# Integrierter Kurs Physik IV
## Exp.-Teil – Atomphysik
## SoSe 19

**Prof. E. Weig, Anh-Tuan Le, Felix Rochau**

# Übungsblatt 5

Ausgabe: 13.05.2019, Abgabe: 20.05.2019

Aufgabe 12: Wie schnell wird der Kaffee kalt? **(1 Häkchen)**

Betrachten Sie eine Thermoskanne als Zylinder mit Durchmesser 10 cm und Höhe 25 cm. Vernachlässigen Sie den Boden und den Deckel, rechnen Sie nur mit der Zylindermantelfläche. Der Flächenunterschied der inneren und äußeren Zylindermantelfläche des Isoliervakuums sei ebenfalls vernachlässigbar. Die (vorgewärmte) Kanne wird mit 350K heißer Flüssigkeit (nehmen Sie Wasser an, Wärmekapazität 18.0 cal mol$^{-1}$ K$^{-1}$, 1 cal = 4.184 J) vollgefüllt. Nach welcher Zeit ist soviel Wärme abgegeben, dass die Wassertemperatur nur noch 310 K beträgt?

Rechnen Sie zunächst ungehinderter Energieabgabe einer Oberfläche ins Vakuum über Wärmestrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz.

Wie ändert sich das Ergebnis, wenn man die Begrenzung des Isoliervakuums durch die Außenwand berücksichtigt? Die Außenwand (auf 300 K) sendet ebenfalls Wärmestrahlung nach innen aus, die der innere Bereich mit der Flüssigkeit vollständig absorbiert (schwarzer Körper). (Auch die Außenwand reflektiert keine Strahlung nach innen.)

*Hinweis zum Rechnen:*

$$\int \frac{dx}{a^4 - x^4} = \frac{1}{4a^3} \ln \frac{a+x}{a-x} + \frac{1}{2a^3} \arctan \frac{x}{a}$$

Aufgabe 13: Wiensches Verschiebungsgesetz **(1 Häkchen)**

Die Herleitung des Rayleigh-Jeans-Gesetzes führte zu einem unphysikalischen Ergebnis für große Frequenzen (*UV-Katastrophe*). Um dieses Problem zu lösen, führte Planck im Jahre 1900 die Quantenhypothese ein. Hierbei nahm er an, dass ein Oszillator der Frequenz $\nu$ nur ganzzahlige Vielfache der Energie $h\nu$ aufnehmen kann. Damit ergab sich das *Plancksche Strahlungsgesetz* (siehe Vorlesung) zu

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}.$$

a) Berechnen Sie aus dem Planckschen Strahlungsgesetz die spektrale Energiedichte $\tilde{u}$ in Abhängigkeit der Wellenlänge $\lambda$ mittels der Transformation

$$u(\nu, T)\, \mathrm{d}\nu = \tilde{u}(\lambda, T)\, \mathrm{d}\lambda.$$

b) Bestimmen Sie jeweils das Maximum von $u(\nu, T)$ und $\tilde{u}(\lambda, T)$ (*Wiensches Verschiebungsgesetz*) und zeigen Sie, dass $\nu_{\max}\lambda_{\max} \neq c$ ist. Was bedeutet das?

*Hinweis*: Die Maxima lassen sich nur numerisch bestimmen.

## Aufgabe 14: Photoeffekt **(1 Häkchen)**

a) Zeigen Sie mit Hilfe der Energie- und Impulserhaltung, dass der Photoeffekt nicht an freien Elektronen möglich ist.

b) Beim Bestrahlen der Oberfläche einer Photozelle mit Licht unterschiedlicher Wellenlängen $\lambda$ beobachtet man die folgenden Gegenspannungen $U_s$, die den Elektronenstrom gerade zum Verschwinden bringen:

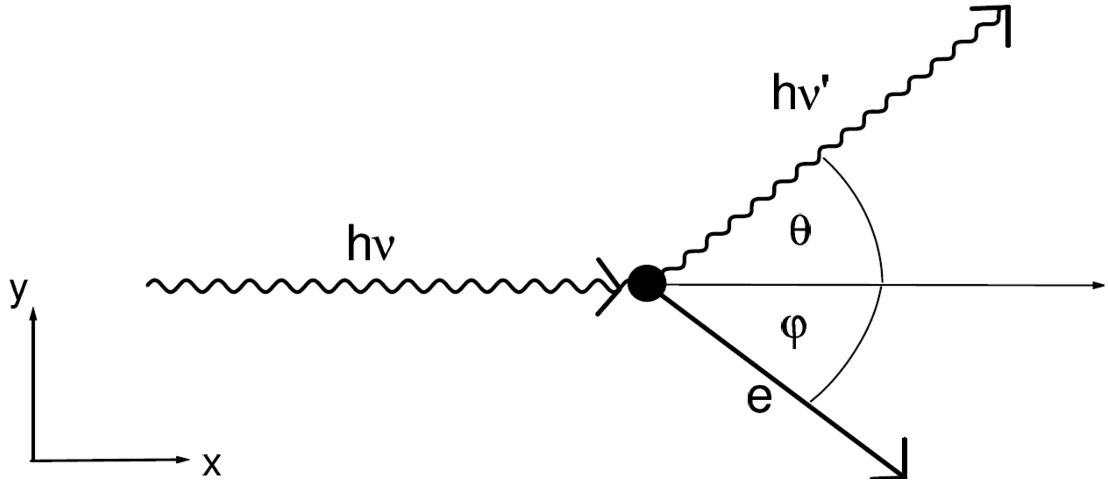
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_s(V)$ | 1.48 | 1.15 | 0.93 | 0.62 | 036 | 0.24 |
| $\lambda(nm)$ | 366 | 405 | 436 | 492 | 546 | 579 |

Bestimmen Sie die Grenzfrequenz, die Austrittsarbeit und den Wert der Planckschen Konstanten $h$. Tragen Sie dazu die Gegenspannung als Funktion der Lichtfrequenz auf. Die Elementarladung $e$ und die Lichtgeschwindigkeit $c$ werden als bekannt angenommen.

c) Eine Kaliumelektrode wird mit ultraviolettem Licht der Wellenlänge 250 nm bestrahlt. Wie groß ist die kinetische Energie der emittierten Elektronen, wenn die Austrittsarbeit 2.21 eV beträgt? Welcher Strom kann durch diese Elektronenemission fließen?

## Aufgabe 15: Compton-Streuung (schriftlich abzugeben) **(10 Punkte)**

Der Compton-Effekt beschreibt die Streuung eines Photons an einem Elektron. Vor dem Stoß sei das Elektron in Ruhe. Die Winkel, unter denen Photon und Elektron nach dem Stoß davonfliegen, werden mit $\theta$ bzw. $\varphi$ bezeichnet. Das Photon gibt einen Teil seiner Energie an das Elektron ab, weshalb die Wellenlänge des gestreuten Lichts größer ist als die des einfallenden.




Die Figur zeigt ein Diagram für den Steuprozess. $\lambda$ und $\nu$ beziehen sich auf das Photon vor dem Stoß, $\lambda'$ und $\nu'$ auf das Photon nach dem Stoß. Ihre Aufgabe besteht nun darin, folgende Gleichung herzuleiten:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_{\mathrm{C}}(1 - \cos\theta). \tag{1}$$

$\lambda_{\mathrm{C}} = \frac{h}{m_0 c}$ ($m_0$ ist die Ruhemasse des Elektrons) heißt Comptonwellenlänge. Für das System aus Photon und Elektron sind Energie- und Impulserhaltung anzusetzen. Der Impuls ist vektoriell zu betrachten bzw. seine Erhaltung einzeln für die Komponenten in $x$- und $y$-Richtung anzusetzen. Das Elektron ist relativistisch zu behandeln, hat also vorher seine Ruheenergie $m_0c^2$ und nachher den Impuls $\vec{p}_{\mathrm{e}}$ sowie die Energie $E_{\mathrm{e}} = \sqrt{m_0^2c^4 + p_{\mathrm{e}}^2c^2}$. Ein Photon, das zu Licht der Frequenz $\nu$ gehört, hat die Energie $h\nu$ und den Impuls(betrag) $h\nu/c$.

a) Schreiben Sie drei Gleichungen auf: Energie-Erhaltung (2), Impuls-Erhaltung in $x$-Richtung (3) und Impuls-Erhaltung in $y$-Richtung (4). Als Variablen sollen nur vorkommen $\lambda, \lambda', \theta, \varphi, p'_{\mathrm{e}}$, wobei $p'_{\mathrm{e}}$ der Impulsbetrag des Elektrons nach dem Stoß ist.

b) Gleichung (3) enthält die Variable $\varphi$. Eliminieren Sie diese mit Hilfe von Gleichung (4) und der Beziehung $\cos^2(\varphi) = 1 - \sin^2(\varphi)$.

c) Gleichung (2) und (3) enthalten nervige Wurzeln. Werden Sie diese los indem Sie die Wurzeln jeweils auf eine Seite schieben und die Gleichungen quadrieren.

d) Stellen Sie Gleichung (3) nach $p'_{\mathrm{e}}$ um und eliminieren Sie sodann diese Variable in Gleichung (2).

e) Kürzen Sie Gleichung (2), bis Sie Gleichung (1) erhalten und somit die Compton-Beziehung hergeleitet haben.

f) Zeigen Sie, dass es nicht möglich ist, dass das Elektron das Photon absorbiert, also seine komplette Energie übernimmt.

g) Ein Photon mit der Energie $1 \cdot 10^4$ eV macht einen Stoß mit einem ruhenden Elektron und wird unter einem Winkel von 60° gestreut. Geben Sie die Wellenlängen des einfallenden und des auslaufenden Photons an (berücksichtigen Sie vier Stellen in der Mantisse der Werte). Berechnen Sie auch die kinetische Energie des Elektrons nach dem Stoß und den Winkel, unter dem es davonfliegt.