

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

13.1 Licht als golf

Opgave 1

Voor de drie verschijnselen geldt: Golven vertonen buigingsverschijnselen als de golflengte groter is dan de grootte van een obstakel. Golflengten kleiner of gelijk aan het obstakel worden tegengehouden en vertonen geen of nauwelijks buigingsverschijnselen

- Een bergtop is een groot obstakel.
Voor radiogolven geldt $c = f \cdot \lambda$. Omdat de lichtsnelheid c een constante is, betekent dit dat hoe hoger de frequentie is, des te kleiner is de golflengte. Hoe kleiner de golflengte, des te kleiner is de mate van buiging. Bij obstakels zoals bergtoppen treedt minder buiging op naarmate de golflengte kleiner is. Als de bron van de golven buiten het dal is, en de golflengte is te klein, zijn de golven niet of nauwelijks waarneembaar in het dal.
- De geluidsgolven met lage tonen hebben kleine frequenties en dus grote golflengtes. Hoge tonen, met kleine golflengtes, worden tegengehouden door kleine obstakels, waar de golven van lage tonen omheen buigen. Daarom hoor je op grote afstand vooral de lage tonen.
- Atomen en de ruimte ertussen hebben een veel kleinere afmeting dan de golflengte van licht. Licht buigt dus om de atomen heen. Röntgenstraling heeft een veel kleinere golflengte dan licht en buigt dus veel minder. Röntgenstraling wordt gedeeltelijk weerkaatst en geeft daarmee informatie over de structuur van kristallen.

Opgave 2

- Er treedt buiging op als de golflengte groter is dan de spleetopening. Een spleet is dus smaller dan 589 nm.
- De gele strepen verschijnen op de plekken waar constructieve interferentie van het gele licht plaatsvindt. Wit is de kleur van de achtergrond, zichtbaar op de plekken waar destructieve interferentie plaatsvindt.
- Als de afstand tussen de spleten kleiner is dan één golflengte, is er maar één maximum. Als de spleetafstand groter is dan de golflengte, kunnen er meer maxima ontstaan. Als er meer maxima verschijnen, is de afstand tussen de spleten dus groter geworden.
- Als de spleetafstand groter is dan de golflengte, kunnen er meer maxima ontstaan. Bij dezelfde spleetafstand is het aantal maxima dus groter als de golflengte kleiner is.

Opgave 3

- Wet van behoud van energie.
- Is een spleet veel groter dan de golflengte van het licht, dan gaat nagenoeg alle licht rechtdoor en treedt er nauwelijks buiging op.
Volgens het principe van Babinet geeft buiging rondom een groot voorwerp het omgekeerde intensiteitspatroon. Dit laat een verlicht scherm zien met een duidelijke schaduw in het midden.
 - Is een spleet veel kleiner dan de golflengte van het licht, dan treedt rondom de spleet nagenoeg volledige buiging op. Omdat de spleet maar klein is, wordt er maar weinig licht doorgelaten.
Volgens het principe van Babinet geeft buiging rondom een klein voorwerp over een grote breedte een kleine vermindering van de lichtintensiteit. Er treedt dus nauwelijks schaduwvorming op.

Opgave 4

- Dat er maar in zeven richtingen rood licht te zien is, leg je uit met de formule voor maxima tralie.

$$d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$$

$$\text{Uit 500 spleten per mm volgt } d = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{500} = 2,00 \cdot 10^{-6} \text{ m .}$$

$$\lambda = 633 \text{ nm} = 633 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$|\sin \alpha| \leq 1$$

$$\text{Invullen levert: } 2,0 \cdot 10^{-6} \times 1 = n \cdot 633 \cdot 10^{-9}$$

$$n = 3,16$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Dus $|n| \leq 3,16$.

Omdat n een geheel getal is, zijn de mogelijkheden $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$.

Dus er zijn 7 mogelijkheden.

- b Dat in het midden een witte streep te zien is, leg je uit met de formule voor de maxima van een tralie.

$$d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$$

Bij de middelste streep hoort $n = 0$. Als $n = 0$, dan is bij elke λ de waarde van $\sin(\alpha) = 0$.

Alle kleuren komen op dezelfde plek uit. Dit geeft wit licht.

Als n niet gelijk is aan 0, dan hangt de waarde van $\sin(\alpha)$ af van de golflengte en dus van de kleur van het licht. Dan komen de verschillende kleuren naast elkaar terecht en zie je een spectrum.

- c De ligging van een spectrum leg je uit met de formule voor de maxima van een tralie.

$$d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$$

Bij één spectrum zijn de waarden van n en d constant. De kleinste λ levert de kleinste hoek α . Violet heeft de kleinste golflengte, en geeft dus de kleinste afbuigingshoek. Violet ligt dus het dichtst bij de witte streep.

- d Voor het verband tussen afbuigingshoek en golflengte geldt $d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$.

Is de spleetbreedte constant, dan hangt de afbuigingshoek dus af van het product $n \cdot \lambda$.

Volgens BINAS tabel 19A heeft zichtbaar licht een golflengte tussen de 380 nm (randje violet) en 750 nm. Voor $n = 2$ ligt de waarde van $n \cdot \lambda$ dus tussen 760 nm en 1500 nm. Voor $n = 3$ ligt de waarde van $n \cdot \lambda$ tussen 1140 nm en 2250 nm. Het spectrum met $n = 3$ begint dus al voordat het spectrum met $n = 2$ is afgelopen.

- e De breedte van de overlap tussen twee spectra is kleiner als de spectra smal zijn. De spectra zijn smaller als er in meer richtingen maxima optreden.

Omdat $|n| \leq \frac{d}{\lambda}$ betekent dit dat d dan groter is. Dus de overlap is kleiner als d groter is.

Bij een grotere d is de afstand tussen twee spleten groter en is het aantal spleten per mm kleiner. Dus de andere tralie heeft minder spleten per mm.

Opgave 5

- a In de richting van $n = 0$ gaan alle lichtstralen rechtdoor, ongeacht hun golflengte. Er is dan geen weglengteverschil tussen lichtstralen van dezelfde golflengte en dus ook geen faseverschil. Voor alle lichtstralen treedt maximale constructieve interferentie op. Alle kleuren blijven samen en laten daardoor wit licht zien en dus geen spectrum. Bij $n = 1$ treedt diffractie op. Als λ groter wordt, wordt α dat ook. De constructieve interferentie is voor lichtstralen met verschillende golflengte op een andere plaats. Er is dus een spectrum te zien.

- b Zie figuur 1.

De hoek φ bereken je met de hoek die de lijn $n = 1$ maakt met de tralie en hoek α die de lijn $n = 1$ maakt met de rechtdoor gaande lijn bij $n = 0$.

Hoek α bereken je met de formule voor de maxima van een tralie.

$$d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$$

Uit 1000 lijnen per mm = 10^{-3} m volgt $d = \frac{10^{-3}}{1000} = 1,000 \cdot 10^{-6}$ m.

$$n = 1$$

$$\lambda = 575 \text{ nm} = 575 \cdot 10^{-9}$$

$$\text{Invullen levert: } 1,000 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(\alpha) = 1 \times 575 \cdot 10^{-9}$$

$$\alpha = 35,099^\circ$$

Dus de hoek tussen de lijnen bij $n = 0$ en $n = 1$ is $35,099^\circ$.

De lijn bij $n = 1$ staat loodrecht op de tralie.

Voor de hoek β tussen de lijn bij $n = 0$ en de tralie geldt dus:

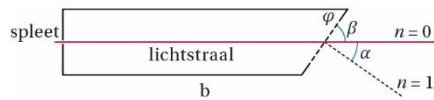
$$\beta = 90,0 - 35,099 = 54,900^\circ$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Hoek φ en hoek β vormen Z-hoeken.

Dus $\varphi = 54,900^\circ$.

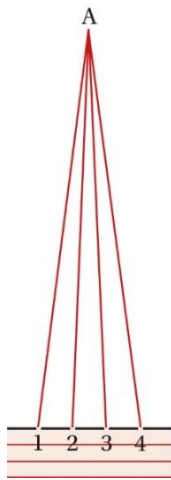
Afgerond: $\varphi = 54,9^\circ$.



Figuur 13.1

Opgave 6

- a Zie figuur 13.2. Richting A is geen weglengteverschil tussen de golven uit de openingen 1 en 4 en tussen de openingen 2 en 3. Omdat er dan geen weglengteverschil is, is het faseverschil 0. Dus interfereren de golven maximaal constructief.



Figuur 13.2



Figuur 13.3

- b Zie figuur 13.3. Het faseverschil tussen golven uit twee naast elkaar gelegen spleten is $\frac{1}{4}$. Dus het faseverschil tussen de golf uit spleet 1 en de golf uit spleet 3 is gelijk is aan $\frac{1}{2}$. Tussen die twee golven treedt dus maximaal destructieve interferentie op. Dit geldt ook voor de golven uit spleet 2 en spleet 4. In punt B treedt volledige uitdoving op.
- c Als de golven uit naburige openingen een faseverschil van $\frac{1}{2}$ hebben, dan doven de golven uit opening 1 en 2 elkaar uit, net als de golven uit 3 en 4. Als de golven uit naburige openingen een faseverschil van $\frac{3}{4}$ hebben, dan hebben de golven uit 1 en 3 een faseverschil van $1\frac{1}{2}$. Ook dan treedt er destructieve interferentie op. Evenzo voor de golven uit 2 en 4. Ook nu is er volledige uitdoving.
- d Versterking kan alleen maar optreden als het faseverschil tussen alle openingen geheel is. Dan moet het faseverschil voor golven uit naast elkaar gelegen openingen dus een geheel getal zijn.
- e Er is maximale destructieve interferentie als voor een golf een andere golf te vinden is waarmee het faseverschil gelijk is aan $\frac{1}{2}$. Hoe meer spleten er zijn, hoe meer combinaties er mogelijk zijn die maximale destructieve interferentie geven.
- f Bij een tralie met veel spleten zie je voor elke kleur uit het witte licht alleen de maxima, die samen een spectrum vormen. De maxima liggen namelijk voor elke kleur op een iets andere plaats omdat het faseverschil afhankelijk is van de golflengte. Er geldt namelijk $\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda}$. Gebruik je een plaat met vier spleten, dan liggen de maxima voor elke kleur wel op dezelfde plaats, maar op andere plaatsen treedt geen volledige destructieve interferentie op. Je ziet dan allerlei kleuren over elkaar heen, die een witte indruk geven.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

13.2 Fotonen

Opgave 7

- a Het aantal fotonen door 1 m² bereken je met de energie en de fotonenergie.
De fotonenergie bereken je met de formule voor de fotonenergie.
De energie bereken je met de formule voor vermogen.

$$E = P \cdot t$$

$$P = 1,36 \text{ kW} = 1,36 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Dus elke seconde gaat 1,36 · 10³ J door 1 m².

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\lambda = 550 \text{ nm} = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\text{Invullen levert: } E_f = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{550 \cdot 10^{-9}} = 3,61165 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Het aantal fotonen } n \text{ is } \frac{1,36 \cdot 10^3}{3,61165 \cdot 10^{-19}} = 3,765 \cdot 10^{21}.$$

$$\text{Afgerond: } n = 3,77 \cdot 10^{21}.$$

- b De maximale snelheid bereken je met de formule voor de kinetische energie.
De kinetische energie bereken je met de wet van behoud van energie.

$$E_f = E_{\text{uittree}} + E_k$$

$$E_f = 3,61 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{zie vraag a})$$

$$E_{\text{uittree}} = 1,94 \text{ eV} = 1,94 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 3,10788 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Invullen levert: } 3,61165 \cdot 10^{-19} = 3,10788 \cdot 10^{-19} + E_k$$

$$E_k = 5,0377 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$\text{Invullen levert: } 5,0377 \cdot 10^{-20} = \frac{1}{2} \times 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot v^2$$

$$v = 3,326 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{Afgerond: } v = 3,33 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}.$$

Opgave 8

- a De grensfrequentie en de grensgolflengte bereken je met de formule voor de fotonenergie.
De fotonenergie bij de grensfrequentie en grensgolflengte is gelijk aan de uittree-energie.

$$E_f = 4,48 \text{ eV} = 4,48 \times 1,606 \cdot 10^{-19} = 7,17696 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{zie BINAS 24 en 7A})$$

$$E_f = h \cdot f$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\text{Invullen levert: } 7,17696 \cdot 10^{-19} = 6,6260 \cdot 10^{-34} \cdot f$$

$$f = 1,083 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Dit komt overeen met 1,08 · 10¹⁵ Hz in BINAS.

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\text{Invullen levert: } 7,17696 \cdot 10^{-19} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{\lambda}$$

$$\lambda = 2,767 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Dit komt overeen met 277 nm in BINAS.

- b Uit $E_f = h \cdot f$ volgt dat hoe groter de frequentie, hoe groter de fotonenergie is.
Dus de frequentie is een ondergrens.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

- c Uit $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ volgt dat hoe groter de frequentie, hoe kleiner de fotonenergie is.
Dus de frequentie is een bovengrens.

Opgave 9

- a Als vrijgemaakte elektronen richting de anode gaan, komen niet alle elektronen op de anode terecht. Als de spanning wordt vergroot, wordt de anode meer positief. Deze trekt dan de elektronen aan die niet precies in de richting van de anode bewegen. Deze vallen dan ook op de anode en dus neemt de stroomsterkte toe.
- b De golflengte van het licht bereken je met de formule voor de fotonenergie.
De fotonenergie bereken je met de wet van behoud van energie.
De kinetische energie bereken je met de remspanning.
Bij de remspanning is de maximale kinetische energie van de snelste elektronen omgezet in elektrische energie.

$$E_k = q \cdot U$$

$$q = e$$

$$U = U_{\text{rem}} = 0,75 \text{ V} \quad (\text{aflezen in figuur 13.22})$$

$$E_k = e \cdot 0,75$$

$$E_k = 0,75 \text{ eV}$$

$$E_f = E_{\text{uittree}} + E_k$$

$$E_{\text{uittree}} = 2,25 \text{ eV} \quad (\text{zie BINAS tabel 24})$$

$$E_f = 2,25 + 0,75$$

$$E_f = 3,00 \text{ eV}$$

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$E_f = 3,00 \text{ eV} = 3,00 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 4,806 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$4,806 \cdot 10^{-19} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{\lambda}$$

$$\lambda = 4,133 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ m.}$$

- c In figuur 13.22 zie je dat de maximale stroomsterkte gelijk is aan $90 \mu\text{A}$. Dan komen blijkbaar alle elektronen op de anode terecht. Een stroomsterkte van $90 \mu\text{A}$ betekent $90 \mu\text{C}$ per seconde. De lading van een elektron is $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

$$\text{Er komen dus maximaal } \frac{90 \cdot 10^{-6}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 5,6179 \cdot 10^{14} \text{ elektronen per seconde op de anode}$$

terecht. Dan worden $5,6179 \cdot 10^{14}$ elektronen per seconde uit de kathode vrijgemaakt.

$$\text{Afgerond: } 5,6 \cdot 10^{14}.$$

- d Het percentage bereken je met de verhouding tussen het aantal elektronen dat per seconde wordt vrijgemaakt en het aantal elektronen dat maximaal vrijgemaakt kan worden uit de kathode.

Het aantal elektronen dat maximaal vrijgemaakt kan worden volgt uit het aantal fotonen dat per seconde op de kathode valt.

Het aantal fotonen per seconde bereken je met de fotonenergie en de totale energie die per seconde op de kathode valt.

De totale energie per seconde volgt uit het totale vermogen dat op de kathode valt.

Het totale vermogen bereken je met de intensiteit en de oppervlakte van de kathode.

$$I = \frac{P_{\text{tot}}}{A}$$

$$I = 6,0 \text{ W s}^{-2}$$

$$A = 3,5 \text{ cm}^2 = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$P_{\text{tot}} = 6,0 \times 3,5 \cdot 10^{-4} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Dus de totale energie die per seconde op de kathode valt is gelijk aan $2,1 \cdot 10^{-3}$ J.

$E_f = 4,806 \cdot 10^{-19}$ J (zie vraag 9b)

Er vallen dus per seconde $\frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{4,806 \cdot 10^{-19}} = 4,369 \cdot 10^{15}$ fotonen op de kathode.

Er kunnen dus maximaal $4,369 \cdot 10^{15}$ elektronen per seconden worden vrijgemaakt.

Volgens vraag 9c worden er per seconde $5,6 \cdot 10^{14}$ elektronen vrijgemaakt.

Dus het percentage is $\frac{5,6 \cdot 10^{14}}{4,369 \cdot 10^{15}} \cdot 100\% = 12,8\%$.

Afgerond: 13%.

- e De fotonenergie wordt omgezet in warmte.

Opgave 10

- a Op alle plaatjes, maar op het linker plaatje in het bijzonder, zijn afzonderlijke puntjes te zien. Deze horen bij de detectie van losse deeltjes, in dit geval fotonen. In het midden, maar zeker aan de rechterkant, zijn duidelijke interferentiestrepen zichtbaar. Deze zijn alleen te verklaren met het golfkarakter van licht.
- b Fotonen van groen licht hebben een hogere energie dan die van rood licht. Als fotonen van rood licht worden gedetecteerd, dan worden die van groen licht zeker gedetecteerd. Wel is het inslagpatroon helemaal willekeurig. Je krijgt dus weer een scherm met puntjes, maar de puntjes zitten niet op dezelfde plaats.
- c Groen licht heeft een kleinere golflengte dan rood licht. Interferentie ontstaat door het faseverschil tussen de golven die door de linker- en de rechterspleet gaan. Bij een kleinere golflengte komen de strepen dichter bij elkaar te liggen.
- d Elke kleur in het witte licht zorgt voor een interferentiepatroon waarvan de strepen op verschillende afstanden van elkaar liggen. De lichte strepen vallen dan gedeeltelijk over elkaar heen. Dat leidt tot een regenboogpatroon, maar de kleur wordt niet gedetecteerd. Dus zie je alleen maar een uitgesmeerd patroon, met weinig contrast.

Opgave 11

- Het maximale vermogen van de lichtbron bereken je met de formule voor vermogen. De energie bereken je met het aantal fotonen en de fotonenergie. Het aantal fotonen bereken je met de tijd waarin een foton de afstand van 80 cm overbrugt. De tijd bereken je met de formule voor de verplaatsing bij eenparige beweging. De fotonenergie bereken je met de formule voor de energie van een foton.

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\lambda = 650 \text{ nm} = 650 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\text{Invullen levert: } E_f = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{650 \cdot 10^{-9}}$$

$$E_f = 3,056 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$s = v \cdot t$$

$$s = 80 \text{ cm} = 0,80 \text{ m}$$

$$v = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{Invullen levert: } 0,80 = 2,9979 \cdot 10^8 \cdot t$$

$$t = 2,668 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

$$E = P \cdot t$$

$$\text{Invullen levert: } 3,056 \cdot 10^{-19} = P \cdot 2,668 \cdot 10^{-9}$$

$$P = 1,145 \cdot 10^{-10} \text{ W}$$

- Een foton doet $2,668 \cdot 10^{-9}$ s over de afstand tussen spleet en scherm.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Als er dan 10 miljoen fotonen na elkaar de afstand overbruggen, dan duurt het experiment dus $2,668 \cdot 10^{-9} \times 10 \cdot 10^6 = 2,668 \cdot 10^{-2} \text{ s}$.

Afgerond: 0,027 s.

Opgave 12

- a Als er spleetdetectie plaatsvindt, dan treedt er geen interferentie op. Door destructieve interferentie ontstaan nulpunten in de grafiek. De rode grafiek ontstaat dus na interferentie. Dus de rode grafiek geeft de resultaten weer van Kartal en de zwarte grafiek die van Malou.
- b Als het foton verder gaat, is er nog steeds een foton. De amplitude kan dan niet veranderd zijn. Dan zou de kans om het foton te detecteren zijn veranderd. Dus is de fase veranderd.
- c Oppervlakte levert totale stralingsenergie. Als dezelfde opstelling is gebruikt, en de belichtingstijd is even lang, is de oppervlakte hetzelfde.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

13.3 Gedrag bij elektronen

Opgave 13

De golflengte bereken je steeds met de formule van De Broglie.

De impuls bereken je met de formule voor impuls.

$$a \quad \lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = 75 \text{ kg}$$

$$v = 5,0 \text{ km h}^{-1} = \frac{5,0}{3,6} = 1,389 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{75 \times 1,389} = 6,3609 \cdot 10^{-36} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 6,4 \cdot 10^{-36} \text{ m.}$$

$$b \quad \lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = 32 \text{ u} = 32 \times 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 5,3136 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$v = 480 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{5,3136 \cdot 10^{-26} \times 480} = 2,5978 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ m.}$$

$$c \quad \lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$v = 1,2 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \times 1,2 \cdot 10^6} = 6,0615 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 6,1 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Opgave 14

- a De formule leid je af met de formule voor de de Brogliegolflengte en de formule voor de kinetische energie.

$$\text{Voor de de Brogliegolflengte geldt } \lambda = \frac{h}{m \cdot v}.$$

$$\text{Voor de kinetische energie geldt } E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

$$\text{Links en rechts vermenigvuldigen met } 2m \text{ levert: } 2m \cdot E_k = m^2 \cdot v^2$$

$$\text{Hieruit volgt: } \sqrt{2m \cdot E_k} = m \cdot v$$

$$\text{Invullen in de formule voor de de Brogliegolflengte levert: } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot E_k}}$$

- b De temperatuur T_p bereken je met de temperatuur $T_e = 293$ en de verhouding van de kinetische energieën.
De verhouding van de kinetische energieën bereken je uit de verhouding van de massa's.
Uit de gegeven formule volgt dat als voor een proton en een elektron de de Brogliegolflengte λ hetzelfde is, ook $2m \cdot E_k$ hetzelfde is.

$$\frac{m_p}{m_e} = \frac{1,007276}{5,485799 \cdot 10^{-4}} = 1836 \quad (\text{zie BINAS tabel 7b})$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Voor het proton is de massa m 1836 keer zo groot, dus is bij dezelfde λ de waarde van E_k 1836 keer zo klein. Omdat de kinetische energie recht evenredig is met de temperatuur, is de temperatuur dus ook 1836 keer zo klein.

$$\frac{T_p}{T_e} = 1836$$

$$T_e = 293$$

$$T_p = \frac{293}{1836} = 0,1595 \text{ K}$$

$$\text{Afgerond: } T_p = 0,160 \text{ K.}$$

Opgave 15

- a De formule voor de compton golf lengte leid je af met de formule voor de rustmassa en de formule voor de fotonenergie.

De rustmassa van deeltje m is gelijk aan de fotonenergie.

$$m \cdot c^2 = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{m \cdot c^2}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c}$$

- b De compton golf lengte bereken je met de gegeven formule.

$$\lambda_c = \frac{h}{m \cdot c}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda_c = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \times 2,9979 \cdot 10^8} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m.}$$

- c Een deel van de fotonenergie wordt gebruikt om het elektron kinetische energie te geven. De rest wordt omgezet in een ander foton. Die energie kan volgens Einstein ook omgezet worden in massa. En dat kan dus de massa van een elektron zijn, als de overgebleven energie groot genoeg is.

Opgave 16

- a Bij de botsing krijgt het elektron snelheid en dus kinetische energie. Vanwege de wet van behoud van energie is de energie van het teruggekaatste foton kleiner dan de energie van het foton dat op het elektron botst.

Voor de energie van een foton geldt $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$. Omdat h en c constanten zijn, is de golflengte groter als de fotonenergie kleiner is.

- b De snelheid van het elektron bereken je met de formule voor de kinetische energie. De kinetische energie bereken je met de wet van behoud van energie. De fotonenergie bereken je met de formule voor de fotonenergie.

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7})$$

$$\lambda_{\text{voor}} = 1,1950 \text{ nm} = 1,1950 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$E_{f,\text{voor}} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{1,1950 \cdot 10^{-9}} = 1,662266 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$\lambda_{\text{na}} = 1,1999 \text{ nm} = 1,1999 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

$$E_{f,na} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{1,1999 \cdot 10^{-9}} = 1,655478 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$E_{f,voor} = E_{f,na} + E_k$$

$$1,662266 \cdot 10^{-16} \text{ J} = 1,655478 \cdot 10^{-16} \text{ J} + E_k$$

$$E_k = 6,78815 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ (zie BINAS tabel 7)}$$

$$6,78815 \cdot 10^{-19} = \frac{1}{2} \times 9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot v^2$$

$$v = 1,220 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

Afgerond: $v = 1,22 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$.

- c De golflengte van het elektron bereken je met de formule voor de comptongolflengte.

$$\lambda_c = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \text{ (zie BINAS tabel 7A)}$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg (zie BINAS tabel 7B)}$$

$$v = 1,22 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda_c = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \times 1,22 \cdot 10^6} = 5,9621 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\frac{1}{\lambda_{f,na}} + \frac{1}{\lambda_{f,voor}} = \frac{1}{\lambda_e}$$

$$\lambda_{voor} = 1,1950 \text{ nm} = 1,1950 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda_{na} = 1,1999 \text{ nm} = 1,1999 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\frac{1}{1,1950 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{1,1999 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{5,9621 \cdot 10^{-10}}$$

$$1,670 \cdot 10^9 = 1,677 \cdot 10^9$$

Verskil is kleiner dan 1%. Dus het klopt.

Opgave 17

- a De spanning tussen de kathode en de anode bereken je met de formule voor de elektrische energie.
De elektrische energie bereken je met de wet van behoud van energie.
De kinetische energie bereken je met de formule voor kinetische energie.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ (zie BINAS tabel 7B)}$$

$$v = 3,75 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{Invullen levert: } E_k = \frac{1}{2} \times 9,10938 \cdot 10^{-31} \times (3,75 \cdot 10^6)^2$$

$$E_k = 6,4050 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Bij versnellen van het elektron wordt elektrische energie omgezet in kinetische energie.
 $E_{el} = E_k$

$$E_{el} = q \cdot U$$

$$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (zie BINAS tabel 7A)}$$

$$\text{Invullen levert: } 6,4050 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 1,602 \cdot 10^{-19} \times U$$

$$U = 39,98 \text{ V}$$

Afgerond: $U = 40,0 \text{ V}$.

- b De golflengte bereken je met de formule voor de de Broglie golflengte.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$v = 3,75 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \times 3,75 \cdot 10^6} = 1,9396 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 1,94 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

- c Is de spleet kleiner dan de golflengte van het licht, dan treedt voorbij de spleet buiging op. Het licht gaat voorbij de spleet alle richtingen uit. Dan is de plaats van de voorwerpen die de spleet begrenzen niet duidelijk.
- d Aan het antwoord bij vraag 17b zie je dat de golflengte van de elektronen veel kleiner is dan die van licht. Nu treedt pas buiging op bij veel kleinere spleten en voorwerpen.

Opgave 18

- a De formule leid je af met de formule voor de de Broglie golflengte en de formule voor de toename van de kinetische energie in een elektrisch veld.

$$\text{Voor de de Broglie golflengte geldt } \lambda = \frac{h}{m \cdot v}.$$

$$\text{Voor de toename van kinetische energie in een elektrisch veld geldt } \Delta E_k = -q \cdot U.$$

$$\text{Omdat de beginsnelheid 0 is en } q = -e \text{ ontstaat hieruit } \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U.$$

$$\text{De snelheid } v \text{ vrijmaken levert: } v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m}}.$$

Combineren met de formule voor de de Broglie golflengte levert:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2e \cdot U \cdot m^2}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2e \cdot U \cdot m}}$$

- b De de Broglie golflengte bereken je met de gegeven formule.

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2e \cdot U \cdot m}}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$U = 5,0 \text{ kV} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ V}$$

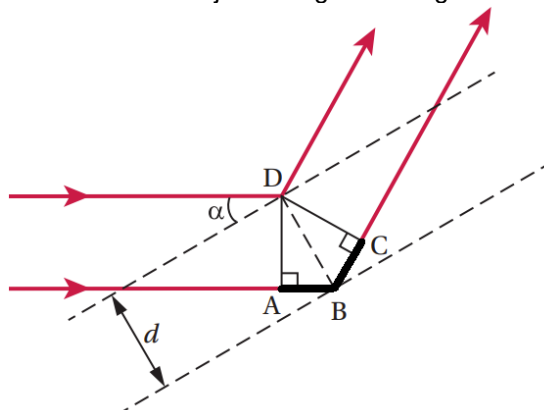
$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,602 \cdot 10^{-19} \times 5,0 \cdot 10^3 \times 9,10938 \cdot 10^{-31}}}$$

$$\lambda = 1,73 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } 1,7 \cdot 10^{-11} \text{ m.}$$

- c De dikke zwarte lijnen in figuur 13.4 geven het verschil in weglengte aan.



Figuur 13.4

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Het weglengteverschil Δx tussen de twee stralen is in figuur 13.4 aangegeven met dikke zwarte lijnen. Dus $\Delta x = AB + BC$ waarbij $AB = BC$.

In rechthoekige driehoek ABD is de tophoek gelijk aan hoek α .

Er geldt dus $\sin(\alpha) = \frac{AB}{BD} = \frac{AB}{d}$. Hieruit volgt $d \cdot \sin(\alpha) = AB$.

Dus het weglengteverschil $\Delta x = AB + BC = 2d \cdot \sin(\alpha)$.

Versterking treedt op als het faseverschil een geheel getal is oftewel $\Delta\phi = n$.

Voor het faseverschil geldt $\Delta\phi = \frac{\Delta x}{\lambda}$. Dus $n = \frac{\Delta x}{\lambda}$ met $\Delta x = 2d \cdot \sin(\alpha)$.

Hieruit volgt $2d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$.

- d Ook elke ring geldt $2d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$.

Voor de buitenste ring geldt dat hoek α het grootst is.

Bij gelijkblijvende n en λ is de afstand tussen de lijnen dan het kleinst.

Dus hoort d_1 bij de buitenste ring.

- e Bij lage versnellingen hoort volgens de gegeven formule een kleinere de Broglie golf lengte. Bij een bepaalde versnelling (en $n = 1$) kan het gebeuren dat $\lambda > 2d$.

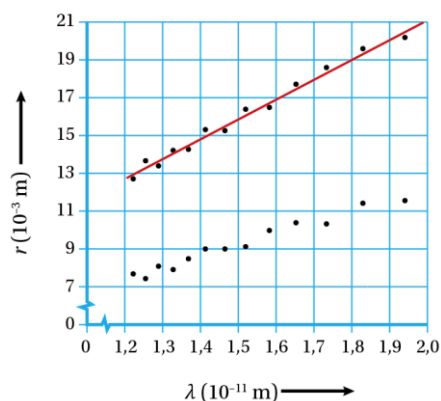
Uit $2d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda$ volgt dan dat $\sin(\alpha) > 1$.

Dat betekent dat er geen interferentie mogelijk is.

- f De grootte van d bereken je met de waarde van $\frac{2R}{d}$.

De waarde van $\frac{2R}{d}$ bepaal je met de steilheid van de lijn die je tekent in figuur 13.35.

Voor de buitenste ring is dat de bovenste set meetpunten. Zie figuur 13.5.



Figuur 13.5

Voor de steilheid geldt:

$$\frac{\Delta r}{\Delta \lambda} = \frac{(21-13) \cdot 10^{-3}}{(1,98-1,22) \cdot 10^{-11}} = 1,05 \cdot 10^9$$

$$\frac{2R}{d} = 1,05 \cdot 10^9$$

Met $R = 65 \text{ mm} = 65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ levert dit $d = 1,235 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Afgerond: $d = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

13.4 Opgesloten quantumdeeltjes

Opgave 19

- a De formule leid je af met de gegeven formule en de formule voor de de Broglie golf lengte.

Voor de de Broglie golf lengte geldt $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

Uit $L = n \cdot \frac{1}{2} \lambda$ volgt $\lambda = \frac{2L}{n}$.

Combineren levert: $\frac{h}{m \cdot v} = \frac{2L}{n}$.

Hieruit volgt $v = n \cdot \frac{h}{2m \cdot L}$.

- b De formule leid je af met de gegeven formule bij vraag a en de formule voor de kinetische energie.

Voor de kinetische energie geldt $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ met $v = n \cdot \frac{h}{2m \cdot L}$.

Combineren levert: $E_k = \frac{1}{2} m \cdot \left(n \cdot \frac{h}{2m \cdot L} \right)^2 = \frac{1}{2} m \cdot n^2 \cdot \frac{h^2}{4m^2 \cdot L^2} = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$

- c De formule leid je af met de formule voor de energie van een foton.
De energie van een foton volgt uit het energieverval tussen de grondtoestand en de tweede aangeslagen toestand.

Het energieverval bereken je met de formule voor de energie van een deeltje in een eendimensionale energieput voor de grondtoestand en de tweede aangeslagen toestand.

Voor de grondtoestand geldt $n = 1$ en voor de tweede aangeslagen toestand $n = 3$.

Voor het energieverval geldt dan $\Delta E = 3^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} - 1^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} = 8 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} = \frac{h^2}{m \cdot L^2}$

Voor de energie van een foton geldt $E = h \cdot f$.

Dus $f = \frac{h}{m \cdot L^2}$.

Opgave 20

- a De formule leid je af uit de formule voor de energie van een deeltje in een eendimensionale energieput.

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

$h = 6,6260 \cdot 10^{-34}$ (zie BINAS tabel 7A)

$L = 3,33 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (zie BINAS tabel 7B)

Invullen levert: $\frac{h^2}{8m \cdot L^2} = n^2 \cdot \frac{(6,6260 \cdot 10^{-34})^2}{8 \times 9,10938 \cdot 10^{-31} \times (3,33 \cdot 10^{-10})^2} = n^2 \cdot 5,4329 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Dit komt overeen met $n^2 \cdot \frac{5,4329 \cdot 10^{-19}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = n^2 \cdot 3,391 \text{ eV}$.

Dit komt afgerond overeen met $E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} = n^2 \cdot 3,39 \text{ eV}$.

- b De energie van een foton bereken je met het energieverval voor de overgang van $n = 2$ naar $n = 1$.

Voor het model van het deeltje in de put geldt $\Delta E = 2^2 \times 3,39 - 1^2 \times 3,39 = 10,2 \text{ eV}$

Voor de energieën van het waterstofatoom geldt $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$.

$$\Delta E = -\frac{13,6}{2^2} - \left(-\frac{13,6}{1^2} \right) = 10,2 \text{ eV}$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

- c Beide modellen leveren dezelfde waarde voor de energie.
De orde van grootte van de energie bereken je met de energie van een deeltje in een eendimensionale energieput.
De orde van grootte van de massa van een proton in vergelijking met de massa van een elektron volgt uit de verhouding van de massa's van een proton en een elektron.

De massa van proton is 1,007 u en die van een elektron $5,485 \cdot 10^{-4}$ u. De massa van een proton is dus ongeveer $1,8 \cdot 10^3$ keer zo groot als de massa van een elektron.
De afmeting L van de energieput is echter 10^4 keer zo klein.

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

De waarde van $8m \cdot L^2$ verandert voor het proton in de atoomkern met $1,8 \cdot 10^3 \times (10^{-4})^2 = 1,8 \cdot 10^{-5}$.

Omdat h een constante is, verandert de waarde van $\frac{h^2}{8m \cdot L^2}$ met een factor

$$\frac{1}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 5,5 \cdot 10^4.$$

De energieovergang van het elektron bedraagt 10,2 eV.

Dus voor het proton is het energieverschil: $10,2 \times 5,5 \cdot 10^4 = 5,6 \cdot 10^5$ eV.

De orde van grootte is dus 10^6 eV.

Opgave 21

- a Dat ultravioletstraling wordt uitgezonden volgt uit de energie van een foton in de lymanreeks en BINAS tabel 19A.

De minimale waarde en de maximale waarde leid je af in BINAS tabel 21A.

Volgens BINAS tabel 21A zijn de uiterste waarden 10,2 eV en 13,6 eV.

Volgens BINAS tabel 19A behoren deze fotonenergieën tot uv-straling.

- b Dat de overgang $n = 10$ naar $n = 2$ geen lijn oplevert in BINAS tabel 20 leid je af met de fotonenergie voor deze overgang.

De fotonenergie bereken je met de formule voor de energie van het waterstofatoom.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

Voor overgangen van niveau $n = 10$ naar $n = 2$ geldt dus $\Delta E = -\frac{13,6}{10^2} - \left(-\frac{13,6}{2^2}\right)$.

$$\Delta E = 3,264 \text{ eV}$$

Volgens BINAS tabel 19A valt deze lijn (net) buiten het zichtbare spectrum.

BINAS tabel 20 laat lijnen zien in het zichtbare gebied. Dus de lijn die hoort bij de overgang van $n = 10$ naar $n = 2$ kun je niet zien in een spectrum van tabel 20.

- c Het maximale energieverschil dat realiseerbaar is bij overgangen binnen het waterstofatoom is 13,6 eV. Deze energie hoort bij fotonen van ultraviolette straling.

Het waterstofatoom kan dus geen röntgenstraling uitzenden.

Als het waterstofatoom een röntgenfoton absorbeert, ontvangt het elektron meer dan 13,6 eV aan energie. Het waterstofatoom raakt daardoor geïoniseerd. Het elektron is dan niet meer gebonden aan het waterstofatoom. De overblijvende energie wordt omgezet in kinetische energie van het vrije elektron.

- d Of de energie meer of minder negatief is beredeneer je met de formule voor de kinetische energie.

De snelheid beredeneer je met de formule voor de de Broglie golf lengte.

De de Broglie golf lengte beredeneer je met de voorwaarden voor een staande golf tussen twee vaste uiteinden.

$$L = n \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

De ruimte waarin een kerndeeltje van deuterium kan bewegen is veel kleiner dan de ruimte waarin het elektron beweegt. Als L veel kleiner is, dan is bij dezelfde waarde van n de de Broglie golf lengte voor een kerndeeltje veel kleiner dan die van het elektron.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Is λ veel kleiner en heeft h dezelfde waarde, dan is het product $m \cdot v$ veel groter.

Daardoor is de kinetische energie van het kerndeeltje groter dan die van het elektron.

De energie van de grondtoestand van het kerndeeltje is dus groter dan die van het elektron.

Opgave 22

- a De energie van het deeltje in een energieput bereken je met de formule voor de energie van een deeltje in een eendimensionale energieput.

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

$$n = 1$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7})$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7})$$

$$L = 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$E_1 = 1^2 \cdot \frac{(6,6260 \cdot 10^{-34})^2}{8 \times 9,10938 \cdot 10^{-31} \times (5,0 \cdot 10^{-9})^2}$$

$$E_1 = 2,4098 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$\text{Dit komt overeen met } \frac{2,4098 \cdot 10^{-21}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 0,01504 \text{ eV}.$$

Afgerond: 15 meV.

- b De snelheid bereken je met de formule van de de Broglie golf lengte.
De golflengte bereken je met de voorwaarde voor een staande golf met twee vaste uiteinden.

$$L = n \cdot \frac{1}{2} \lambda$$

$$L = 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$n = 1$$

$$5,0 \cdot 10^{-9} = 1 \times \frac{1}{2} \lambda$$

$$\lambda = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$1,0 \cdot 10^{-8} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot v}$$

$$v = 7,2738 \cdot 10^4 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{Afgerond: } v = 7,3 \cdot 10^4 \text{ m s}^{-1}.$$

- c Hoe vaak het elektron in een milliseconde tegen de wanden botst bereken je met de tijd die het kost om de lengte van de energieput over te steken.
De oversteektijd bereken je met de formule voor de verplaatsing bij een eenparige beweging.

$$s = v \cdot t$$

$$s = 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$v = 7,3 \cdot 10^4 \text{ m s}^{-1}$$

$$5,0 \cdot 10^{-9} = 7,3 \cdot 10^4 \cdot t$$

$$t = 6,849 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

Het elektron steekt dus elke $6,849 \cdot 10^{-14} \text{ s}$ over.

$$\text{Dan zijn er } \frac{1}{6,849 \cdot 10^{-14}} = 1,46 \cdot 10^{13} \text{ oversteken per seconde, oftewel 15 miljard oversteken}$$

per milliseconde. Bij elke oversteek is er een botsing met een uiteinde.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Met een kans van 1 op 1 miljard is de kans dus zeer klein dat het deeltje na 15 miljard oversteken nog in de energieput zit.

- d Dat de snelheid groter is, bereken je met de formule voor de kinetische energie. Bij een aangeslagen toestand hoort een grotere energie. Een deeltje dat tussen de wanden van een energieput beweegt heeft alleen maar kinetische energie. Dus is de kinetische energie in een aangeslagen toestand groter.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Als E_k groter is en de massa is niet verandert, dan is de snelheid groter.

- e Dat de kans op tunnelen groter is, bereken je met het energietekort. In een aangeslagen toestand is de energie groter dan 15 meV. De energie van de barrière blijft 15 eV. Het energietekort (het verschil tussen de energie in de aangeslagen toestand en de hoogte van de barrière) is dus kleiner. Als het energietekort kleiner, is de kans om te tunnelen groter.

- f Als de barrières verder uit elkaar staan, is de tijd die een elektron nodig heeft om over te steken ook groter. Er zijn dus minder botsingen met de wand.

Bovendien geldt $E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$. Omdat h en m dezelfde waarde houden, is de energie in de

grondtoestand omgekeerd evenredig met L^2 . Hoe groter L , hoe kleiner de energie van het deeltje is. Het verschil tussen de energie van het systeem en de hoogte van de barrière is dan groter. De kans om uit de energieput te tunnelen is dan kleiner.

Opgave 23

- a De snelheid leid je af met de formule voor de middelpuntzoekende kracht en de algemene formule voor de kracht.

Bij een eenparige cirkelbeweging is de middelpuntzoekende kracht gelijk aan de algemene

kracht. $F_{\text{mpz}} = \frac{m \cdot v^2}{r}$ en $F = \frac{k}{r^2}$

$$F_{\text{mpz}} = F$$

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{k}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{k}{m \cdot r}$$

$$v = \sqrt{\frac{k}{m \cdot r}}$$

- b De waarde van n bereken je met de omtrek van de cirkel en de de Broglie golf lengte. De de Broglie golf lengte bereken je met de formule voor de de Broglie golf lengte. De snelheid bereken je met de gegeven formule voor snelheid. De constante k bereken je met de gegeven formule voor k .

Voor het elektron

$$k = f \cdot e^2$$

$$f = 8,98755 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2} \quad (\text{zie BINAS tabel 7})$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{zie BINAS tabel 7})$$

$$k = 8,98755 \cdot 10^9 \times (1,602 \cdot 10^{-19})^2 = 2,30656 \cdot 10^{-28} \text{ N m}^2$$

$$v = \sqrt{\frac{k}{m \cdot r}}$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$r = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\text{Invullen levert: } v = \sqrt{\frac{2,3068 \cdot 10^{-28}}{9,1093 \cdot 10^{-31} \times 5,29 \cdot 10^{-11}}}$$

$$v = 2,1878 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \times 2,1878 \cdot 10^6} = 3,32469 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$O = 2\pi r$$

$$r = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\text{Invullen levert: } O = 2\pi \times 5,29 \cdot 10^{-11} = 3,3238 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$n = \frac{O}{\lambda}$$

$$n = \frac{3,3238 \cdot 10^{-10}}{3,32469 \cdot 10^{-10}} = 0,9973$$

Afgerond: $n = 1$ (want n is altijd een geheel getal).

$n = 1$ geeft de grondtoestand aan.

Voor de maan

$$k = G \cdot M_{\text{aarde}} \cdot M_{\text{maan}}$$

$$G = 6,67384 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$M_{\text{aarde}} = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 31})$$

$$M_{\text{maan}} = 0,0735 \cdot 10^{24} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 31})$$

$$k = 6,67384 \cdot 10^{-11} \times 5,972 \cdot 10^{24} \times 0,0735 \cdot 10^{24}$$

$$k = 2,92942 \cdot 10^{37} \text{ N m}^2$$

$$v = \sqrt{\frac{k}{m \cdot r}}$$

$$m = M_{\text{maan}} = 0,0735 \cdot 10^{24} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 31})$$

$$r = 384,4 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2,92942 \cdot 10^{37}}{0,0735 \cdot 10^{24} \times 384,4 \cdot 10^6}}$$

$$v = 1,01825 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{0,0735 \cdot 10^{24} \times 1,01825 \cdot 10^3} =$$

$$\lambda = 8,85333 \cdot 10^{-60} \text{ m}$$

$$O = 2\pi r$$

$$r = 384,4 \cdot 10^6 \text{ m}$$

$$O = 2\pi \times 384,4 \cdot 10^6 = 2,415 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$n = \frac{O}{\lambda}$$

$$\lambda = 8,86 \cdot 10^{-60} \text{ m}$$

$$n = \frac{2,415 \cdot 10^9}{8,8533 \cdot 10^{-60}} = 2,728 \cdot 10^{68}$$

Afgerond: $n = 2,73 \cdot 10^{68}$.

n is heel groot. Dus dit is een zeer hoge aangeslagen toestand.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

- c Als n heel groot wordt, wordt het energieverval tussen opeenvolgende energieniveaus steeds kleiner. Voor de maan is n zeer groot. Dus de maan gaat over naar een ander energieniveau door een zeer kleine energiehoeveelheid op te nemen of af te staan.

Opgave 24

- a De eenheid leid je af met de andere eenheden in de formule.

$$\left[\frac{h}{\sqrt{2m \cdot \Delta E}} \right] = \frac{[h]}{\sqrt{[m] \cdot [E]}}$$

$$[h] = \text{J s}$$

$$[m] = \text{kg}$$

$$[E] = \text{J}$$

$$\left[\frac{h}{\sqrt{2m \cdot \Delta E}} \right] = \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\sqrt{\text{kg} \cdot \text{J}}} = \text{s} \cdot \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}}$$

Verder geldt $\text{J} = \text{N m} = (\text{kg m s}^{-2}) \cdot \text{m} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$.

$$\text{Dus } \left[\frac{h}{\sqrt{2m \cdot \Delta E}} \right] = \text{s} \cdot \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \text{s} \cdot \sqrt{\frac{\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}}{\text{kg}}} = \text{s} \cdot \text{m s}^{-1} = \text{m}.$$

Dit is inderdaad de eenheid van lengte.

- b Als de massa van het deeltje m groter is, is volgens de gegeven formule $d_{\frac{1}{2}}$ kleiner.

Als de horizontale afstand d hetzelfde is, dan is $\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}$ dus groter. Daardoor is $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}}$ kleiner en

de kans op tunnelen dus ook.

- c *Reden 1*

Voor een deeltje met een energie van 9 MeV is het energietekort ΔE groter dan voor een deeltje met energie 10 MeV.

Als ΔE groter is en de massa is dezelfde, dan is volgens de gegeven formule $d_{\frac{1}{2}}$ kleiner.

Als de horizontale afstand d hetzelfde is, dan is $\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}$ groter. Daardoor is $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}}$ kleiner en de

kans op tunnelen dus ook.

Reden 2

Een deeltje met een energie van 9 MeV moet over een grotere afstand door de energiebarrière tunnelen dan een deeltje met een energie van 10 MeV. Dus de horizontale afstand d is groter.

Als de halveringsdikte dezelfde is, dan is $\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}$ groter. Daardoor is $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}}$ kleiner en de kans op

tunnelen dus ook.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

13.5 Elektronen in materialen

Opgave 25

- a De de Broglie golf lengte bereken je met de formule voor de de Broglie golf lengte.
De snelheid bereken je met de formule voor kinetische energie.
De kinetische energie volgt uit de gemiddelde energie.
De gemiddelde energie bereken je met de gegeven formule.

$$E_{\text{gem}} = \frac{3}{2} k_B \cdot T$$

$$k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

$$T = 293 \text{ K}$$

$$E_{\text{gem}} = \frac{3}{2} \times 1,380649 \cdot 10^{-23} \times 293$$

$$E_{\text{gem}} = 6,06795 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$E_k = E_{\text{gem}} = 6,06795 \cdot 10^{-21}$$

$$m = m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$6,06795 \cdot 10^{-21} = \frac{1}{2} \times 9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot v^2$$

$$v = 1,1542 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,10938 \cdot 10^{-31} \times 1,1542 \cdot 10^5}$$

$$\lambda = 6,30189 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 6,3 \text{ nm.}$$

- b Voor een kern van Fe-56 is de gemiddelde energie bij kamertemperatuur dezelfde.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$E_k = E_{\text{gem}} = 6,06795 \cdot 10^{-21} \text{ J} \quad (\text{zie vraag 25a})$$

$$m_{\text{Fe-56}} = 55,9349 \text{ u}$$

$$\text{Dit is } 55,9349 \times 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 9,28799 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabellen 25 en 7B})$$

Dit is de massa van een atoom Fe-56. De kern heeft 56 elektronen minder.

De kern heeft dan een massa van $9,28799 \cdot 10^{-26} - 56 \times 9,10938 \cdot 10^{-31} = 9,2828 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$.

$$6,06795 \cdot 10^{-21} = \frac{1}{2} \times 9,2828 \cdot 10^{-26} \cdot v^2$$

$$v = 3,6157 \cdot 10^2 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$\text{Invullen levert: } \lambda = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{9,2828 \cdot 10^{-26} \times 3,6157 \cdot 10^2}$$

$$\lambda = 1,97 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 20 \text{ pm.}$$

- c De golflengte van een elektron (0,63 nm) is groter dan de afstand tussen de atomen (0,23 nm). De golf functie van een elektron overlapt dus met de golf functies van meerdere atomen. Er zijn dus quantumeffecten te verwachten.
De golflengte van een kern Fe-56 is kleiner dan de afstand tussen de atomen. De golf functie van een kern Fe-56 heeft geen overlap met de golf functies van andere kernen. Daardoor zijn er geen quantumeffecten te verwachten.

Opgave 26

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

- a De drie elektronen verdeel je over de energieniveaus, waarbij je rekening houdt met het uitsluitingsprincipe van Pauli.
In elk niveau kunnen maximaal twee elektronen.
Zie tabel 13.1.

	n_1	n_2	n_3
1	2	1	0
2	1	2	0
3	2	0	1
4	1	1	1
5	0	2	1
6	1	0	2
7	0	1	2

Tabel 13.1

- b De fotonenergieën van de spectraallijnen bereken je met het verschil tussen de energieniveaus bij emissie van fotonen:
 overgang n_3 naar n_2 $\Delta E = 5,6 - 3,2 = 2,4 \text{ eV}$
 overgang n_3 naar n_1 $\Delta E = 5,6 - 1,5 = 4,1 \text{ eV}$
 overgang n_2 naar n_1 $\Delta E = 3,2 - 1,5 = 1,7 \text{ eV}$
- c De energie bereken je met de energieën van de drie niveaus waarbij je rekening houdt met het uitsluitingsprincipe van Pauli.
 Vanwege het Pauli-uitsluitingsprincipe kan maar één elektron met spin omhoog in een energieniveau. Dus elk energieniveau heeft één elektron.
 In deze toestand is dus de energie gelijk aan $1,5 + 3,2 + 5,6 = 10,3 \text{ eV}$.

Opgave 27

- a De lengte bereken je met de formule voor de energie van deeltje in een eendimensionale energieput.

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

$$E_1 = 0,25 \text{ eV} = 0,25 \times 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$n = 1$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = 9,1093 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$\text{Invullen levert: } 4,005 \cdot 10^{-20} = 1^2 \cdot \frac{(6,6260 \cdot 10^{-34})^2}{8 \times 9,1093 \cdot 10^{-31} \cdot L^2}$$

$$L = 1,226 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } L = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m.}$$

- b De energie van een niveau bereken je met $E_n = n^2 \cdot E_1$ met $E_1 = 0,25 \text{ eV}$.
 $E_1 = 0,25 \text{ eV}$ $E_2 = 1,00 \text{ eV}$ $E_3 = 2,25 \text{ eV}$ $E_4 = 4,00 \text{ eV}$ $E_5 = 6,25 \text{ eV}$

De kleur die het molecuul uitzendt wordt bepaald door de overgangen tussen vrije energieniveaus. Met 8 elektronen vul je de eerste 4 energieniveaus: één keer spin omhoog en één keer spin omlaag per niveau. Het laagste niet gevulde niveau is dan E_5 . De kleinste energiesprong die mogelijk is, is als een elektron van E_4 naar E_5 springt. Hierbij wordt een foton van $6,25 - 4,00 = 2,25 \text{ eV}$ eerst geabsorbeerd, en daarna weer uitgezonden.

In BINAS tabel 19A zie je dat het molecuul dus groen licht uitzendt.

Voor de overgang van $n = 4$ naar $n = 6$ is $(6^2 - 4^2) \times 0,25 = 5,0 \text{ eV}$ nodig;

voor overgangen naar $n = 5$ van lager liggende niveaus komt minstens $4,0 \text{ eV}$ vrij.

Dit hoort allemaal niet bij zichtbaar licht. Het groene licht is het enige zichtbare licht dat wordt uitgezonden.

- c Dit systeem kan alleen fotonen opnemen van $4,0 \text{ eV}$ bij een overgang van $n = 3$ naar $n = 5$.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Springt er een elektron van $n = 3$ naar $n = 5$, dan kan een elektron van $n = 4$ naar $n = 3$ springen onder uitzending van een foton met een energie van 1,75 eV, dat is rood licht volgens BINAS tabel 19A.

Daarna kan het elektron van $n = 5$ naar $n = 4$ overgaan onder uitzending van een foton van 2,25 eV, en dat is groen licht.

Opgave 28

- a Dat de lengte L gelijk is aan 2,5 nm maak je aannemelijk door de gemiddelde lengte van de 11 dubbele en 10 enkele bindingen op te vatten als de binding in benzeen. De 11 dubbele bindingen en 10 enkelvoudige bindingen vormen samen 21 bindingen zoals de $C-C$ in benzeen. De bindingslengte in benzeen is $140 \cdot 10^{-12}$ m. De lengte van het geconjugerd systeem in β -caroteen is $21 \times 140 \cdot 10^{-12} = 2,94 \cdot 10^{-9}$ m = 2,94 nm. De koolstofketen heeft een zigzagstructuur. Dus de lengte in rechte lijn is kleiner (en blijkbaar 2,5 nm).
- b Er zijn 22 elektronen beschikbaar. Voor de laagst mogelijke energie van het molecuul zijn de laagste 11 niveaus gevuld met twee elektronen. Bij de eerste aangeslagen toestand zit een elektron in niveau $n = 12$. Dus is er een overgang van $n = 11$ naar $n = 12$.
- c De formule voor het energieverschil leid je af met de formule voor de energie van een deeltje in een eendimensionale energieput en de waarden $n = 12$ en $n = 1$.

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

$$\Delta E = 12^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} - 11^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} = (144 - 121) \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2} = 23 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

- d Volgens BINAS tabel 19A heeft licht met frequentie kleiner dan $6 \cdot 10^{14}$ blauwe en violette kleuren. Die kleuren worden geabsorbeerd en de andere weerkaatst. De weerkaatste kleuren zorgen voor een mengkleur van groen, geel en rood. Geel en rood levert de kleur oranje. Blijkbaar overheerst de kleur oranje in wortels.
- e De lengte L bereken je met de gegeven formule. Het energieverschil bereken je met de formule voor de energie van een foton.

$$\Delta E = h \cdot f$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$f = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\Delta E = 6,6260 \cdot 10^{-34} \times 6 \cdot 10^{14}$$

$$\Delta E = 3,975 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Delta E = 23 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

$$m = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$3,975 \cdot 10^{-19} = 23 \cdot \frac{(6,6260 \cdot 10^{-34})^2}{89,10938 \cdot 10^{-31} \cdot L^2}$$

$$L = 1,86 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } L = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 2 \text{ nm.}$$

Dat komt dus overeen met de 2,5 nm die volgt uit BINAS tabel 53.

Opgave 29

- a De bewegende deeltjes bewegen gemiddeld met 35 meV. Dan heeft ongeveer de helft van de deeltjes een nog hogere energie. Er zijn dus heel veel interacties mogelijk waarbij een elektron de band gap oversteekt.
- b Dat de band gap kleiner moet zijn dan 1,65 eV leg je uit met behulp van BINAS tabel 19A. Volgens BINAS tabel 19A ligt de energie van de fotonen in zichtbaar daglicht tussen 1,65 eV en 3,10 eV. Fotonen in het rode gebied van zichtbaar licht moeten dan nog in staat zijn om elektronen over de band gap te laten springen. Dus moet de band gap kleiner zijn 1,65 eV.
- c In een blauw led ontstaat (blauw) licht als een elektron terugvalt van de geleidingsband naar de valentieband. Daarbij komt een foton vrij waarbij de fotonenergie gelijk is aan de band gap. Volgens BINAS tabel 19A hebben fotonen van blauw licht een energie van ongeveer 3 eV.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Als er blauw licht ontstaat, is de band gap dus ongeveer 3 eV.

Opgave 30

- a De golflengte bereken je met de formule voor de energie van een foton.
De energie volgt uit de band gap van silicium.

De energie van de band gap van silicium is 1,10 eV.

Dit is gelijk aan de (minimale) energie van het foton.

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$E_f = 1,10 \text{ eV} = 1,10 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 1,7622 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

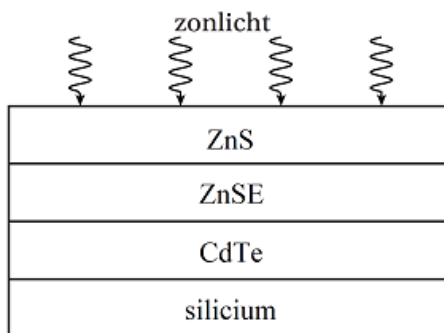
$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7B})$$

$$\text{Invullen levert: } 1,7622 \cdot 10^{-19} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{\lambda}$$

$$\lambda = 1,1272 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\text{Afgerond: } \lambda = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

- b De band gap van silicium is 1,10 eV. Fotonen met een energie kleiner dan 1,10 eV kunnen elektronen de band gap niet laten oversteken en zijn dus verloren: het rendement ervan is 0. Fotonen met een energie groter of gelijk aan 1,10 eV kunnen elektronen wel de band gap laten oversteken. Fotonen met meer energie dan 1,10 eV geven het overschot van hun energie af in de vorm van warmte. Hiermee daalt het rendement van een zonnecel. Hoe groter het verschil, hoe kleiner het rendement.
- c Het rendement schat je met de oppervlakte onder de grafiek tussen 1,65 eV en 3,10 eV. Het rendement bij een foton van 1,65 eV is ongeveer 0,6 = 60%. Het rendement bij 3,10 eV is 0,36 (= 36%). Gemiddeld is dit 48%. Rekening houdend met de kromming zal de schatting dus iets lager zijn. De schatting is 47%.
- d Zie figuur 13.6.



Figuur 13.6

- De stof met de grootste band gap absorbeert fotonen met de meeste energie. Fotonen met de meeste energie moeten als eerste geabsorbeerd worden (om te voorkomen dat deze fotonen zorgen voor rendementsverlies in lager liggend materiaal). Dus moet de stof met de grootste band gap bovenop.
- Vervolgens komen de andere stoffen met een band gap groter dan die van silicium, waarbij van boven naar beneden de band gap steeds kleiner wordt.

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

13.6 Afsluiting

Opgave 31

- a Het atoom beweegt naar het foton toe. Hierbij treedt blauwverschuiving op: dus naar hogere frequenties. Voor de fotonenergie geldt $E_f = h \cdot f$. Omdat h een constante is, betekent een hogere frequentie een hogere fotonenergie. Daardoor heeft het foton wel voldoende energie om het atoom aan te slaan.
- b Het frequentieverschil bereken je met het verschil in fotonenergie tussen de twee fotonen. Het verschil in fotonenergie volgt volgens de wet van behoud van energie uit het verschil in kinetische energie van het atoom. De kinetische energie van het atoom bereken je met de formule voor kinetische energie van het atoom ^{85}Rb .

$$\Delta E_k = E_{k,\text{voor}} - E_{k,\text{na}}$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$m = 84,91179 \text{ u} = 84,91179 \times 1,6605 \cdot 10^{-27} = 1,40996 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

$$v_{\text{voor}} = 0,500 \text{ m s}^{-1}$$

$$v_{\text{na}} = 0,495 \text{ m s}^{-1}$$

Invullen levert:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \times 1,40996 \cdot 10^{-25} \times 0,500^2 - \frac{1}{2} \times 1,40996 \cdot 10^{-25} \times 0,495^2 = 3,507 \cdot 10^{-28} \text{ J}$$

Volgens de wet van behoud van energie is $\Delta E_f = \Delta E_k$.

$$\Delta E_f = h \cdot \Delta f$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\text{Invullen levert: } 0,03515 \cdot 10^{-26} = 6,6260 \cdot 10^{-34} \times \Delta f$$

$$\Delta f = 5,3048 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

$$\text{Afgerond: } \Delta f = 5 \cdot 10^5 \text{ Hz.}$$

- c Als een atoom een foton uitzendt, is er sprake van een kracht van het atoom op het foton. Volgens de derde wet van Newton is er dan ook sprake van een kracht van het foton op het atoom. Hierdoor krijgt het atoom een versnelling en dus snelheid.
- d De snelheid bereken je met de formule voor de de Broglie golf lengte. De (de Broglie) golf lengte bereken je met de formule voor de fotonenergie. De fotonenergie bereken je met de oorspronkelijke fotonenergie en het verschil in kinetische energie van het atoom bij een botsing.

$$E_f = E_{f,\text{voor}} + \Delta E_k$$

$$E_{f,\text{voor}} = 1,59 \text{ eV} = 1,59 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 2,54718 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Delta E_k = 3,507 \cdot 10^{-28} \text{ J} \quad (\text{zie vraag b})$$

$$E_f = 2,54718 \cdot 10^{-19} + 0,03515 \cdot 10^{-26} = 2,54718 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$2,54718 \cdot 10^{-19} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{\lambda}$$

$$\lambda = 7,79846 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$h = 6,6260 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (\text{zie BINAS tabel 7A})$$

$$m = 1,40996 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \quad (\text{zie vraag 30b})$$

$$\text{Invullen levert: } 7,79846 \cdot 10^{-7} = \frac{6,6260 \cdot 10^{-34}}{1,40996 \cdot 10^{-25} \cdot v}$$

$$v = 6,026 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

Vwo 6 Hoofdstuk 13 Uitwerkingen

Afgerond: $v = 6,03 \text{ m s}^{-1}$.

Opgave 32

- a In figuur 13.52 staat de led in de doorlaatrichting als de stroom van links naar rechts door de led loopt. De elektronen gaan in de tegenovergestelde richting. In de tekst staat dat het elektron eerst in het n-type materiaal komt. In figuur 13.52 bevindt het n-type geleidend materiaal zich dus aan de rechterkant van de led.
- b De pluspool trekt aan de elektronen uit het n-type, maar daar is al een tekort aan elektronen. De minpool duwt elektronen richting het p-type, maar daar is al een overschot. De stroom wordt dus geblokkeerd
- c – Het elektron moet binnenkomen via de geleidingsband. Alle lagere energieniveaus zijn immers bezet. De elektrische energie van het elektron moet dus groot genoeg zijn om de band gap te kunnen oversteken.
– De drempelspanning bereken je met de formule voor de toename van de elektrische energie.
Volgens de wet van behoud van energie is de toename van de elektrische energie (minstens) gelijk aan de fotonenergie die vrijkomt bij terugvallen.

$$E_{\text{el}} = E_{\text{f}} = 2,26 \text{ eV}$$

$$E_{\text{el}} = q \cdot U$$

$q = e$ bij een elektron

$$U = 2,26 \text{ V}$$

- d De kleur van het licht bepaal je met BINAS tabel 19A.
Bij het terugvallen van een elektron komt een foton vrij met een energie van 2,26 eV.
Volgens BINAS tabel 19A hoort bij dit type fotonen zichtbaar licht in de kleur groengeel.
- e Dat bij interne conversie warmtestraling vrijkomt beredeneer je met BINAS tabel 19A.
Bij interne conversie is het energieverschil veel kleiner dan 2,26 eV.
De bijbehorende fotonen hebben dan ook een veel kleinere energie. Als de fotonenergie veel kleiner is dan 2,26 eV, behoort de erbij behorende straling volgens BINAS tabel 19A niet tot zichtbaar licht, maar tot infraroodstraling. Infraroodstraling is warmtestraling.
- f Of ΔE_1 samenhangt met de afmetingen of met de afstanden beredeneer je met de formule voor de energie van een deeltje in een eendimensionale energieput.

$$E_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{8m \cdot L^2}$$

Kleinere hoeveelheden energie en dus kleine energieverschillen horen dus bij een grotere waarde van L . De afmetingen van de led zijn groter dan de afstanden tussen de atomen. Omdat ΔE_1 groter is dan ΔE_2 bepalen de afstanden tussen de afzonderlijke atomen in de led dus ΔE_1 (en de afmeting van de led zelf bepaalt dus ΔE_2).