzt das dadurch verursachte Licht? In welchem Spektralbereich tritt es auf?

$$e \cdot U = h \cdot f \rightarrow f = e \cdot U / h = 2,805 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = 107 \text{ nm} \rightarrow \text{UV-Strahlung}$$



© Doris Walkowiak 2010

Elektronen im Potentialtopf

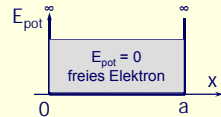
- linearer Potentialtopf: Elektron ist in einem lang gestreckten Körper der Länge a eingeschlossen
- innerhalb des Topfes keine Kräfte
- Energie der Elektronen in einem Potentialtopf der Breite a mit unendlich hohen Wänden ist quantisiert. Sie kann nur die Werte

$$\Delta E = \frac{h^2}{8ma^2} n^2 \quad (n = 1; 2; 3; \dots)$$

annehmen, die durch die Quantenzahl n gekennzeichnet werden.

- Energieaustausch:

$$\Delta E = \frac{h^2}{8ma^2} (m^2 - n^2)$$



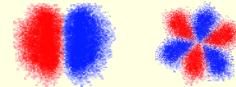
http://www.leifiphysik.de/web_ph12/lesestoff/10quantenatom/lin_potential.htm



© Doris Walkowiak 2010

Moderne Atommodelle

- Atommodell der Quantenphysik, welches dem Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte besser gerecht wird
→ kompliziertes Gebilde mathematischer Gleichungen
- **Orbitalmodell:** Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen (Orbital = Raum, in dem sich das Elektron mit mindestens 90 %-iger Wahrscheinlichkeit aufhält)



- **Pauli-Prinzip**

[Video: Darstellung Orbitale](#)

[Video: Erläuterung Orbitale](#) (3:00)

Physik 2000 – Science Trek - Quantenatom



© Doris Walkowiak 2010

Lumineszenz

- Anregen von Atomen durch Photonen → Licht anderer Frequenz wird ausgesendet

Fluoreszenz:

- Energie des anregenden Photons ist größer als die des emittierten Photons

Phosphoreszenz:

- Anregung durch energiereiches Photon
- Übergang in ein niedrigeres metastabiles Niveau
- durch thermische Anregung Übergang in ein noch niedrigeres Niveau
- Aussenden der beobachteten Strahlung

Metzler S. 431



© Doris Walkowiak 2010

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

spontane/induzierte Emission:

- **spontan:** Das angeregte Atom geht nach sehr kurzer Zeit (10^{-8} s) in seinen Grundzustand zurück
- **induziert:** Manche Elektronen bleiben relativ lange (10^{-2} s) auf dem höheren Energieniveau (metastabiler Zustand) und müssen erst stimuliert werden, um in den Grundzustand zurückzukehren
→ viele Atome können sich gleichzeitig im angeregten Zustand befinden und die Elektronen kehren dann nach der Stimulation gleichzeitig in den Grundzustand zurück
→ starke Leuchtwirkung
→ Grundprinzip des Lasers

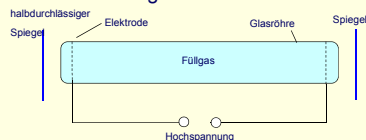
[Video](#)



© Doris Walkowiak 2010

Gas-Laser (z. B. He-Ne-Laser)

- mit Helium und Neon gefülltes Glasrohr und niedrigem Druck



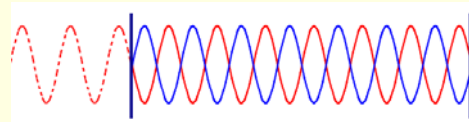
- durch Gasentladung wird ein Teil der Atome ionisiert → Ionen, Elektronen
- Elektronen stoßen mit He- und Ne-Atomen zusammen → angeregte Zustände
- angeregte He-Atome stoßen außerdem noch mit den angeregten Ne-Atomen zusammen → nochmaliges Anheben des Energieniveaus der Ne-Atome



© Doris Walkowiak 2010

Gas-Laser (z. B. He-Ne-Laser)

- induzierte Emission (Stimulierung durch spontane Emission eines Lichtquants, welches von einem der angeregten Atome angestrahlt wird) ==> verstärkte Photonenstrahlung



- Durch zwei Spiegel (einer davon ist halbdurchlässig) an den Enden der Röhre (optischer Resonator) werden die Photonen ständig hin- und herreflektiert (stehende Welle entsteht), wobei immer ein Teil durch den halbdurchlässigen Spiegel nach außen gelangen kann
→ Lichtverstärkung in nur eine Richtung



© Doris Walkowiak 2010

Feststofflaser (z. B. Rubinlaser)

- besteht aus einem Rubinstab, der an beiden Enden planparallel geschliffen und verspiegelt ist, einer davon halbdurchlässig
- Rubin ist ein sehr guter Isolator
- Anregung zum Leuchten durch Blitzlampen, wobei die ausgesandten Photonen die Elektronen aus dem Rubin herauschlagen, beim Zurückspringen auf eine niedrigere Schale senden sie Licht aus
- der Rest funktioniert im Prinzip wie beim Gas-Laser
- da das Blitzlicht nur kurzzeitig erzeugt werden kann, werden nur kurze Laser-Impulse ausgesandt
- diese sind besonders energiereich
- durch die kurzen Impulse erwärmt sich bei Anwendung des Lasers die Umgebung kaum → wichtig für medizinische Zwecke



© Doris Walkowiak 2010

Eigenschaften des Laserlichts

- nahezu paralleles Lichtbündel entsteht (auf 10 km ca. 1,5 m Verbreiterung) → geringe Abschwächung auch auf großen Entfernung (Mond!)
- extrem monochromatisch (sehr konstante Frequenz)
- sehr gute Kohärenz
- vollständig linear polarisiert
- große Energiekonzentration (kurzzeitig Leistungen von $>10^{12}$ W)

© Doris Walkowiak 2010

Anwendungen Laser

- Längenmessung (gekoppelt mit Interferometer Genauigkeiten bis auf Bruchteile der Lichtwellenlänge möglich)
- Nachrichtentechnik (Aufmodulation von sehr vielen Informationen möglich, relativ störungsempfindlich)
- Medizin, Biologie (Zellforschung, Operationsskappell, Abtöten einzelner Zellen ...)
- Holografie (nur möglich bei strengem monochromatischem Licht)
- Technik (Schweißen, sehr feine Löcher bohren ...)

© Doris Walkowiak 2010

Quellen/Links

- [Zentrale für Unterrichtsmedien](#)
- [Walter Fendt](#)
- [KworkQuark](#)
- [Physik 2000](#)
- [Physikon](#)
- [Vortrag von Christfried-Alexander Kurz \(Uni Bayreuth\) zum Elektronenmikroskop](#)
- www.quantenwelt.de
- www.quanten.de
- Download [Atomos](#)

© Doris Walkowiak 2010

Witz

Werner Karl Heisenberg war mit seinem Wagen auf der Autobahn unterwegs und wurde von zwei Polizisten angehalten. Einer fragte Heisenberg, nachdem er ausgestiegen war und sich umgesehen hatte: „Herr Professor Heisenberg, wissen Sie eigentlich wie schnell Sie gerade gefahren sind?“ Heisenberg sieht die beiden Polizisten verschmitzt an und meint: „Nein! Aber wenigstens weiß ich, wo ich bin!“

© Doris Walkowiak 2010