

Leitprogramm

Quantenphysik

Stand 06. Dezember 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Masse und Impuls von Photonen	3
2	Röntgenstrahlung	4
2.1	Interferenz von Röntgenstrahlung (Bragg Reflexion)	5
2.2	Spektrum der Röntgenstrahlung	6
3	Elektronen als Quantenobjekte	8
3.1	Interferenz an Kristallen	8
3.2	Interferenz mit sich selber	10
4	Die Unschärferelation	11
A	Hinweise	12
B	Lösungen	13
	Literaturverzeichnis	15

Kapitel 1

Masse und Impuls von Photonen

Der Fotoeffekt ließ darauf schließen, dass Licht auch Teilchencharakter hat. Wenn dieses der Fall ist, müssen die als Photonen bezeichneten Lichtteilchen auch weitere Eigenschaften von Teilchen haben: Eine Masse und einen Impuls. Darauf wird im Text 5.2.4 im Buch auf der Seite 200 eingegangen.

Aufgaben 1.1

- a) Die Lichtmühle gilt fälschlicherweise als Nachweis für den Impulsübertrag von Licht. Bearbeiten Sie die Aufgabe 7 mit allen Teilaufgaben dazu, die auf der Seite 222 zu finden ist. [H](#) [L](#)
- b) Der rote Laserstrahl $\lambda = 633\text{ nm}$ eines Laserpointers mit einer Leistung von $P = 1\text{ mW}$ wird für eine halbe Minute auf ein Blatt gehalten. Bestimmen Sie, wie viele Photonen das Blatt mit welcher Gesamtmasse das Blatt getroffen haben. Diskutieren Sie, weshalb der Laserpointer dabei nicht »leichter« wird. [L](#)

Kapitel 2

Röntgenstrahlung

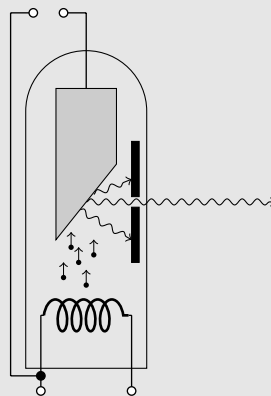
Röntgenstrahlung ist genauso wie sichtbares Licht eine elektromagnetische Welle, bzw. besteht aus Photonen. Den Prozess ihrer Erzeugung in modernen Röntengeräten kann man als Umkehrung des Fotoeffekts bezeichnen. Es werden Elektronen auf eine Anode beschleunigt. Beim Aufschlag auf die Anode wird die Energie der Elektronen in Röntgenphotonen umgewandelt.

Die Eigenschaften von Röntgenstrahlung und ihre Entstehung wird im Buch auf der Seite 273 in den Abschnitten 7.4.2 »Eigenschaften von Röntgenstrahlung« und »Aufbau eine Röntgenröhre« eingegangen.



Aufgaben 2.1

- a) Beschriften Sie den folgenden Aufbau einer Röntgenröhre und erklären Sie die Funktionsweise in eigenen Worten. **L**



- b) Bei alten Röhrenfernsehern wurde empfohlen, sich nicht direkt davor aufzuhalten. Erklären Sie diese Empfehlung und den Sachverhalt dahinter im Bezug auf Röntgenstrahlung. **H L**

2.1 Interferenz von Röntgenstrahlung (Bragg Reflexion)

Um eindeutig bestimmen zu können, dass es sich bei Röntgenstrahlung um Wellen handelt, muss man entsprechende Wellenphänomene nachweisen. Die Interferenz lässt sich bei Röntgenstrahlung aber nicht mit den aus der Optik bekannten Möglichkeiten nachweisen. Es liegt daran, dass die Wellenlänge zu klein ist um ein passendes regelmäßiges Gitter erzeugen zu können. Daher muss man auf Kristalle zurückgreifen. Die Atome in ihrem inneren haben eine sehr regelmäßige Anordnung wie ein Gitter.

Fällt nun die Strahlung auf den Kristall, so wird sie an den Atomen reflektiert. Dieses geschieht nicht nur an der obersten Atomlage des Kristalls, sondern auch an den mit dem Abstand d darunterliegenden Ebene. Dadurch kommt es zu einem Wegunterschied $2 \cdot \Delta s$ zwischen den auf verschiedenen Ebenen reflektierten Licht. Je nach Wegunterschied und der dadurch bedingten Phasenverschiebung, kommt es zur konstruktiven bzw. destruktiven Interferenz. Konstruktive Interferenz liegt dann vor, wenn gilt: $2 \cdot \Delta s = n \cdot \lambda$.

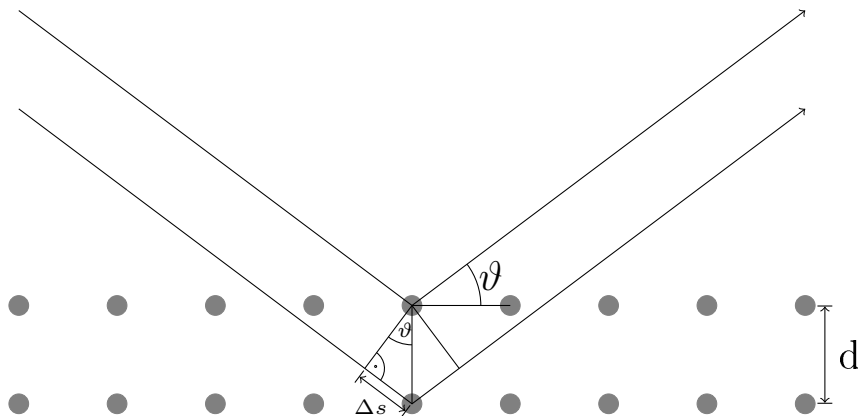


Abbildung 2.1: Reflexion von Strahlung an verschiedenen Ebenen eines Kristalls

In der Zeichnung ist die Reflexion von zwei parallelen Strahlen eingezeichnet, die mit dem Winkel ϑ einfallen. Zu beachten ist hierbei, dass bei dieser Reflexion der Winkel nicht vom Lot aus gemessen wird. Die Strecke Δs in dem Dreieck ist die Gegenkathete zum Winkel ϑ mit dem Ebenenabstand d als Hypotenuse. Daher gilt: $\sin \vartheta = \frac{\Delta s}{d}$. Wird die oben aufgeführte Bedingung für konstruktive Interferenz hinzugenommen, so erhält man die Bragg'sche Gleichung:

$$\sin \vartheta = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot d}$$

Auf diese Weise ist es möglich, in Abhängigkeit vom Reflexionswinkel und mit Hilfe eines Detektors die Wellenlänge eines Röntgenstrahls zu untersuchen. Dieses setzt natürlich voraus, dass der Ebenenabstand für den eingesetzten Kristall bekannt ist.

 Aufgaben 2.2

- a) Geben Sie die Herleitung der Bragg'schen Gleichung mit ihren eigenen Worten und Zwischenschritten an.
- b) Eine Röntgenquelle wird mit 20 kV betrieben. Bestimmen Sie den Winkel unter dem man bei einem Netzebenenabstand von $d = 201 \text{ pm}$ die Photonen findet, die die komplette Energie aus der Beschleunigung übernommen haben. **L**

2.2 Spektrum der Röntgenstrahlung

Bei der Analyse des Spektrums der Röntgenstrahlung möchte man wissen, aus welchen Wellenlängen sich die Strahlung zusammensetzt. Dazu wird die Röntgenstrahlung auf einen drehbar gelagerten Kristall geschickt. Ein passender Detektor dreht sich dazu passend mit dem doppelten Winkel, damit nur der Anteil der entsprechenden Wellenlänge gemessen wird.

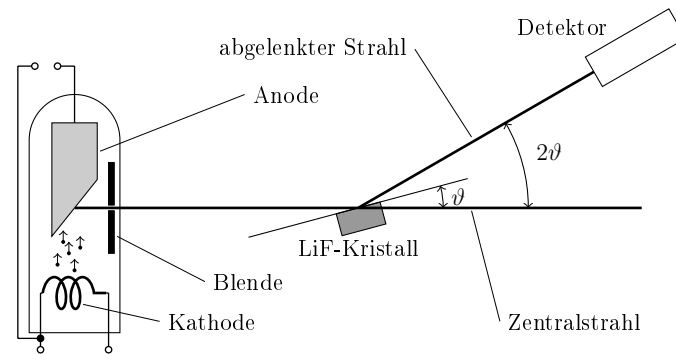


Abbildung 2.2: Aufbau zur Analyse des Spektrums der Röntgenstrahlung

Auf diese Weise lässt sich ein Diagramm der gemessenen Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge auftragen. Führt man für eine Röntgenröhre diese Messung mit verschiedenen Beschleunigungsspannungen durch, so erhält man ein typisches Muster, wie im folgenden idealistischen Diagramm (2.3) zu sehen.

 Aufgabe 2.3

Beschreiben Sie den Verlauf der einzelnen Kurven in dem Diagramm und die Kurven untereinander. Geben Sie eine Vermutung zum Verlauf der Kurve ab. **H L**

Im Buch auf der Seite 276 und 277 sind auch Spektren von echten Messwerten aufgetragen. Diese haben zwei oder mehr spezielle Peaks, die unter anderem auch vom Material der Anode abhängig sind. Ihre Bedeutung kann aber erst mit mehr Wissen über den Aufbau von Atomen erklärt werden.

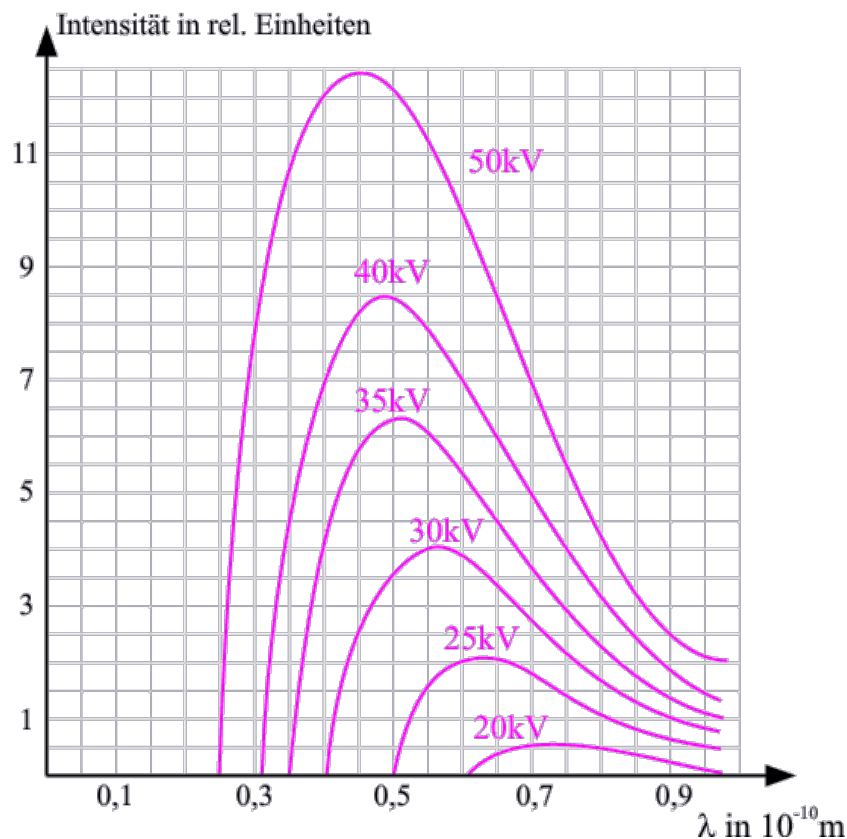


Abbildung 2.3: Spektrum einer Röntgenröhre aus <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-photon/ausblick>

Die Verschiebung des Beginns des Spektrums mit höherer Beschleunigungsspannung zu kleineren Wellenlängen hin, hat etwas mit der Energie der Elektronen zu tun. Ihr Energie bekommen sie fast ausschließlich durch die Beschleunigung. Wenn sie danach auf das Anodenmaterial treffen, können sie diese Energie an das entstehende Röntgenphoton abgeben. Dabei gilt weiterhin $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, so dass es eine Grenzwellenlänge gibt, die durch die Beschleunigungsspannung festgelegt wird.

Das der Hochpunkt bei einer noch größeren Wellenlänge liegt hat die Ursache darin, dass eine Teil der Energie der Elektronen in Wärme umgewandelt wird. Auch ist es möglich, dass es zu einer Aufspaltung kommt, so dass ein Elektron zwei Photonen auslöst.



Aufgaben 2.4

- a) Bearbeiten Sie im Buch auf der Seite 283 die Aufgabe 12. L
- b) Bearbeiten Sie im Buch auf der Seite 283 die Aufgabe 14. L

Kapitel 3

Elektronen als Quantenobjekte

Bisher wurde Licht, das erst einmal als Welle interpretiert wurde, auch Teilchencharakter zugeschrieben und die Lichtteilchen als Photonen bezeichnet. Da liegt es nahe, dass sich dieses auch umkehren lässt: Teilchen haben Wellencharakter. Am einfachsten lässt sich dieses an Elektronen zeigen und verdeutlichen.

Dabei wird den Elektronen die Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ zugewiesen. Diese wird als De-Broglie-Wellenlängen bezeichnet. Das Buch beschreibt dieses auf den Seiten 229 bis 231 inklusive eines Abschnitts über »Interferenz an einem Doppelspalt«, mit dem die Welleneigenschaften bestätigt werden.

Wie Elektronen ein solches Interferenzmuster erstellen kann man nur verstehen, wenn man sie beim Durchgang durch den Doppelspalt als Welle ansieht. Bleibt man beim Teilchenmodell, so muss man annehmen, dass das Teilchen wüsste, was passiert, wenn es durch den anderen Spalt gehen würde und dann mit diesem Abbild von sich selbst interferiert. Dieses ist daher wichtig, da auch ein Interferenzbild entsteht, wenn man über einen längeren Zeitraum immer nur einzelne Elektronen auf den Doppelspalt fallen lässt.

3.1 Interferenz an Kristallen

Wie im Buch beschrieben, muss man das Interferenzbild von Elektronen speziell vergrößern, um es überhaupt sichtbar zu machen. In der Schule gibt es aber ein Experiment, dass das Interferenzbild auch von Elektronen zeigt. Hierbei wird ein Polykristall aus Graphit mit dem Elektronenstrahl einer Elektronenkanone beschossen und das Ergebnis auf einem Fluoreszenzschirm sichtbar gemacht. Der Aufbau ist in der folgenden Graphik (3.1) verdeutlicht.

Der Polykristall besteht dabei aus vielen kleinen einzelnen Kristallen, die der Elektronenstrahl in verschiedenen Anordnungen trifft. Immer dann, wenn die Bragg-Bedingung zutrifft kommt es zur konstruktiven Interferenz in entsprechender Richtung. Dadurch

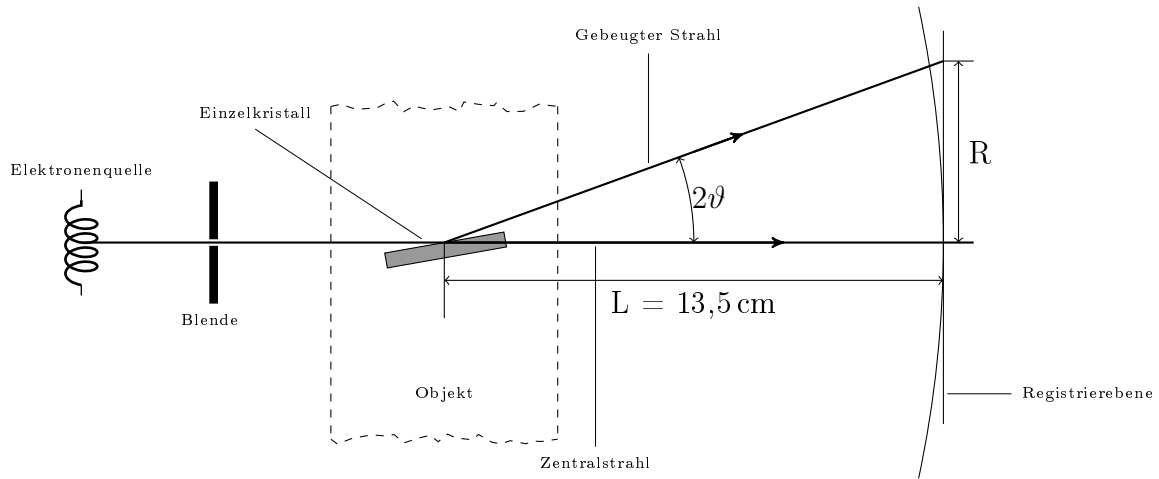


Abbildung 3.1: Aufbau zur Beugung von Elektronen

kommt es zu einer kreisrunden Anordnung des Interferenzmusters, wie in der Abbildung (3.2) zu sehen.

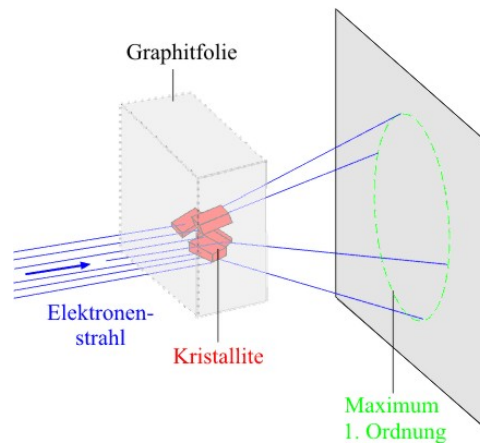


Abbildung 3.2: Herkunft der Interferenzringe aus <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche>

Graphit hat eine besondere der Atome, so dass es zwei verschiedene Netzebenenabstände aufweist. Dadurch gehören auch immer zwei Ringe zu einem Maximum.

Aufgaben 3.1

- a) Bei dem Experiment zur Beugung von Elektronen wurde eine Beschleunigungsspannung von $U = 5 \text{ kV}$ angelegt. Die Ringe der ersten Ordnung haben einen Radius von $r_1 = 1,1 \text{ cm}$ und $r_2 = 1,9 \text{ cm}$. Bestimmen Sie die beiden Netzebenenabstände. H L
- b) Bearbeiten Sie die Aufgabe 2 auf der Seite 233 im Buch. L

3.2 Interferenz mit sich selber

Kapitel 4

Die Unschärferelation

Anhang A

Hinweise

1.1 a a) Denken Sie an die Erhaltungssätze in der Physik.

b) Nutzen Sie aus, dass bei einer konstanten Kraft gilt: $W = F \cdot v$. Bedenke außerdem, dass eine Lampe in alle Richtungen abstrahlt. Die Oberfläche der Lichtmühle kann man mit ca. 8 cm^2 abschätzen.

c) –

d) –

[Zurück](#)

2.1 b Machen Sie sich vertraut mit dem Aufbau und der Funktionsweise eines Röhrenfernsehers. [Zurück](#)

2.3 Schauen Sie sich den Beginn des Spektrums genauer an. Gibt es Zusammenhänge zu anderen Größen? [Zurück](#)

3.1 a Nutzen Sie auch die Angaben aus der Zeichnung und stellen sie bekannte Formeln entsprechend um. [Zurück](#)

Anhang B

Lösungen

1.1 a) In allen Fällen gilt die Impulserhaltung. Auf der schwarzen Seite kommt es durch die Absorption Übertrag des kompletten Impulses (unelastischer Stoß). Auf der glänzenden Seite fliegt das Photon mit gleicher Geschwindigkeit wieder zurück (elastischer Stoß). Deshalb muss hier der doppelte Impuls auf die Flügel übertragen werden, damit weiterhin die Impulserhaltung gilt. Dadurch müssten sich die Seiten mit den glänzenden Flächen von der Lichtquelle wegbewegen.

$$b) P_{\text{auftreffen}} = 0,05 \cdot \frac{0,0008 \text{ m}^2}{4 \cdot \pi \cdot (0,5 \text{ m})^2} \cdot 100 \text{ W} = 0,00127 \text{ W}$$
$$F = 4,24 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

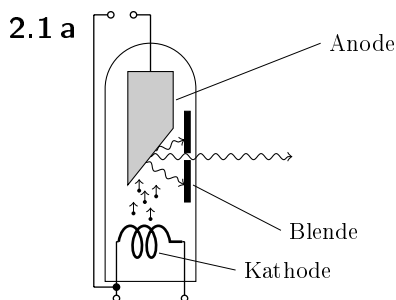
$$c) a = 8,48 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

d) Das restliche Gas vor den schwarzen Flächen wird erwärmt. Aufgrund der Brownschen Molekularbewegung stoßen auf diese Seite mehr Teilchen, als auf die glänzende Fläche, vor der sich das Restgas nicht so erwärmt.

[Zurück](#)

$$1.1 b) N = 9,55 \cdot 10^{16}$$

$$m_{\text{ges}} = 3,33 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \quad \text{Zurück}$$



[Zurück](#)

2.1 b Bei der Kathodenstrahlröhre im Fernseher werden auch Elektronen beschleunigt und auf dem Schirm geschossen. Bei dem dann folgenden Abbremsen auf dem Schirm kann es auch zu Erzeugung von schwacher Röntgenstrahlung kommen, wie beim Abbremsen auf der Anode in der Röntgenröhre. [Zurück](#)

2.2 b $\vartheta = 8,87^\circ$ [Zurück](#)

2.3 Alle Kurven beginnen jeweils ab einem Punkt steigen dann stark an zu einem Hochpunkt an um danach abzuflachen. Bei höherer Beschleunigungsspannung ist der Hochpunkt höher und liegt bei einer kleineren Wellenlänge. Dieses gilt auch für den Beginn der Kurve.

Das Spektrum beginnt erst bei einer Wellenlänge, die der Maximalenergie der Elektronen zugeordnet werden kann, die auf die Anode treffen. Da das Maximum bei größerer Wellenlänge liegt, wird wohl bei einer Vielzahl der Elektronen ein Teil der Energie für andere Prozesse genutzt, als der Photonenerzeugung. [Zurück](#)

2.4 a a) $1,54 \cdot 10^{-11}$ m

b) Dazu benötigen die Elektronen mehr Energie, die sie über $\lambda = \frac{h \cdot c}{U \cdot e}$ in ein Photon umwandeln können. Ihre Energie haben die Elektronen aber fast ausschließlich über die Beschleunigungsspannung U erhalten.

[Zurück](#)

2.4 b Da in einer normalen Messanordnung der Detektor nur im Bereich zwischen 0° und 90° bewegt werden kann, liegt der Einfallswinkel auf den Kristall zwischen 0° und 45° liegen. Bei 0° tritt aber keine Braggreflexion auf, so dass für die Rechnung 1° als kleinster Winkel herangezogen wird.

$d_{\min} = 0,108$ nm, $d_{\max} = 4,41$ nm [Zurück](#)

3.1 a ($d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10}$ m und $d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10}$ m) [Zurück](#)

3.1 b $x = 2,6$ μm [Zurück](#)

Literaturverzeichnis

[Physik Cornelsen Qualifikationsphase 2010] DIEHL, Bardo ; ERB, Roger ; HEISE, Harri ; KOTTHAUS, Udo ; LINDNER, Klaus ; SCHLICHTING, Hans J. ; SCHMALHOFER, Claus ; SCHÖN, Lutz-Helmut ; SCHRÖDER, Klaus ; SCHULZ, Helmke ; SCHULZE, Peter ; TEWS, Wolfgang ; TILLMANNS, Peter ; WINTER, Rolf: *Physik Oberstufe Qualifikationsphase*. 1. Aufl. Berlin : Cornelsen Verlag, 2010. – ISBN 978-3-06-013022-1