

# Übungen zur Vorlesung Moderne Experimentalphysik I

## KIT, Sommersemester 2019



Prof. Dr. G. Drexlin, Dr. K. Valerius, Dr. M. Schlösser, Dr. H. Seitz-Moskaliuk

---

Vorlesungen	Di 9:45 + Do 8:00, Gerthsen-Hörsaal
Sprechstunde	Prof. Drexlin: Di 11:30-12:30, Raum F2-34 (Flachbau)
Übungen	Mo 8:00, 9:45, 11:30 (Anmeldung im Ilias)
Sprechstunde	Dr. Schlösser, Dr. Seitz-Moskaliuk: nach Vereinbarung (magnus.schloesser@kit.edu, hendrik.seitz-moskaliuk@kit.edu)
Ilias	<a href="https://ilias.studium.kit.edu/goto_produkativ_crs_946736.html">https://ilias.studium.kit.edu/goto_produkativ_crs_946736.html</a>

---

## Übungsblatt 1 – Bearbeitung bis 29.04.2019

### (1) Photonen und typische Energien

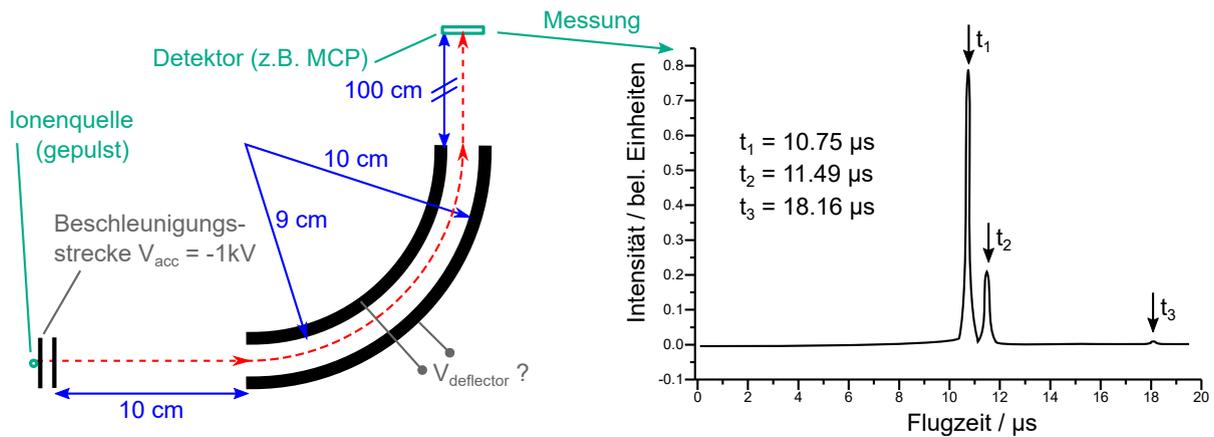
Füllen Sie die fehlenden Felder in folgender Tabelle aus. Verwenden Sie hierbei die üblichen Exponentenabkürzungen wie  $\mu$ , m, k, M ... (Ausnahme: bei Wellenzahl  $\tilde{\nu} = 1/\lambda$  schreibt man  $10^x \text{ cm}^{-1}$ ).

Energie	Frequenz	Wellenlänge	Wellenzahl	System?
			$5.13 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$	
10.1 $\mu\text{eV}$	457 THz			
		0.849 pm		
	70.4 THz		$3.90 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$	

Alle Beispiele entsprechen atomaren, molekularen oder nuklearen Übergängen, die in der Natur so vorkommen. Ordnen Sie diese Systeme den Zeilen in der Tabelle zu.

- Haushaltsmikrowelle (In der Nähe von Rotationsanregungen des Wassermoleküls).
- Gamma-Emission nach Zerfall des Kalium-40 Isotops in Argon-40.
- $K_\alpha$  Linie von Eisen (charakteristische Röntgenemission nach Elektronenbeschuss).
- Asymmetrische Streckschwingung des  $\text{CO}_2$ -Moleküls.
- Balmer ( $H-\alpha$ ) Linie beim Wasserstoffatom (Emission nach Übergang des Elektrons von Energieniveau  $n=3$  nach  $n=2$ ).
- Photon, das gerade so ein Elektron aus einer Goldoberfläche herauslösen kann.

Überlegen Sie, welche Einheiten wohl üblicherweise für die sechs verschiedenen Typen von Übergängen verwendet werden (z.B. UV Strahlung wird üblicherweise in "nm" angegeben oder Ultra-Kurz-Wellen (UKW) werden in der Einheit "MHz" charakterisiert, usw.).



**Abbildung 1: Links:** Experimenteller Aufbau eines Flugzeitspektrometers. Ionenoptiken zur Strahlführung und Formung sind nicht eingezeichnet. **Rechts:** Time of Flight (ToF) Spektrum der gesuchten Ionen.

## (2) Massenspektrometrie

In der Vorlesung wurden bestimmte Arten der Massenspektroskopie von geladenen Teilchen vorgestellt. Die Massenselektion beruht in den meisten Fällen auf der Manipulation der Ionen (mit einem bestimmten  $q/m$ -Verhältnis) mit statischen oder dynamischen elektromagnetischen Feldern, z.B. magnetische Sektorfilter, Radiofrequenzmassenfilter oder auch Flugzeitmassenfilter (Time of Flight, ToF). Abbildung 1 zeigt einen typischen experimentellen Aufbau, mit dem die Zusammensetzung einer Probe analysiert werden kann. In diesem Fall wird ein Gas in eine Probekammer gebracht und mittels Entladung oder Laserpuls einfach positiv ionisiert (in vernachlässigbar kurzer Zeit). Die Ionen werden instantan durch eine Beschleunigungsstrecke auf eine bestimmte kinetische Energie gebracht. Anschließend fliegen die Ionen in Richtung eines elektrostatischen Deflektors zur Energiefilterung und treffen letztlich, nach einer weiteren Driftstrecke, auf einen Detektor (z.B. eine Multichannelplate). Das dabei erzeugte Signal kann mit einem Oszilloskop angezeigt werden, das gleichzeitig mit der gepulsten Ionenquelle getriggert wird.

- Mit welcher Spannung muss der elektrostatische Filter  $V_{\text{Deflektor}}$  betrieben werden, sodass nur Ionen mit einer kinetischen Energie von  $E_{\text{kin}} = 1/2mv^2 = 1000 \text{ eV}$  passieren können? Was passiert mit Ionen höherer bzw. niedriger Energie? (Hinweis: Nutzen Sie das Kräftegleichgewicht  $F_{\text{Coulomb}} = F_{\text{centripetal}}$  bzw.  $qE_{\text{deflector}} = mv^2/R$  aus. Vereinfachung: Die Feldstärke  $E_{\text{deflector}}$  im Deflektor mit Radius  $R$  entspricht in erster Näherung der in einem Plattenkondensator.)
- Warum ist der elektrostatische Filter in diesem Betriebsmodus KEIN Massenfilter? Was würde in diesem Experiment mit zweifach positiv geladenen Ionen passieren?
- Um welche Ionen handelt es sich im gegebenen ToF Spektrum? Was für ein Gas könnte analysiert worden sein?
- Wenn der elektrostatische Deflektor durch einen magnetischen Deflektor ersetzt wird (Magnetfeldrichtung senkrecht zur Blattebene), dann kann man hiermit nach Massen filtern. Welche Magnetfeldstärke wird benötigt, um die Ionen zu filtern, die im ToF Spektrum bei  $t_3$  zu finden sind?

## (3) Elektronenstoßanregung von Atomen<sup>1</sup>

Der Wirkungsquerschnitt für eine Elektronenstoßanregung eines Atoms für einen bestimmten Über-

<sup>1</sup>Diese Aufgabe wird auch noch mal auf Blatt 2 zu finden sein und muss spätestens dann bearbeitet werden.

gang von Grundzustand  $|g\rangle$  in einen angeregten Zustand  $|e\rangle$  beträgt  $\sigma_A = 1.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ . Der angeregte Zustand hat eine Lebensdauer von  $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . Ein Dampf aus diesen Atomen bei einem Druck von 0.05 mbar wird mit einem Elektronenstrahl der Stromdichte  $J = 5 \text{ mA/cm}^2$  beschossen.

- Berechne die Besetzungsdichte des angeregten Zustand  $|e\rangle$  (pro  $\text{cm}^3$ ) im Gleichgewichtszustand. (Hinweis: Diese Aufgabe kann analog der Betrachtung des zwei Niveau-Systems gelöst werden (siehe Herleitung der Planck-Formel aus der Vorlesung). Wie bei den Photonen müssen auch dieselben drei Prozesse berücksichtigt werden.)
- Die Übergangsenergie zwischen den Zuständen entspricht einer Photonenwellenlänge von  $\lambda = 500 \text{ nm}$ . Das Wechselwirkungsvolumen des Elektronenstrahls in den Atomen beträgt  $1 \text{ cm}^3$ . Wie viel Leistung wird durch die fluoreszierenden Atome abgestrahlt?

#### **(4) Wechselwirkung von Photonen und Materie**

Am European x-ray free electron laser (XFEL) können Photonen mit einer Wellenlänge bis zu 0.05 nm erzeugt werden. Ein solches Röntgen-Photon trifft auf ein ruhendes Elektron, das um  $90^\circ$  relativ zum Photon gestreut wird.

- Welche Frequenz hat das Photon vor und nach dem Stoß? Wie schnell ist das Elektron nach dem Stoß? Muss man hier relativistisch rechnen?
- Rotes Licht hat eine Wellenlänge von ca. 600 nm. Um welchen Faktor  $x$  ist das Licht niederenergetischer als das Röntgen-Photon?
- Nun lässt man  $x$  rote Photonen (je mit  $x$ -fach geringerer Energie) auf dieselbe Art mit dem Elektron stoßen. Ist die kinetische Energie des Elektrons nach den  $x$  Stößen gleich, größer oder kleiner als im Stoß mit dem einzelnen Röntgen-Photon? Falls es nicht gleich ist, um wieviel?
- Ist der Comptoneffekt im oben genannten Beispiel eine effiziente Materie-Photonen Wechselwirkung?
- Welche weiteren Wechselwirkung von Photonen mit Materie gibt es und in welchen Energiebereichen sind sie relevant (und warum)?

#### **(5) Schwarzkörperstrahlung**

Du befindest Dich an einem Dir unbekanntem Ort. Dort findest du einen großen Bären, der, zu einer Kugel ( $d = 2 \text{ m}$ ) zusammengekauert, auf einer hochpräzisen Waage schläft. Sein Fell hat eine durchschnittliche Emissivität von ca.  $\epsilon = 0.5$ . Du nimmst das Spektrum des abgestrahlten Lichts des Bären auf und misst die intensivste Wellenlänge bei  $\lambda_{\text{max}} = 9.47 \mu\text{m}$ . Nach einer Viertelstunde liest Du die Waage erneut ab und stellst fest, dass der Bär  $0.021 \mu\text{g}$  an Masse verloren hat. Nehme an, dass der Bär weder atmet noch schwitzt.

- Wo befindest Du Dich und wie kommst Du zu dieser Annahme? Um was für einen Bären handelt es sich vermutlich? Tipp: Berechne die Umgebungstemperatur, um einen Hinweis auf deinen Aufenthaltsort zu bekommen.
- Nun stellst Du dein Strahlungsmessgerät auf Frequenzdarstellung um und wunderst Dich, dass die Frequenz maximaler Strahlungsleistung nicht  $\nu_{\text{max}} = c/\lambda_{\text{max}}$  beträgt, sondern einen deutlich kleineren Wert hat. Wieso ist das so? Hinweis: Gehe vom Planckschen Strahlungsgesetz aus und leite das Wiensche Verschiebungsgesetz für  $\lambda$  und  $\nu$  daraus ab.  $\frac{xe^x}{e^x-1} - 5 = 0$  mit der numerischen Lösung  $x = 4.9651$ ;  $\frac{xe^x}{e^x-1} - 3 = 0$  mit der numerischen Lösung  $x = 2.8214$ .

**(\*) Punkteverteilung**

Aufgabe	Teilaufgabe	Punkte
1	-	3
2	a, b, c, d	je 1
3	a, b	je 2
4	a, c, e	je 1
4	b, d	je 0.5
5	a, b	je 2