

# Übungen zur Vorlesung Mod. Experimentalphysik I

KIT, Sommersemester 2024

Prof. Dr. T. Müller, Dr. D. Hinz



---

Vorlesungen	Di 9:45 + Do 11:30, Gerthsen-Hörsaal 30.21
Übungen	Mo 8:00, 9:45, 11:30 (Anmeldung im Ilias)
Sprechstunde	Dr. Hinz: nach Vereinbarung (dominic.hinz@kit.edu)
Ilias	s.kit.edu/ex4ss24

---

## Übungsblatt 3 – Bearbeitung bis 13.05.2024

### (8) Photoelektrischer Effekt

Sie haben ein unbekanntes Material erhalten und haben die Aufgabe zu bestimmen, worum es sich dabei handelt. Sie beschließen die Austrittsarbeit (engl. work function) mittels der Gegenfeldmethode zu messen. Die tabellierten Austrittsarbeiten entnehmen Sie der Veröffentlichung von H. B. Michaelson, "The work function of the elements and its periodicity", *Journal of Applied Physics* 48, 4729 (1977) - auch im ILIAS zu finden. Hinweis: Die Austrittsarbeit ist sehr von der Kristallorientierung und der Oberflächenkontaminationen abhängig. Sie kann daher oft vom Literaturwert abweichen. Verwenden Sie für diese Aufgabe dennoch die Werte aus der Veröffentlichung.

- (a) Sie haben mehrere Lichtquellen zur Auswahl. Diskutieren sie die Vor- und Nachteile der einzelnen Quellen für die geplante Messung.
- Eine Kerze
  - Ein durchstimmbarer (d.h. die Wellenlänge kann verändert werden) IR-Laser mit sehr guter Energieauflösung und hoher Laserleistung
  - Ein großer Satz LEDs (255 nm bis 808 nm) in einem weiten Wellenlängenbereich
  - Eine UV Lampe mit nachgeschaltetem Gittermonochromator
  - Eine Röntgenröhre
- (b) Sie zeichnen folgende Gegenspannungen als Funktion der Wellenlänge auf. Bestimmen Sie aus dieser Messung die Austrittsarbeit und das dazugehörige Metall.

---

$\lambda$ (nm)	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
$U_0$ (V)	5,97	3,90	2,66	1,83	1,24	0,80	0,46	0,18	0	0

---

- (c) Wieso kann man mit dieser Messungen ebenfalls den Wert des Planckschen Wirkungsquantums bestimmen? Welchen Wert erhalten Sie und stimmt dieser mit dem Literaturwert überein?
- (d) Nun verdampfen Sie das Material und wollen auch in diesem Aggregatzustand den Photoeffekt messen. Überlegen Sie sich anhand ihrer bisherigen Physikkenntnisse, wie eine solche Apparatur aussehen könnte, um diese Messung durchzuführen.

- (e) Nun bemerken Sie, dass Sie für das verdampfte Material viel höhere Photon-Energien brauchen, um Elektronen zu erzeugen. Woher kommt dieser Unterschied?
- (f) Sie messen, dass der Wirkungsquerschnitt eine Kante bei 4,3 eV, eine weitere Kante bei 31,6 eV und sogar eine Kante bei 45,7 eV aufweist. Skizzieren und erläutern Sie den energieabhängigen Wirkungsquerschnitt.

## (9) Unschärferelation

### (a) Orts-Impulsunschärfe

Innerhalb des Wasserstoffatoms ist das Elektron nicht genau an einem Ort lokalisierbar. Nehmen Sie an, dass es sich *unscharf* innerhalb einer Kugel mit dem Bohr'schen Radius  $a_0 = 5.292 \cdot 10^{-11} \text{ m}$  befindet. Mithilfe der Unschärferelation lässt sich die kinetische Energie des Elektrons unter diesen Bedingungen abschätzen. Wie groß ist sie?

### (b) Energie-Zeitunschärfe

In Aufgabe 3 auf dem ersten Übungsblatt haben wir bereits die spontane (Photonen-) Emission eines atomaren Übergangs betrachtet. Wenn man nun die Emission spektroskopisch misst, so beobachtet man, dass diese Energie nicht beliebig scharf ist, sondern eine endliche Linienbreite besitzt. Woher resultiert diese Linienbreite? Wie breit ist die Linie? Wie ist die relative Breite? (*Hinweis: Alle notwendigen Angaben befinden sich in Aufgabe 3 im ersten Übungsblatt.*)

- (c) Wenn das Atom im angeregten Zustand mit einem anderen Atom stößt bevor es ein Photon emittiert, dann kann die Emission unterdrückt werden (z.B. nimmt das stoßende Atom die Energie als kinetische Energie auf). Dadurch wird die Linie neben der *natürlichen* Linienbreite (siehe vorherige Teilaufgabe) zusätzlich durch die intermolekularen Stöße verbreitert. Wie lässt sich das anhand der Unschärferelation erklären?

Welcher Druck muss in der Probenkammer herrschen, damit der zusätzliche Anteil durch die Stöße genauso groß ist, wie die natürliche Linienbreite? Vergleiche dazu die natürliche Lebensdauer mit der mittleren Zeit zwischen zwei Stößen. Bei dem Gas handelt es sich um Argon mit einem Atomradius von  $r_{\text{atom}} = 71 \text{ pm}$ . Die Temperatur beträgt  $T = 300 \text{ K}$ . (*Hinweis: Die mittlere freie Weglänge bezeichnet die mittlere Distanz, die ein Atom zwischen zwei Stößen zurücklegt,  $\ell = \frac{1}{n\sigma}$ .  $n$  ist die Teilchendichte und  $\sigma = \pi(2 \cdot r_{\text{atom}})^2$  ist der Stoß(wirkungs)querschnitt. Des Weiteren benötigen Sie die mittlere thermische Geschwindigkeit:  $v_{\text{therm}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ .)*

- (d) Welches der folgenden Systeme könnte man mit höherer Genauigkeit spektroskopieren (relative Genauigkeit), wenn man ein Messsystem mit beliebig guter Auflösung besitzt?
- Gamma-Strahlung aus einem Atomkern  $\tau \approx 10^{-15} \text{ s}$  bei ca. 2 MeV.
  - Übergänge in einem hochangeregten Atom (Rydberg-Atom) mit  $\tau \approx 1 \text{ s}$  bei ca. 2 eV.

## (10) Materiewellen

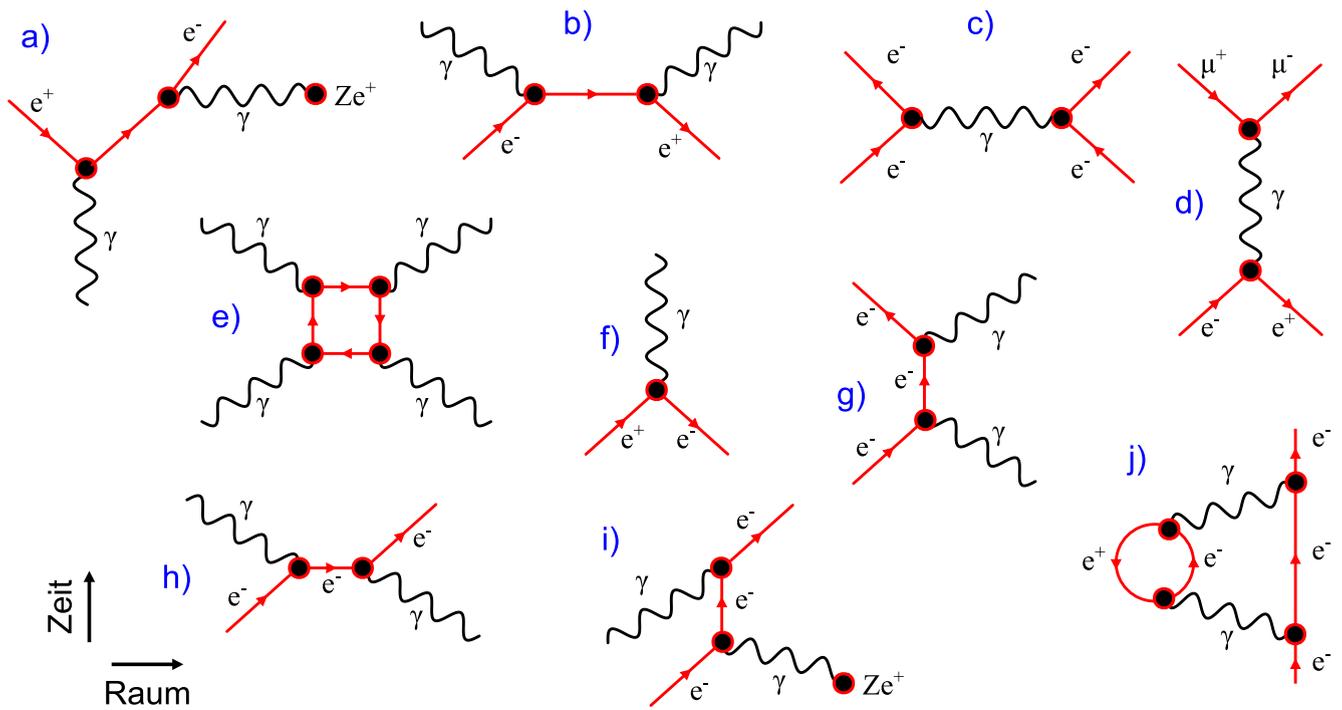
Das Debye-Scherrer-Verfahren ist ein weiteres Verfahren zur Untersuchung von Kristallstrukturen mit Röntgenstrahlung. In dieser Aufgabe werden statt Röntgenstrahlen Elektronen der Energie  $E_B$  auf eine Probe Graphit-Pulver geschossen und das Beugungsmuster auf einem dahinter positionierten Leuchtschirm beobachtet.

- (a) Auf dem Leuchtschirm zeigt sich ein helles Zentrum umgeben von mehreren konzentrischen Ringen. Erläutern Sie anhand einer Skizze und daraus abgeleiteten Formeln, wie es zu diesem Befund kommt.
- (b) Wie können Sie experimentell beweisen, dass es sich bei den gestreuten Teilchen tatsächlich um Elektronen handelt und nicht um Röntgenstrahlung, die durch den Elektronenbeschuss im Graphit entsteht?
- (c) Die Elektronen werden mit einer Beschleunigungsspannung  $U_B = 6,0 \text{ kV}$  beschleunigt. Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge.
- (d) Wie viele Ringe passen auf einen Leuchtschirm (kreisrund mit Durchmesser  $R = 10 \text{ cm}$ ) im Abstand von  $25 \text{ cm}$  von der Graphitprobe? Graphit besitzt zwei Gitterkonstanten mit  $d_1 = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  und  $d_2 = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ .
- (e) Mit die größten und schwersten Teilchen, für die bisher der Wellencharakter nachgewiesen wurde, sind Fullerene ( $C_{60}$ -Moleküle) (siehe Arndt et al (1999), Wave-particle duality of  $C_{60}$  molecules, *Nature* 401, 680-682). Warum ist der Nachweis von Materiewellen für solch beinahe-makroskopische Objekte so schwierig?
- (f) Ein Fulleren-Strahl mit der Temperatur  $1000 \text{ K}$  fällt auf ein Gitter mit Gitterkonstante  $g = 100 \text{ nm}$ . Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge für die wahrscheinlichste Fulleren-Geschwindigkeit. Nehmen Sie hierzu eine Maxwell-Boltzmann-Verteilung an. Im Abstand von  $1,5 \text{ m}$  befindet sich der Detektor. Wie gut muss die räumliche Auflösung des Detektors sein, um das 0. Maximum sicher vom 1. Maximum unterscheiden zu können?

### **(11) Virtuelle Teilchen und Feynmangraphen**

Feynmangraphen / Feynmandiagramme sind Hilfsmittel zur mathematischen Berechnung von Matrixelementen  $S_n$ , z.B. für Streuwirkungsquerschnitte. Die Wahrscheinlichkeit einer (Streu-)wechselwirkung kann dann wie folgt berechnet werden  $P = |\langle \psi_f | \sum_n S_n | \psi_i \rangle|^2$ , mit  $\psi_f$  und  $\psi_i$  als End- bzw. Anfangszustand. Dies wird intensiv in den Theorievorlesungen behandelt. Eines der wichtigsten Konzepte ist hierbei, dass jede Wechselwirkung durch Austausch von virtuellen Teilchen erfolgt. Photonen als Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft wechselwirken immer mit elektrisch geladenen Teilchen, wie Elektronen. Abbildung 1 zeigt verschiedene Feynmangraphen.

- (a) Markieren sie alle virtuellen Teilchen in einer Farbe, sowie alle realen Teilchen in einer anderen.
- (b) Welche Feynmangraphen repräsentieren ...
  - (a) ...die elastische Streuung von Elektronen?
  - (b) ...den photoelektrischen Effekt?
  - (c) ...die Bildung eines Myonenpaares nach Kollision eines Elektron-Proton-Paares?
- (c) Welcher Feynmangraph repräsentiert die Paarbildung? Gibt es eine Energieschwelle für diese Wechselwirkung? Falls ja, wie groß ist diese und weshalb?
- (d) Welcher Feynmangraph könnte die sogenannte Vakuumpolarization darstellen bzw. die Wechselwirkung eines Elektrons mit Vakuumfluktuationen? Wie werden solche Fluktuationen von der Kopplungskonstante  $\alpha$  abhängen?
- (e) Welche zwei Feynmangraphen repräsentieren die Compton-Streuung?



**Abbildung 1:** Verschiedene Feynmangraphen für elektromagnetische Wechselwirkungen.

- (f) Zwei Feynmangraphen bieten eine Möglichkeiten für Elektron-Positron-Annihilation. Welche sind das? Aus welchem Grund macht nur eines der beiden Diagramme physikalisch Sinn?
- (g) Welcher Feynmangraph zeigt eine Photon-Photon-Wechselwirkung? Könnte man dafür nicht auch einen einfacheren Feynmangraphen aufmalen? Wieso bzw. wieso nicht?
- (h) Die virtuellen Teilchen liegen nicht auf der Massenschale (d.h. man kann ihnen keine wohlbestimmte Masse zuweisen) und verletzen im Rahmen der Unschärferelation die Energieerhaltung. Was bedeutet dies für die Wechselwirkungsreichweite von virtuellen Photonen, Elektronen und schweren Bosonen (wie das W-Boson der schwachen Wechselwirkung mit einer Masse von 80 GeV)?

**(\*) Punkteverteilung**

Aufgabe	Teilaufgabe	Punkte
8	a, e	je 0,5
8	b, c, d, f	je 1
9	a, b, c, d	je 1
10	a, d, f	je 1
10	b, c, e	je 0,5
11	a-h	je 0,5

Bei Verständnisfragen gerne das Forum im ILIAS nutzen oder eine Mail an den Übungsleiter oder Tutor:in schreiben.