Nachklausur in Experimentalphysik 3
Lösung

Prof. Dr. S. Schönert
Wintersemester 2017/18
26. März 2018

Zugelassene Hilfsmittel:

- 1 Doppelseitig handbeschriebenes DIN A4 Blatt
- 1 nichtprogrammierbarer Taschenrechner

Die Bearbeitungszeit beträgt 90 Minuten. Es müssen nicht alle Aufgaben vollständig gelöst sein, um die Note 1,0 zu erhalten.

Aufgabe A (10 Punkte)

(a) Welchen Vorteil bietet ein Parabolspiegel gegenüber einem Kugelspiegel?

(b) Was ist der Unterschied zwischen spontaner und stimulierter Emission?

(c) Wie entsteht eine Luftspiegelung (Fata Morgana)?

(d) Was war das zentrale Ergebnis des Michelson-Morley-Experiments?

(e) Warum ist die untergehende Sonne rot?

(f) Was besagt das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz?

(g) Warum ist ein Bild mit Blende schärfer als ohne?

(h) Was besagt das Huygensche Prinzip?

(i) Was besagt das Fermatsche Prinzip?

(j) Warum werden hochenergetische elektromagnetische Wellen kaum von Materie absorbiert?

Lösung

(a) Bei sphärischen Spiegeln schneiden sich nur die achsennahen Strahlen exakt im Brennpunkt. Bei einem Parabolspiegel durchlaufen auch die achsenfernen Strahlen den Brennpunkt.

[**1**]

(b) Anders als bei der spontanen Emission wird die stimulierte von einem zweiten Photon ausgelöst.

[**1**]

(c) Durch die räumliche Änderung des Brechungsindex wird ein hindurchgehender Lichtstrahl gebogen. Bei Erwärmung einer bodennahen Luftschicht verringern sich deren Dichte und Brechungsindex. In Luft mit geringerer Dichte breiten sich Lichtwellen schneller aus (v=c/n), sodass ein Lichtstrahl beim Übergang in die wärmere Luft gebogen wird.

[**1**]

(d) Dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Richtungen gleich und unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle oder des Beobachters ist.

[**1**]

(e) Das blaue Licht wird durch die Rayleigh-Streuung stärker senkrecht zur Lichtausbreitung gestreut, ein größerer Rotanteil bleibt übrig.

[**1**]

(f) $\frac{\Phi_1}{A_1} = \frac{\Phi_2}{A_2}$ also die Verhältnisse zwischen abgestrahlter Leistung und Absorptionsvermögen sind im thermischen Gleichgewicht konstant.

[**1**]

(g) Weil achsenferne Strahlen nicht am Bildschirm auftreffen.

[**1**]

(h) Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle.

[**1**]

(i) Die Lichtausbreitunng erfolgt so, dass der optische Weg auf dem tatsächlich benutzten Pfad s0 gegenüber den benachbarbten Pfaden si einen Extremwert besitzt.

[**1**]

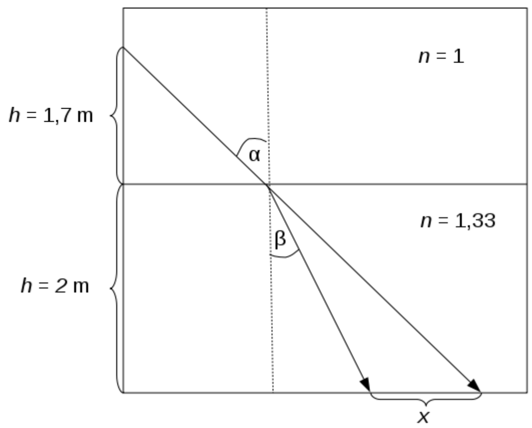
(j) Um die Resonanzfrequenz von Materialien zu erhöhen müssten entweder die Bindungen der Elektronen stärker werden ("Federkonstante erhöhen") oder die Massen geringer. Nur dann können können sie auf die Anregung der einfallenden Welle reagieren.

[**1**]

Aufgabe 1 (8 Punkte)

(a) Am Boden eines flachen Gewässers (n = 1,33) der Tiefe 2 m liegt ein vermutlich wohlschmeckender Hummer. Ein Fischer mit einer Harpune steht am Ufer (Augenhöhe 1,7 m) und sieht diesen Hummer unter einem Winkel von 40° relativ zur Wasseroberfläche.
Wie weit schießt er mit seiner Harpune daneben, wenn er in der Vorlesung nicht aufgepasst hat und deswegen dorthin zielt, wo er den Hummer sieht?

(b) Am Boden eines bis zu einer Höhe von 10 cm mit Wasser gefüllten Gefäßes befindet sich eine punktförmige Lichtquelle. Auf der Wasseroberfläche schwimmt eine runde undurchsichtige Platte, deren Mittelpunkt sich über der Lichtquelle befindet. Welchen Radius muss diese Platte mindestens haben, damit kein Strahl aus der Wasseroberfläche austreten kann?



Lösung

(a) Es sei x die gesuchte Distanz zwischen Hummer und Auftreffpunkt der Harpune. Wie in der Abbildung deutlich wird, gilt:

$$x = \tan\alpha \cdot T - \tan\beta \cdot T = T \cdot (\tan\alpha - \tan\beta)\,. \tag{1}$$

Des Weiteren gilt:

$$\sin\beta \cdot n_W = \sin\alpha \cdot n_L \quad \Rightarrow \beta = \arcsin\left(\sin\alpha \cdot \frac{n_L}{n_W}\right). \tag{2}$$

[**2**]

Damit folgt für x:

$$x = T \cdot \left(\tan\alpha - \tan\left(\arcsin\left(\sin\alpha \cdot \frac{n_L}{n_W}\right)\right)\right). \tag{3}$$

Mit $T = 2$ m, $\alpha = 40°$, $n_L = 1$ und $n_W = 1{,}33$ ergibt sich x zu:

$$x = 0,57 \text{ m}. \tag{4}$$

[**2**]

(b) Es gilt der trigonometrische Zusammenhang

$$\sin\vartheta_T = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \quad \Rightarrow r^2 = \frac{\sin^2\vartheta_T h^2}{1 - \sin^2\vartheta_T} \tag{5}$$

Weiterhin gilt:

$$\sin\vartheta_T = \frac{n_t}{n_e} = \frac{1}{n_W} \quad \Rightarrow \vartheta_T = 48,75°. \tag{6}$$

[**2**]

Setzt man dies in den Ausdrück für r^2 ein, erhält man

$$r^2 = \frac{h^2 n_W^2}{n_W^2 (n_W^2 - 1)} = \frac{h^2}{n_W^2 - 1}, \tag{7}$$

woraus folgt:

$$r = 11,4 \text{ cm}. \tag{8}$$

[**2**]

Alternativweg:

$$\sin 90° = \sin\beta \cdot n_w \Rightarrow \beta = 48,8°$$
$$\tan\beta = \frac{x}{10\text{m}} \Rightarrow x = 11,4\text{cm} = r$$

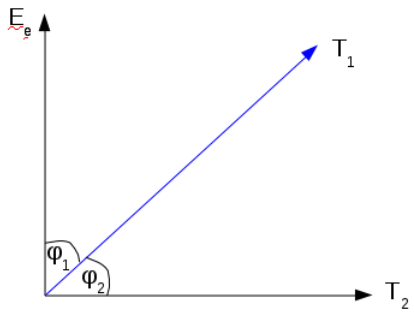
Aufgabe 2 (7 Punkte)

Linear polarisiertes Licht fällt auf eine Anordnung von zwei hintereinander aufgestellten Polarisatoren

(a) Berechnen welche Winkelstellungen die Transmissionsachsen der beiden Polarisatoren bezüglich der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes haben müssen, damit nach dem zweiten Polarisator ein um 90° gedrehtes linear polarisiertes Licht maximaler Intensität erhalten wird? Hinweis: $\sin\phi_1 \cos\phi_1 = \frac{1}{2}\sin(2\phi_1)$ kann nützlich sein.

(b) Welche Intensität wird maximal durchgelassen?

Lösung



(a) Zunächst ist klar, dass die Transmissionsachse des zweiten Polarisators den Winkel $\phi_2 = 90° = \frac{\pi}{2}$ zur Polarisationsebene des einfallenden Lichts haben muss. Der Winkel ϕ_1 ist zunächst beliebig. Die Intensität nach dem ersten Polarisator ist

$$I_1 = I_0 \cos^2\phi_1 \tag{9}$$

und nach dem zweiten Filter

$$I = I_2 = I_1 \cos^2(\phi_2 - \phi_1) = I_0 \cos^2 \phi_1 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right). \tag{10}$$

Da $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) = \sin\phi_1$,kann man auch schreiben:

$$I = I_0 \cos^2 \phi_1 \sin^2 \phi_1. \tag{11}$$

Die maximale Intensität folgt aus der Extremalbedingung

$$\frac{dI}{d\phi_1} = 0. \tag{12}$$

[3]

Die Lösung dieser Extremalbedingung kann auf drei Arten erfolgen:

(i) Man schreibt die Gleichung für I folgendermaßen:

$$I = I_0 \left(\cos\phi_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right)\right)^2 = \frac{I_0}{4}\left(\cos\left(2\phi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)^2. \tag{13}$$

Dann folgt:

$$\frac{dI}{d\phi_1} = -I_0 \left(\cos\left(2\phi_1 - \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \sin\left(2\phi_1 - \frac{\pi}{2}\right) = 0. \tag{14}$$

Dies wird gelöst durch

$$\sin\left(2\phi_1 - \frac{\pi}{2}\right) = 0. \quad \Rightarrow \phi_1 = \frac{\pi}{4}. \tag{15}$$

[2]

(ii) Einfacher ist es, den obigen Ausdruck für I mittels der Produktregel abzuleiten:

$$I = I_0 \left(\cos\phi_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right)\right)^2 \tag{16}$$

$$\frac{dI}{d\phi_1} = 2I_0 \left(\cos\phi_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right)\right)\left(-\sin\phi_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) + \cos\phi_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right)\right) \tag{17}$$

und daher

$$\tan\phi_1 = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) \quad \Rightarrow \phi_1 = \frac{\pi}{4}. \tag{18}$$

(iii) Wegen

$$\sin\phi_1 \cos\phi_1 = \frac{1}{2}\sin(2\phi_1) \tag{19}$$

gilt

$$\frac{dI}{d\phi_1} = I_0 \sin(2\phi_1)\cos(2\phi_1) = 0 \tag{20}$$

mt den Lösungen $\phi_1 = 0$ oder $\phi_1 = \frac{\pi}{4}$. Die erste Lösung entspricht einem Minimum, die zweite einem Maixmum.

Der Winkel beträgt also

$$\phi_1 = 45°. \tag{21}$$

(b) Die Intensität selbst folgt dann aus

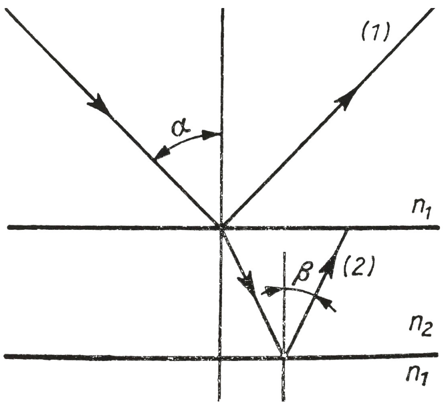
$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right)\cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right) = I_0 \cos^4\left(\frac{\pi}{4}\right) = I_0 \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^4 = \frac{I_0}{4}. \tag{22}$$

[**2**]

Aufgabe 3 (5 Punkte)

Auf eine planparallele Glasplatte fällt ein Lichtstrahl unter einem solchen Winkel ein, dass der in die Luft reflektierte Strahl vollständig polarisiert ist. Zeigen Sie, dass auch der ins Glas hinein gebrochene und an der unteren Begrenzungsfläche ins Glas reflektierte Strahl vollständig polarisiert ist.

Lösung



Wenn die absoluten Brechzahlen von Luft bzw. Glas n_1 und n_2 sind, dann wird die Bedingung, dass der reflektierte Strahl (1) (siehe Abbildung) vollständig polarisiert ist, durch die Brewster'sche Beziehung ausgedrückt, also

$$\tan\alpha = \frac{n_2}{n_1}. \tag{23}$$

Um festzustellen, ob der an der unteren Begrenzungsfläche unter dem Brechungswinkel β ins Glas zurückreflektierte Strahl (2) vollständig polarisiert ist, untersuchen wir den Tangens des Brechungswinkels

$$\tan\beta = \frac{\sin\beta}{\cos\beta}. \tag{24}$$

[**2**]

Gemäß dem Brechungsgesetz ist

$$\sin\beta = \frac{n_1}{n_2}\sin\alpha. \tag{25}$$

Durch Vergleich mit Gleichung (23), die auf die Form

$$\cos\alpha = \frac{n_1}{n_2}\sin\alpha \tag{26}$$

gebracht wird, erhalten wir

$$\sin\beta = \cos\alpha \tag{27}$$

und weiter

$$\cos\beta = \sin\alpha, \tag{28}$$

was nach Einsetzen in Gleichung (24) ergibt:

$$\tan\beta = \cot\alpha = \frac{1}{\tan\alpha} = \frac{n_1}{n_2}. \tag{29}$$

[**3**]

Diese Beziehung drückt die Bedingung dafür aus, dass der an der Begrenzungsfläche Glas-Luft reflektierte Strahl vollständig polarisiert ist, da hier die Brewsterbedingung für innere Reflektion erfüllt ist.

Aufgabe 4 (8 Punkte)

Der Abstand a zwischen einem Objekt und seinem reellen Bild, das von einer Sammellinse erzeugt wird, sei unveränderlich. Zeigen Sie, dass es

(a) zwei mögliche Positionen für die Linse gibt (unter welcher Bedingung?)

(b) und die Größe des Objekts $H = \sqrt{h_1 h_2}$ beträgt, wobei h_1 und h_2 die Höhen der beiden möglichen Bilder sind.

Lösung

(a) Es sei f die Brennweite der Linse, g die Gegenstandsweiteweite und b die Bildweite. Es gilt der Zusammenhang:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \tag{30}$$

Laut Aufgabenstellung ist die Distanz zwischen dem Objekt und seinem Bild konstant:

$$g + b = \text{const} = a. \tag{31}$$

Die Kombination dieser beiden Gleichungen ermöglicht es, entweder g oder b zu eliminieren: Die Multiplikation der ersten Gleichung mit gb liefert zunächst

$$g + b = \frac{gb}{f}. \tag{32}$$

[2]

Hier wird nun die zweite Gleichung eingesetzt:

$$a = \frac{g\,(a-g)}{f} \quad (\text{mit } b = a - g). \tag{33}$$

Dies kann zu einer quadratischen Gleichung in g umformuliert werden:

$$g^2 - ag + af = 0. \tag{34}$$

Zu dieser Gleichung existieren zwei Lösungen,

$$g = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4af}}{2}, \tag{35}$$

unter der Voraussetzung, dass $a > 4f$ gilt (entspricht der minimalen Distanz zwischen Objekt und Bild). Auf diese Weise wurde gezeigt, dass es für einen gegebenen konstanten Abstand a zwischen Objekt und Bild genau zwei mögliche Positionen für die Linse gibt.

[2]

[2]

(b) Die Vergrößerung bei der Abbildung durch die Linse beträgt $-\frac{b}{g}$. Unter der Verwendgung von Gleichung (31) kann dies zu $1 - \frac{a}{g}$ umformuliert werden. An dieser Stelle könnte man hier den zuvor ermittelten Ausdruck für g einsetzen. Da dies etwas langwierig wäre, kann alternativ auch mit der Linsengleichung weitergearbeitet werden:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{f} - \frac{1}{b} = 1 - \frac{b}{f}. \tag{36}$$

Ersetzt man nun b durch $a - g$ wird daraus

$$\frac{1}{g} = -\frac{a - g - f}{f}. \tag{37}$$

[2]

Falls das Objekt die Größe H besitzt ergibt sich somit:

$$h_1 = -\frac{H}{f}\left(a - \frac{a}{2} - \frac{\sqrt{a^2 - 4af}}{2} - f\right) = -\frac{H}{2f}\left(a - 2f - \sqrt{a^2 - 4af}\right) \tag{38}$$

$$h_2 = -\frac{H}{f}\left(a - \frac{a}{2} + \frac{\sqrt{a^2 - 4af}}{2} - f\right) = -\frac{H}{2f}\left(a - 2f + \sqrt{a^2 - 4af}\right). \tag{39}$$

Das Produkt aus h_1 und h_2 lautet

$$h_1 h_2 = \frac{H^2}{4f^2}\left(a^2 + 4f^2 - 4af - a^2 + 4af\right) = H^2. \tag{40}$$

Somit wurde gezeigt, dass die Höhe h des Objekts h durch $\sqrt{h_1 h_2}$ gegeben ist.

[2]

Aufgabe 5 (8 Punkte)

Das Emissionsspektrum des Wasserstoffatoms wird mit einem Beugungsgitter mit der Gitterkonstanten $d = 1,5$ μm aufgenommen. Eine Linie der Balmer-Serie ($n = 2$)wird in der zweiten Ordnung unter einem Winkel $\theta = 35{,}37°$ beobachtet.

(a) Welcher Wellenlänge entspricht das?

(b) Welche Quantenzahl hat der angeregte Zustand von dem der Übergang ausgeht?

(c) Welche Gitterkonstante wäre notwendig, um den gleichen Übergang in Pb^{81+} unter dem gleichen Winkel zu beobachten?

Lösung

(a) Für die Beugung am Gitter gilt

$$n\lambda = d \sin\theta. \tag{41}$$

Mit $n = 2$ für die zweite Ordnung und $\theta = 35,37°$ ergibt sich für die Wellenlänge $\lambda = 434{,}1$ nm.

[**2**]

(b) Dies entspricht einer Photonenenergie von

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 2,856 \text{ eV}. \tag{42}$$

Für die Balmer Linien mit $n_f = 2$ gilt:

$$\Delta E = 13,6 \cdot Z^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n_i^2}\right). \tag{43}$$

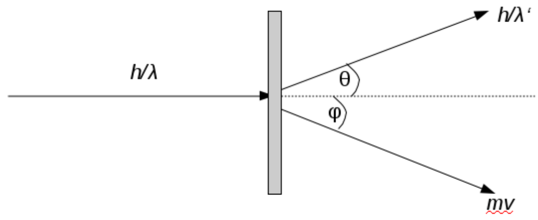
Eine Übergangsenergie von $\Delta E = 2{,}856$ eV entspricht damit einem Anfangszustand von $n_i = 5$.

[**3**]

(c) Der gleiche Übergang besitzt in Pb^{81+} mit $Z = 82$ eine Übergangsenergie von $\Delta E = 19{,}2$ keV. Dies entspricht einer Wellenlänge von $\lambda = 6,46 \cdot 10^{-11}$ m bzw. $\lambda = 64,6$ pm. Für den Beugungswinkel $\theta = 35,37°$ in zweiter Ordnung ($n = 2$) wird dann einen Linienabstand von 0,223 nm benötigt.

Anmerkung:
Für die Spektroskopie von Röntgenstrahlung werden Gitter mit Linienabständen im Sub-Nanometerbereich benötigt. Da derartig kleine Abstände in Kristallen vorliegen, werden in der Röntgenspektoskopie Kristalle als Gitter eingesetzt.

[**3**]



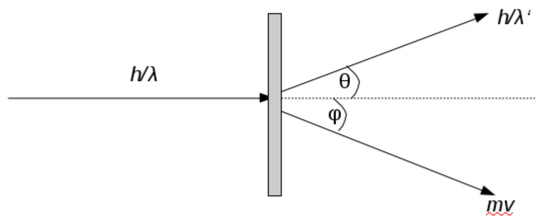
Aufgabe 6 (10 Punkte)

(a) Man berechne die Frequenzänderung (Compton-Verschiebung), die Röntgenstrahlung der Wellenlänge $\lambda = 0{,}3$ nm bei Streuung an den quasifreien Elektronen in einer Metallfolie für Streuwinkel $\vartheta = 90°$ und $\vartheta = 180°$ erfährt.

(b) Wie groß sind in beiden Fällen die kinetische Energie E_k und die Geschwindigkeit v des Rückstoßelektrons?

(c) In welche Richtung ϕ gegenüber der Einstrahlungsrichtung wird das Rückstoßelektron abgelenkt?

Lösung



(a) Die Compton-Verschiebung

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \tag{44}$$

folgt aus

$$\Delta\lambda = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\vartheta}{2}, \tag{45}$$

wobei $\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2,42631 \cdot 10^{-12}$ m die Compton-Wellenlänge des Elektrons ist.

[2]

Die entsprechenden Frequenzänderungen sind durch

$$\Delta f = f' - f = \frac{c}{\lambda'} - \frac{c}{\lambda} = -\frac{c\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)} \approx -\frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} \tag{46}$$

gegeben.

Winkel	$\Delta\lambda$	Δf	$\Delta\lambda/\lambda = -\Delta f/f$
90°	$1 \cdot \lambda_C$	$-0,808 \cdot 10^{16} Hz$	0,81 %
180°	$2 \cdot \lambda_C$	$-1,62 \cdot 10^{16} Hz$	1,62%

[**2**]

(b) Die kinetische Energie des Rückstoßelektrons beträgt

$$E_k = hf = -h\Delta f \tag{47}$$

Und die Geschwindigkeit folgt aus

$$E_k = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_e c^2 \approx \frac{1}{2} m_e v^2 \tag{48}$$

$$v \approx \sqrt{\frac{2E_k}{m_e}} \tag{49}$$

Winkel	E_k	v
90°	$5,36 \cdot 10^{-18}$ J = 33,4 eV	$3,43 \cdot 10^6$ $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
180°	$1,07 \cdot 10^{-17}$ J = 66,9 eV	$4,85 \cdot 10^6$ $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

[**3**]

(c) Aus der Impulsbilanz z.B senkrecht zur Einstrahlrichtung (siehe Abbildung) folgt:

$$0 = \frac{hf'}{c} \sin\vartheta - mv \sin\phi \quad \Rightarrow \phi = \arcsin\left(\frac{hf'}{mvc} \sin\vartheta\right), \tag{50}$$

woraus man mit $m = \frac{m_e}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$ für den Streuwinkel des Elektrons erhält:

Winkel	ϕ
90°	$44,5°$
180°	$0°$

[**3**]

Aufgabe 7 (6 Punkte)

Mit Röntgenbeugungsverfahren kann man Gitterkonstanten von Kristallen sehr genau bestimmen und dies als Abschätzung für Atomdurchmesser verwenden. Es ergeben sich typische Werte von etwa 0,1 nm (Wasserstoff) bis 0,5 nm (z.B. Cäsium). Stellt man sich das Elektron innerhalb des Atomdurchmessers lokalisiert vor, folgt daraus mit Hilfe der Heisenbergschen Unschärferelation sofort eine Abschätzung für seine Impulsunschärfe. Für ein ruhendes Elektron ist die Impulsverteilung symmetrisch um $p = 0$ und man kann aus $\Delta p/2$ eine kinetische Energie ausrechnen. Vergleichen Sie die sich ergebenden Werte der kinetischen Energie mit den ersten Ionisierungsenergien von Wasserstoff (13,6 eV) und Cäsium (3,9 eV).

Lösung

Im Folgenden wird die Heisenbergsche Unschärferelation in der Form $\Delta x \Delta p_x \approx h$ für die Abschätzungen verwendet.

(i) Wasserstoff:

Mit $\Delta x = 10^{-10}$ m folgt die Abschätzung

$$\Delta p_x = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{Js}}{10^{-10}\ \mathrm{m}} = 6,6 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{kg}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

[2]

Nun ist dies die volle Breite der Verteilungsfunktion zentriert bei $p = 0$, d.h. effektiv muss man mit $\Delta p/2$ weiterrechnen, um eine Abschätzung für die kinetische Energie zu gewinnen. Mit der Elektronenmasse $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg erhält man $\langle v \rangle = \Delta p/2m_e = 1,8 \cdot 10^6\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Damit kann man die kinetische Energieunschärfe zu

$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{1}{8m_e}\Delta p_x^2 = \frac{1}{8m_e}\left(\frac{h}{\Delta x}\right)^2 = 6 \cdot 10^{-18}\ \mathrm{J} = 37,4\ \mathrm{eV} = 2,75\ \cdot I_H \tag{51}$$

berechnen.

[2]

(ii) Cäsium:

$$\Delta p_x = 1,3 \cdot 10^{-24}\ \mathrm{kg}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \tag{52}$$

$$\langle E_{kin} \rangle = 2,4 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J} = 1,5\ \mathrm{eV} = 0,38 \cdot I_{Cs} \tag{53}$$

[2]

Was dieses Ergebnis zeigt, ist, dass man die Heisenbergsche Unschärferelation durchaus zu einer größenornungsmäßigen Abschätzung der Beziehung zwischen Atomradius und erforderlicher Bindungsenergie heranziehen kann. Die Abweichungen sind durchaus ein systematisches Indiz. Cäsium tendiert dazu, in Kristallen ionische Bindungen einzugehen. Wasserstoff hingegen tendiert eher zu kovalenten Bindungen, bei denen sich die Elektronenwolken mit den Nachbaratomen relativ stark überlappen können.

Konstanten

Elektrische Feldkonstante:	$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}\mathrm{CV}^{-1}\mathrm{m}^{-1}$
Elementarladung:	$e = 1.60 \cdot 10^{-19}\mathrm{C}$
Planck'sche Konstante:	$h = 6.63 \cdot 10^{-34}\mathrm{Js} = 4,14 \cdot 10^{-15}\mathrm{eVs}$
Lichtgeschwindigkeit:	$c = 3 \cdot 10^{8}\mathrm{ms}^{-1}$
Elektronenruhemasse:	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}\mathrm{kg}$
Stefan Boltzmann Konstante:	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}$
Wiensche Verschiebungskonstante:	$b = 2,9 \cdot 10^{-3}\mathrm{mK}$