

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1: Biomimetica en Quantum Technologie	3
1.1. Wat is biomimetica?.....	3
1.2. Vliegen als voorbeeld van biomimetica	3
1.3. Technologie en biomimetica	6
1.4. Het elektrisch veld.....	7
1.5. Sensoren.....	8
1.6. Quantummechanica.....	10
Hoofdstuk 2: Licht waarnemen en maken	12
2.1. Inleiding.....	12
2.2. Licht: Kleur, golflengte en frequentie	13
2.3. Licht en donker onderscheiden: staafjes	15
2.4. Kleur onderscheiden: kegeltjes	17
2.5. Kleuren maken en meten met LEDs.....	19
2.6. Lichtdeeltjes: fotonen	23
2.7. Fotodiodes	25
2.8. Fotodiodes en het oog	26
2.9. Verdieping: Halfgeleiders	28
Hoofdstuk 3: Fluorescentie en microscopie.....	29
3.1. Inleiding.....	29
3.2. Fluorescentie.....	31
3.3. Filters en spectrofotometers.....	33
3.4. Toepassing: energiezuinige lampen	33
3.5. Toepassing: Fluorescentiemicroscopie.....	35
3.6. Toepassing: Quantumdots	36
Hoofdstuk 4: Magnetisme en spin	37
4.1. Inleiding.....	37
4.2. Navigerende vogels	37
4.3. Magnetische velden en elektrische stroom.....	38
4.4. Elektronspin	40
4.5. Energietoestanden in een magneetveld: het zeemaneffect	40
Hoofdstuk 5: Beeldvorming met NV centers.....	44
5.1. Inleiding.....	44
5.2. De structuur van diamant met NV centra	44
5.3. Energieniveau schema van een NV centrum	46

NLT Module Quantum Ready

Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

5.4. Magneetveld meten met NV centra46

Hoofdstuk 1: Biomimetica en Quantum Technologie

Opdracht 1.1. Startopdracht

In dit hoofdstuk maak je kennis met de twee concepten die de basis van deze module vormen: biomimetica en quantum sensoren.

1.1. Wat is biomimetica?

Goed kijken naar hoe de natuur werkt kan ons helpen met het ontwikkelen van nieuwe technologie. Veel van onze technologische uitdagingen zijn namelijk al door de natuur opgelost in een proces van miljarden jaren aan evolutie. Hoe houd je overdag iets koel, of 's nachts warm? Hoe zet je licht om in bruikbare energie? Hoe maak je iets waterafstotend? Dat zijn allemaal vragen waar wetenschappers, technici en ingenieurs zich mee bezig houden. Soms kijken ze daarvoor goed naar de natuur om nieuwe oplossingen te vinden. Bewust de functionaliteit van de natuur nadoen heet biomimetica of in het Engels biomimicry. In plaats van leren over de natuur leer je van de natuur. Het volgende voorbeeld laat dat goed zien.

1.2. Vliegen als voorbeeld van biomimetica

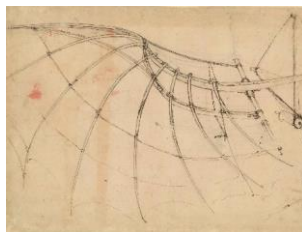
In een mythe uit de Griekse oudheid maakt de uitvinder Daedalus vleugels uit veren en bijenwas voor hem en zijn zoon om van het eiland Kreta weg te kunnen vliegen. Ondanks waarschuwingen van zijn vader vliegt Icarus te dicht bij de zon waardoor de bijenwas smelt. Icarus stort neer in de Icarische Zee en verdrinkt (figuur 1a).

Het tragische verhaal van Icarus illustreert dat mensen al duizenden jaren fantaseren over zelf kunnen vliegen. Het duikt bijvoorbeeld ook op in het werk van Leonardo Da Vinci omstreeks 1480. Hij bestudeert vogels en ontwerpt meerdere kunstvleugels (figuur 1b), inclusief een harnas om de vleugels om te doen.

In 1903 voeren de gebroeders Wright de eerste gemotoriseerde vliegtuigvlucht uit (figuur 1.1c). Ze hadden in de jaren daarvoor uitgebreid gewerkt aan het ontwerpen van vleugels die tijdens de vlucht van vorm kunnen veranderen om zo het toestel stabiel te houden, net zoals vogels dat doen. Mocht je ooit in een vliegtuig bij het raam zitten let dan eens op de vleugel. Die verandert tijdens de vlucht ook van vorm.



Figuur 1.1a: De val van Icarus, geschilderd door Jacob Peter Gowy (17^e eeuw).



Figuur 1.1b: Vleugelontwerp door Leonardo da Vinci.



Figuur 1.1c: De succesvolle vliegtuigvlucht van de gebroeders Wright in 1903.

Commented [LK1]: Hier nog een startopdracht van maken. Mede n.a.v. feedback Suzanne Calabretta:

In hoofdstuk 1 zou mijns inziens moeten worden uitgelegd a) wat NV centers zijn b) hoe biomimetisch onderzoek en quantum technologie relevant zijn voor onderzoek aan/ begrip van de NV centers. Vervolgens kan kort worden aangestipt wat quantum sensoren zijn, welke quantum sensoren een rol spelen en wat quantum biomimetisch onderzoek behelst. Nu wordt erin Hoofdstuk 1 begonnen met voorbeelden (die niets te maken hebben met quantum) van biomimetische technologie en is er een korte (erg oppervlakkige) definitie van quantum fysica (1.6) met quantum sensor toepassing, het is niet duidelijk waarom deze onderwerpen behandeld worden en wat het hoofd thema is van de module.

Hier onder wat aantekeningen.

Elevator pitch (achtig). Dit in aangepaste vorm is misschien iets voor de inleiding op de NLT-module.

We leren van de natuur voor onze technische toepassingen. Veel moderne technieken/toepassingen zijn afhankelijk van kennis van interactie tussen licht en materie op atomaire en moleculaire schaal. De natuurkunde daarvan is de quantummechanica.

In deze NLT module laat je je inspireren door de natuur voor gebruik in technologische toepassingen. Gaandeweg leer je zo ook hoe de natuur op atomaire schaal werkt.

Commented [LK2]: Om de "we" vorm weg te werken en omdat er anders een vraag staat die niet voor de leerling bedoeld is.

Commented [LK3]: Als je dat bedoelt.

NLT Module Quantum Ready

Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Opdracht 1.2. [Een nog betere vleugel](#)

Rond 1970 stelt Richard Whitcomb, ingenieur bij NASA, voor het ontwerp van een vliegtuigvleugel aan te passen zodat deze meer lijkt op de vleugel van een zwevende adelaar. Zie figuur 1.2 a t/m c.



Figuur 1.2a: Vliegtuigvleugel zonder aanpassing.



Figuur 1.2c: Zwevende adelaar. (Foto door Derek Keats)



Figuur 1.2b: Uiteinde van een vliegtuigvleugel met Whitcombs aanpassing.

[Zoek informatie in ten minste drie verschillende bronnen](#) om in je eigen woorden onderstaande vragen te beantwoorden. Geef daarbij duidelijk aan welke informatie uit welke bron afkomstig is. Gebruik tussen de 250 en 500 woorden.

1. Wat heeft Whitcomb aan de vleugel van een vliegtuig aangepast?
2. Voor welke verbetering(en) heeft deze verandering gezorgd?

Welke impact heeft dat gehad op de moderne luchtvaart?

Commented [LK4]: Uiteindelijk moeten we de opdrachten denk ik een andere achtergrondkleur geven, zodat duidelijk is waar de tekst weer verder gaat.

Commented [RO5R4]: Eens. Aan het eind een vormgever (TA van IO of zo?) aan de slag zetten.

Commented [LK6]: Alternatief: laat drie leerlingen elk één andere bron vinden.

Opdracht 1.3. [Match de natuur en de toepassing](#)

Hieronder vind je twee lijsten. De eerste bevat beschrijvingen van een biomimetische toepassing (nummers 1 t/m 9), geïnspireerd op een dier. De tweede bevat een aantal dieren (letters A t/m I). Probeer bij iedere technologische toepassing (nummer) het juiste dier of plant (letter) te vinden en stel zo een lijst met voorbeelden van biomimetica samen. Noteer hiervoor de nummers 1 t/m 9 in je schrift en noteer daar achter de juiste letters A t/m I. Een antwoord is al gegeven: 7 = H.

1	Waterafstotende oppervlakken, zoals kleding of zonnepanelen
2	Air conditioning Eastgate Center (kantoorgebouw) in Zimbabwe
3	Ecologische witte verf
4	Stillere Japanse Bullet Train
5	Efficiëntere wieken van een windmolen
6	Antibacteriële coatings in het ziekenhuis
7	Wateropvang voor hergebruik in een energiecentrale
8	Ecologische schimmelbestrijdingsmiddel
9	Watervaste, ecologische lijm



1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

A Termietenheuvel

B IJsvogel

C Mosselen



D Citroenhaai



E Cyphochilus Kever



F Bultrugwalvis



G Oregano



H Bijen



I Lotusblad

Opdracht 1.4. Match de natuur en de toepassing (vervolg)

In Opdracht 1.3 heb je kennis gemaakt met een aantal voorbeelden van biomimetica. Bij ieder voorbeeld is een video beschikbaar die je van de docent krijgt.

- Kies één voorbeeld van biomimetica uit Opdracht 1.3 (maar niet 7H).
- Zoek bij dat voorbeeld, naast de video twee aanvullende bronnen.
- Gebruik je bronnen om in je eigen woorden uit te leggen wat het verband is tussen de natuur en de technologische toepassing.

Geef duidelijk aan welke informatie uit welke bron afkomstig is en gebruik tussen de 250 en 500 woorden.

1.3. Technologie en biomimetica

Biomimetica is niet alleen kijken naar de natuur. Het is een proces waarbij observeren, meten, onderzoeken en ontwerpen een belangrijke rol spelen. Zo vergeleek Richard Whitcomb de vleugel van een vliegtuig met de vleugel van een adelaar en haalde daar inspiratie uit. Hij heeft vervolgens verschillende modelvleugels gemaakt en de luchtweerstand gemeten in een windtunnel.

Waarom de cyphochilus kever uit Opdracht 1.3 wit is kun je niet zo makkelijk zien met het blote oog. Daarvoor moet je het schild van de kever onder een microscoop onderzoeken om kleine structuren te kunnen zien. Naast een technologie om het schild te bestuderen heb je andere technologie nodig om de structuur van het schild na te bootsen. Vragen die eenvoudig lijken, hebben vaak een uitgebreid antwoord hebben. Wat is bijvoorbeeld de 'kleur' wit? Dit soort vragen zul je in de loop van deze module proberen te beantwoorden.

Commented [LK7]: Bron:
<https://pxhere.com/en/photo/671271>
 CC0 1.0

Commented [LK8]: iets gerichtere vraag, maar ik ben nog niet tevreden. De vraag is: wat willen we dat leerlingen toelichten?

Commented [LK9]: Ik denk dat het bruggetje meer is: We gaan biologische systemen op microscopische schaal gebruiken als inspiratie voor technologische toepassingen. Daarvoor is nieuwe natuurkunde nodig: de quantummechanica. Vliegen was alleen een voorbeeld voor biomimetica. Het voorbeeld van de kever en het water is een voorbeeld van een microscopische toepassing.

Commented [RO10]: Dit is een mooie aanleiding om het begrip kleur en interferentie van licht uit te diepen, eventueel in een apart hoofdstuk of in het hoofdstuk over microscopie. Misschien kunnen we het schild van zo'n kever onder de AFM leggen?

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

Je zult in de module voortdurend gebruik maken van natuurkundige begrippen en principes. Een voorbeeld daarvan, wat je in het volgende hoofdstuk ook zal tegenkomen, is het begrip elektrisch veld. Daarom **kijk je in de volgende paragraaf wat dieper naar voorbeeld 7H uit Opdracht 1.3.**

1.4. Het elektrisch veld

Lees onderstaand artikel.

Vers water uit energiecentrales

Van al het water op aarde is slechts 2,5% zoet water dat je zou kunnen drinken. Maar we gebruiken dat water ook voor heel veel andere toepassingen. Zo wordt in de Verenigde Staten maar liefst 39% van al het zoete water gebruikt voor het koelen van energiecentrales. Dat water ontsnapt via grote koeltorens naar de atmosfeer (zie figuur 1.3).



Figuur 1.3: Water ontsnapt via koeltorens naar de atmosfeer.



Figuur 1.4: Ingenieurs van MIT bij hun prototype. Bron: <https://energy.mit.edu/news/new-system-recovers-fresh-water-from-power-plants/>

Daarom ontwikkelen ingenieurs van het Massachusetts Institute of Technology (MIT) een systeem dat water van koeltorens opvangt om het te kunnen hergebruiken (figuur 1.4). Ze spannen daarvoor een elektrisch geladen net boven de koeltorens. Het opstijgende water krijgt de tegenovergestelde lading en wordt daardoor naar het net getrokken. Het water verzamelt zich op het net, waarna het naar beneden drupt. Bijen kunnen op een vergelijkbare manier bloemen vinden en het stuifmeel van de bloem blijft op eenzelfde manier aan de poten van de bij plakken.

Naar: *New systems recovers fresh water from power plants*, MIT News, <https://news.mit.edu/2018/new-system-recovers-fresh-water-power-plants-0608>

Elektrisch geladen deeltjes, zoals het water en het net, hoeven elkaar niet aan te raken om elkaar te kunnen beïnvloeden. Dat komt omdat ieder elektrisch geladen deeltje een elektrisch veld zich heen heeft. Dat veld kun je niet zien met het blote oog of onder een microscoop. Maar je kunt wel voelen dat het er is!

Opdracht 1.5. Practicum: statische elektriciteit waarnemen

Voor de volgende proef heb je nodig:

- kunststof kleding of kunststof doek (bijvoorbeeld van polyester)
- ballon

Voer de volgende proef uit en beantwoord de vragen:

- 1) Blaas de ballon op en knoop hem dicht.
- 2) Wrijf met de ballon een aantal keer snel over je kleding of de doek. De ballon krijgt zo een negatieve elektrische lading.
- 3) Houd de ballon vervolgens dicht bij haartjes op je arm.

Commented [LK11]: Ik vind de uitwerking van 7H hieronder nog niet zo duidelijk terug komen. Het gaat in de toepassing meer om de aantrekkingskracht en het blijven plakken van stuifmeel. In de uitwerking hier onder meer over het waarnemen van het elektrisch veld. Nog geen suggestie hoe het anders te doen...

Commented [LK12]: Dit is een beetje een sprong.

Commented [RO13R12]: Ja dat klopt. Komt omdat dit er later bij is geschreven. Ik doe een poging het wat te soepeler te maken.

Commented [LK14]: Bron: <https://pxhere.com/en/photo/1360825>
CC0 1.0

Commented [LK15]: Het nieuwsartikel heeft het over een ionenbundel die de druppels eerst een elektrische lading geeft.

Field Code Changed

Commented [LK16]: Mooi voorbeeld. Dit is wel biomimetica na de daad, want WiFi is toch niet geïnspireerd op communicatie tussen bijen?

Commented [RO17R16]: Er moet hier een kleine conclusie bijgeschreven worden over het opvangen van water. Het is een uitwerking van 7H uit opdracht 1.2. Zie filmpje <https://youtu.be/2pU5Yksk-pg>

WiFi is inderdaad een parallel die je de leerling mee zou kunnen geven maar het is geen biomimetica.

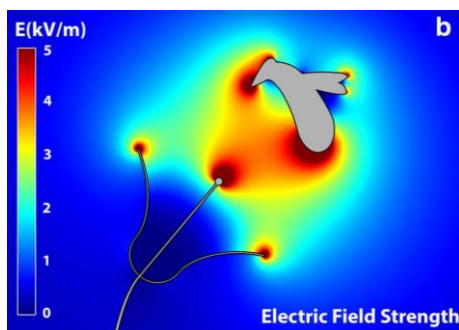
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

- 4) Beschrijf wat je ziet en beschrijf wat je voelt.
- 5) Bepaal vanaf welke afstand je dit voelt en druk je antwoord uit in je lichaamslengte.
Bijvoorbeeld: als je het effect voelt op 0,8 m en jij bent 1,6 m lang, dan voel je het effect op 0,5 lichaamslengtes.

De ballon in Opdracht 1.5 is geladen en oefent op afstand een kracht uit op de haartjes op je arm. Zo zou je op iedere positie rond de buis een bepaald effect kunnen verwachten. Natuurkundigen vatten die invloed afhankelijk van positie samen met het begrip *veld*. En omdat het om een *elektrische* kracht gaat heet het in dit geval een *elektrisch* veld.

Het blijkt dat bijen op een vergelijkbare manier het elektrisch veld van een bloem kunnen voelen. Komen ze dichtbij een bloem, ongeveer vanaf 10 cm, dan buigen haartjes op hun lijf af. Dat afbuigen zorgt voor een signaal in het zenuwstelsel van de bij. Een afstand van 10 centimeter klinkt misschien als weinig maar bedenk dat dit overeenkomt met ongeveer 5 lichaamslengtes van een bij! Het elektrisch veld dat een bloem maakt verschilt per bloemsoort. Bijen kunnen dus kleur, geur en het elektrisch veld gebruiken om verschillende bloemen te herkennen. In figuur 1.5 is het elektrisch veld rond een bloem zichtbaar gemaakt.



Figuur 1.5: Simulatie van de sterkte van het elektrisch veld tussen een bloem en een bij.

Niet alleen tijdens het vliegen maar ook met andere bewegingen maken bijen steeds wisselende elektrische velden. Ook die wisselende elektrische velden kunnen bijen waarnemen, zowel met de haartjes als met een zintuig in hun antennes. Het vermoeden bestaat dat bijen op afstand met elkaar kunnen communiceren door verschillende elektrische signalen te herkennen.

Mensen gebruiken ook elektrische (en elektromagnetische) signalen om met elkaar te communiceren. Denk bijvoorbeeld aan radio en wifi. Dat is niet direct afgekeken van de natuur maar wel een voorbeeld van hoe de natuur gebruik maakt van dezelfde natuurkundige principes als de mens.

1.5. Sensoren

Uit Opdracht 1.5 blijkt dat mensen wel het elektrisch veld kunnen voelen, maar er niet zo gevoelig voor zijn als een bij. De mens mist hiervoor een fijn ontwikkeld zintuig. Als je een elektrisch veld wil waarnemen met dezelfde (of meer) precisie als een bij dan moet je hiervoor een kunstmatig zintuig gebruiken. Zo'n kunstmatig zintuig noemen we een sensor. Een sensor zet een meetbare grootte om in een elektrisch signaal dat we kunnen aflezen op een voltmeter of verwerkt kan worden door een computer.

Opdracht 1.6. Zintuigen en sensoren

Commented [LK18]: Nog een definitie geven?

Commented [RO19R18]: Ik vind sensor = kunstmatig zintuig een prima werkdefinitie. Als jij een betere / duidelijkere hebt hoor ik het graag 😊

Commented [LK20R18]: Poging gedaan.

Commented [RO21R18]: Dan zou ik zeggen: een sensor zet een grootte om in een elektrisch signaal.

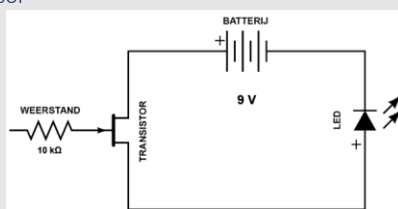
Figuur 3 is een simulatie, niet de output van een sensor.

De mens heeft verschillende zintuigen die je kunt zien als biologische sensor.


- a) Maak een lijst met zintuigen die een mens heeft.
- b) Probeer bij elk zintuig een sensor (kunstmatig zintuig) te vinden en noteer deze.
Bijvoorbeeld: Gehoor (20 Hz tot 20 kHz) → Microfoon
Als je informatie opzoekt vermeld dan de bronnen die je gebruikt hebt.
- c) Maak ook een lijst met zintuigen die (sommige) dieren wel hebben maar mensen niet.
Zoek ook daarbij weer een voorbeeld van een sensor en vermeld je bronnen.

Opdracht 1.7. Practicum: elektrisch veld sensor

In deze opdracht maak je met slechts een paar onderdelen een eenvoudige sensor die elektrische velden kan oppikken. Het doel van deze opdracht is iets te bouwen dat werkt maar niet om precies te begrijpen hoe het werkt, dat komt later in de module aan bod. Het schema is gegeven in figuur 1.6. De onderdelen uit het schema vind je in onderstaande tabel met een foto.



Figuur 1.6: Een eenvoudige sensor om het elektrisch veld te meten.

Onderdeel	Functie	Onderdeel	Functie
	JFET Transistor: regelt de stroom in het circuit. Dit is de eigenlijke sensor.		Lever energie om de led te laten branden
	led: is een indicator voor de hoeveelheid negatieve lading. Als er geen lading in de buurt is dan brandt de led. De lange pin is de plus (+)		Batterijclip om de batterij aan te sluiten.
	Weerstand: werkt als antenne en beschermt de transistor tegen statische elektriciteit.		Breadboard: Wordt gebruikt om de onderdelen in te klikken en met elkaar te verbinden.

Voer de volgende opdrachten uit:

- Teken op het werkblad hoe je de componenten op het breadboard wil prikken zodat ze het schema van figuur 1.6 vormen. Laat je ontwerp goedkeuren door de docent.
- Bouw vervolgens jouw opstelling en controleer dat de led gaat branden. Zo niet, dan heb je of een vergissing gemaakt (draai de led eens om) of er is een negatief elektrisch veld in de buurt. Probeer ook het losse uiteinde van de weerstand even aan te raken. Merk op dat het uiteinde van de weerstand los is: dat is geen fout, maar de bedoeling.
- Onderzoek hoe de sensor reageert in de buurt van een negatief geladen ballon (zie Opdracht 1.5).
- Wapper de ballon heen en weer op verschillende afstanden. Over welke afstand kan de sensor de aanwezigheid van de ballon nog meten? Kun je de sensor van een andere groep beïnvloeden?
- Werk samen met andere groepen: plaats jullie sensor in een zelfbedacht patroon, bijvoorbeeld allemaal op een rij op gelijke afstand van elkaar. Onderzoek hoe je zo kunt meten hoe het elektrisch veld rond de ballon eruit ziet. Dit is een beetje te vergelijken met de simulatie uit figuur 1.5 van de bij en de bloem.

1.6. Quantummechanica

Je hebt in Opdracht 1.7 je eerste quantumsensor gemaakt! De led en de transistor zijn namelijk gemaakt van het halfgeleidermateriaal silicium. Zoals je hebt gezien kun je prima apparaten bouwen

Commented [LK22]: Maken en toevoegen in docentmateriaal

Commented [LK23]: Eén woord in het NL

Commented [RO24R23]: Ja maar dat ziet er niet uit. Dan wordt het waarschijnlijk ook nog quantummechanica...

Commented [LK25R23]: Ik zou het gewoon eigenwijs schrijven als: quantummechanica.

met halfgeleiders zonder precies te weten waarom het werkt. Dat is wat elektrotechnisch ingenieurs doen: met een paar vuistregels ontwerpen ze heel veel nuttige circuits. Maar wil je beter begrijpen wat er in de halfgeleider gebeurt en waarom het reageert op een elektrisch veld, dan moet je een beetje quantummechanica kennen.

Opdracht 1.8. Wat weet je al van quantum?

Je hebt de term quantum, met of zonder 'mechanica', misschien al eens gehoord.

Bespreek met elkaar of en waar je de term bent tegengekomen. Noteer begrippen die volgens jullie met quantum te maken hebben en wat 'quantum' volgens jullie betekent.

In het volgende hoofdstuk duik je dieper in de wereld van de quantummechanica.

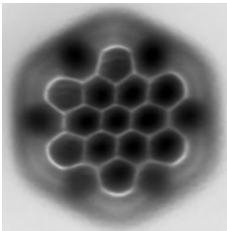
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

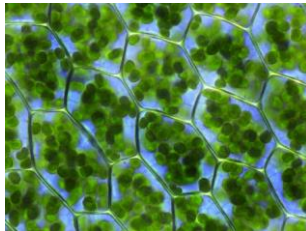
Hoofdstuk 2: Licht waarnemen en maken

2.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk heb je kennisgemaakt met een toepassing van de quantummechanica: de sensor voor het elektrisch veld maakte gebruik van halfgeleidermateriaal. Quantummechanica is een natuurkundige theorie die het gedrag van licht, materie en hun interactie beschrijft. Vaak wordt deze theorie gebruikt om het gedrag te beschrijven van dingen die we niet met het blote oog kunnen zien, zoals koolstofverbindingen (figuur 2.1a), bladgroencellen (figuur 2.1b) en zelfs kleine beestjes zoals het beerdier (figuur 2.1c).



Figuur 2.1a: AFM-opname van een koolstof-molecuul (2 nm breed).



Figuur 2.1b: Bladgroencellen in de mossoort *Plagiomnium affine*. Elke groene stip heeft een diameter van 5 µm.



Figuur 2.1c: Een beerdier onder de microscoop (lengte 0.3 mm).

Quantummechanica drukt een groot stempel op de wereld om je heen, ook al is dat niet altijd direct zichtbaar. Apparaten zoals een USB-stick, een laser en een led-lamp zouden niet mogelijk zijn zonder quantummechanica. Bovendien komen we er meer en meer achter dat ook in biologische processen quantummechanica een belangrijke rol moet spelen. We weten vaak nog niet precies hoe, maar wel dat het zo is. Ondertussen wordt er hard gewerkt aan het ontwikkelen van nieuwe quantum technologieën.

In deze module maak je kennis met een aantal voorbeelden van zowel oude als nieuwe quantumtechnologie. Daarbij wordt regelmatig de vergelijking gemaakt met de natuur of gebruik je technologie om de natuur beter te kunnen bestuderen. Dit hoofdstuk gaat over de vraag: wat is licht en hoe neem je het waar?

Opdracht 2.1. Nogmaals de bij

In hoofdstuk 1 heb je gezien dat bijen het elektrisch veld kunnen gebruiken om te navigeren en bloemen te herkennen. Zelf kun je ook de aanwezigheid van een elektrisch veld voelen maar je hebt geen zintuig dat erin is gespecialiseerd zoals een bij dat wel heeft.

- Geef een reden waarom de bij een zintuig heeft ontwikkeld om nauwkeurig het elektrisch veld te kunnen bepalen (en wij niet).
- Leg uit met welk biologisch proces de ontwikkeling van verschillende zintuigen samenhangt.

De haartjes van de bij gaan bewegen door de invloed van geladen deeltjes die (op afstand) een elektrisch veld veroorzaken. Om een beweging in gang te zetten is een energieomzetting nodig: de energie die zit opgeslagen in het elektrisch veld wordt omgezet in bewegingsenergie van de haartjes. Je kunt die energie transporteren van A naar B. Dat gebeurt via een verschijnsel waar je al enigszins bekend mee bent uit het dagelijks leven: licht.

Commented [RO26]: Er is vast een spannendere titel te bedenken

Commented [LK27]: Dit (en het beeld en tekst eronder) zou de inleiding kunnen zijn van H2.

Commented [LK28]: afmetingen erbij zetten?

Commented [RO29R28]: Goed idee, moet ik eens opzoeken

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

De natuur heeft vele verschillende manieren gevonden om dat licht waar te nemen. Kijk daarover onderstaande video. Later in dit hoofdstuk bekijk je de ogen van een van de dieren uit de video.



Commented [LK30]: Eventueel nog inzoomen op het zien van polarisatie door de bidsrunkhaankreeft en het bouwen van een camera om gepolariseerd licht te filmen: <https://www.youtube.com/watch?v=TdR3ZZ6sp80>

2.2. Licht: Kleur, golflengte en frequentie

In de komende paragrafen ga je verder onderzoeken wat licht en kleur zijn en hoe we licht kunnen waarnemen, maken en meten. Daarvoor is het handig eerst wat meer te weten over wat licht eigenlijk is.

In figuur 2.2 zie je een deel van een regenboog. Licht van de zon wordt door regendruppels uit elkaar getrokken in verschillende kleuren. Dat verloop van kleuren wordt een spectrum genoemd. De volgorde waarin het witte licht van de zon uiteenvalt is altijd hetzelfde.



Figuur 2.2 Regenboog na een storm door Ben Njeri

Commented [RO31]: Of: het elektromagnetisch spectrum?

Commented [RO32]: Ik heb het plaatje gespiegeld tov origineel om de kleuren op volgorde van golflengte te zetten zoals gebruikelijk in de grafieken met respons kegeltjes / staafjes.

Nadeel is dan wel weer dat we doorgaans de kleuren van de regenboog opnoemen van rood -> violet. Moeilijk om de juiste keuze te maken. Maakt het uit?

Commented [LK33]: Dan is er geen werkblad nodig.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Opdracht 2.2. Kleuren van de regenboog

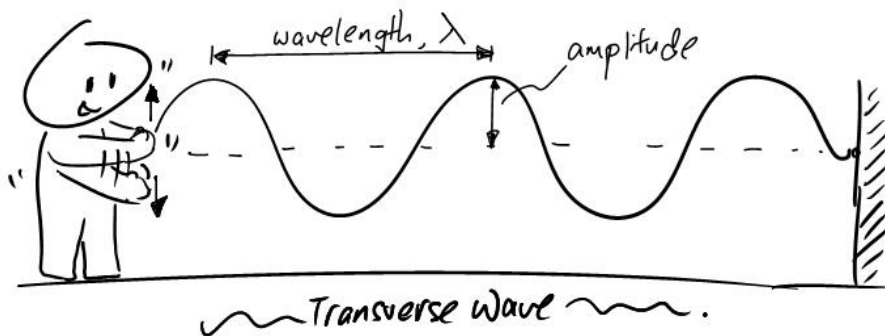
De regenboog wordt traditioneel verdeeld in zeven kleuren. Welke kleuren zijn dat? Neem de volgende zin over in je schrift en vul hem met behulp van figuur 2.2 aan:

"De zeven kleuren van de regenboog van buiten naar binnen zijn achtereenvolgens: ..."

Met licht bedoelen we meestal *zichtbaar* licht. Licht ontstaat door een regelmatige verstoring in het elektrisch veld. Een bij kan bijvoorbeeld ook een willekeurige verstoring in het elektrisch veld waarnemen, maar dat is een ander soort die we geen licht zouden noemen. Die *regelmatige* verstoring wordt elektromagnetische straling genoemd. Naast zichtbaar licht zijn er ook vormen van elektromagnetische straling die niet zichtbaar zijn voor mensen. Als we ze wel zouden kunnen zien, dan zou je in figuur 2.2 ultraviolet links van de regenboog nog violet zien en infrarood rechts van rood.

Dat de verstoring in het elektrische veld regelmatig is betekent dat het een bepaalde frequentie heeft: het aantal keer dat het veld per seconde verandert. Voor de grootte frequentie wordt de letter f gebruikt en je meet het in de eenheid hertz, afgekort met Hz. De hertz is gelijk aan de eenheid 'per seconde', dus $\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$. Elke kleur heeft zo een andere frequentie. Rood licht heeft bijvoorbeeld een frequentie van rond de $4,4 \cdot 10^{12}$ Hz. Vergelijk die frequentie maar eens met je hartslag: in rust zo'n 60 Hz.

Het bijzondere van elektromagnetische straling is dat de trilling zich altijd voortplant met de lichtsnelheid: $v = c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. Doordat de trilling zich voortplant ontstaat er een golflengte. Je kunt dat vergelijken met wat er in een heel lang touw gebeurt dat je aan een kant regelmatig op en neer beweegt: een trilling (figuur 2.3). Die trilling zal zich ook door het touw verplaatsen. Maar niet elk punt op het touw trilt op het zelfde moment in dezelfde richting. Er zit een vertraging in. Door die vertraging ontstaat er een golf in het touw. De lengte van één zo'n golf heet een golflengte. Voor de grootte golflengte wordt de Griekse letter λ gebruikt (spreek uit: lambda). De eenheid is de meter. De golflengte is gelijk aan de afstand die het licht in één trilling aflegt.



Figuur 2.3: Een trilling plant zich voort in een touw. (Bron: <https://evantoh23.wordpress.com/2011/07/29/general-wave-properties-rope-wave/>, rechten onbekend)

Tussen golflengte, frequentie en lichtsnelheid geldt nu het volgende verband:

$$\lambda \cdot f = c$$

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Met deze formule kun je de frequentie van rood licht omrekenen naar een golflengte.

Opdracht 2.3. Golfsnelheid, golflengte en frequentie

Elektromagnetische straling plant zich in vacuüm en lucht voort met een snelheid van $3,0 \cdot 10^8$ m/s. Het is moeilijk voor te stellen hoe snel dat is.

- a) Bereken hoe vaak licht in één seconde rond de evenaar kan reizen.

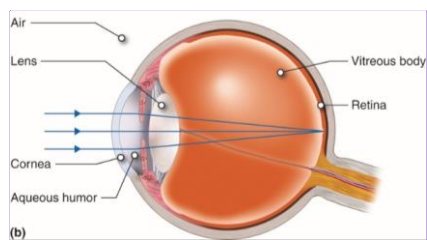
Er zijn vele vormen van elektromagnetische straling. Zichtbaar licht is daar maar een klein gedeelte van. Reken voor de volgende voorbeelden de gegeven frequentie om in een golflengte of andersom.

- b) Rood licht heeft een frequentie van rond de $4,4 \cdot 10^{12}$ Hz. Bereken de bijbehorende golflengte.
- c) Er zijn drie soorten ultraviolette straling: UV-A, UV-B en UV-C. Het grootste deel van de ultraviolette straling van de zon die de aarde bereikt is UV-A. Dat heeft een golflengte van 315 tot 400 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Reken de grenzen van UV-A om in hun frequentie.
- d) Een magnetron warmt eten op met behulp van radiogolven met een frequentie van 2,45 GHz. De G staat voor Giga. Zoek op hoe groot de vermenigvuldigingsfactor G is en reken de frequentie van magnetronstraling om naar een golflengte. Vergelijk die golflengte met de afmeting van een magnetronoven.

2.3. Licht en donker onderscheiden: staafjes

Dat wij elektromagnetische straling met een frequentie van rond de $4,4 \cdot 10^{12}$ Hz waarnemen als rood is niet zo vanzelfsprekend. Die kleur komt op een ingewikkelde manier tot stand. Om de werking van het oog beter te begrijpen kijken we daarom eerst naar de meest eenvoudige functie van het oog: het verschil meten tussen licht en donker.

Om licht van donker te onderscheiden moet het oog lichtenergie opnemen en omzetten in een elektrisch signaal dat naar de hersenen gestuurd wordt via de oogzenuw. Het opvangen en verwerken van licht gebeurt met je netvlies, zie figuur 2.4. Daar bevinden zich de lichtgevoelige cellen die kegeltjes en staafjes worden genoemd. De staafjes zijn vooral heel lichtgevoelig, met de kegeltjes zie je kleur. Daar is wel meer licht voor nodig. Vandaar dat je in het donker weinig kleur ziet: er is te weinig licht voor de kegeltjes in je oog om kleuren te onderscheiden.



Figuur 2.4 Een schematische doorsnede van het oog, waarin ook het netvlies is aangegeven. (CC BY 3.0 door Cenvio <https://www.coursehero.com/study-guides/cuny-csi-ap-1-2/special-senses-vision/>)

Opdracht 2.4. Kegeltjes en staafjes

In figuur 2.5 zie je een afbeelding van kegeltjes en staafjes gemaakt met een (elektronen)microscop.

Commented [LK34]: In deze sectie kunnen nog wat meer praktische opdrachten. Misschien is te bepalen hoe lichtgevoelig het oog is?

Commented [RO35R34]: Integratietijd camera vs. kikker

Wat leren lln. Over de biologie dat ze in een technische toepassing nodig hebben?

Commented [RO36]: Suggestie: korter door de bocht opschrijven. Verschillende kleuren onderscheiden bestaat uit meerdere stappen. Een van die stappen is licht en donker onderscheiden (en dat gaan we nu eerst doen)

Commented [LK37]: Inhoudelijk controleren

Commented [RO38R37]: Zijn staafjes inherent gevoeliger dan kegeltjes of is het 't systeem dat er achter zit met 'dataverwerking'

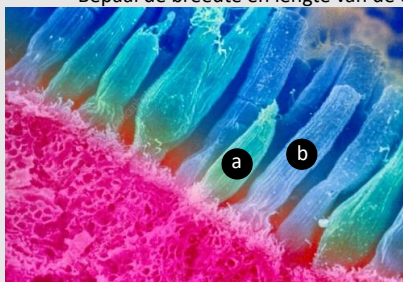
Commented [RO39]: Vertaling nodig

Field Code Changed

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

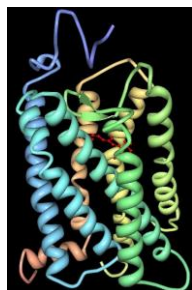
- Twee cellen zijn aangegeven met een letter (a en b). Welke van deze cellen is een kegeltje, welke een staafje?
- De vergroting van de opname bedraagt 4000×
Bepaal de breedte en lengte van de cel aangegeven met b.



Figuur 2.5 Een afbeelding van kegeltjes en staafjes gemaakt met een elektronenmicroscop. De kleuren zijn niet echt maar later toegevoegd. Vergroting 4000× (nietrechtenvrij!) | <https://www.sciencephoto.com/media/308755/view/false-colour-sem-of-rods-and-cones-of-the-retina>

Commented [LK40]: Nog even de schaal weergeven in de afbeelding

Hoewel kegeltjes en staafjes verschillende functies hebben, is hun werking gebaseerd op hetzelfde principe. Een lichtgevoelig molecuul (retinal) zit opgevouwen binnenin een groot eiwitmolecuul (opsine). Deze combinatie heet rodopsine (figuur 2.6). Als retinal lichtenergie opneemt dan verandert het van vorm (figuur 2.7). Hierdoor past het niet meer in de opsine. Zo valt het rodopsine uit elkaar en dat is het begin van het signaal dat naar de hersenen wordt gestuurd dat er licht is waargenomen.



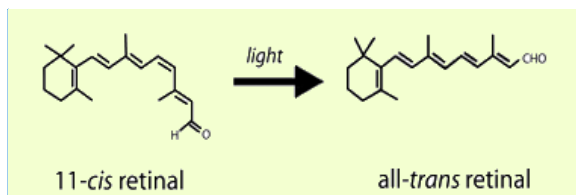
Figuur 2.6 Rodopsine met in het midden retinal (rode bolletjes). [publiek domein]

Commented [RO41]: Bijna niet te zien

Commented [LK42R41]: In figuur omcirkelen b.v.

Commented [LK43]: Figuur zelf maken

Commented [LK44]: 11- weglaten? Roept vragen op.



Figuur 2.7 cis-retinalmolecuul absorbeert licht en verandert in trans-retinal.

Opdracht 2.5. Lichtgevoelig molecuul: retinal

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

Retinal komt in twee vormen (isomeren) voor. In figuur 2.7 zie je een schematische weergave de twee vormen van retinal: cis en trans genaamd. Op ieder hoekpunt bevindt zich een koolstofatoom (C) die met een enkele binding (één streep) of dubbele binding (twee strepen) is verbonden met andere koolstofatomen.

Construeer een cis retinal molecuul met een molecuul bouwdoos. Maak er een foto van, verander het vervolgens in trans retinal en maak een tweede foto.

Commented [LK45]: Soms is er een verbinding met een H-atoom.

Opdracht 2.6. Stabiliteit van rodopsine

Af en toe verandert retinal spontaan van vorm zonder dat er een interactie is met licht. Dat is een bron van ruis: je oog (of een sensor) geeft een vals signaal af. Om goed te kunnen zien moet die ruis veel kleiner zijn dan het echte signaal. Met andere woorden: de kans dat rodopsine spontaan uit elkaar valt moet heel klein zijn. Een staafje bevat ongeveer 10^8 moleculen rodopsine en geeft ongeveer iedere 150 seconden een vals signaal af.

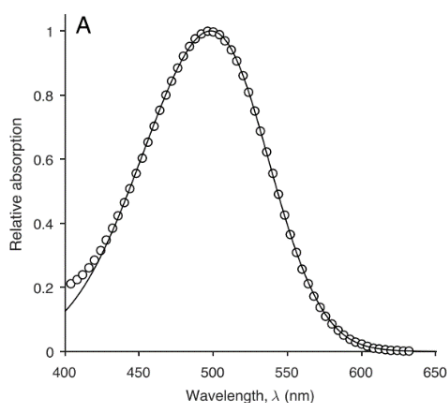
Leg met deze twee gegevens en een berekening uit dat rodopsine een heel stabiel molecuul is.

2.4. Kleur onderscheiden: kegeltjes

In zowel de staafjes als de kegeltjes is het de stof retinal die reageert op licht. Het precieze eiwit waar het in opgesloten zit (de opsine) verschilt echter. Daardoor verschilt de kleur van het licht waarbij retinal van vorm verandert. Zo heeft de natuur een (bio)sensor ontworpen die gevoelig is voor bepaalde kleuren licht.

In figuur 2.8 zie je voor welke golflengtes een staafje gevoelig is. De piek ligt ongeveer bij een golflengte van 500 nanometer, wat overeenkomt met groen licht. Kleur zie je juist met de kegeltjes. Daarvan heb je drie verschillende soorten. Elk kegeltje is gevoelig voor een specifiek stukje van lichtspectrum. Een is voornamelijk gevoelig voor rood licht, één voor groen en één voor blauw licht. Zie figuur 2.9. In dit figuur is ook nog eens de grafiek voor de staafjes weergegeven.

Met die drie kegeltjes kun je veel meer kleuren zien dan alleen blauw, groen en rood. Dat werkt als volgt. Stel er valt cyaan licht op je netvlies met een golflengte van 480 nm. Alle drie de kegeltjes zijn gevoelig voor dit soort licht en geven dus alle drie een signaal naar de hersenen. Omdat bij deze golflengte de gevoeligheid niet precies gelijk is, verschilt het signaal van de drie kegeltjes. Het is die precieze combinatie van signalen waar de hersenen een betekenis aan geven. Je hersenen gebruiken dus de relatieve sterkte van de drie signalen om heel veel kleuren mee te kunnen zien.



Figuur 2.8 Absorptie van licht door een staafje als functie van de golflengte.

Commented [LK46]: Oude opmerking Rutger:

ik zou toch ook graag nog iets doen met dit artikel: Frog eyes show prowess as quantum sensors <https://pubs.aip.org/physicstoday/article/67/7/16/414771/Frog-eyes-show-prowess-as-quantum-sensors>

Commented [RO47]: Voor zo ver ik heb kunnen nagaan. Klopt dit?

Commented [LK48]: Het is toch wat nauwkeuriger om te zeggen dat een gevoelig is voor vooral rood licht, etc.? Anders lijkt het of je rood ziet dankzij dat ene rode kegeltje. Maar je ziet rood doordat m.n. het rode kegeltje geactiveerd wordt.

Commented [RO49R48]: Prima, make it so

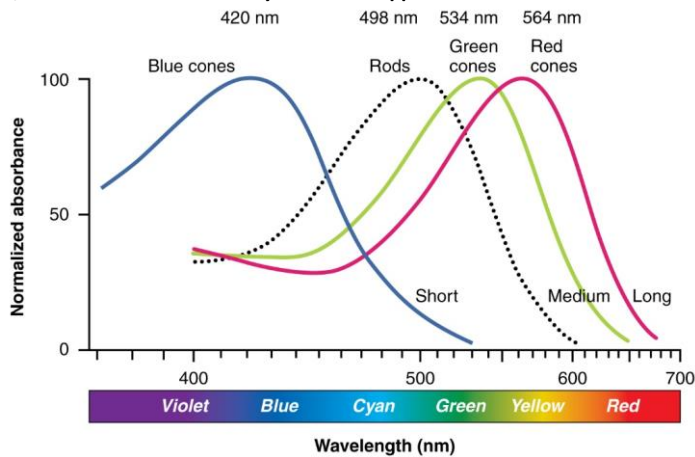
Commented [LK50]: Aangepast; hier past nog een opgave bij hoe je dan kleur ziet en dat het te maken heeft met het samenspel van deze drie kegeltjes.

Commented [RO51]: Cyaan vlak toevoegen (meester, wat is cyaan?)

Commented [LK52]: Bron?

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.



Figuur 2.9 De gevoeligheid van kegeltjes en staafjes als functie van kleur. (Variatie op Bowmaker & Dartnall CC BY-SA 3.0 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cone-response-uk.svg>)

Opdracht 2.7. Lichtgevoeligheid staafjes

Bij weinig licht is het signaal dat van de kegeltjes naar je hersens gaat veel kleiner dan van de staafjes.

- a. Leg met behulp van figuur 2.8 uit waarom je met alleen staafjes toch geen kleuren van elkaar kunt onderscheiden, hoewel de staafjes wel gevoelig zijn voor meerdere kleuren.

Apps die gebruikt worden bij het sterrenkijken hebben vaak een nachtmodus waarbij alleen roodtinten worden gebruikt met een golflengte rond de 630 nm. Daardoor kun je wel de app zien, maar wordt je niet door je scherm verblind waardoor je de lichtzwakke sterren niet meer ziet.

- b. Leg dat uit met behulp van de grafiek in figuur 2.9.

Commented [R053]: Rood Groen beperking (kleurenblind) komt door niet onderscheiden rood en groen. Oplossing: bril met (smal) band stop filter. [zie opdracht 2.9]

Opdracht 2.8. Kleuren zien

In de video bij de inleiding van dit hoofdstuk heb je al kennis kunnen maken met de bidsprinkhaankreeft. Vreemde naam trouwens: het is geen sprinkhaan en geen kreeft. Lees onderstaande tekst over de ogen van dit diertje.

De ogen van de bidsprinkhaankreeft

In het oog van bidsprinkhaankreeften bevinden zich twaalf verschillende fotoreceptorklassen, waaronder vier die uv-licht kunnen detecteren. Kun je je voorstellen wat een bidsprinkhaankreeft aan kleuren kan ontwaren!



Figuur 2.10 Ogen van de bidsprinkhaan garnaal door Daniel Sasse (CC BY 4.0)

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mantis-Shrimp-Eyes.jpg>

Toch maakt het schaaldiertje het niet zo bont: ze zijn ontstellend slecht in het onderscheiden van subtiele kleurverschillen. Mensen kunnen kleuren onderscheiden waarvan de golflengte

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

één tot vier nanometer verschilt. Bidsprinkhaankreeften kunnen dat nog niet met kleuren die tussen twaalf en vijftientig nanometer uit elkaar liggen, ongeveer het verschil tussen zuiver geel en oranje. Zij zien als het ware de kleuren van een setje van twaalf verschillende potjes verf, maar kunnen de mengkleuren niet waarnemen.

Bron: Esger Brunner, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*

In het oog van de bidsprinkhaankreeft vind je dus veel meer verschillende soorten lichtgevoelige cellen. Toch kun jij beter kleuren onderscheiden dan de bidsprinkhaankreeft.

- a) Leg met behulp van de theorie eerder beschreven uit hoe je met slechts drie soorten kegeltjes de kleuren geel en violet kunt zien.

Elk van de lichtgevoelige cellen van de bidsprinkhaankreeft is gevoelig voor een net iets andere golflengte. In figuur 2.9 staat de gevoeligheid van de drie kegeltjes in mensenogen.

- b) Maak een schets hoe jij denkt dat de grafiek er voor de 12 lichtgevoelige cellen van de bidsprinkhaankreeft eruit ziet. Geef kort een motivatie voor je schets.
- c) Leg met behulp van jouw schets en het artikel uit dat de hersenen van de bidsprinkhaankreeft niet veel doen aan het verwerken van de informatie, zoals wel het geval is in de hersenen van mensen.

Doordat er minder verwerking plaats vindt in de hersenen van de bidsprinkhaankreeft wordt het signaal veel sneller verwerkt dan bij de mens.

- d) Noem een evolutionair voordeel van deze snelle verwerking.

Opdracht 2.9. Kleurenblind

Een vorm van kleurenblindheid is de rood-groen beperking. Je kunt dan niet goed onderscheid maken tussen de kleuren rood en groen.

Bedenk een oorzaak voor die beperking waarbij je gebruik maakt van figuur 2.9.

Opdracht 2.10. Meer kegeltjes of meer staafjes?

Vier leerlingen praten over de vraag of je nu meer kegeltjes of staafjes hebt in je netvlies:

Sumeia zegt: 'Je moet drie verschillende kleuren kunnen zien. Staafjes hoeven alleen licht en donker waar te nemen. Dus je hebt meer kegeltjes nodig.'

Iris zegt: 'In het donker is er minder licht. Dan kijk je met je staafjes, dus je hebt meer staafjes nodig.'

Sem zegt: 'In het donker kun je soms nog steeds kleur zien, dus je hebt van een bepaald type kegeltje er minder nodig dan van de anderen.'

Amir zegt: 'Ik denk dat het aantal staafjes gelijk is aan het totaal aantal kegeltjes. Dus van alle drie bij elkaar opgeteld.'

- a) Geef voor elk van de leerlingen een argument waarom je het eens zou kunnen zijn.
- b) Geef voor elk van de leerlingen een argument waarom je het oneens zou kunnen zijn.
- c) Bedenk samen nog andere mogelijke antwoorden.

2.5. Kleuren maken en meten met LEDs

Je kunt je oog dus zien als een sensor die licht meet en omzet in een signaal. Je oog kan daarbij onderscheid maken tussen licht en donker: ogen zijn lichtgevoelig. En je ogen kunnen heel veel verschillende kleuren licht onderscheiden: ze zijn ook kleurgevoelig. Veel technische toepassingen

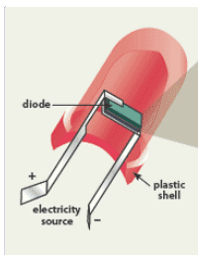
Commented [R054]: Kan ook een ander stukje tekst over de ogen van dit beestje worden, waar biomimicry in naar voren komt.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

moeten iets soortgelijks kunnen: 1) weinig licht waarnemen en omzetten in een elektrisch signaal, en/of 2) de kleur van licht waarnemen en dat omzetten in een elektrisch signaal.

In Opdracht 1.7 heb je al een eerste sensor gemaakt. Die zette een verandering van het *elektrisch veld* om in een elektrisch signaal (en vervolgens weer in licht). Die sensor maakte gebruik van een JFET en een led. Een JFET is een voorbeeld van een transistor: een component die een signaal kan versterken of kan dienen als schakelaar. Transistoren kunnen heel klein zijn: in je smartphone zitten wel 10 miljard transistoren! Al die transistoren samen zijn verantwoordelijk voor het verwerken van elektrische signalen en dat maakt allerlei bewerkingen mogelijk.

In de sensor van Opdracht 1.7 zat ook een led: die zette het elektrische signaal om in een lichtsignaal. Led is een afkorting van *light emitting diode* (vertaling: licht uitzendende diode). Een diode is, net als een transistor, een elektrische component die gemaakt kan worden van halfgeleiders. In figuur 2.11 zie je een schematische weergave van een led. Het plastic omhulsel zorgt ervoor dat het licht gebundeld wordt en beschermt tegelijkertijd de diode zelf. Merk op dat een led twee aansluitingen heeft die niet gelijk zijn. De led geeft alleen licht als deze goed is aangesloten: het lange pootje is de plus, het korte de min. Bovendien kun je de min-kant herkennen doordat het omhulsel aan die kant is afgeplat.



Figuur 2.11 Schematische weergave van een led.

Je kunt een led ook gebruiken als een eenvoudig soort lichtsensor.

Opdracht 2.11. Practicum: Een eerste lichtsensor

Voor deze kleine proef heb je nodig:

- een rode en een groene of blauw led
- een rood lampje
- een uv-zaklamp
- een knoopcelbatterij

Uitvoering:

- 1) Controleer eerst met de knoopcelbatterij of de leds werken. Sluit daarvoor de led aan op de plus en min van de knoopcel. Let op dat je de juiste kant gebruikt (zie ook de theorie hierboven).
- 2) Houd nu de plus van de ene led tegen de plus van de andere led. Doe hetzelfde met de min.
- 3) Vraag een andere leerling om met het rode lampje op de groene/blauwe led te schijnen. Neem waar of de rode led licht gaat geven.
- 4) Doe hetzelfde maar nu met de uv-zaklamp. Neem opnieuw waar of de rode led licht gaat geven.

Opdracht 2.12. Practicum: kleur van een led

Commented [R055]: Zo'n soort plaatje versimpelen en rechtenvrij regelen

Commented [LK56]: Nog niet getest. N.a.v. <https://www.instagram.com/richardvandewege/reel/C2IPyfiNMqj/>

Commented [LK57]: Eventueel toevoegen dat leerlingen nagaan dat de led alleen in de doorlaatrichting stroom geleidt en licht uitzendt.

Commented [R060]: Misschien de les / paragraaf gewoon beginnen met deze proef? Straight to the point. Daarna via uitleg / opdrachten de waarnemingen koppelen aan fotonenergie etc.?

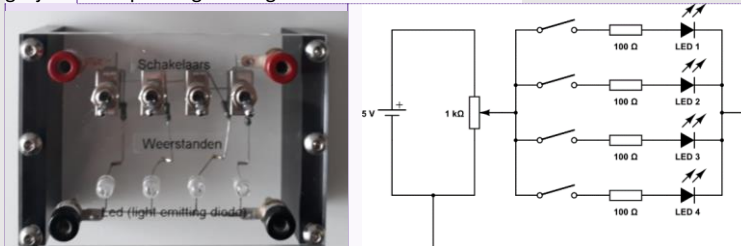
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

In Opdracht 2.11 heb je gezien dat een led licht geeft als er een spanning over staat. In dit practicum onderzoek je dat wat preciezer.

Onderzoeksvraag: Welk verband is er tussen de spanning over een led en het licht dat de led uitzendt?

Zie figuur 2.12 voor de proefopstelling. Er zijn vier leds parallel aangesloten op een variabele spanningsbron die in eerste instantie is ingesteld op 0 volt. De spanning kan variëren van 0 tot 5 volt. Iedere led is in serie geschakeld met een weerstand van 100 Ω . Bovendien kan iedere led aan/uit geschakeld worden. Bij een parallelschakeling is de spanning over iedere tak op ieder moment gelijk is. Die spanning wordt gemeten met een voltmeter.



Figuur 2.12 De demonstratieopstelling met vier leds

Selecteer met de schakelaars steeds één led en onderzoek door langzaam de spanning op te voeren bij welke spanning de led begint te branden en met welke kleur. Controleer vervolgens wat er met het licht gebeurt als je de spanning verder opvoert. Daarna zet je de led weer uit en ga je door naar de volgende led.

Neem onderstaande tabel over in je schrift en vul hem in op basis van je waarnemingen. De kolommen voor golflengte en frequentie heb je nodig bij de verwerking.

led	Kleur	Golflengte (nm)	Frequentie (10^{14} Hz)	Spanning (Volt)
1				
2				
3				
4				

Verwerking

- Zoek in Binas of internet bij elke kleur led welke golflengte er (ongeveer) bij hoort.
- Reken de golflengte om naar frequentie en vul die ook in.
- Zet je gegevens in een diagram waarin je de frequentie uitzet tegen de spanning.
- Welk verband is er op basis van je diagram tussen de frequentie (kleur) en de spanning over de led?

Beschrijf wat er veranderde aan de kleur en de felheid van de leds toen je de spanning verhoogde voorbij het punt waarop de leds licht gingen geven.

De resultaten uit Opdracht 2.12 kun je met een vereenvoudigd model van de werking van een led verklaren. Een led, maar ook een diode, bestaat uit twee tegen elkaar geplaatste plakjes silicium (halfgeleiders) die elk verontreinigd zijn met een bepaalde stof om ze zo verschillende eigenschappen te geven. In het grensgebied tussen die twee materialen ontstaat daardoor een elektrisch veld dat elektronen tegenhoudt. Er is dus een blokkade waardoor er geen elektrische stroom kan lopen. Het bijzondere is dat je de hoogte van die blokkade kunt beïnvloeden tijdens de fabricage door de keuze van de verontreinigingen.

Tijdens de oversteek door het grensgebied geeft een elektron een hoeveelheid elektrische energie ΔE_{el} af in de vorm van licht. Zie figuur 2.13. Om die oversteek te maken moet de spanning groot

Commented [R058]: Bij benadering, eigenlijk weerstand + LED, even onder tapijt vegen

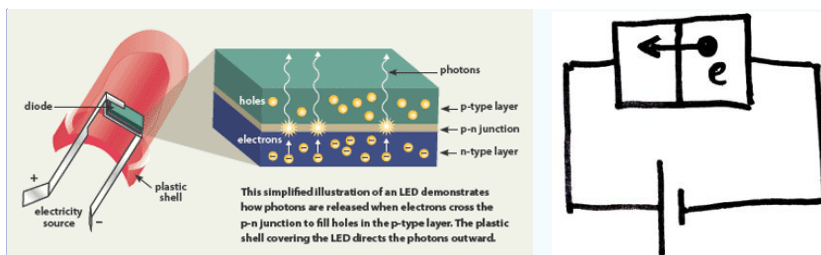
Commented [R059]: komt een nieuwe versie van

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

genoeg zijn: miniaal gelijk aan de drempelspanning $U_{drempel}$. Het verband tussen $U_{drempel}$ en ΔE_{el} wordt gegeven door:

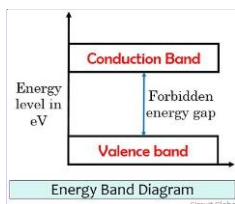
$$\Delta E_{el} = q \cdot U_{drempel} \quad (1)$$

In deze formule is q de lading van het elektron dat de oversteek tussen de twee halfgeleiders en heeft een waarde van $-1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb (C). Voor deze module is het belangrijk om met vergelijking (1) te kunnen werken. Wil je meer weten over de werking van de led en het ontstaan van het grensgebied, lees dan 2.9 Verdieping: Halfgeleiders.



Figuur 2.13 Schematische weergave van de twee halfgeleidende materialen in een led/diode.

We kunnen dit alles samenvatten met het energiediagram in figuur 2.14. De elektronen kunnen zich (bij benadering) in een van twee energietoestanden bevinden die de valentieband en de geleidingsband worden genoemd. Tussen die twee energietoestanden bevinden zich geen mogelijke energietoestanden voor de elektronen. Dit wordt de band gap genoemd. De grootte van die band gap bepaald de kleur van een led. Steekt een elektron het grensgebied tussen twee halfgeleiders over dan valt het vanuit de geleidingsband terug naar de valentieband en het energieverschil tussen de banden, de band gap, wordt omgezet in licht.



Figuur 2.14 Energieniveauschema voor een led

In tabel 2.1 staan de verontreinigingen die gebruikt zijn in de leds uit Opdracht 2.12. In de verdieping aan het eind van dit hoofdstuk kun je in meer detail te weten komen hoe de eigenschappen van halfgeleiders te beïnvloeden zijn en wat er in een diode en transistor gebeurt.

Tabel 2.1 Halfgeleiders gebruikt in verschillende kleuren leds.

led (kleur)	Verontreiniging
rood	AlGaInP = Aluminium Gallium Indium Fosfide (fosfor)
geel	AlGaInP = Aluminium Gallium Indium Fosfide (fosfor)
groen	InGaN = Indium Gallium Nitride (stikstof)
blauw	InGaN = Indium Gallium Nitride (stikstof)

Commented [LK61]: Negatieve lading, elektron gaat tegen de stroom in. Nagaan hoe we dit helder presenteren.

Commented [LK62]: Weer een nieuw model voor de LED. Is dit nodig? Met p-n junctie?

Commented [RO63R62]: Plan is om het model steeds verder aan te kleden, of in verdieping of in H3. En om het 'elektrisch' model te koppelen aan een 'fysisch' model. Ergens in de hoofdtekst moet dat misschien even aangekondigd worden (dat het model van de LED langzaam wordt opgebouwd).

Commented [LK64]: Hier kan de PhET applet gebruikt worden voor halfgeleiders. Conceptueel kan het lastig zijn om het ruimtelijke beeld van de twee halfgeleiders gescheiden te zien van het Energieniveauschema (waarin geen ruimtelijke informatie staat).

Commented [RO65]: Dit lijkt mij genoeg voor simpel model in hoofdtekst. Vertalen en wat aanpassen (foton toevoegen)

Commented [LK66]: Dit roept de vraag op waarom eenzelfde materiaal toch een verschillende kleur kan genereren.

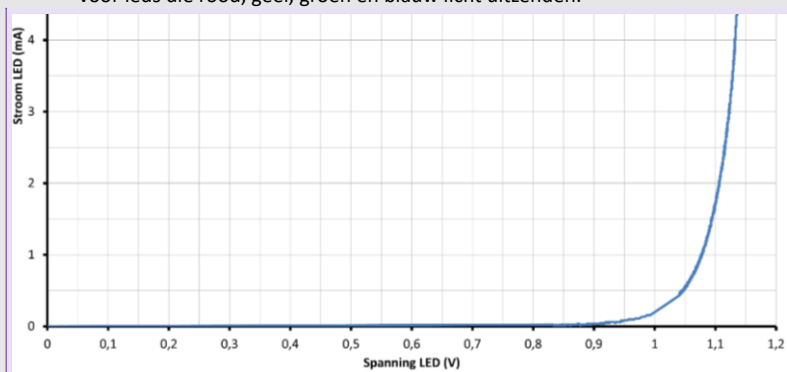
Commented [RO67R66]: Terecht, laten we daar een vraag van maken! "Wat valt je op"...Dan kan weer in H3 dat verder worden toegelicht, zoals vd week besproken.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Opdracht 2.13. Stroom-spanningskarakteristiek van een led

In figuur 2.15 zie je een stroom-spanningkarakteristiek die de elektrische eigenschappen van een led laat zien.

- Leg aan de hand van de grafiek uit dat de led geen stroom geleidt en dus geen licht uitzendt als de spanning onder de drempelspanning blijft.
- Lees uit de grafiek af wat de drempelspanning is voor deze led.
- Gebruik je resultaten uit Opdracht 2.12 om te voorspellen welk soort straling deze led uitzendt. De spanningen die je daar hebt bepaald zijn bij benadering gelijk aan de drempelspanning voor de betreffende led.
- Schets op basis van je resultaten uit Opdracht 2.12 de stroom-spanningskarakteristiek voor leds die rood, geel, groen en blauw licht uitzenden.



Figuur 2.15 De stroom-spanning karakteristiek van een diode (eigen werk)

De kleur van een led wordt bepaald door de drempelspanning. Iedere keer als een elektron genoeg energie heeft om door de led heen te stromen komt er licht vrij. Boven de drempelspanning geldt: hoe hoger de spanning, hoe groter de kans dat elektronen de oversteek gaan maken. De led gaat dan dus feller branden. Je ziet in figuur 2.15 dat bij een grotere spanning er meer stroom gaat lopen. De grootte van de elektrische stroom zou dus een maat kunnen zijn voor de hoeveelheid licht die de led uitzendt.

Wil je beter begrijpen *waarom* de led pas licht gaat uitzenden boven een bepaalde drempelspanning, bestudeer dan de verdieping.

2.6. Lichtdeeltjes: fotonen

Een aquarium gevuld met water bevat een gigantische hoeveelheid watermoleculen die zich samen gedragen als een vloeistof. Je kunt een los watermolecuul niet zien maar het is wel de kleinste bouwsteen waaruit de vloeistof bestaat: de kleinste hoeveelheid water die je er in de bak bij kunt doen (of er uit kunt halen) is één watermolecuul.¹ Er bestaat geen 'half' watermolecuul, het is alles of niks. Het idee dat de materie om ons heen is opgebouwd uit een kleinste bouwsteen stamt al uit de Griekse oudheid. Het woord atoom komt daar ook vandaan: het betekent 'ondeelbaar'.

¹ Moleculen bestaan natuurlijk weer uit atomen maar er is maar één combinatie van atomen die we een watermolecuul noemen: H₂O.

Commented [LK68]: Was diode; nu led van gemaakt

Commented [RO69]: Deze is van een IR LED. Vervangen door grafiek van germanium of silicium diode

Commented [RO70]: Is dit in een redeneeropdracht om te schrijven, dat de leerling er zelf achter komt? Ik heb het gevoel dat dit alleen lukt met heel veel sturen, dus dan maar gewoon vertellen? Of zie ik dat verkeerd?

Commented [LK71]: Waar is er plek voor Single Quantum?

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop 1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

In het dagelijks leven merk je niet dat materie is opgebouwd uit atomen en moleculen. Dat komt omdat je bij alles wat je doet met een enorme hoeveelheid atomen tegelijkertijd in aanraking komt. In een suikerklontje zitten al gauw zo'n $3 \cdot 10^{23}$ atomen die met elkaar $7 \cdot 10^{21}$ suikermoleculen maken.

Ook licht heeft een kleinste bouwsteen. Die bouwsteen heet een foton. Het is de kleinste hoeveelheid energie die je in het elektrisch veld kunt opslaan of eruit kunt halen. Bij iedere kleur licht hoort een eigen fotonenergie. Wil je meer energie toevoegen (van een bepaalde kleur) dan kan dat alleen door er een geheel foton bij te doen. In een led wordt de energie van één elektron omgezet in de energie van één foton.

Anders dan atomen en moleculen kunnen fotonen niet met elkaar botsen of aan elkaar blijven plakken. Fotonen zijn dus altijd losse deeltjes en ze zitten elkaar niet in de weg. Je kunt er ook niet zoiets als een lichtmolecuul mee bouwen. Als je een (denkbeeldige) doos wil vullen met atomen zit de doos op een gegeven moment vol tot aan de rand. Maar in dezelfde doos kun je (bijna) oneindig veel fotonen kwijt.

Opdracht 2.14. Energie van een foton

Pak voor deze opdracht je resultaten op Opdracht 2.12 er weer bij en beantwoord de volgende vragen.

- Welk verband is er tussen de frequentie van het licht dat een led uitzendt en de drempelspanning van die led?

Voor spanning geldt de volgende formule: $U = \frac{\Delta E_{el}}{q}$. In woorden: als er over een elektrische component een spanning U staat, dan geven de ladingen een elektrische energie ΔE_{el} af aan die component. In een led zijn het de elektronen die hun energie afgeven en die energie wordt omgezet in de energie van een foton, dus: $\Delta E_{el} = E_f$.

- Bereken met behulp van bovenstaande formule en de drempelspanning voor de vier led uit hoeveel energie de fotonen hebben die de leds uitzenden.
- Maak een grafiek met op de verticale as de fotonenergie (in joule) en op de horizontale as de frequentie (in Hz) van het licht.
- Welk verband lijkt er te zijn tussen fotonenergie en frequentie van het licht? Teken in je diagram een trendlijn die bij dit verband past.
- Bepaal de helling van de trendlijn. Geef je antwoord in de juiste eenheid.

In Opdracht 2.14 heb je gezien dat de hoeveelheid energie van een foton afhangt van de kleur licht en dus van de frequentie f . Voor de energie E_f van een foton geldt de volgende formule:

$$E_f = h \cdot f \quad (2)$$

De letter h staat voor een constante, de zogenoemde constante van Planck. De eenheid van E_f is joule (J). De eenheid van f is Hz. De helling die je in Opdracht 2.14 hebt bepaald is bij benadering gelijk aan de constante van Planck h . De literatuurwaarde is: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s. Uit formule (2) volgt dat in een bundel licht van precies één kleur alle energiepakketjes even veel energie hebben.

Omdat de energie van een enkel foton heel klein is gebruiken we in deze module we vaak de eenheid elektronvolt (eV). Ook daar kun je het verschil tussen een enkel deeltje en een hele groep zien. Wissel je energie uit met een grote groep deeltjes dan gebruik je de joule. De uitwisseling met een enkel deeltje is zo klein dat je er een aparte eenheid voor gebruikt. Daarvoor geldt: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Door deze keuze wordt het heel makkelijk om een spanning om te rekenen in elektrische energie. Een spanning over een led van (bijvoorbeeld) 1 V komt overeen met een energie van 1 eV.

Opdracht 2.15. Omrekenen joule en elektronvolt

Commented [R072]: Het hele verhaal hier 'klopt' in eerste benadering en ik denk ook dat het belangrijk is iets over het 'gedrag' van een foton te zeggen. Ik weet niet of dit de manier is. De tekst is denk ik wat taal betreft prima te begrijpen maar komt het ook echt aan?

Commented [LK73]: We moeten onderscheid maken tussen verwerkingsvragen en de begripsvragen die de leerlingen helpen de tekst te lezen.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

De meeste halfgeleiders zijn gemaakt van silicium. Ook zonnepanelen bestaan uit kristallen van silicium. De band gap van silicium is 1,1 eV.

- Reken deze energie om naar een energie in joule.
- Reken met behulp van formule (2) uit welke frequentie fotonen minimaal moeten hebben om elektronen in silicium over de band gap te krijgen.
- Reken de frequentie uit b) om naar een golflengte.
- Leg uit of de golflengte uit opdracht c) een minimale of juist maximale waarde is om elektronen in het silicium over de band gap te krijgen.

In de zomer bedraagt de gemiddelde zonnestraling in Nederland 200 W per vierkante meter. Een zonnepaneel van één vierkante meter ontvangt dus gemiddeld per seconde 200 J aan lichtenergie. Zonlicht bestaat natuurlijk uit licht met meerdere kleuren. Neem voor de volgende opdracht aan dat al het zonlicht een frequentie heeft van $5,2 \cdot 10^{14}$ Hz (geel licht).

- Bereken uit hoeveel fotonen 200 J zonlicht bestaat.
- Maak een schatting hoeveel fotonen er per seconde in je oog terecht komen.

2.7. Fotodiodes

Zoals je in de vorige paragraaf hebt gezien kun je met behulp van een led elektrische energie omzetten in licht. Het omgekeerde kan ook: met licht elektrische energie opwekken. Een voorbeeld daarvan is natuurlijk een zonnepaneel. Die worden ook gemaakt van halfgeleiders. Maar ook de leds uit de vorige paragraaf kun je hiervoor gebruiken. Als je een diode gebruikt om licht te meten (in plaats van licht te maken) dan noem je het een fotodiode.

Eerder heb je geleerd dat een diode maar in één richting stroom doorlaat. Een led geeft dus alleen maar licht als je deze in de goede richting aansluit. Draai je de led om, dan wordt de stroom geblokkeerd en lijkt het alsof er niks gebeurt. Maar diodes hebben altijd een kleine lekstroom. Die lekstroom wordt gevormd door elektronen die 'toevallig' de grens tussen de twee halfgeleiders oversteken. De energie die daarvoor nodig is kan uit de omgeving gehaald worden, bijvoorbeeld in de vorm van warmte of, zoals net beschreven, licht. Hoe meer licht de diode opvangt, hoe groter de lekstroom. Door de lekstroom te meten kun je een fotodiode dus gebruiken als lichtsensor. De grootte van de band gap speelt dan nog steeds een rol.

Opdracht 2.16. Toepassingen van een fotodiode

Bedenk samen zo veel mogelijk toepassingen waarin je een of meerdere fotodiodes gebruikt om:

- De hoeveelheid licht te meten en
- De kleur van licht te meten.

Geef voor elke toepassing aan welke eisen er zijn aan de fotodiode.

Voorbeeld van a): met een fotodiode meet je hoeveel licht er van buiten een kamer binnenkomt. Als het licht wordt kan de verlichting automatisch uitgeschakeld worden. Eisen aan de fotodiode: moet gevoelig zijn voor zichtbaar licht en moet bij weinig licht een verschillend signaal af kunnen geven.

Opdracht 2.17. Practicum: spectrometer maken

Commented [R074]: Moeten ze dat zelf ook nog even onderzoeken of is het genoeg om dit te geven?

Commented [LK75R74]: Ik zou dat als opdracht in het practicum van H1 verwerken, zodat ze ook echt zien dat een led (diode) maar in één richting stroom geleidt.

Commented [LK76]: Alternatief Hacking STEM project van Microsoft waarbij een Arduino data verzameld die live wordt weergegeven in Excel: zie <https://www.youtube.com/watch?v=wKIH-7ePOAk>

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

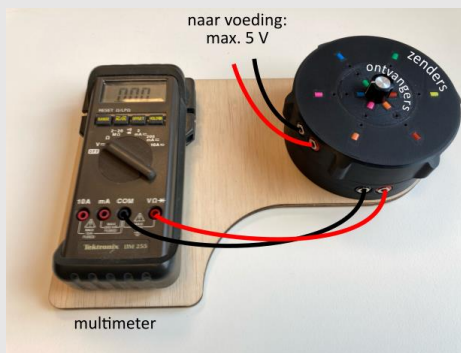
Voor dit practicum heb je een opstelling nodig die is gemaakt door studenten van de Leidse instrumentmakers School, de LIS (zie figuur 2.16).

Verder heb je nodig:

- Een spanningsmeter (of multimeter).
- Een gelijkspanningsbron instelbaar op 5 V.
- Vier aansluitsnoeren.

Uitvoering:

- Aan de buitenkant bevinden zich vier aansluitpunten: twee voor de spanningsmeter en twee voor de gelijkspanningsbron. Sluit ze op de juiste wijze aan. (Zie figuur 2.16.)
- Stel de spanningsbron in op 5 V, niet hoger.
- Stel de spanningsmeter zo in dat je tot enkele volts kunt meten, op tienden volts nauwkeurig. (In figuur 2.16 is een multimeter aangesloten.)
- Door het knopje in het midden te draaien kun je achtereenvolgens een led aanzetten (zenders). Controleer dat de leds werken.
- De binnenste ring bevat dezelfde leds als de buitenste ring. Deze leds zijn de ontvangers. Door de ring te draaien kun je een bepaalde zender led (b.v. rood) plaatsen tegenover een ontvanger led (b.v. geel). De spanningsmeter meet de spanning over deze ontvanger leds.
- Schakel een bepaalde zender led aan, draai één voor één een ontvanger led tegenover de zender en lees af welke spanning je meet. Noteer je gegevens in een tabel zoals hieronder. Vul aan met het aantal rijen en kolommen dat je nodig hebt.



Figuur 2.16 Aangesloten opstelling

Spanning (V) over ontvanger →	rood	geel	...
Zender ↓			
rood			
geel			
...			

Verwerking:

- Bekijk je tabel met gegevens. Welk verband kun je ontdekken tussen de kleur van de lichtgevende led en de hoogte van de spanning die je over de ontvanger led meet?
- Geef een verklaring voor het verband dat je bij a) hebt gevonden op basis van de energie van de fotonen en de bandgap van de led waarover je de spanning meet.

2.8. Fotodiodes en het oog

Zoals je in Opdracht 2.17 heb gezien kun je met behulp van fotodiodes licht meten. Je zou fotodiodes dus kunnen gebruiken om een camera te maken. Maar de kleur en hoeveelheid licht bepalen is ook precies de functie van het netvlies.

Opdracht 2.18. Oogimplantaat

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Lees onderstaand artikel en bespreek vervolgens welke technologische uitdagingen jij ziet om van een led (als fotodiode) een kunstmatig netvlies te maken dat geïmplanterd kan worden in een oog.

Fotovoltaïsch implantaat kan zicht herstellen

Een team onder leiding van onderzoekers van Stanford University zegt een draadloos implantaat te hebben ontwikkeld dat het zicht vijf keer beter kan herstellen dan bestaande apparaten. Resultaten van rattenstudies suggereren dat het een functioneel gezichtsvermogen kan bieden aan patiënten met retinale degeneratieve ziekten, zoals retinitis pigmentosa of maculaire degeneratie.

“De prestaties die we op dit moment waarnemen, is zeer bemoedigend”, zegt Georges Goetz, onderzoeker en promovendus elektrotechniek aan Stanford. “Op basis van onze huidige resultaten hopen we dat mensen met dit implantaat objecten kunnen herkennen en zich kunnen verplaatsen.”

Retinale degeneratieve ziekten vernietigen fotoreceptoren - de staven en kegels van het netvlies - maar andere delen van het oog blijven meestal gezond. Het implantaat maakt gebruik van de elektrische prikkelbaarheid van retinale neuronen die bekend staan als bipolaire cellen. Deze cellen verwerken de ingangen van de fotoreceptoren voordat ze ganglioncellen bereiken, die retinale signalen naar de hersenen sturen. Door bipolaire cellen te stimuleren, maakt het implantaat gebruik van belangrijke natuurlijke eigenschappen van het retinale neurale netwerk, dat meer verfijnde beelden produceert dan de apparaten die deze cellen overslaan.

Het implantaat is samengesteld uit zeshoekige fotovoltaïsche pixels die licht via speciale brillen, die door de ontvanger worden gedragen, in elektrische stroom omzetten. Deze elektrische pulsen stimuleren vervolgens de bipolaire cellen van het netvlies en veroorzaken een neurale cascade die de hersenen bereikt.

Vertaald van: <https://med.stanford.edu/news/all-news/2015/04/photovoltaic-retinal-implant-could-restore-functional-sight.html> (2015)

NLT Module Quantum Ready

Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

2.9. [Verdieping: Halfgeleiders](#)

Synopsis: model van led, n-type en p-type halfgeleiders, depletielaag, intern E-veld

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Hoofdstuk 3: Fluorescentie en microscopie

3.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk heb je gezien dat licht bestaat uit energiepakketjes, fotonen genaamd. De materiaaleigenschappen van leds kunnen zo veranderd worden dat ze fotonen uitzenden die overeenkomen met verschillende kleuren licht. Leds kun je ook gebruiken als fotoreceptor: fotonen met voldoende energie kunnen een spanning over de led opwekken. Ook de kegeltjes in je oog zijn gevoelig voor bepaalde golflengten en dus ook voor fotonen van een bepaald energie. De overeenkomst is dat lichtenergie wordt omgezet in een elektrisch signaal.

Er bestaan ook een processen waarbij licht wordt omgezet in een andere kleur licht. Een voorbeeld is fluorescentie. Veel dieren blijken te fluoresceren: vliegende eekhoorns, vogelbekdieren, nesten van wespen, kwallen en ook tropische kikkers, zoals uit het volgende artikel blijkt.

Onderzoekers vinden de eerste natuurlijke fluorescerende kikkersoort

Zuid-Amerika is de thuisbasis van allerlei gek uitzijnde amfibieën, van levendige pijlgifkikkers tot cartoon-achtige roodogige boomkikkers. Een andere voegde zich net bij de gelederen: de Zuid-Amerikaanse boomkikker, *Hypsiboas punctatus*.

In zichtbaar licht ziet de kikker er gewoontjes uit, met kleine rode stippen over zijn verder groene lichaam. Maar als je er een beetje ultraviolet licht op schijnt wordt het een heel ander verhaal. Onderzoekers zeggen dat *Hypsiboas punctatus* de enig bekende, van nature fluorescerende amfibie is.



De Zuid-Amerikaanse boomkikker in zichtbaar licht (links) en UV-licht (rechts).

Fluorescentie treedt op wanneer een oppervlak korte golflengten licht absorbeert en het bij langere golflengte weer uitzendt. Wanneer UV-licht, met een korte golflengte, bijvoorbeeld een fluorescerend object raakt, dan zendt het zichtbaar licht, met een langere golflengte, weer uit. Hoewel veel onderwatersoorten, waaronder vissen, koralen, haaien en zelfs zeeschildpadden fluorescerende lichaamsdelen hebben, is het fenomeen zeldzaam bij landdieren en is het alleen waargenomen bij bepaalde soorten papegaaien en schorpioenen.

De ontdekking van de fluorescentie van de Zuid-Amerikaanse boomkikker was geheel toevallig. Onderzoeker Julian Faivovich en zijn collega's van het Natuurwetenschappen Museum in Buenos Aires, Argentinië, bestudeerden de pigmenten in de boomkikker toen ze UV-licht op de kikker schenen. "Voor sommige dingen die we van plan waren te doen, moesten we de kikkerweefsels verlichten met UV-licht", vertelt Faivovich. "Toen realiseerden we ons dat de hele kikker fluorescerend was."

Commented [R077]: Toch nog eens nadenken of daar een betere beschrijving voor is. Het woord lijkt bijna infantiel maar ik denk dat een leerling er misschien toch geen beeld bij heeft (het onderzoeken waard? Al onderzocht?)

Commented [LK78]: Polka-dot tree frog
Er is geen Nederlandse naam voor, ik gebruik daarom Zuid-Amerikaanse boomkikker.

Commented [LK79]: Beeld afkomstig uit:
<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1701053114>

Rechten nog onduidelijk.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Het biologische nut van de fluorescentie is grotendeels onbekend en is misschien niet belangrijk om te overleven. Veel dieren kunnen oplichten omdat ze toevallig veelvoorkomende, van nature fluorescerende moleculen in hun lichaam hebben, niet omdat er een bijzonder voordeel is.

De onderzoekers ontdekten dat het blauwgroene licht dat de kikkers afgeven overeenkomt met de kleur licht waar de kikkers het meest gevoelig voor zijn. De fluorescentie maakt de kikkers 30 procent helderder tijdens de schemering en 19 procent helderder tijdens de volle maan. Hoewel het misschien toeval is, is het mogelijk dat de fluorescentie de kikkers 's nachts zichtbaar maakt voor elkaar, wanneer ze het meest actief zijn.

Het zou kunnen dat dit niet de enige oplichtende kikker is. Er bestaan 250 andere boomkikkers met vergelijkbare kenmerken, waaronder een doorschijnende huid, die de onderzoekers graag zouden willen onderzoeken. "Ik hoop echt dat andere collega's ook geïnteresseerd zullen zijn in dit fenomeen en dat ze een UV-zaklamp mee het wild in nemen." zegt Faivovich.

Vertaalde en bewerkte versie van: Daley, Jason (15 maart 2017). *Researchers Find the First Naturally Fluorescent Frog Species*. Smithsonian Magazine. <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/researchers-find-first-fluorescent-frog-species-180962538/>. Geraadpleegd: 14 juni 2024

Het verschijnsel dat dieren fluoresceren wordt *biofluorescentie* genoemd. De vraag is of die fluorescentie ergens goed voor is, of dat de stoffen in deze dieren, naast hun reguliere functie, toevallig ook blijken te fluoresceren. Omdat de tropische boomkikkers gevoelig zijn voor het uitgezonden licht, denken de onderzoekers dat het wel een functie zou kunnen hebben. Welke is nog onduidelijk.

Wetenschappers zijn om meerdere redenen geïnteresseerd in biofluorescentie. Ze willen begrijpen hoe die dieren kunnen fluoresceren en welke biologische functie het heeft. De stoffen die in deze dieren fluoresceren zijn ook interessant voor medische toepassingen. Zo wordt de stof in de kristalkwal gebruikt om chemische processen in levende organismen zichtbaar te maken zoals het volgende filmpje laat zien:



Commented [LK80]: Kan dit zo? Ik heb het artikel vertaald, aangepast en ingekort.

Commented [LK81]: Evt. uitwerken:

- kristalkwal is ook bioluminescent
- in dat proces is GFP een fluorescerend onderdeel
- dat molecuul is nu ook genetisch te modificeren om de kleur aan te passen
- en in te bouwen in organismen
- zo is met fluorescentiemicroscopie de chemische processen zichtbaar te maken

Aardig overzicht in:

<https://www.leica-microsystems.com/science-lab/life-science/fluorescent-proteins-from-the-beginnings-to-the-nobel-prize/>

Opdracht 3.1. [Practicum: olijfolie](#)

Olijfolie wordt gemaakt door olijven te persen. De duurste en vaak lekkerste olijfolie komt uit de eerste persing: *extra vierge* olijfolie. Deze olijfolie bevat bladgroen en dat bladgroen fluoresceert. Olijfolie van latere persingen fluoresceert minder of helemaal niet. Dankzij fluorescentie kunnen inspecteurs controleren of goedkope olijfolie van latere persingen niet verkocht wordt als dure extra vierge olijfolie.

In dit practicum onderzoek je met behulp van extra vierge olijfolie wat er bij fluorescentie met het licht gebeurt.

Benodigdheden:

- Flesje met olijfolie (extra vierge),
- Twee flesjes met water,
- Rode laserpen,
- Groene laserpen,
- Plantenspuit met water,
- Witte muur of vel wit papier

Veiligheid: Schijn nooit met een laser in iemands oog. Voorkom ook dat reflecties van het laserlicht in een oog terecht kan komen.

Uitvoering:

1. Schijn met de rode laserpen op de muur: kun je de lichtstraal zelf zien? Waarom wel, waarom niet?
2. Vernevel in het pad van de laserstraal water met de plantenspuit. Bespreek met elkaar wat je waarneemt en of je nu de laserstraal zelf ziet.
3. Plaats in de volgende volgorde tegen elkaar: flesje met water, flesje olijfolie, flesje water.
4. Schijn met de rode laserpen door de drie flesjes. Beschrijf je waarnemingen.
5. Schijn met de groene laserpen door de drie flesjes. Beschrijf je waarnemingen.

Er zijn (minstens) twee verklaringen voor wat je in stap 5 waarneemt:

- A. Groen licht wordt in de extra vierge olijfolie rood/oranje. Het rood/oranje licht wordt in het water weer groen.
 - B. Een deel van het groene licht wordt in de extra vierge olijfolie rood/oranje en een deel gaat ongestoord verder als groen licht.
6. Leg uit dat beide verklaringen met de waarnemingen overeen lijken te komen.
 7. Leg uit dat verklaring B beter overeenkomt met je waarnemingen in stap 1 en 2.
 8. Bedenk met elkaar welke proef je zou kunnen doen om verklaring A te controleren.

3.2. Fluorescentie

Bij fluorescentie wordt een foton met voldoende energie geabsorbeerd door een molecuul: het foton verdwijnt en de energie van het foton is in het molecuul opgenomen. Het molecuul komt daardoor in een toestand met meer energie, ofwel een hogere energietoestand. Een deel van de energie gaat verloren aan warmte of trillingen in het molecuul en vervolgens zendt het molecuul de rest van de energie uit in de vorm van een foton met een energie kleiner dan de energie van het foton dat het proces in gang zette. In een formule:

$$E_{f,in} = E_{f,uit} + Q$$

Commented [LK82]: Op basis van Show de Fysica artikel/hoofdstuk... Nog verder uitwerken.

Commented [RO83]: Even scherp: weet de leerling al dat het foton dan verdwijnt en dat er niet een soort 'restje' foton overblijft?

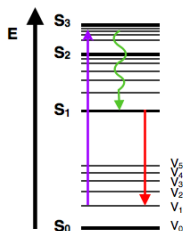
Commented [RO84]: Is dat niet hetzelfde? Warmte = macro, trillingen = micro? Je zou kunnen overwegen om hier een illustratie bij te maken / geven waarmee je laat zien hoe een molecuul kan trillen. Extra stukje diepgang / mogelijke leerling vraag kan dan het begrip zijn dat waterstof niet kan fluoresceren. Veel andere stoffen overigens ook niet, maar dat heeft dan met de ligging van de energieniveaus te maken.

Toevoeging: er kan natuurlijk ook nog energie verloren gaan via het uitzenden van fotonen met een heeeeeeele laaaaaaange golflengte. Zie opmerking hieronder.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop**1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.**

Waarbij Q de warmte is die bij het proces ontstaat. Wat deze vergelijking ook uitdrukt: energie is behouden. Met andere woorden, de wet van behoud van energie houdt in dat de totale energie in een gesloten systeem op elk moment gelijk is. Je zult deze wet nog vaker tegenkomen in deze module.

Je kunt dit proces ook grafisch weergeven in een energiediagram (figuur 3.1). Verticaal staat de energie uitgezet. Het pijltje omhoog staat voor de energiesprong in het molecuul door het opnemen van een foton ($E_{f, \text{in}}$). Het slingerende pijltje omlaag staat voor de warmte die ontstaat (Q). Het pijltje omlaag is de energiesprong die het molecuul maakt bij het uitzenden van een foton ($E_{f, \text{uit}}$). Het pijltje omlaag is korter dan het pijltje omhoog: het foton dat wordt uitgezonden heeft minder energie dan het foton dat wordt geabsorbeerd.



Figuur 3.1 Energiediagram van het proces fluorescentie. (Bron:

[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Jablonski_diagram](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Jablonski_diagram), natekenen en aanpassen door fotonen in te tekenen)

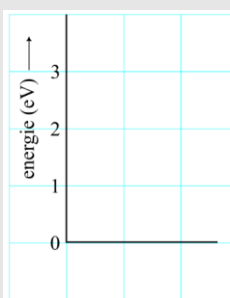
Opdracht 3.2. Fluorescentie bij kikkers

De fluorescerende Zuid-Amerikaanse boomkikkers blijken het sterkst te fluoresceren bij licht met een golflengte van 400 nm. Het uitgezonden licht is het sterkst bij een golflengte van 460 nm.

- Leg uit waarom de golflengte van het uitgezonden licht langer is dan die van het geabsorbeerde licht. Maak gebruik van figuur 3.1.
- Bereken hoeveel energie er per foton in warmte wordt omgezet. Druk je antwoord uit in joule en in eV.
- Teken het bijbehorende energieniveauschema voor de fluorescentie in de Zuid-Amerikaanse boomkikker. Zorg dat je de energie op schaal tekent. Rechts zie je een voorbeeld. In het energieniveauschema staat er geen grootte langs de horizontale as uitgezet. Begin in de grondtoestand: hier is de energie 0 eV.

De *quantum yield* is het aantal uitgezonden fotonen per geabsorbeerd foton. Ook bij veel andere quantumprocessen wordt dit begrip gebruikt, bijvoorbeeld bij de werking van het oog en het functioneren van zonnepanelen. De *quantum yield* van de fluorescentie bij boomkikkers is 0,12: voor iedere 100 geabsorbeerde fotonen worden er gemiddeld 12 nieuwe uitgezonden. De huid van de boomkikker reflecteert relatief weinig straling bij 460 nm: minder dan 8%.

- Leg hiermee uit dat te verwachten is dat de fluorescentie bij de boomkikker goed zichtbaar.



Commented [RO85]: In het energiediagram zie ik alleen de fotonenergie, niet de Q . Die Q kan dus trillingsenergie zijn maar kan ook bestaan uit allemaal fotonen met een hele lage energie? Ik weet niet of leerlingen zo kritisch zijn, tegelijkertijd, als ze dat niet zijn wil dat eigenlijk zeggen dat ze het diagram niet begrijpen.

Commented [RO86]: In eV? Of in J?

Commented [LK87]: Voor fluorescentie moet je dus licht hebben met een korte golflengte. Die wordt geabsorbeerd en vervolgens wordt er licht uitgezonden met een langere golflengte. Het is niet altijd makkelijk om fluorescentie waar te nemen. Dat komt doordat:

- Het signaal zwak is: er worden weinig fotonen uitgezonden als gevolg van fluorescentie;
- Het invallende licht deels wordt gereflecteerd door de fluorescerende stof: b.v. de huid van het dier dat fluoresceert;

Er teveel omgevingslicht is, feller dan het fluorescerende signaal.

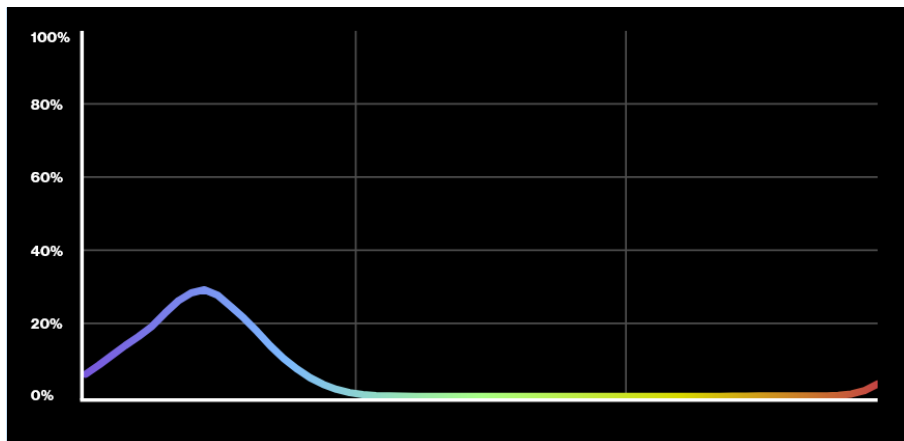
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

3.3. Filters en spectrofotometers

Je bent verschillende keren grafieken tegengekomen waarin staat uitgezet wat de lichtintensiteit of gevoeligheid is als functie van de golflengte van het licht. Bijvoorbeeld bij de eigenschappen van het oog, of de straling uitgezonden door een led. Die grafieken zijn gemaakt met een spectrofotometers of een spectroscop.

In toepassingen waar gebruik wordt gemaakt van fluorescentie is het vaak nodig om alleen te kijken naar het fluorescerende signaal, niet naar het licht dat was gebruikt om de stof te laten fluoresceren. Dan wordt gebruik gemaakt van filters, waarbij alleen bepaalde straling wordt doorgelaten en de rest wordt tegengehouden. De Zuid-Amerikaanse boomkikker fluoresceert maximaal 30% (zie artikel boven).

In figuur 3.x zie je hoeveel licht een blauwfilter doorlaat als functie van de golflengte.



Figuur 3.x Een blauwfilter: Op de y-as het percentage van het licht dat wordt doorgelaten als functie van de golflengte (op de x-as).

Opdracht 3.3. Practicum: fluorescentie onderzoeken

In dit practicum onderzoek je waar fluorescentie vanaf hangt door gebruik te maken van stoffen die je in de keuken zou kunnen tegenkomen: quinine uit tonic (frisdrank), kurkuma (een specerij), chlorofyl uit spinazie en chlorogeenzuur uit aubergine.

De practicumbeschrijving is apart beschikbaar.

3.4. Toepassing: energiezuinige lampen

In 2008 besloot de EU om gloeilampen uit te faseren. Ze zijn erg inefficiënt in het omzetten van elektrische energie in licht. Een gloeilamp bevat een metalen draad waar een elektrische stroom doorheen loopt. De draad wordt heet, gaat gloeien en zendt elektromagnetische straling uit. De temperatuur van de draad bepaalt welke straling er uitgezonden wordt. In 2014 ging de Nobelprijs voor natuurkunde naar de uitvinding van de blauwe led die energiezuinige verlichting mogelijk

Commented [LK88]: Mogelijkheden om uit te werken:

- Zelf filter/spectroscop maken? Zie ook Opdracht 2.17 <https://hackaday.io/project/181144-raspberry-pi-spectrometer> (ca. 100 pond + Raspberry Pi)
- https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6930 (ca. Euro 1500,-)
- <https://webshop-english.cma-science.nl/subject-areas/biology/sensors/usb-sensors/spectrometer-hd-usb.html> (+ lichtbron voor E 1200,-)
- Manieren om het licht uiteen te rafelen in verschillende kleuren: tralie en/of prisma
- Gebruik van een filter voor kleurenblinden om weer kleur te zien

Commented [LK89]: Voorbeeld van

<https://leefilters.com/colour/071-tokyo-blue/>

Schaalverdeling x-as: links = 400 nm, stappen van 100 nm. Zelf geschikte grafieken tekenen.

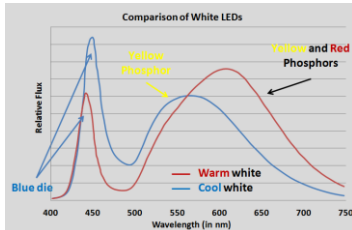
Commented [LK90]: Uitwerken a.d.h.v.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00328>

...en als bijlage toevoegen.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

maakte. Samen met fluorescentie is het mogelijk om met een blauwe led licht te maken dat wij
waarnemen als wit licht.



Figuur 3.2 Spectrum van twee soorten witte leds. (bron onbekend; grafiek natekenen)

Commented [LK91]: <https://www.youtube.com/watch?v=AF8d72mA41M>

Commented [RO92]: Mooi dat we net kunnen doen alsof de spaarlamp nooit bestaan heeft :P Daarvoor is het wel handig als leerlingen weten dat de Nobelprijs niet wordt uitgereikt voor een uitvinding gedaan in 2014 maar dat blauwe LEDs commercieel beschikbaar zijn sinds 1989 😊

Opdracht 3.4. Werking witte led

Voor de uitvinding van de blauwe led werden witte leds gemaakt op basis van drie afzonderlijke kleuren leds: rood, groen en blauw. Deze leds kun je kopen als rgb-leds.

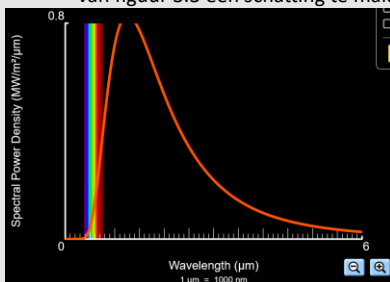
- Leg met behulp van de theorie uit Hoofdstuk 2: uit dat het licht van een rgb-led eruit ziet als wit licht.
- Welke golflengte moeten de afzonderlijke leds hebben om er voor het menselijk oog wit uit te zien? Schets voor een rgb- led de lichtintensiteit als functie van de golflengte.

Een witte led op basis van een blauwe led zendt wit licht uit met behulp van een laagje fluorescerend fosfor. Het spectrum van dit type led zit je in figuur 3.2. In het vervolg wordt deze led een witte led genoemd.

- Leg uit waarom het wel mogelijk is om met een blauwe led met behulp van fluorescentie groen, geel en rood licht te maken, maar het niet mogelijk is om met bijvoorbeeld een rode led en fluorescentie blauw licht te maken.
- Leg met behulp van figuur 3.2 uit dat de witte led er ook voor ons wit uitziet. Maak ook gebruik van het figuur uit Hoofdstuk 2: met de gevoeligheid van kegeltjes in het oog.

De temperatuur van de gloeidraad in een gloeilamp bepaalt welke straling er uitgezonden wordt. Bij een temperatuur van 2300 °C ziet het spectrum er uit zoals in figuur 3.3. Alle elektrische energie wordt hierbij omgezet in straling.

- Leg hiermee uit dat het rendement van een gloeilamp heel laag is. Probeer met behulp van figuur 3.3 een schatting te maken voor dit rendement.



Figuur 3.3 Spectrum van een gloeilamp bij 2300 °C. Op de verticale as staat de energie uitgezonden bij een bepaalde golflengte. (bron: PhET, natekenen)

Je hebt nu drie manieren gezien om wit licht te maken: met een gloeilamp een rgb-led en met een witte led op basis van fluorescentie. Onze ogen zijn geëvolueerd op basis van zonlicht. Het

Commented [LK93]: natekenen

Commented [RO94]: Het kan ook anders (RGB led). Ik zou hier nog even expliciet verwijzen naar de regenboog van eerder: wit licht bevat alle kleuren.

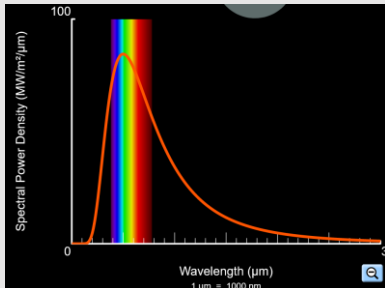
Commented [RO95]: Deze vraag zou ik veel eerder stellen. In de lijn 'vroeger waren er gloeilampen' -> in 2008 is besloten die uit te faseren -> dat kan door de gloeilamp te vervangen door een led lamp

Commented [LK96]: natekenen

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

spectrum van de zon lijkt op dat van een gloeilamp, maar de temperatuur is veel hoger, zie figuur 3.4.



Figuur 3.4 Spectrum van de zon (5500 °C). (bron: PhET, natekenen)

Vergelijk het spectrum dat je in opdracht b) hebt getekend met dat van een witte led (figuur 3.2) en een gloeilamp (figuur 3.3)

f) Welk van de spectra komt het meest overeen met dat van de zon (figuur 3.4)?

De led witte lijkt dus veel efficiënter dan de gloeilamp. De vergelijking is niet helemaal eerlijk, want figuur 3.2 laat alleen het zichtbare licht zien dat uitgezonden wordt door de witte led. Een deel van de elektrische energie wordt omgezet in warmte, net als bij fluorescentie het geval is. De blauwe led heeft ook een quantum yield.

3.5. Toepassing: Fluorescentiemicroscopie

Een gewone lichtmicroscop, zoals je op school kunt gebruiken, heeft een belangrijk nadeel: details die kleiner zijn dan de golflengte van het licht worden onscherp. Veel processen in ~~de~~ levende wezens vinden juist plaats op een schaal die kleiner is dan de golflengte van zichtbaar licht. In de cel zorgen microtubuli bijvoorbeeld voor de structurele stevigheid van de cel, spelen een rol in celdeling en het transport van moleculen in de cel. Ze kunnen wel 50 μm lang en slechts 20 nm breed zijn. Die zijn met een lichtmicroscop niet zichtbaar te maken. Een ander probleem bij een lichtmicroscop is dat verschillende celonderdelen licht even goed doorlaten en dus niet van elkaar te onderscheiden zijn: er is weinig contrast. Daarom kleuren biologen hun preparaten. Vaak overleven cellen zo'n kleuring niet, waardoor het niet langer mogelijk is processen te onderzoeken in levende cellen.

Fluorescentiemicroscopie lost een aantal van deze problemen op. Door stoffen aan de cel toe te voegen die hechten aan de delen die onderzocht worden, lichten deze op onder de microscoop. Veel stoffen die gebruikt worden in fluorescentiemicroscopie zijn echter giftig en net als bij het kleuren van cellen, is het dan niet langer mogelijk om processen in levende cellen te onderzoeken.

In 2008 ging de nobelprijs voor scheikunde naar Osamu Shimomura, Martin Chalfie en Roger Y. Tsien voor de ontdekking van en verdere ontwikkeling van groen fluorescerend eiwit. In het Engels is dat green fluorescent protein, afgekort GFP.

Opdracht 3.5. Resolutie van een microscoop

Lichtmicroscopen werken met zichtbaar licht, dat zal je niet verbazen. De golflengte van licht ligt in de orde van honderden nanometers. Voor ons heel klein. Op onze schaal lijkt licht daardoor in een rechte lijn te bewegen. Daarom hebben we het vaak over lichtstralen. Maar als je op kleine schaal kijkt, dan blijkt licht om voorwerpen heen te buigen. Je merkt daar het meest van als de opening

Commented [LK97]: natekenen

Commented [LK98]: Eventueel uitwerken; quantum yield/efficiency kan ik niet zo snel vinden.

Commented [LK99]: Gebruik in microscopie, wat zijn de voordelen, wat is er voor nodig? Mogelijk in de klas (?): <https://www.scienceinschool.org/article/2022/fluorescence-microscopy-classroom/> of <https://nightsea.com/articles/fluorescence-for-education-and-outreach/>
Eventueel zelf bouwen met: <https://doi.org/10.1021/ed100290w>
Waarom een bepaalde korte golflengte voor excitatie gebruiken i.c.m. een filter en niet bijvoorbeeld licht met een breed spectrum?

Commented [LK100]: Hier past dan misschien een activiteit op basis van de tekst van Rutger over een haar in je laser.

Commented [RO101]: Geef wat (of 1 heel goed) voorbeeld(en)

Commented [LK102R101]: Eens: ik zit te denken aan b.v. het onderzoek van Marileen Dogterom (TU Delft) die in beeld brengt hoe microtubuli in de cel werken.

Commented [LK103]: Fasecontrastmicroscopie lost dat deels op

Commented [LK104]: Probleem daar weer mee: het hele beeld fluoresceert en dat verlaagt het signaal tegen de ruis. Oplossing is confocal microscopie belicht alleen een klein punt en dek het fluorescerende licht af dat van andere punten komt. Dan moet je scannen, want je ziet maar één punt van je preparaat. Upgrade is STED waarbij het punt dat belicht wordt kleiner kan zijn door een ander laserprofiel. Het scannen blijft.

Commented [RO105R104]: Misschien een keertje een brainstorm aanvragen met Hylkje?

Commented [LK106]: Herschrijven zonder verwijzing naar de nobelprijs.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

waar het licht doorheen gaat, of het obstakel dat het licht tegenkomt dezelfde orde van grootte heeft als de golflengte van het licht. Dat is lastig als je een microscoop gebruikt om bijvoorbeeld organellen in een cel waar te nemen.

Verband voor resolutie

Schatting afmeting organel in cel

Waarom kun je microtubuli niet zien als ze wel lang genoeg zijn?

Commented [LK107]: uitwerken

3.6. Toepassing: Quantumdots

Quantumdots zijn kleine kristallen gemaakt van halfgeleidermateriaal. Ze zijn slechts enkele nanometer in diameter. Door die kleine afmeting gedragen de elektronen in quantumdots zich anders: ze kunnen alleen licht absorberen van een bepaalde golflengte en zenden het weer uit bij een langere golflengte. Kortom: quantumdots fluoresceren. Door het materiaal waarvan de quantumdot is gemaakt slim te kiezen en door de afmeting aan te passen kunnen er quantumdots gemaakt worden met de gewenste optische eigenschappen.

Quantumdots worden gebruikt in beeldschermen, in zonnepanelen en in biologisch onderzoek.

Commented [LK108]: Schets; eventueel uitwerken.

Zelf quantumdots maken en fluorescentie onderzoeken met eerdere technieken? Maken van de quantumdots blijft lastig.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00114>

Hoofdstuk 4: Magnetisme en spin

4.1. Inleiding

In het vorige hoofdstuk heb je kennis gemaakt met fluorescentie. In het practicum van Opdracht 3.3 bleek de mate van fluorescentie en de precieze golflengte van het uitgezonden licht sterk afhankelijk te zijn van de oplossing. Met andere woorden: de energieniveaus van de fluorescerende stof veranderen onder invloed van ladingen in de oplossing. Ook een magnetisch veld kan de ligging van energieniveaus veranderen. Dat effect wordt bijvoorbeeld gebruikt in een MRI-scanner in het ziekenhuis. Ook is het zichtbaar in het spectrum van verschillende elementen, bijvoorbeeld waterstof en natrium. Dit wordt het zeeman-effect genoemd, naar de Nederlandse natuurkundige Pieter Zeeman (1865 – 1943). Het zeeman-effect is niet makkelijk zichtbaar te maken. Toch denken wetenschappers dat vogels het aardmagnetisch veld kunnen “zien” en zo hun weg vinden op lange tochten; dankzij een quantumeffect.

4.2. Navigerende vogels



[Geschikte YouTube video (kort)]

samenvatting van “*The Quantum Nature of Bird Migration*” in *Scientific American Magazine* Vol. 326 No. 4 (April 2022), p. 26, zie ook *Quantum Effects in Biology*

- Eigenschappen navigatie vogels
- Niet gevoelig voor richting B-veld
- Wel gevoelig voor inclinatie en sterkte
- Gevoelig voor hoogfrequent B-veld (MHz): gevoelig voor “radiosmog”
- Gevoelig voor licht: vogels lijken veld te “zien”
- Conclusie: het kan niet macroscopisch effect zijn in de snavel, wel moleculair in het netvlies van het oog

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

]

4.3. Magnetische velden en elektrische stroom

Maak voordat je de theorie bestudeert de volgende opdracht.

Opdracht 4.1. |Practicum: eigenschappen van (elektro)magneten|

Voor deze opdracht heb je nodig:

- twee permanente magneten
- kompas
- spoel (minimaal 200 windingen)
- variabele gelijkspanningsbron
- twee aansluitsnoeren
- dik papier/karton (a4, ca. 200 grams)
- ijzervijlsel

In deze opdracht onderzoek je de eigenschappen van permanenten magneten en elektromagneten. Noteer je waarnemingen voor de volgende activiteiten:

1. Een magneet heeft twee uiteinden die polen worden genoemd. De ene wordt noord, de andere zuid genoemd. Gebruik het kompas om bij de permanenten magneet te bepalen welke pool noord en welke zuid is. Welke polen trekken elkaar aan? Welke stoten elkaar af?
2. Leg een permanente magneet vlak op tafel. Leg daarover het papier. Strooi over het ijzervijlsel over het papier. Beschrijf het patroon dat zichtbaar wordt. (Voorkom dat het ijzervijlsel in contact komt met de magneet: het is lastig weer los te krijgen.)
3. Beweeg het kompas over het papier, rond de positie van de permanenten magneet. Beschrijf wat er met de kompasnaald gebeurt. Wat valt je op aan de richting van het kompas als je dit vergelijkt met de richting waarin het ijzervijlsel zich richt?
4. Ruim het ijzervijlsel als volgt op: vouw een vel a4 dubbel en weer open, kiep het ijzervijlsel erop en verzamel het in de vouw. Giet het terug in het potje.

[uitwerken]

Er zijn veel toepassingen van magneten: koelkastmagneten, deurtjes die dicht blijven door een magneet en kompassen om het noorden te vinden. Dit zijn voorbeelden van permanente magneten: metalen, zoals ijzer, nikkel en kobalt. Er zijn ook *elektromagneten*: als je een elektrische stroom door een draad stuurt dan wekt die stroom een magnetisch veld op om de draad. Je kunt de draad rond een cilinder wikkelen zodat het magnetisch veld van de windingen elkaar versterken. Dit wordt een spoel genoemd (figuur 4.x). In zowel permanente magneten als in elektromagneten ontstaat het magnetisch veld door bewegende ladingen. Maar bij permanente magneten speelt quantummechanica een belangrijke rol.

Commented [LK109]: Als alternatief kunnen we het volgende uitwerken:
Kerry Browne, David P. Jackson; Simple Experiments to Help Students Understand Magnetic Phenomena. *Phys. Teach.* 1 October 2007; 45 (7): 425–429.
<https://doi.org/10.1119/1.2783151>

Eventueel aanvullen met idee Rutger:
Suggestie bij dat laatste: proefje met Curie-temperatuur. Bind een naald aan een draad die met het andere uiteinde stevig vast zit aan de tafel. Hou er een magneet bij zodat de naald naar de magneet wijst (zonder die te raken) en de draad strak gespannen is. Verwarm je de naald tot boven de Curie-temperatuur dan valt de naald ineens naar beneden (want faseovergang naar niet magnetiseerbare toestand).

Dan naar een model voor magnetisme met behulp van *Quantum Matter on the Table: A Pretty, Simple Hands-on Activity*. <https://doi.org/10.1119/10.0003014>

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Source	Approximate Magnetic Field Strength
Neuron depolarization (imaged by MEG)	0.5 pT (5×10^{-13} T)
Earth's magnetic field	0.5 G (50 μ T)
Refrigerator magnet	50 G (5 mT)
Junkyard electromagnet	1 T
Clinical MRI scanners	0.5 - 3.0 T (typical)
Research MRI scanners (human)	7.0 T – 11.7 T
Laboratory NMR spectrometers	6 - 23 T
Largest pulsed field created in lab nondestructively	97 T
Largest pulsed field created in lab (destroying equipment but not the lab)	730 T

<https://mriquestions.com/how-strong-is-30t.html>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_\(magnetic_field\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_(magnetic_field))

Veldsterkte in Tesla	Wat	bron
10^{-18}	Gevoeligheid SQUID in Gravity Probe B	http://einstein.stanford.edu/content/education/GP-B_T-Guide4-2008.pdf
10^{-14}	Menselijke hersenen	https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/14383291/RevModPhys.65.413.pdf
10^{-7}	Magnetron op 1 m	https://web.archive.org/web/20210428043618/http://www-ehs.ucsd.edu/LBCI/LIPA_Magnetic_Field_Levels_Around_Homes.pdf
10^{-5}	Aardmagnetisch veld	
10^{-3}	Koelkastmagneet	
10^{-1}	Neodymiummagneet in hoofdtelefoon	
1	MRI in ziekenhuis	
10	Sterkste, continu opgewekt magneetveld	
10^3	Sterkste, gepulsde magneetveld	
10^8	Neutronenster	
10^{11}	Magnetar (type neutronenster)	
10^{13}	Sterkste magnetische Pulsar	

Commented [LK110]: Infographic van maken

4.4. Elektronspin

Permanente magneten zijn magnetisch dankzij de elektronen in de atomen waaruit de magneet bestaat. Het blijkt dat elektronen zich als microscopische kompasnaaldjes gedragen. Maar wel op een quantum-manier: de sterkte van hun magneetveld ligt vast en het veld kan maar twee richtingen aannemen, vaak op en neer, of *up* en *down* genoemd. Dit heeft met een meer fundamentele eigenschap van elektronen te maken: hun spin. Elektronen kunnen zich in twee spintoestanden bevinden: spin up en spin down. Wat up en down is, ligt eraan in welke richting je het magneetveld van de elektronen meet. In welke richting je ook meet: het elektron neemt een van twee mogelijke spin-richtingen aan.

Opdracht 4.2. Bewijs voor elektronspin
[Einstein-de Haas-effect? Is dit te doen in de klas?]

Met elektronspin is te verklaren waarom sommige metalen magnetisch zijn. Elektronen in een atoom bevinden zich in vaste energietoestanden. Elke energietoestand kan door maximaal twee elektronen bezet worden. Ze moeten dan wel een tegengestelde spin hebben. In een waterstofatoom bezet het enige elektron de laagste energietoestand. De spin maakt niet uit. Helium heeft twee elektronen: ze bezetten de laagste energietoestand met tegengestelde spin. Scheikundigen zeggen: de elektronen zijn gepaard (vanwege hun spin) en de K-schil is gevuld. Omdat de elektronen in helium een tegengestelde spin hebben, is hun netto magneetveld samen nul.

Lithium heeft drie elektronen: twee elektronen bezetten de K-schil en één elektron een volgende schil. Dat derde elektron is niet gepaard en je zou daarom kunnen verwachten dat lithium magnetisch is van zichzelf. Dat is niet het geval: de lithiumatomen zijn niet geordend, dus het magneetveld van het ene lithiumatoom wordt teniet gedaan door dat van een ander lithiumatoom (figuur 4.x). Lithium kan wel magnetisch worden als je er een magneet in de buurt houdt: het magneetveld van de individuele lithiumatomen richten zich een beetje naar het externe magneetveld.

Bij atomen met meer elektronen gaat het vullen van energietoestanden op soortgelijke manier. Hoe meer elektronen hoe hoger de energietoestand die ze bezetten. Opeenvolgende schillen bestaan uit steeds meer energietoestanden en kunnen steeds meer elektronen bevatten. Er zijn nog meer quantumregels voor het vullen die je niet hoeft te weten. In het kort komt het erop neer dat elektronen in een niet-gevulde schil met ongepaarde (dus gelijke) spin een lagere energie hebben. Die atomen zijn dus magnetisch. Net als in lithium zorgt dat er niet altijd voor dat de stof permanent magnetisch is. Bij sommige stoffen is het magneetveld van de individuele atomen zo sterk dat ze elkaar beïnvloeden en in één richting wijzen. Er ontstaan domeinen: gebieden met een netto magneetveld (figuur 4.x). Als er voldoende domeinen in dezelfde richting staan, dan heb je een permanente magneet.

4.5. Energietoestanden in een magneetveld: het zeemaneffect

In Opdracht 4.1 heb je gezien dat een kompasnaald zich richt naar een extern magneetveld. Dat is de laagste energietoestand van de kompasnaald. Het kost energie om tegen het veld in te staan. Bovendien is die toestand niet stabiel: de kompasnaald klapt om. Het is als een potlood dat je op z'n punt laat balanceren: een kleine verstoring en het valt om.

Elektronen gedragen zich ook een beetje als een kompasnaald, maar ze kunnen slechts twee mogelijke toestanden aannemen: die wordt spin up en down genoemd. Stel dat een elektron zich in

Commented [LK111]: Stern-Gerlach? <https://plato-stanford-edu.tudelft.idm.oclc.org/entries/physics-experiment/app5.html>

Commented [LK112]: Quantumtoestand?

Commented [LK113]: Halbach array

Commented [LK114]: Leuk historisch verhaal van Goudsmit: <https://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

een energietoestand van een atoom bevindt. Of het elektron nu spin up of down is, zonder extern magneetveld is de energie gelijk. Vergelijk dit met een potlood in een ruimtestation: je kunt in deze gewichtsloze toestand een potlood in elke richting op z'n punt zetten.

Als er wel een extern magneetveld is, dan zal de spin van het elektron meest waarschijnlijk dezelfde kant op wijzen als het veld. Die energie is dus lager. Als de elektronspin tegen het magneetveld in wijst, dan is de energie hoger. Het energieniveau splitst dus op (figuur 4.x). Hoe sterker het externe magneetveld, hoe verder de energieniveaus uit elkaar komen te liggen.

Opdracht 4.3. Zeemaneffect

Stel je een elektron voor dat zich in twee energietoestanden kan bevinden: de grondtoestand en een hoger gelegen eerste aangeslagen toestand (zie links in figuur 4.x). In elke toestand kan het elektron zowel spin up, of spin down hebben.

- Leg uit dat er maar één overgang mogelijk is: tussen de grond- en de eerste aangeslagen toestand. De spin van het elektron maakt dus niet uit.
- Bepaal met behulp van figuur 4.x de energie van een foton dat door het elektron geabsorbeerd kan worden. Bereken daarmee de golflengte van het foton.

Nu wordt er een magneetveld aangezet met een sterkte van $B = 50 \text{ mT}$. Hierdoor splitst de grondtoestand en de eerste aanslagen toestand op in elk twee toestanden. Zie rechts in figuur 4.x.

- Neem het energieniveauschema voor het geval $B > 0$ (rechts in figuur 4.x) over in je schrift. Geef met pijltjes alle mogelijke overgangen weer vanuit de grondtoestand.

De grond- en aangeslagen toestanden splitsen op met een energieverval van $\Delta E = 2\gamma \cdot B \cdot h$. Hierin is $\gamma = 28 \text{ GHz/T}$, B de sterkte van het magneetveld en h de constante van Planck.

- Bereken alle mogelijke golflengten van de fotonen die geabsorbeerd kunnen worden vanuit de grondtoestand. Maak gebruik van je antwoord bij opdracht c.

In Opdracht 4.3 heb je gezien dat door een extern magneetveld de energieniveaus waarin een elektron zich kan bevinden een klein beetje verschuiven. Het elektron kan daardoor andere golflengte straling absorberen of uitzenden. Je merkt dus iets van die verschuiving als je kijkt naar de uitgezonden straling. Dit effect wordt het Zeemaneffect genoemd, naar de Nederlandse natuurkundige Pieter Zeeman (1865 – 1943). Hij ontdekte dit effect in natrium: dat zendt twee kleuren oranje uit, met bijna dezelfde golflengte. In een sterk magneetveld splitsen die twee op. Het effect is maar moeilijk waar te nemen.

Commented [LK115]: Leuke video over zeemaneffect:

<https://www.youtube.com/watch?v=JV4Fk3VNZgs>

Dit is een follow-up

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.



Figuur 4.x Twee lijnen van natrium zonder magneetveld (boven) en in een sterk magneetveld (onder). (Copyright: publiek domein)

Verhaallijn:

- (?) Biologische voorkomen van magnetiet:
https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetite#Biological_occurrences
-

Eerdere aantekeningen:

- (Table top AFM van Thorlabs:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10756&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMlt_DChlewhAMVEJ6DBx3kQQN8EAAAYAAAEgKaPvD_BwE)
- H5: Onderzoek aan de tanden van magnetiet van de zeelak
- H5: Onderzoek aan gesteenten, aardmagnetisch veld ([Govert naar de kern van de aarde](#), ca. min. 33)
- Hersenonderzoek?
https://www.photonics.com/Articles/Diamond_Defects_Boost_Magnetic_Field_Sensing_for/a68179 en <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abn7192> > "Here we describe a new spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometer, and demonstrate magnetic field sensitivity of 0.54 fT Hz^{-1/2} with a measurement volume of only 0.3 cm³." (<https://www.nature.com/articles/nature01484>)
- Zalm oriënteert zich a.d.h.v. het aardmagnetisch veld (onderzoek gebruikt AFM/MFM).
<https://today.oregonstate.edu/news/new-research-magnetite-salmon-noses-illuminates-understanding-sensory-mechanisms-enabling>
- Fosforescentie en magnetisch veld:
https://www.youtube.com/watch?v=w8shYrF_OSU
- Govert naar de kern van de aarde: <https://ntr.nl/Govert-naar-de-kern-van-de-aarde/558> (v.a. minuut 34)

Verwerkingsopdracht:

- Onderzoek naar mogelijke toepassingen van technieken besproken in deze module?
- Hoe wordt de techniek toegepast? Wat is de werking?

Commented [LK116]: Dit vraagt dan weer om een lijnspectrum uit te leggen. Is dit echt nodig?

Field Code Changed

Field Code Changed

Field Code Changed

NLT Module Quantum Ready

Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

- Welke obstakels?
- Kies een focus: technisch, medisch, biologisch, etc.?
- Welke rol speelt biomimetica?

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

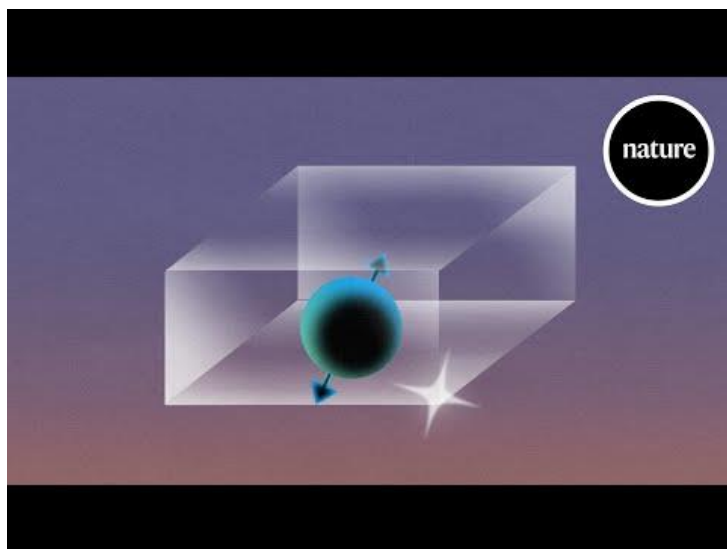
1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

Hoofdstuk 5: Beeldvorming met NV centers

Aantekening: zie artikel Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers A. Gruber et al. 27 juni 1997 Science 276 p. 2012

5.1. Inleiding

Veel van de onderwerpen die je tot nu toe bent tegengekomen – biomimetica, sensoren, magnetische velden, fluorescentie en spin – komen samen in dit hoofdstuk dat gaat over een bijzonder soort diamant. Diamant ken je het best als een duur onderdeel van juwelen. Maar er zijn veel meer toepassingen van diamant. De laatste jaren verwachten onderzoekers veel van diamant met een speciaal defect. Daarover gaat de volgende video. Kijk de video als inleiding op dit hoofdstuk. Beantwoord daarbij de vragen die in de opdracht onder de video staan. Lees voor je de video kijkt de vragen door.



Opdracht 5.1. Vragen bij video over NV centers

Beantwoord de volgende vragen met behulp van de video over NV centra.

- Uit welk soort atoom bestaat diamant voornamelijk?
- Waar staat de N en waar de V voor in de naam NV center?
- Welke mogelijk spin kan een NV center hebben?
- NV centers fluoresceren: in welke kleur?
- Noem zoveel mogelijk toepassingen van NV centra die in de video worden genoemd.
- Hoe worden diamanten gemaakt met NV centra?

5.2. De structuur van diamant met NV centra

Opdracht 5.2. Bouw je eigen diamant

Voer deze opdracht uit in een groep van twee tot drie leerlingen.

Benodigdheden uit een molecuulbouwset:

- 39 zwarte plastic bollen (koolstof)

Commented [LK117]: Vertaald van het Erasmus+ materiaal.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

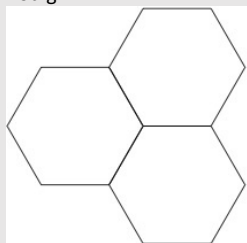
- 1 blauwe bol (stikstof)
- 1 transparante bol
- 57 verbindingen

De transparante bol staat model voor de lege plek, dus de vacante plek in een NV centrum.

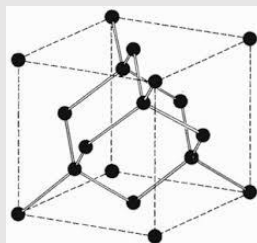
Stap 1: Bouwen

Maak een 3D model van een diamantrooster. Begin met 13 koolstof atomen en vorm drie hexagonale tegels (Figuur 5.1).

Bouw drie van deze lagen en leg ze op elkaar om zo een diamantrooster te vormen (Figuur 5.2 laat een deel daarvan zien). Je moet de lagen een beetje ten opzichte van elkaar verschuiven. Dat heet een translatie. Gebruik alle koolstofatomen. Je houdt een paar verbindingen over, die heb je later nodig.



Figuur 5.1 Drie hexagonalen.



Figuur 5.2 Diamantrooster

Stap 2: Controleren

Controleer je model door in figuur 5.2 alle complete hexagonalen te zoeken en te kijken of ze overeenkomen met die in je 3D model.

Stap 3: NV centrum maken

Maak ergens in het midden van je model een NV centrum. Verwijder hiervoor twee naast elkaar gelegen koolstofatomen en vervang ze door een blauwe (stikstof) en transparante (vacante) bol.

Je hebt nu een model van een diamantrooster met een enkel NV centrum. Voer nu de volgende opdrachten uit.

- Het NV centrum heeft een bepaalde oriëntatie: de verbinding tussen de N en de V wijst een bepaalde kant op. Onderzoek hoeveel verschillende oriëntaties er mogelijk zijn. (Zonder je diamantrooster te draaien.)
- Zoek en andere groep op met een compleet model, maar met een NV centrum in een andere oriëntatie. Combineer jullie roosters tot één groot rooster met behulp van de overgebleven verbindingen.

In Opdracht 5.2 ben je te weten gekomen welke structuur diamant met een of meerdere NV centra heeft. De verbindingen tussen de koolstofatomen in diamant ontstaan door elektronen die zich een beetje verdelen over twee naburige koolstofatomen. Dat doen ze dankzij quantumeffecten. Hoe precies is nu niet van belang.

Kijk nu nog eens goed naar je model en merk het volgende op:

- Elk koolstofatoom heeft vier burens.
- Elk koolstofatoom heeft dus vier enkele bindingen die door vier elektronen tot stand komen.
- Een stikstofatoom bevindt zich één plaats hoger in het periodiek systeem: het heeft een elektron extra ten opzichte van koolstof.

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Kop

1;Hoofdstuk to the text that you want to appear here.

- Vanuit de lege plek gezien (de transparante bol) zijn er vijf elektronen die zich een beetje op de lege plek bevinden.

Het diamantrooster als geheel heeft geen lading, maar die lege plek, met die vijf elektronen heeft een kans om een extra elektron in te vangen. Dat elektron kan elders uit het rooster komen. Het NV centrum als geheel is dan niet meer neutraal, maar negatief geladen. Je krijgt dan een NV^- centrum. In alle moderne toepassingen worden altijd zulke negatief geladen NV^- centra gebruikt. Omdat er dan meestal geen verwarring kan ontstaan, worden ze toch kortweg NV centra genoemd (zonder de min).

5.3. Energieniveau schema van een NV centrum

[uitleg hoe fluorescentie werkt met behulp van het Energieniveauschema]

5.4. Magneetveld meten met NV centra

[proef met NV centra om het magneetveld te meten, op basis van spin-mixing, dus zonder radiobron]

Overzicht van opdrachten

Hoofdstuk 1: Biomimetica en Quantum Technologie	3
Opdracht 1.1. Startopdracht	3
Opdracht 1.2. Een nog betere vleugel.....	5
Opdracht 1.3. Match de natuur en de toepassing	5
Opdracht 1.4. Match de natuur en de toepassing (vervolg)	6
Opdracht 1.5. Practicum: statische elektriciteit waarnemen.....	7
Opdracht 1.6. Zintuigen en sensoren.....	8
Opdracht 1.7. Practicum: elektrisch veld sensor.....	10
Opdracht 1.8. Wat weet je al van quantum?	11
Hoofdstuk 2: Licht waarnemen en maken	12
Opdracht 2.1. Nogmaals de bij.....	12
Opdracht 2.2. Kleuren van de regenboog	14
Opdracht 2.3. Golf lengte en frequentie berekenen.....	15
Opdracht 2.4. Kegeltjes en staafjes	15
Opdracht 2.5. Lichtgevoelig molecuul: retinal	16
Opdracht 2.6. Stabiliteit van rodopsine	17
Opdracht 2.7. Lichtgevoeligheid staafjes	18
Opdracht 2.8. Kleuren zien.....	18
Opdracht 2.9. Kleurenblind.....	19
Opdracht 2.10. Meer kegeltjes of meer staafjes?.....	19
Opdracht 2.11. Practicum: Een eerste lichtsensor	20
Opdracht 2.12. Practicum: kleur van een led.....	20
Opdracht 2.13. Stroom-spanningskarakteristiek van een led	23
Opdracht 2.14. Energie van een foton	24
Opdracht 2.15. Omrekenen joule en elektronvolt	24
Opdracht 2.16. Toepassingen van een fotodiode	25
Opdracht 2.17. Practicum: spectrometer maken.....	25
Opdracht 2.18. Oogimplantaat	26
Hoofdstuk 3: Fluorescentie en microscopie.....	29
Opdracht 3.1. Practicum: olijfolie	31
Opdracht 3.2. Fluorescentie bij kikkers	32
Opdracht 3.3. Practicum: fluorescentie onderzoeken	33
Opdracht 3.4. Werking witte led	34
Hoofdstuk 4: Magnetisme en spin	37

Opdracht 4.1. Practicum: eigenschappen van (elektro)magneten	38
Opdracht 4.2. Bewijs voor elektronspin	40
Hoofdstuk 5: Beeldvorming met NV centers.....	44