

# Der Franck–Hertz-Versuch (B. S. 400ff.)

Der Franck–Hertz-Versuch illustriert die Quantelung des Energieübertrags. Anstatt dass eine kontinuierliche Leuchtverteilung sichtbar ist, beobachtet man nämlich isolierte Schichten, wie weiter unten genauer erklärt.

## 1 Unterteilung in drei Bereiche

### 1.1 Beschleunigung der Elektronen

Elektronen, die aus einer Heizspirale austreten, gelangen zunächst zu einer Katode, an der sie über eine Beschleunigungsspannung beschleunigt werden. Dabei finden Stöße zwischen den Elektronen und den Gasteilchen statt.

### 1.2 Stoß mit Gasteilchen

Übersteigt die Elektronenenergie einen bestimmten Schwellenwert, so ist ein solcher Stoß inelastisch; es wird also (ein Teil) der kinetischen Elektronenenergie auf das Gasteilchen übertragen.

Dies hat zur Konsequenz, dass zum einen das Gasteilchen Licht aussendet, und zum anderen, dass das Elektron abgebremst wird, da es ja (einen Teil) seiner kinetischen Energie verloren hat.

Ist die Elektronenenergie geringer als der Schwellenwert, so ist ein solcher Stoß elastisch; das Elektron verliert keine Energie, es findet kein Energieübertrag statt und es wird kein Licht ausgesendet.

Je nach Höhe der Beschleunigungsspannung haben nach einem inelastischen Stoß abgebremste Elektronen die Möglichkeit, erneut zu beschleunigen.

Ob ein Stoß mit einem Gasteilchen stattfindet, „hängt vom Zufall ab“, ist also stochastisch verteilt. Es gibt immer Elektronen, die – möglicherweise obwohl ihre kinetische Energie den Schwellenwert weit übertrifft – nicht mit Gasteilchen stoßen.

### **1.3 Situation am Gitter**

Am Gitter kommen alle Elektronen an; bei den Stößen werden keine Elektronen vernichtet. Die Stromstärke direkt am Gitter zu messen, ist daher wenig sinnvoll.

Interessanter ist es, wenn man fragt, wie viele Elektronen eine bestimmte Energie besitzen. Es ist tatsächlich möglich, diese Frage zu klären, indem man nach dem Gitter eine Gegenspannung (Anodenspannung) anlegt und den Strom nach der Gegenspannung misst.

Die Gegenspannung wird dabei nur von Elektronen komplett durchlaufen, deren kinetische Energie größergleich der zum Durchlaufen der Gegenspannung benötigten Energie ist.

Zweckmäßigerweise gibt man die Elektronenenergie in Elektronenvolt und die Höhe der Gegenspannung in Volt an; damit wird der Zusammenhang unmittelbar klar: Hat ein Elektron beispielsweise eine Energie von  $5\text{ eV}$ , so kann es eine Gegenspannung der Höhe  $5\text{ V}$  durchlaufen.

## **2 Klassische Erwartung vs. tatsächliche Messergebnisse**

### **2.1 Klassische Erwartung**

Im Modell der klassischen Physik ist der Energieübertrag nicht quantelt. Das bedeutet, dass, wenn immer ein Elektron mit einem Gasteilchen stößt, Licht ausgesendet wird und das Elektron seine gesamte kinetische Energie verliert.

Sichtbar müsste also ein kontinuierlicher Verlauf der Leuchterscheinung sein; nahe an der Katode müsste die Lichtintensität gering sein, da die beschleunigende elektrische Kraft der Beschleunigungsspannung effektiv nur kurz wirken konnte. Entsprechend müsste mit zunehmender Entfernung von der Katode die Intensität zunehmen.

Die Höhe der Beschleunigungsspannung dürfte nur die Intensität der Leuchterscheinung bestimmen, nicht aber, ob sie überhaupt stattfindet oder nicht.

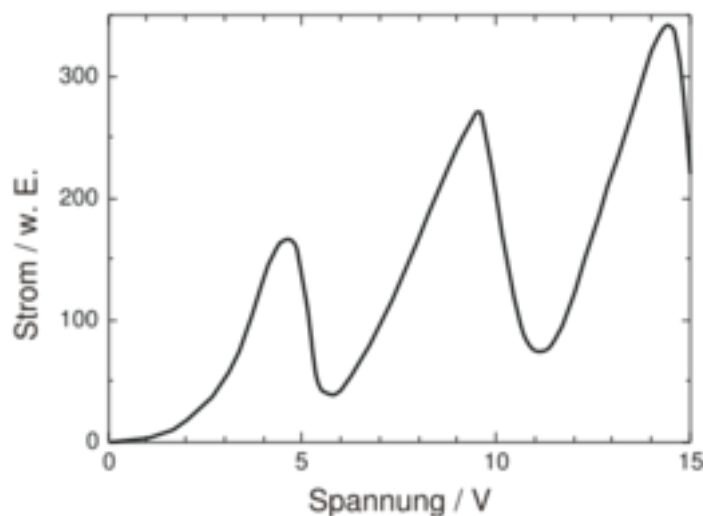
## 2.2 Tatsächliche Messergebnisse

Tatsächlich aber hat die Beschleunigungsspannung qualitativen Charakter:

1. Ist die Elektronenenergie kleiner als der Schwellenwert, so findet kein Energieübertrag statt; die Elektronen werden nicht abgebremst.
2. Entspricht die kinetische Energie genau dem Schwellenwert, so wird die kinetische Energie vollständig auf das Gasteilchen übertragen; es kommt zur Aussendung von Licht und das Elektron wird vollständig abgebremst.
3. Ist die kinetische Energie höher als der Schwellenwert, so wird Energie in Portionen des Schwellenwerts aufgenommen. Die übrige Energie bleibt dem Elektron als kinetische Energie erhalten.

## 2.3 $I_{\text{Anode}}-U_{\text{Beschl.}}$ -Diagramm

Zu den im letzten Abschnitt dargestellten Schlussfolgerungen kommt man durch Betrachten des  $I_{\text{Anode}}-U_{\text{Beschl.}}$ -Diagramms. Dabei trägt man nach rechts die (verstellbare) Beschleunigungsspannung  $U_{\text{Beschl.}}$  und nach oben die Stromstärke  $I_{\text{Anode}}$ , gemessen nach der Gegenspannung, auf.



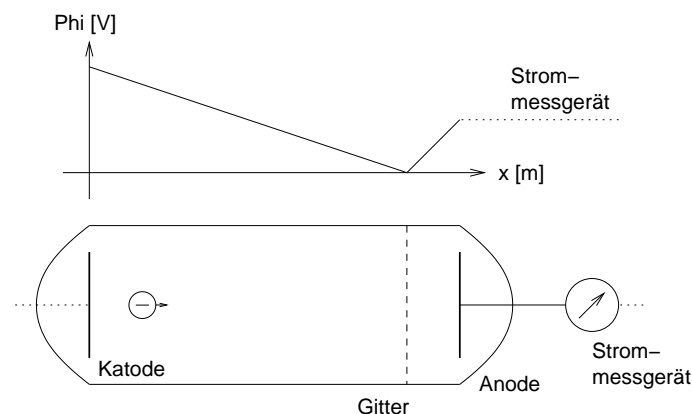
$I_{\text{Anode}}$  ist in dem Bereich, in dem  $U_{\text{Beschl.}}$  kleiner als die Gegenspannung ist, Null.

Ab  $U_{\text{Beschl.}} \geq U_{\text{Gegen}}$  müssten die Messergebnisse klassisch betrachtet eine streng monoton wachsende Kurve bilden: Je höher die Beschleunigungsspannung, desto mehr Elektronen müssten die Gegenspannung überwinden.

Diese Voraussage des Modells beschreibt die Wirklichkeit aber nicht treffend. Tatsächlich nimmt der Anodenstrom zwar durchaus zu, sinkt dann aber wieder fast auf 0 A ab. Modern beschreibt man dieses Versuchsergebnis dadurch, indem man die Quantelung des Energieübertrags fordert. (Vgl. Punkte 1. und 2. des vorigen Abschnitts.)

Ab dem Punkt, an dem die Stromstärke fast 0 A erreicht hat, steigt der Anodenstrom wieder – die Beschleunigungsspannung ist groß genug, um Elektronen nach einem inelastischen Stoß wieder so weit zu beschleunigen, dass sie die Gegenspannung überwinden können.

### 3 Veranschaulichung durch Betrachtung des Potenzialverlaufs



Anschaulich kann man sich den Potenzialverlauf als schiefe Ebene vorstellen: An der Katode „rollen“ die Elektronen „herunter“, ab dem Gitter „rollen“ sie „hinauf“. Jedes Elektron, das den Bereich nach dem Ende der Gegenspannung erreicht hat, wird am Anodenstrommessgerät registriert.

Die Stöße kann man sich nun als besondere Hindernisse vorstellen, die die Bedingungen der Energieübertragsquantelung erfüllen.

Diese Modellvorstellung ist äußerst tragfähig. Wichtig ist, dass man nicht vergisst, dass die Elektronen nicht etwa nach oben oder nach

unten rollen, sondern dass die „Bewegung“ vielmehr in  $\frac{V}{m}$ -Richtung stattfindet.

## **4 Fragen und Antworten**

### **4.1 Wieso erreicht der Anodenstrom bei bestimmten Höhen der Beschleunigungsspannung nur beinahe Null?**

Weil es – stochastisch verteilt – immer Elektronen gibt, die zufälligerweise gar nicht mit Gasteilchen zusammenstoßen oder nur elastische Stöße durchführen.

### **4.2 Wie verändert sich das Leuchtmuster mit höherer Beschleunigungsspannung?**

Zum einen nimmt die Zahl der Leuchtschichten zu, und zum anderen verschieben sich die Streifen in Richtung der Katode.

### **4.3 Wieso ist der Druck im Glaskolben sehr niedrig?**

Der Gasdruck ist deshalb so niedrig – typischerweise zwischen 10 mbar und 20 mbar –, damit genug Elektronen so beschleunigt werden können, damit sie die Gasteilchen anregen können.

Zwar sind die Stöße bei kinetischen Elektronenenergien unterhalb des Schwellenwerts zwar eigentlich vollständig elastisch, bei sehr vielen Stößen ist aber der Energieverlust, der sonst vernachlässigbar wäre, wohl doch entscheidend.

### **4.4 Wieso beschleunigt man nicht nur die Elektronen, sondern baut zusätzlich eine Gegenspannung mit ein?**

Weil man messen will, wie viele Elektronen eine bestimmte Energie besitzen. Würde man ohne Gegenspannung ein Strommessgerät nach dem Gitter einsetzen, wäre der erhaltene Wert von geringer inhaltlicher Bedeutung: Es ist uninteressant, wie viele Elektronen aus der Katode austreten.

#### **4.5 Inwiefern ist die Aussage „Im Bild 404.1 sieht man die diskreten Energieniveaus von Neon“ missverständlich?**

Man sieht keine Energieniveaus – die ja eine rein abstrakte Größe des Modells sind –, sondern die Abbildung eines Musters von abwechselnd nicht leuchtenden Stellen und leuchtenden Stellen.

Sieht man über diese Missverständlichkeit hinweg, bleibt eine Ungenauigkeit: Die Schichten spiegeln nicht die Energieniveaus wieder, sondern bestimmte Energieniveauunterschiede.

(Außerdem ist es missverständlich, von „diskreten Schichten“ zu sprechen. Besser ist es wohl, die Schichten als „isoliert“ zu bezeichnen – mit „diskret“ meint man üblicherweise eine diskrete Verteilung über der Frequenzachse, anstatt über der Ortsachse.)

#### **4.6 Wieso ist im Versuch mit Neongas der Schwellenwert der Energieübertragung viel größer als die Energie der Photonen des emittierten Lichts?**

Weil beim Versuch mit Neon nicht Resonanzabsorption stattfindet. Elektronen überspringen also einige Stufen, fallen dann so hinunter, dass ein Photon im sichtbaren Bereich des Spektrums ausgesendet wird, und emittieren den Rest der Energie dann über andere Frequenzen, die uns aber nicht weiter interessieren.

### **5 Ungeklärte Fragen**

- Gibt es für die Aussendungsrichtung bei der Abregung eine Vorzugsrichtung (ala HERTZscher Dipol) oder werden wirklich alle Raumrichtungen gleichermaßen bestrahlt?
- Gibt es einen besseren Begriff als „Resonanzabsorption“? Mich stört, dass nur „absorption“ im Begriff vorkommt, obwohl ja die Gleichheit der Absorptions- und Emissionsfrequenzen den Begriff definiert.

# Resonanzabsorption (B. S. 404)

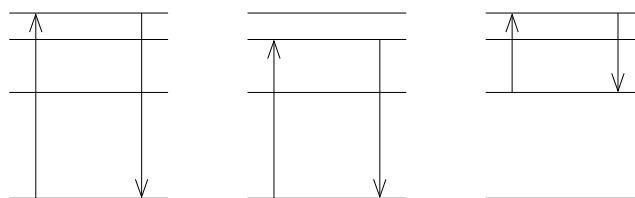
Unter Resonanzabsorption versteht man den Vorgang, dass zunächst ein Atom durch ein Photon bestimmter Frequenz angeregt wird und dann die aufgenommene Energie in Form eines Photons gleicher Frequenz wieder abgibt. Dabei gibt es wohl keine Vorzugsrichtung des Emissionslichts.

Kurz: Wenn eine Anregung in einem Schritt mittels Licht der Frequenz  $f_0$  durchgeführt wird, nennt man den Vorgang genau dann „Resonanzabsorption“, wenn die Energie beim Zurückfallen in einem Schritt durch Licht gleicher Frequenz  $f' = f_0$  abgegeben wird.

Die Konsequenzen der Resonanzabsorption kann man an einem einfachen Versuch erkennen: Das Spektrum von weißem Licht, das durch einen bestimmten Stoff geleitet wird, weist an den Stellen, an denen die  $\Delta E_n$  des Durchleitstoffes sitzt, Lücken auf, die zu den  $\Delta E_n$  gehörigen Frequenzen werden also ausgefiltert.

## Veranschaulichung durch Energieniveauschemen

Beispiele für Resonanzabsorptionen:



Beispiele für Nicht-Resonanzabsorptionen:

