

## Atome, Fortsetzung

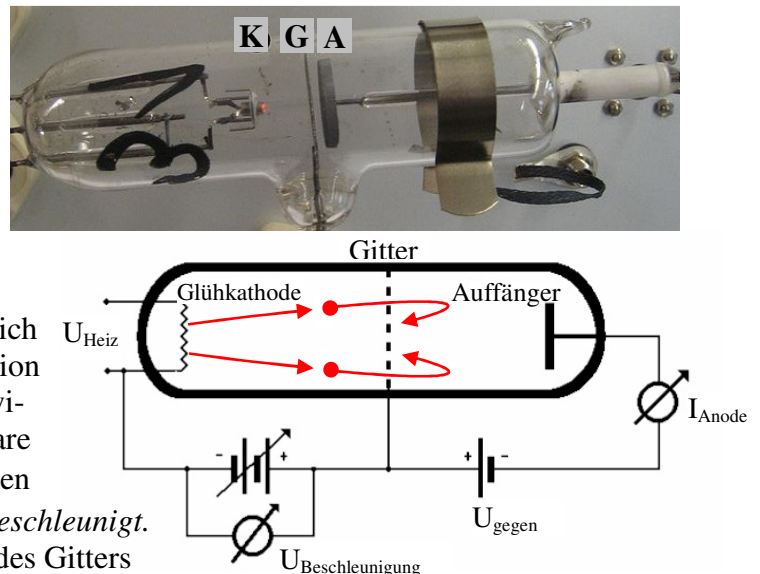
### 13) Der Franck-Hertz-Versuch

#### a) Nils Bohr, Theodore Lyman, James Franck und Gustav Hertz

Nils Bohr entwickelte 1913 sein Atommodell für das *Wasserstoffatom* nach dem Konzept von Max Planck so, dass die 1906 von Lyman gemessenen *optischen* Spektrallinien gemäß Einsteins Formel  $W = h \cdot f$  den Differenzen der Energieniveaus entsprachen. Eine theoretische Begründung gelang erst viel später im Jahre 1924 durch die Materiewelle von deBroglie: Nur auf den Bohrschen Bahnen findet *konstruktive* Interferenz statt, ansonsten „löscht sich die Materiewelle selber aus“. Doch diese Begründung war zunächst noch nicht in Sicht. Bohrs Konzept war ganz frisch und wegen seiner willkürlichen Annahmen blieb unklar, ob es möglicherweise *nur* für Wasserstoffatome und *nur* für Photonenanregung sinnvolle Aussagen liefert. Daraus erklärt sich die Bedeutung des Franck-Hertz-Versuches. Kurz nach Bohr, im Jahre 1914, konnten die beiden für ein *anderes* Atom, nämlich für Quecksilber, und für eine *anderen* Anregungsmethode, nämlich für den Elektronenstoß, zumindest *ein* angeregtes diskretes Energieniveaus experimentell nachweisen. Das war ein erster Schritt, denn ein komplettes Energietermschema, wie es die Lyman-Serie geliefert hatte, war damit noch nicht entdeckt.

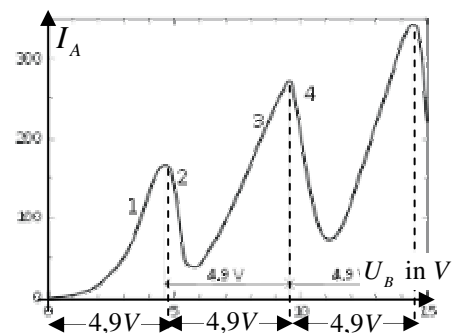
#### b) Franck-Hertz-Versuchsaufbau

Franck und Hertz konstruierten eine Röhre mit drei eingeschmolzenen Elektroden, einer Glühkathode K, einem Gitter G und einer Auffanganode A, alles aus Metall. Vor dem Evakuieren und Zuschmelzen wurde noch ein Tröpfchen Quecksilber (Hg) in den Glaskolben eingebracht. Durch Aufheizen verdampft ein Teil des flüssigen Quecksilbers. So lässt sich durch die Temperaturwahl die Konzentration der Hg-Atome in der Röhre einstellen. Zwischen Kathode und Gitter wird die regelbare Spannung  $U_B$  gelegt, welche die emittierten Elektronen von der Kathode zum Gitter *beschleunigt*. Etliche der Elektronen prallen auf Stege des Gitters und werden anschließend durch die Spannungsquelle zur Kathode zurückgeleitet. Interessant sind aber nur diejenigen Elektronen, welche zufälligerweise in den Bereich eines Gitterloches treffen und so durch das Gitter hindurch fliegen. Sie gelangen dann in den Bereich zwischen dem Gitter und der Auffanganode. Die Spannung  $U_g$  zwischen diesen beiden Elektroden ist jedoch nach der *Gegenfeldmethode* in *Gegenrichtung* gepolt, so dass die Elektronen zwischen G und A *abgebremst* werden.



#### c) Versuchsablauf

Nun stellt man eine kleine feste Gegenspannung  $U_g \approx 0,5V$  ein und regelt die Beschleunigungsspannung  $U_g$  langsam hoch. Sobald  $U_B$  dem Betrage nach  $U_g$  übertrifft, beginnt der Anodenstrom zu fließen.  $I_A$  wächst dann weiter an. Es ist bekannt, dass zunehmende Beschleunigungsspannung zunehmend mehr Elektronen aus der Elektronenwolke der Glühwendel abzieht.



Aber plötzlich, bei  $U_B = 4,9V$ , bricht der Strom ein und sinkt auf fast null ab. Zudem bildet sich zwischen K und G dicht vor

dem Gitter eine *Leuchtschicht*. Diese sieht man jedoch nur mit einem Wandler, denn die Lichtfarbe der Schicht liegt im Ultravioletten. Bei weiterem Hochregeln von  $U_B$  wächst der Strom erneut an und die Leuchtschicht wandert vom Gitter in Richtung Kathode. Bei  $U_B = 9,8V$  wiederholt sich das Spiel: Die Stromstärke sinkt tief ab und dicht vor dem Gitter bildet sich eine *zweite* Leuchtschicht aus. Alle  $4,9V$  wiederholt sich das Geschehen.

d) Erklärung.

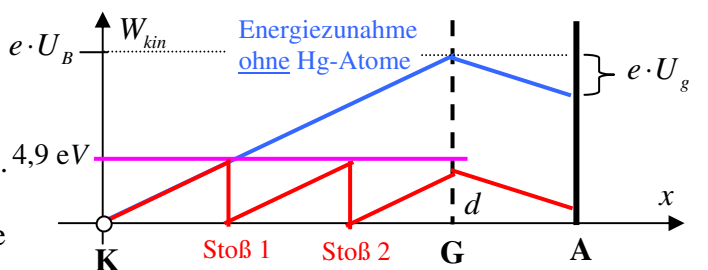
In einem Koordinatensystem liege die Glühkathode bei  $x = 0$  und das Gitter bei  $x = d$ . Liegt zwischen K und G die Spannung  $U_B$ , so gewinnt jedes Elektron auf der Beschleunigungsstrecke  $d$  die kinetische Energie  $W_{kin} = e \cdot U_B$ . Auf der halben Strecke  $d/2$  gewinnt das Elektron die halbe kinetische Energie  $e \cdot U_B / 2$ . Warum? Die Gesamtstrecke wirkt wie ein „Spannungsteiler“: Zwischen  $x = 0$  und  $x = d/2$  liegt die halbe Spannung und zwischen  $x = d/2$  und  $x = d$  liegt die andere Hälfte der Spannung. Auf jedem Teilabschnitt gewinnt das Elektron daher die kinetische Energie  $e \cdot U_B / 2$ . Also: Nicht die Geschwindigkeit  $v$  steigt linear an, wohl aber die kinetische Energie. Bei einer Spannung um  $U_B = 4,9V$  erreichen die Elektronen unmittelbar vor dem Gitter die Energie  $W_{kin} = e \cdot U_B = 1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 4,9V = 7,84 \cdot 10^{-19} J$ . Die Energiemaßeinheit Joule ist hier aber ungeschickt. Wir verwenden die Maßeinheit Elektronenvolt =  $eV$ . Zur Umrechnung teilt man den Joulewert durch  $1,6 \cdot 10^{-19}$ , man sieht: Beim Durchlaufen von  $4,9V$  gewinnt das Elektron die Energie  $W_{kin} = 4,9eV$ . Das zeigt, warum die Maßeinheit  $eV$  bei Elektronenbewegungen so viel geschickter ist.

Unterhalb der Beschleunigungsspannung  $U_B = 4,9V$ , also unterhalb der kinetischen Energie  $W_{kin} = 4,9eV$  geschieht nichts Sichtbares. Die Elektronen überwinden das Gegenfeld und erreichen die Anode, sodass der Anodenstrom fließt. Zwar treffen einige Elektronen durchaus die Hg-Atome, doch dabei behalten sie ihre Geschwindigkeit bei. Der Stoß ist *elastisch*. Sobald die Elektronen jedoch unmittelbar vor dem Gitter bei  $U_B = 4,9V$  die Energie

$W_{kin} = 4,9eV$  erreichen, sind sie in der Lage ihre kinetische Energie nach dem 1-zu-1-Prinzip jeweils auf *ein* Hg-Atom zu übertragen.

Also kann das Hg-Atom nur mit dem Energiewert  $4,9eV$  etwas anfangen.

Nur diesen Wert kann es nutzen, um in einen angeregten Zustand über zu gehen. Für die Elektronen handelt es sich dann um einen *inelastischen* Stoß, bei dem sie ihre Geschwindigkeit einbüßen und ihre Energie auf ein Hg-Atom zu übertragen.



Verlauf der kinetischen Energie der Elektronen mit Hg-Atomen

Die verbleibende, fast gegen null gehende, kinetische Energie reicht dann *nicht* mehr, das Gegenfeld zwischen G und A zu überwinden. Daher fällt die Stromstärke  $I_A$  auf fast null ab.

Beschleunigt man mit  $2 \cdot 4,9V = 9,8V$ , so haben die Elektronen schon auf der halben Strecke die Anregungsenergie  $W_{kin} = 4,9eV$  aufgebaut. Auf der zweiten Streckenhälfte können sie ein zweites mal schnell genug werden, um eine zweite Stoßanregung zu bewirken. Deshalb hat man bei  $U_B = 9,8V$  zwei Leuchtstreifen, einen in der Mitte und einen unmittelbar vor dem Gitter. Die Leuchtstreifen kommen zustande, wenn das angeregte Hg-Atom in den Grundzustand zurückfällt und seine Anregungsenergie in Form eines Photons abstrahlt. Bei  $2 \cdot 4,9V = 9,8V$  könnten die Hg-Atome mit  $9,8eV$  angeregt werden. Aber auch diese Energiedifferenz können sie nicht verwerten. Dass die Hg-Atome jeweils *nur* einfach und nicht doppelt oder dreifach angeregt werden, erkennt man an der Farbe des abgestrahlten Lichtes.

Alle Anregungsstreifen haben die gleiche Farbe. Ihre Frequenz beträgt  $f = \Delta W / h = 7,84 \cdot 10^{-19} J / 6,626 \cdot 10^{-34} Js = 1,18 \cdot 10^{15} Hz$ . Das liegt im UV-Bereich.

e) Welches Orbital wird bei Hg-Atom angeregt?

n	s	p	d	f	n	s	p	d	f	n	s	p	d	f	n	s	p	d	f	n	s	p	d	f
1	2			Pt	1	2			Au	1	2			Hg	1	2			Tl	1	2			Pb
2	2	6			2	2	6			2	2	6			2	2	6			2	2	6		
3	2	6	10		3	2	6	10		3	2	6	10		3	2	6	10		3	2	6	10	
4	2	6	10	14	4	2	6	10	14	4	2	6	10	14	4	2	6	10	14	4	2	6	10	14
5	2	6	9		5	2	6	10		5	2	6	10		5	2	6	10		5	2	6	10	
6	1				6	1				6	2				6	2	1			6	2	2		

Beim Hg-Atom ist die sechste Schale mit zwei 6s-Elektronen besetzt. Der Schalenaufbau zeigt für das nächst schwerere Thallium die einfache Besetzung des 6p – Orbitals. Deswegen dürfte bei der Stoßanregung im Franck-Hertz-Versuch der Übergang 6s → 6p angeregt werden.

**Material**

f) Bindungsenergie und Ionisationsenergie

Bzgl. des Vorzeichens ist die Begriffbildung ist hier leider nicht einheitlich.

Meist werden die beiden Energien jedoch positiv gezählt.

Die *Bindungsenergie* ist diejenige Energie, die frei wird, wenn sich zwei Komponenten exotherm verbinden. Fängt z.B. ein isoliertes Proton (Wasserstoffkern) ein Elektron ein, so entsteht ein Wasserstoffatom. Wir haben gelernt, dass dabei ein Photon mit der Rydbergfrequenz emittiert wird. Die Energie  $h \cdot R$  dieses Photons wird also bei der Bindung als

*Bindungsenergie* abgegeben. Also: Bindung:  $W(H^+ + e) \rightarrow W(H) + W_{Bind}$

Die *Ionisationsenergie* ist aufzuwenden, um die Komponenten wieder zu trennen.

Unser Beispiel: Wenn ein im Grundzustand befindliches Wasserstoffatom die *Ionisationsenergie*  $h \cdot R$  z.B. in Form eines Photons absorbiert, so wird das Wasserstoffatom ionisiert.

Also: Ionisierung:  $W(H) + W_{Ionis} \rightarrow W(H^+ + e)$ .

Wir sehen: *Bindungsenergie* und *Ionisationsenergie* haben denselben Zahlenwert, doch stehen die Begriffe in anderen Kontexten:

Die *Ionisationsenergie* muss aufgebracht werden, um die Bindung rückgängig zu machen.

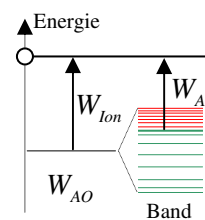
Für Atome mit mehreren Elektronen, gibt es eine ganze Serien von Ionisierungsenergien und zwar so viele, wie das Atom Elektronen hat. Die erste Ionisationsenergie ist aufzubringen, um ein erstes Elektron abzutrennen und das Atom X in  $X^+ + e$  zu überführen. Die zweite Ionisationsenergie ist für den Übergang  $X^+ \rightarrow X^{2+} + e$  aufzubringen, usw. Die Ionisationsenergien nehmen für alle Atome stark zu, denn die verbleibende Elektronenhülle schirmt den Atomkern immer weniger ab, so dass jede weitere Ionisation schwieriger wird.

g) Austrittsarbeit = Ablösearbeit = Ablöseenergie  $W_A$

Während sich Bindungs- und Ionisationsenergie (bei uns) auf *einzelne isolierte Atome* beziehen, bezieht sich die Austrittsarbeit  $W_A$  auf das Ablösen eines Elektrons aus einem ungeladenen *Festkörper*. Wir kennen den Begriff vom Fotoeffekt, wo Elektronen aus einer Cäsium(Cs)- oder Zink(Zn)-Platte ausgelöst werden. Auch bei der Glühemission werden Elektronen aus einem Festkörper ausgelöst, nämlich aus Glühwendel.

Zunächst denkt man, dass die Austrittsarbeit  $W_A$  größer sein sollte als die Ionisationsenergie, denn die einzelnen Atome fügen sich ja unter *Energieabgabe*, also exotherm, zum Festkörper zusammen. Deswegen sollten die Elektronen im Festkörper insgesamt stärker an die Atomrümpfe gebunden sein als in den isolierten Atomen. Insgesamt stimmt das auch, in der Summe sinken die Energieniveaus bei der Festkörperbildung ab. Doch kann es

„Ausreißer“ geben: In Metallen ist das sog. Leitungsband tatsächlich so deformiert, dass der Besetzungsschwerpunkt zwar *unter*, das *höchste* besetzte Niveau jedoch *über* dem



Atomniveau liegt. Da die Ablösearbeit sich aber immer ein Elektron aus dem *höchsten* besetzten Niveau greift, gilt hier erstaunlicherweise  $W_A < W_{\text{ionis}}$ .

Metall	Na	Mg	Al	Ka	Ca	Pt	Au	Hg
$W_{\text{ionis}}$ in eV	5,14	7,65	5,99	4,43	6,11	8,96	9,23	10,47
$W_A$ in eV	2,75	3,66	4,16	2,3	2,87	5,65	5,10	2,49

## h) Aufgabe

Im Jahr 1925 wurden die deutschen Physiker James FRANCK (1882 - 1964) und Gustav HERTZ (1887 - 1975) für ihre experimentellen Forschungen auf dem Gebiet der Atomphysik mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

- (a) Skizziere den Versuchsaufbau (inkl. Messgeräte) zum Elektronenstoß-Versuch im FRANCK-HERTZ-Rohr. Beschrifte die wesentlichen Teile.  
Beschreibe knapp die Versuchsdurchführung.
- (b) Fertige eine Skizze des charakteristischen  $U_B - I_A$  -Diagramms an.  
Zeichne darin auch den ungefähren Verlauf der Kennlinie ein, die man erwarten würde, wenn zwischen Elektronen und Quecksilberatomen nur elastische Stöße auftreten könnten.  
Begründe den unterschiedlichen Kurvenverlauf.  
Begründe, dass der Strom  $I_A$  erst einsetzt, sobald  $U_B$  dem Betrage nach  $U_g$  übertrifft.
- (c) Bei Zimmertemperatur ist in der Röhre Quecksilber in flüssigem Zustand zu sehen.  
Erkläre kurz, warum zur Aufnahme der Messkurve die Röhre beheizt werden muss.
- (d) Nach Anregung der Quecksilberatome auf ein Niveau von 4,9eV über dem Grundzustand geht die Mehrzahl direkt wieder in den Grundzustand über.  
Erkläre die Leuchtstreifen.  
Berechne die Wellenlänge der damit verbundenen Strahlung.  
Nenne den dazugehörigen Wellenlängenbereich.
- (e) Das Bohrsche Atommodell war zur der Zeit als Franck und Hertz ihre Versuche durchführten noch fast unbekannt. Und somit war auch unbekannt, dass Atome angeregt werden können. Franck und Hertz wollten nicht die Anregungsenergie, sondern die Ionisationsenergie einatomiger Gase erforschen.  
Recherchiere, warum Quecksilber als Gas einatomig ist.  
Erläutere Unterschiede bzw. Übereinstimmungen zwischen den Begriffen Bindungsenergie, Ionisationsenergie, Anregungsenergie und Ablöseenergie.  
Kläre, anhand der Tabelle im Material, welche Energie Franck und Hertz in ihrem Versuch nicht gemessen haben können.