



Universiteit Utrecht

De chemie en fysica van de mobiele telefoon

een rijke context voor een breed scala aan chemische en fysische concepten

R.S. WILLEMS



Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Het scherm	6
2.1	Luminescentie	7
2.2	LCD-schermen	9
2.2.1	Gepolariseerd licht	9
2.2.2	Hoe werkt een LCD?	11
2.2.3	Kleurenweergave	11
2.2.4	De achtergrondverlichting of 'backlight'	12
2.3	De aansturing: passieve of actieve matrix	15
2.4	Het AMOLED-scherm: elektroluminescentie	16
3	De accu	18
3.1	Redox	18
3.2	Elektrochemische cellen: redox op afstand	18
3.3	De Li-ionaccu	20
4	De Zender	22
4.1	Draadloze verbinding	22
4.2	Bereik, bandbreedte en antenne	23
4.3	Frequentiebanden	24
4.4	Principes achter draadloze gegevensoverdracht	24

Gepubliceerd en gedistribueerd door Universiteit Utrecht, Departement Scheikunde
Onderwijsinstituut Scheikunde, Budapestlaan 4b, 3584 CD Utrecht

Ontwikkelaar: Ralf Willems, vwo docent bij de sectie Condensed Matter and Interfaces
Begeleider: Prof. Dr. Andries Meijerink

Deze opdracht is ontwikkeld in het project VWO docent bij een Scheikundesectie van de UU.
Het departement Scheikunde van de Universiteit Utrecht heeft middelen uit het sectorplan
Scheikunde ingezet voor dit project.

2015 Onderwijsinstituut Scheikunde, Universiteit Utrecht, Nederland

Mits deze bron wordt vermeld is het toegestaan om zonder voorafgaande toestemming van
bovenstaande uitgever deze uitgave binnen de lessituatie geheel of gedeeltelijk te kopiëren dan
wel op andere wijze te verveelvoudigen. De ontwikkelaar stelt het op prijs geïnformeerd te
worden over het gebruik van deze uitgave en de ervaringen die ermee zijn opgedaan.

Email: science.vwo.chem@uu.nl

Hoofdstuk 1

Inleiding

Vijftien jaar geleden had bijna niemand er eentje, maar vandaag de dag is hij niet meer uit ons leven weg te denken: de mobiele telefoon. Aanvankelijk werd hij vooral gebruikt om mee te bellen, te laten weten dat je wat later kwam als je trein of bus vertraagd was, later ook om korte tekstberichten naar elkaar te sturen (sms: *short messaging service*). Tegenwoordig zijn de meeste mobiele telefoons aangesloten op het wereldwijde internet, met e-mail, een internet browsers en een onnoemlijk grote hoeveelheid 'apps' staan we permanent in verbinding met de rest van de wereld. De mobiele telefoon is in veel gevallen hèt middel geworden om op de hoogte te blijven van het nieuws en de weersvoorspelling, om bankzaken te regelen, om de weg te vinden en niet in de laatste plaats om in contact te blijven met vrienden en familie, waar deze zich ook bevinden. Te meer omdat de mobiele telefoon altijd bij ons, is zij voor onze communicatie met de buitenwereld de afgelopen jaren belangrijker geworden dan de computer of de vaste telefoon, waarvan het gebruik de laatste jaren gestaag afneemt en waarvoor bovendien steeds minder mensen kiezen.

Met de komst van Apples iPhone in 2007 zijn mobiele telefoons met internetfunctionaliteit – de zogenaamde *smart phones* – veel gebruiksvriendelijker en alomtegenwoordiger geworden. De telefoons met aanraakgevoelig scherm en in hun navolging de tablet computers, kunnen naar verluid zonder verdere instructie door peuters en ouderen bediend worden. Dat er een wondere wereld van chemie en fysica schuil gaat achter het apparaatje dat je permanent bij je draagt en dat het apparaatje in je handpalm een schat aan technologische hoogstandjes huisvest, wordt door de meeste mensen niet beseft: het werkt gewoon. Echter, terwijl de bediening steeds eenvoudiger en intuïtiever is geworden, is de telefoon zelf steeds ingewikkelder geworden: hoe een mobiele telefoon *werkt*, wat er allemaal in zit en waarom, hoe de belangrijkste onderdelen werken, dat weten de meeste mensen niet.

Deze lesmodule probeert een inzicht te geven in de werking van een mobiele telefoon. Aangezien er in die telefoon een veelheid aan hypermoderne technologie schuilgaat, is het binnen het bestek van een lesmodule als deze niet mogelijk om alle onderdelen van de mobiele telefoon uitvoerig aan bot te laten komen, zij beperkt zich daarom tot een drietal vooraanstaande onderdelen: het scherm, de accu en de zender. Ieder hoofdstuk is gewijd aan één van deze onderdelen: wat zijn de belangrijkste eigenschappen? En: hoe werkt het nu eigenlijk?

De mobiele telefoon biedt een rijke context voor concepten als aangeslagen toestand, halfgeleiders en diodes, elektrochemische cellen, elektromagnetische straling en elektronische gegevensoverdracht. In dit materiaal worden deze uitgelegd aan de hand van drie belangrijke onderdelen van het mobieltje: het scherm, de accu en de zender. De theorie gaat vergezeld van een reeks verwerkingsopdrachten en enkele praktica.

Veronderstelde voorkennis

- atoombouw (basaal)
- periodiek systeem
- optica/kijklijnen
- golven
- elektriciteit en schakelingen
- redox (basis)

Behandelde concepten

- atoommodel Bohr /schillentheorie
- luminescentie
- grondtoestand/aangeslagen toestand
- energie van een foton
- (vloeibare) kristallen
- polarisatie van licht
- diodes/LEDs
- halfgeleiders (p-type & n-type)
- energiebanden en bandafstand
- elektroluminescentie
- elektrochemische cellen
- Daniellcel en loodaccu
- frequentiebanden
- draadloze gegevensoverdracht

Op de volgende pagina staat een overzicht van de elementen die zoal worden gebruikt voor de productie van een mobiele telefoon. Dit schema is door de auteut vertaald uit het Engels.

ELEMENTS OF A SMARTPHONE

ELEMENTENLEGENDA: ● ALKALIMETAAL ● AARDALKALIMETAAL ● OVERGANGSMETAAL ● GROEP 13 ● GROEP 14 ● GROEP 15 ● GROEP 16 ● HALOGEEN ● LANTHANIDE

SCHEM



Indiumtinoxide is een mengsel van indiumoxide en tinoxide. Het wordt gebruikt in een transparante, dunne laag die elektriciteit geleidt. Hierdoor kan het scherm functioneren als een touchscreen.



Het glas dat gebruikt wordt in de meerderheid van de smartphones is een aluminosilicaatglas, bestaande uit een mengsel van alumina (Al_2O_3) en silica (SiO_2). Dit glas bevat ook kaliumionen die helpen om het glas steviger te maken.



Een verzameling zeldzame aardmetalen worden in kleine hoeveelheden gebruikt om de kleuren in het scherm te verkrijgen. Sommige verbindingen worden ook gebruikt om de gevoeligheid voor UV-licht te verminderen.

Accu



De meerderheid van telefoons maakt gebruik van lithiumionaccu's, die bestaan uit lithiumkobaltoxide als positieve elektrode en grafiet als negatieve elektrode. Sommige accu's maken gebruik van andere metalen zoals mangaan in plaats van kobalt. De behuizing van de accu is gemaakt van aluminium.

ELEKTRONICA



Koper wordt gebruikt voor de bedrading in de telefoon, terwijl koper, goud en zilver de voornaamste metalen zijn waaruit microelektronische componenten zijn vervaardigd. Tantalaan is het belangrijkste bestanddeel van microcondensatoren.



Nikkel wordt onder andere gebruikt in de microfoon. Legeringen met onder andere de elementen praseodymium, gadolinium en neodymium worden gebruikt in de magneten in de luidspreker en de microfoon. Neodymium, terbium en dysprosium worden gebruikt in de vibratiemotor.



Zuiver silicium wordt gebruikt om de chip in de telefoon te fabriceren. Het wordt geoxideerd om niet-geleidend onderdelen te maken. Daarnaast worden er andere elementen toegevoegd.

Tin en lood worden gebruikt om elektronica te solderen. Nieuwere loodvrije solderen bevat een mengsel van tin, koper en zilver.



BEHUIZING



Sommige behuizingen van telefoons zijn vervaardigd van magnesiumlegeringen, maar de meeste van plastics. Plastics bevatten ook vlamvertragers, waarvan sommige broom bevatten, terwijl nikkel kan worden toegevoegd om elektromagnetische interferentie te verminderen.

Hoofdstuk 2

Het scherm

Het eerste dat je ziet aan je mobiele telefoon is je scherm. Je kunt je misschien nog herinneren dat mobiele telefoons vroeger een klein scherm hadden, dat groenig was en zwarte lettertjes en cijfers bevatte. De rest van de voorkant van je mobiel werd ingenomen door een toetsenbordje. Schermen zijn de afgelopen jaren steeds groter en helderder geworden. Wat je minder goed kunt zien, is dat zij ook dunner en zuiniger zijn geworden. De trend was eerst om telefoons steeds kleiner te maken, daarna, met de invoering van het aanraakgevoelige scherm en de steeds bredere toegankelijkheid van mobiel internet, moesten de telefoons weer groter.



Motorola Brick	Nokia 3210	Sony Ericson T610	Apple iPhone 3G
1984	1999	2003	2008

Tabel 2.1: dertig jaar mobiele telefoon: een ontwikkeling van groot naar klein naar groot.

Het scherm van je mobiele telefoon is in beginsel niet heel anders dan bijvoorbeeld het scherm van een laptop of televisie.

In dit hoofdstuk gaan we stap-voor-stap bekijken welke eigenschappen een goed scherm moet hebben, hoe een scherm is opgebouwd en hoe deze bouw van het scherm zich verhoudt tot die eigenschappen.

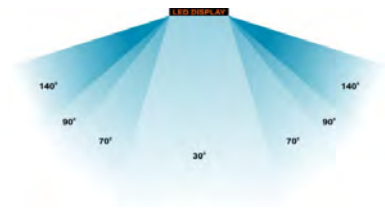
Waaraan moet een goed scherm voldoen? Een ideaal scherm heeft:

- een grote helderheid,
- een hoge mate van kleurechtheid,
- een grote inkijkhoek,
- reageert snel (geen ghosting),
- is zuinig en dun
- en relatief goedkoop te produceren.

De meeste van deze eigenschappen spreken voor zich, bij twee zullen we even stilstaan, omdat het misschien niet meteen duidelijk is wat ermee wordt bedoeld.

Inkijkhoek Een belangrijke eigenschap van een scherm is de inkijkhoek. Dat is de maximale hoek van waaruit het bekeken kan worden zonder dat dat verlies van contrast en kleur oplevert. Als je buiten de maximale kijkhoek van je televisie zit, krijg je vervormd beeld en rare kleuren. Probeer maar eens onder een heel scherpe hoek naar het scherm van je mobiele telefoon te kijken. Treedt er vervorming op? Of zie je gekke kleuren?

Je zou kunnen zeggen dat een grote inkijkhoek voor mobiele telefoons minder belangrijk is dan voor bijvoorbeeld televisies. Meestal wordt een mobiele telefoon immers maar door één persoon tegelijk gebruikt en kijkt deze recht op het scherm.



Figuur 2.1: De kijkhoek



Figuur 2.2: Een beeld met sterke mate van ghosting.

Ghosting Een ander belangrijk nadeel dat platte schermen vooral vroeger hadden was dat er *ghosting* optrad, zeker bij (snel) bewegende beelden. *Ghosting* betekent dat er een replica van het beeld – maar dan iets verschoven – te zien is door het beeld heen, alsof er een ‘spook’ achter zit. Het wijst op een hoge responstijd van het scherm: het scherm is niet in staat de pixels snel genoeg te laten schakelen, wanneer deze ‘nalicht,’ waardoor een deel van het beeld achter blijft. Wanneer er een object door het beeld beweegt, een bal of muispijl, lijkt het alsof deze een ‘staart’ heeft, als een komeet.

2.1 Luminescentie

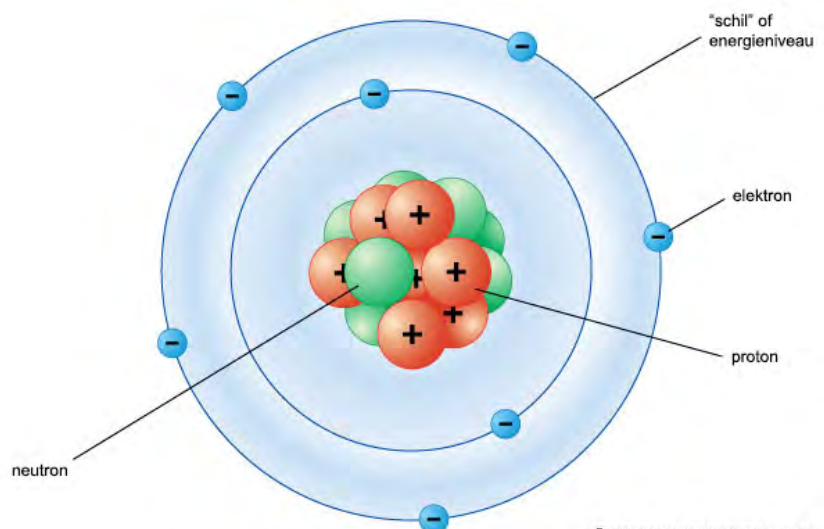
Het scherm van je mobieltje geeft licht, anders zou je niets kunnen zien. Hoe maakt het scherm dit licht? En hoe zorgt hij ervoor dat er op verschillende punten (*pixels*, van *picture elements*) verschillende kleuren en verschillende helderheden te zien zijn? Om dit te begrijpen, hebben we het begrip luminescentie (van *lumen*, licht) nodig.

Je hebt geleerd dat atomen bestaan uit protonen, neutronen en elektronen. De protonen en neutronen zitten in de kern van het atoom, dat grotendeels uit lege ruimte bestaat. Aan de rand van het atoom, de schil, bevinden zich de elektronen.

Deze elektronen bevinden zich echter niet allemaal op een gelijke afstand tot de kern; sommige zitten dichterbij, andere verder af. We zeggen dat de elektronen zich in verschillende *schillen* bevinden. In deze schillen kunnen zich steeds een beperkt aantal elektronen bevinden: twee in de eerste schil, acht in de tweede, achttien in de derde. In iedere schil kunnen $2n^2$ elektronen, waar n het betreffende energieniveau is. In de vierde schil kunnen dus $2 \cdot 4^2 = 32$ elektronen.

Deze schillen corresponderen met verschillende energieniveaus: hoe verder het elektron van de kern is, hoe hoger zijn energieniveau. De eerste schil bevindt zich het dichtst bij de kern en heeft dus het laagste energieniveau. Aangezien alles altijd streeft naar een zo laag mogelijk energieniveau, worden de elektronen altijd vanaf de laagste schil gevuld (*aufbau*-principe).

In figuur 2.3 zie je een modelvoorstelling van een stikstofatoom, met de elektronen in verschillende energieniveaus. Stikstof



© 2011 Encyclopædia Britannica, Inc.

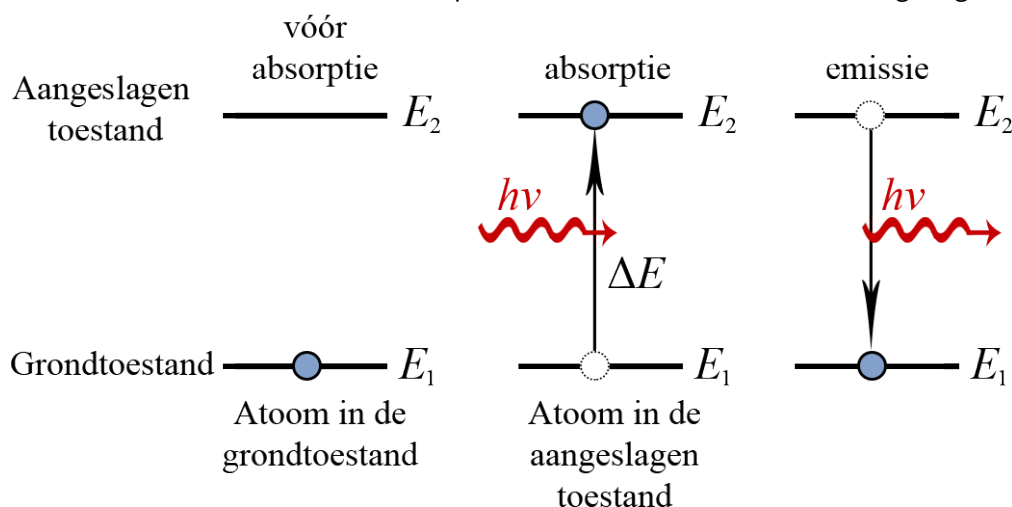
Figuur 2.3: Een stikstofatoom volgens het model van Bohr.

heeft atoomnummer 7, dus zeven protonen in zijn kern. Daarnaast heeft dit stikstofatoom 7 neutronen (de massa is $14\text{ u} - 7\text{ u}$ van de protonen $= 7\text{ u}$ over, dus 7 neutronen). Aangezien het stikstofatoom een ongeladen deeltje is en er al 7 positief geladen deeltjes aanwezig zijn (de 7 protonen), zullen zich er zeven elektronen in de elektronenwolk bevinden. Van deze 7 elektronen bevinden zich twee in de eerste schil ($2 \cdot 1^2 = 2$) en dus nog 5 in de tweede schil, waar er maximaal 8 in kunnen ($2 \cdot 2^2 = 8$). Buiten deze schillen bevinden zich nog meer schillen, maar deze zijn normaal niet bezet met elektronen.

Aangezien iedere schil correspondeert met een energieniveau, is het mogelijk een elektron van een lager niveau op een hoger niveau te brengen door er energie in te stoppen, bijvoorbeeld met behulp van licht.

$$E = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

De energie van een enkel foton kun je uitrekenen door de frequentie van dat licht ν (in Hz) te vermenigvuldigen met de constante van Planck h (ca. $6,6 \cdot 10^{-34}$, zie BINAS), zie formule 2.1. Wanneer op een atoom een foton valt met een energie die overeenkomt met het energieverschil (ΔE) tussen twee schillen, dan kan dat foton worden geabsorbeerd en een elektron een schil worden opgewaardeerd naar een hogere schil/energietoestand. Het niveau waarop het elektron zich normaal gesproken bevindt, noemen we de *grondtoestand*. Wanneer het atoom een foton opneemt, komt het elektron in de *aangeslagen* toestand.



Figuur 2.4: Luminescentie: een schematische weergave van een elektron in verschillende energieniveaus: voor absorptie van een foton, bij absorptie en bij emissie van een foton.

Aangezien toestanden van hogere energie niet stabiel zijn (een systeem streeft naar zo min mogelijk energie), raakt het atoom deze energie weer kwijt. Dat kan op verschillende manieren, bijvoorbeeld door het uitzenden van een foton met een energieinhoud die overeenkomt met het te overbruggen energieverschil. Wanneer het atoom de energie van de aangeslagen toestand verliest onder uitzending van een foton, noemen we dat luminescentie. Door middel van luminescentie kun je licht maken.

Proef: luminescentie van plantaardige olie Benodigdheden: verschillende laserpointers (groen, rood, blauw), UV-lamp, plantaardige olie (bijv. zonnebloemolie of olijfolie), glazen flesjes, (half)verduisterde ruimte.

Vul een glazen flesje met olie en schijn er met een laserpointer door. Schrijf je observaties op en maak foto's. Herhaal de proef met de andere laserpointers en tot slot met de UV-lamp. Noteer je waarnemingen.

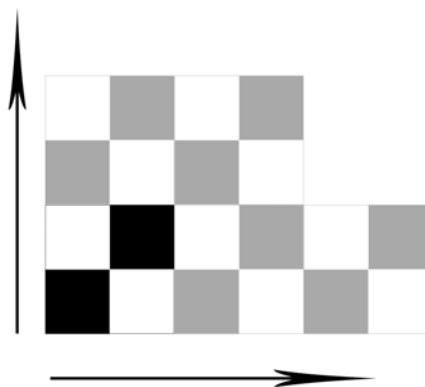
Vragen

- Welke kleuren heb je gezien?
- Bereken de energie van het geobserveerde geëmitteerde licht (gebruik BINAS 19)
- Wat valt op als je deze vergelijkt met de energie van het ingestraalde licht?

2.2 LCD-schermen

LCD staat voor *liquid crystal display*. Letterlijk is het dus een scherm gemaakt van vloeibare kristallen. 'Display' mag voor zich spreken, maar wat moet je je nu voorstellen bij een vloeibaar kristal? Een kristal is een hoeveelheid deeltjes die in alle richtingen op een regelmatige wijze geordend zijn. Je kunt je dat voorstellen als een schaakbord. De repeterende eenheid bestaat hier steeds uit twee witte en twee zwarte blokjes. Je kunt het hele schaakbord maken, door de eenheid in twee richtingen met dezelfde eenheid uit te breiden. Zo ontstaat een regelmatig geordend patroon van deeltjes, een kristal.

In het geval van een LCD-scherm zijn de kristallen vloeibaar, dat wil zeggen dat ze, in tegenstelling tot een vast kristal, ook nog kunnen bewegen, kunnen draaien. Dat is een eigenschap waar we dankbaar gebruik van maken. De vloeibare kristallen in een LCD scherm worden gevormd door een gedraaide stapel moleculen, als een wenteltrap of zoals de school vissen hieronder.



Figuur 2.5: Schematische weergave van een kristal (in 2D): deeltjes gerangschikt volgens een regelmatig patroon.



Figuur 2.6: Vloeibare kristallen: als een school vissen?

2.2.1 Gepolariseerd licht

Hoe komt het nu dat de vloeibare kristallen in één toestand geen licht doorlaten en in een andere toestand wel? Dat komt doordat er geen 'gewoon licht' wordt gebruikt, maar gepolariseerd licht.

Licht is elektromagnetische straling, het bestaat uit een elektrische en een magnetische component. Deze twee golven staan haaks op elkaar en hebben dezelfde golflengte en fase. De polarisatie-richting van het licht is de stand van het elektrisch veld. In figuur 2.8 is de polarisatie-richting verticaal. Golven hebben een golflengte en frequentie. Voor golven geldt dat de golflengte λ gelijk is aan de snelheid van de golf v vermenigvuldigd met de trillingstijd T , de periode van de golf in seconden (zie formule 2.2). Het aantal trillingen per seconde is de frequentie ν (zie formule 2.3). Dus de golflengte is gelijk aan de snelheid gedeeld door de frequentie (zie formule 2.4). Aangezien de lichtsnelheid, c , constant is (ca. $2,9 \cdot 10^8$ m/s, zie BINAS), kun je uit de frequentie de golflengte uitrekenen en omgekeerd, via formule 2.5, waarin de golflengte λ (in meters) gelijk is aan de lichtsnelheid c (in meters per seconde) gedeeld door de frequentie ν (in s^{-1} of Hz).

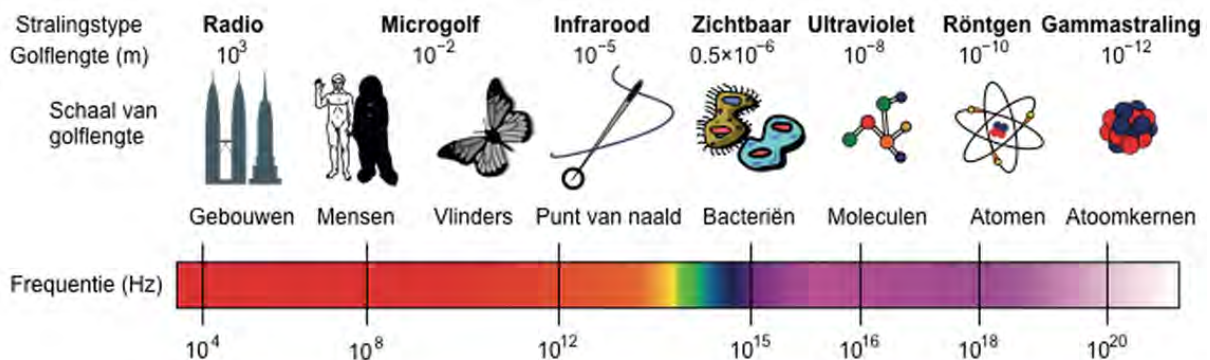
$$\lambda = v \cdot T \quad (2.2)$$

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.5)$$

Voor het zichtbare licht (golflengten ca. 400-700 nm) correspondeert de kleur die wij waarnemen met de golflengte van het licht. Licht met een golflengte van 650 nm zien wij altijd als rood, licht met een golflengte van 550 nm als geel (zie BINAS 19). Licht van alle zichtbare golflengten gemengd, zien wij als wit. In figuur 2.7 staat het hele elektromagnetische spectrum schematisch weergegeven.

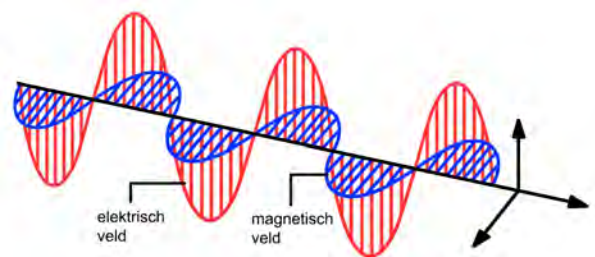


Figuur 2.7: Het elektromagnetisch spectrum: type straling met bijbehorende golflengtes, orden van grootte en frequenties.

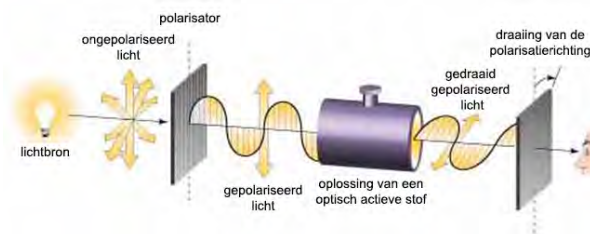
In 'gewoon' licht komen lichtgolven voor met alle polarisatierichtingen. Dat noemen we ongepolariseerd licht. Licht met maar één polarisatierichting noemen we gepolariseerd licht. Door middel van een polarisator is het mogelijk om licht met andere polarisatierichtingen te blokkeren. Zo'n polarisator laat alleen licht van één polarisatierichting door en blokkeert andere.

De moleculen van het vloeibare kristal vertonen *optische activiteit*, zij draaien de polarisatierichting van het licht. Wanneer dat gebeurt met ongepolariseerd licht, verandert er netto weinig: alle polarisatierichtingen worden in gelijke mate gedraaid. Wanneer er echter gepolariseerd licht wordt gebruikt, is er maar één polarisatierichting en is het resultaat dus licht dat nog steeds gepolariseerd is, maar in een andere richting.

In figuur 2.9 zie je hoe de draaiing van de polarisatierichting van licht door een optisch actieve stof kan worden gemeten. Licht van een lichtbron wordt gepolariseerd door een eerste polarisatiefilter, er blijft gepolariseerd licht over met een enkele polarisatierichting. Wanneer deze door de oplossing van een optisch actieve stof valt, wordt de polarisatierichting gedraaid. Daarmee valt het licht niet meer door het tweede polarisatiefilter. Door het tweede polarisatiefilter te draaien, kan de draaiing worden bepaald: er wordt net zo lang aan het filter gedraaid tot er licht wordt doorgelaten. Door de hoek tussen deze laatste en de eerste polarisatie te bepalen, meet men de optische activiteit.



Figuur 2.8: Licht is elektromagnetische straling: het bestaat uit een golven met een magnetische component en een elektrische component. Deze staan loodrecht op elkaar.



Figuur 2.9: Opstelling om de optische activiteit van een oplossing te bepalen.

Je kunt je zo'n polarisatiefilter voorstellen als een scherm met spleten erin. De doorsnede van een lichtstraal heeft dan een langwerpige vorm (de polarisatierichting) en kan dus alleen door het filter heen als het dezelfde richting heeft als de spleten in het filter. Wanneer er twee polarisatiefilters op elkaar worden gelegd, wordt er alleen licht doorgelaten als de oriëntatie van de filters hetzelfde is. Immers, de richting van

de spleten is nu hetzelfde. Wanneer de filters haaks op elkaar staan, kan het licht wel één van beide filters door, maar stuit op het tweede. Vanaf de andere kant zie je nu geen licht: het is donker.

Proef: gepolariseerd licht Ook uit het scherm van je mobiele telefoon of tablet komt gepolariseerd licht. Hiervan mag je gebruik bij deze proef. Benodigdheden: mobiele telefoon of tablet, sucrose-oplossing (1M), (brede) maatcilinder (min 50 mL), polarisatiefilter.

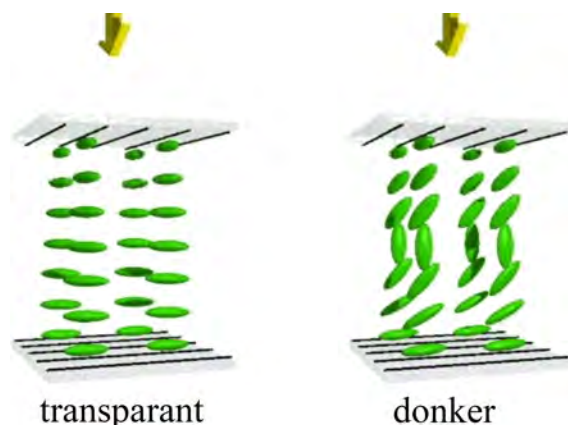
Stel je telefoon of tablet scherm in op een wit vlak (bijvoorbeeld door de achtergrond op wit in te stellen). Leg het polarisatiefilter op het witte vlak. Draai het filter vervolgens een kwartslag. Noteer je waarnemingen.

Vul de maatcilinder tot ongeveer twee derde met de sucrose-oplossing en plaats deze op het scherm (pas op met knoeien!). Plaats nu het polarisatiefilter bovenop de maatcilinder. Wat zie je als je deze nu een kwartslag draait?

2.2.2 Hoe werkt een LCD?

Het verschil met veel optisch actieve stoffen is dat de vloeibare kristallen in een LCD kunnen "schakelen." Wordt er een spanning aangelegd, dan vervormt het vloeibare kristal en hiermee verandert de optische activiteit.

Worden er twee polarisatoren na elkaar geplaatst onder een rechte hoek, dan wordt er geen licht doorgelaten. Door hiertussen een laag vloeibare kristallen te plaatsen die de polarisatierichting van het licht over negentig graden draait, wordt al het gepolariseerde licht doorgelaten. Immers, het gepolariseerde licht wordt nu door de kristallen zó gedraaid, dat het door de tweede polarisator heen gaat.



Figuur 2.10: Schematische dwarsdoorsnede van een LCD.

Aan beide zijden van de vloeibare kristallen bevinden zich elektroden. Door een voldoende grote spanning aan te leggen over de kristallen, vervormen deze zo dat zij de polarisatierichting van het licht niet meer veranderen. Hierdoor komt een lichtgolf die gepolariseerd is door de eerste polarisator niet meer door de tweede polarisator heen, de optische activiteit van de vloeibare kristallen was immers nodig om de polarisatie zo te draaien dat het precies door de tweede polarisator heen valt.

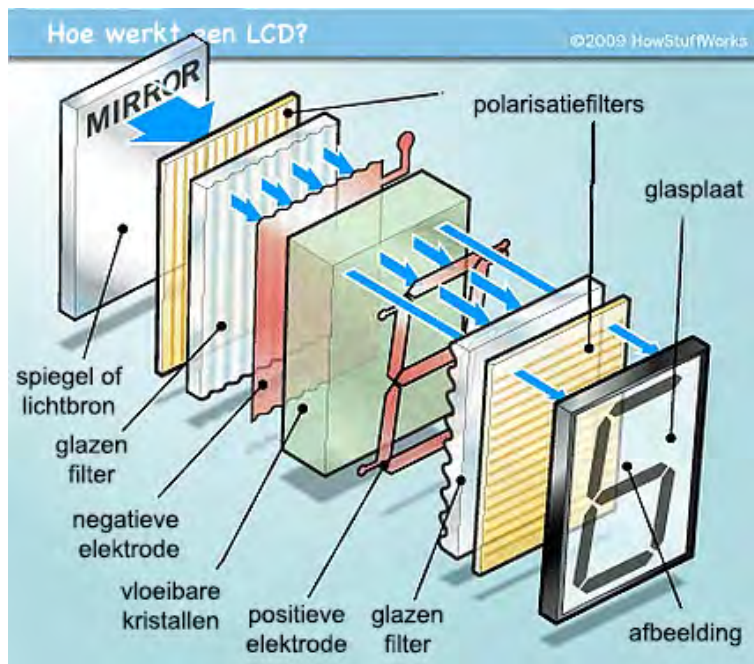
Door de spanning te variëren kan zo de hoeveelheid licht worden bepaald die door de LCD valt: van helemaal geen licht (donker/zwart) tot al het licht (licht/wit).

Figuur 2.10 geeft de twee toestanden van een klein stukje LCD weer: links de toestand waarin er geen spanning is aangelegd en het LCD transparant is, rechts de toestand waarin er spanning staat op de elektroden: de moleculen in het kristal ordenen zich zo, dat er geen licht meer wordt doorgelaten. De gele pijl geeft een lichtstraal weer.

LCDs zijn er in verschillende types. De hierboven beschreven variant betreft het wat ouder en eenvoudiger type van de zogenaamde 'twisted-nematic' (TN) LCD. Hier lopen de elektroden parallel aan het scherm en zij zijn haaks op elkaar geplaatst. De tussen de elektroden aangelegde spanning staat daarmee haaks op het scherm. Er valt bij dit type licht door de pixel wanneer er geen spanning over de elektroden staat (de pixel 'uit' staat), zoals in figuur 2.10. Tegenwoordig zijn er IPS-LCDs ('In Plane Switching'), waarbij de elektroden in één vlak liggen, in hetzelfde vlak als het scherm. De aangelegde spanning loopt hier parallel aan het scherm (vandaar de naam). Dit maakt de moderne IPS-schermen dunner, scherper en geeft hen een veel grotere inkijkhoek (tot 180°). Ook schakelen ze precies andersom: als er spanning over de elektroden staat, laat de pixel licht door; als er geen spanning is, is de pixel donker.

2.2.3 Kleurenweergave

Licht doorlaten of niet doorlaten resulteert in licht of donker. Door te variëren in de spanning over de vloeibare kristallen kunnen ook licht/donkerschakeringen gemaakt worden. Maar hoe kan het dat LCDs kleuren bevatten?



Figuur 2.11: Hoe werkt een LCD?

Eigenlijk is de oplossing heel eenvoudig. Iedere pixel wordt opgesplitst in drie, nog kleinere, subpixels, een rode, een groene en een blauwe. Doordat deze subpixels heel klein zijn en heel dicht bij elkaar zitten, ziet ons oog geen verschil tussen de verschillende subpixels. Wanneer er alleen licht door de rode subpixel valt, zie je de pixel als rood. Worden tegelijkertijd de rode en de groene aangezet, dan zie je geel. Door de kleuren rood, blauw en groen in bepaalde verhoudingen te mengen, ontstaan andere kleuren. Door de verschillende subpixels in verschillende mate aan te zetten, kun je licht "mengen" tot de gewenste kleur.

Onderstaande video geeft een visuele samenvatting van de werking van een LCD.

<http://www.youtube.com/watch?v=k7xGQKpQAWw>

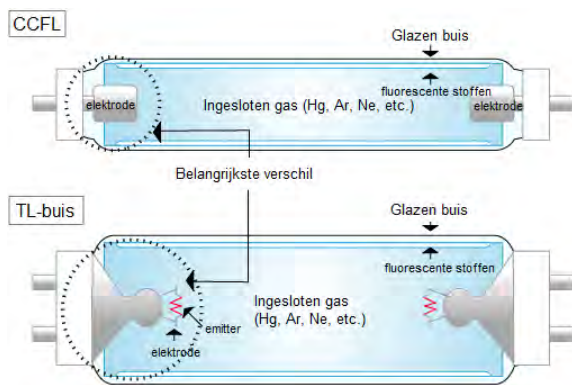
Opdracht: Kleuren Van een scherm kunnen de drie subpixels 256 schakeringen weergeven: van geen licht door laten naar al het licht doorlaten in 256 stapjes. Hoeveel kleuren kan dit scherm weergeven?

2.2.4 De achtergrondverlichting of 'backlight'

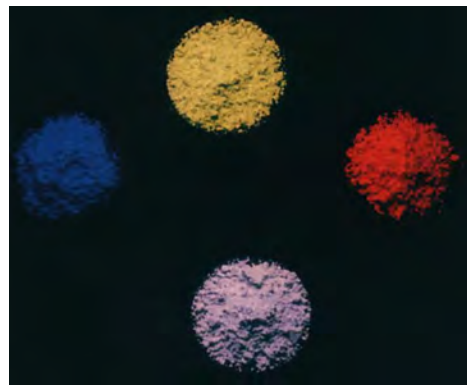
In een LCD zitten dus twee polarisatoren om een laag vloeibare kristallen. Deze kunnen zelf echter geen licht geven, zij kunnen alleen selectief licht doorlaten. Om iets te kunnen zien op een LCD is een lichtbron nodig. Oudere LCDs, die je vroeger veel in digitale klokken van radioweekers en horloges vond, werken met een spiegel, zij reflecteren licht dat vanuit de omgeving door het scherm heen valt, terug door het scherm. Wanneer de vloeibare kristallen in een pixel 'aan' staan, wordt het licht geblokkeerd en ontstaat er een zwarte pixel. Staan de pixel 'uit,' dan wordt het licht doorgelaten. Deze techniek is energiezuinig, maar werkt eigenlijk alleen met zwart-wit schermen met een lage resolutie. Voor de schermen van televisies, computers, tablets en telefoons is dat niet voldoende. Deze schermen hebben zelf een lichtbron nodig.

Die lichtbron kan verschillende vormen hebben. De gasontladingsbuizen (CCFL, een soort kleine TL-buizen) worden steeds minder gebruikt. Het nadeel is dat zij vrij veel energie verbruiken en vrij dik zijn. Niet echt handig voor in je mobiel. Tegenwoordig worden vooral LEDs gebruikt om het scherm te verlichten.

Een LCD heeft achtergrondverlichting nodig en dit levert verscheidene nadelen op. Ten eerste gebruikt het scherm meer energie doordat er een extra onderdeel in zit. Ten tweede wordt het scherm daarmee dikker. Ten derde is de hele achtergrond van het scherm permanent verlicht en 'lekt' er altijd wel wat licht langs of door de donkere pixels. Zwart is hierdoor op een LCD nooit helemaal zwart. Dat betekent dat het contrast (het verschil tussen zwart en wit) van een LCD relatief klein is.



(a) Schematische dwarsdoorsnede van een ccfl en een gewone ('warme kathode')tl-buis. Het grote verschil zit hem in de wijze van ontleding: in de TL-buis gebeurt dat door middel van een emitter, die na opwarming elektronen uitwerpt en in de CCFL gebeurt dat door middel van een heel hoge spanning.



(b) De fluorescente stoffen (in deze context vaak 'fosforen' genoemd) die aan de binnenkant van een TL-buis zitten onder UV-licht. Eén van deze stoffen emitteert blauw licht, de ander geel licht en de ander rood licht wanneer er ultraviolet licht op schijnt. Zonder UV-licht zijn de stoffen wit. Het vierde hoopje poeder is het resultaat van het mengen van de andere drie.

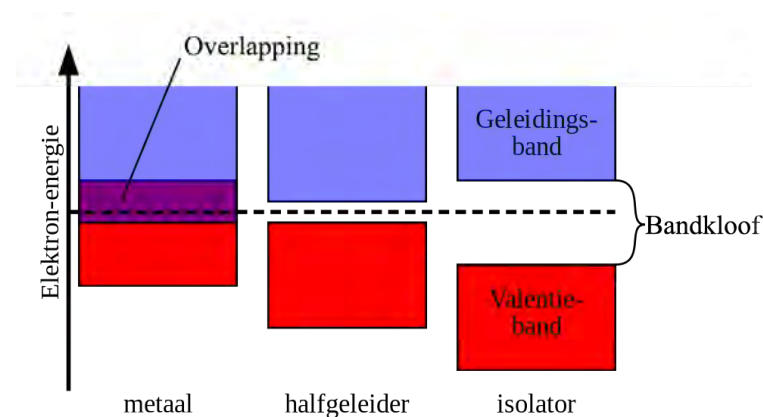
Figuur 2.12: De werking van gewone TL-buis en CCFL.

CCFL CCFL staat voor 'cold cathode fluorescent lamp.' Dat betekent dat er licht gemaakt wordt door middel van een 'koude' elektrode die elektronen uitzendt. Dit in tegenstelling tot een warme elektrode die elektronen gaat uitzenden doordat er een aan de elektrode verbonden filament sterk wordt verhit. De uitgezonden elektronen ioniseren kwikgas dat in de buis aanwezig is en dat op zijn beurt UV-licht gaat uitzenden. Aan de binnenwand van de buis zitten fluorescente stoffen die dat UV-licht opnemen en die energie gebruiken om zichtbaar licht uit te zenden. Voor een koude elektrode is een hoge spanning nodig. Dat betekent dat er vaak eerst een transformator nodig is om de gebruikte spanning op te transformeren. Ook deze neemt weer ruimte in.

LED

Tegenwoordig worden LEDs steeds vaker gebruikt voor achtergrondverlichting. LEDs zijn erg zuinig. LED staat voor 'light emitting diode,' een diode die licht geeft. Maar wat is nu precies een diode?

Om antwoord te krijgen op die vraag, moeten we weten wat een halfgeleider is. Je weet dat er geleiders zijn en isolatoren: sommige stoffen geleiden elektrische stroom en andere niet. Een halfgeleider zit daar tussenin: onder sommige omstandigheden geleidt hij stroom, onder andere omstandigheden niet.



Figuur 2.13: Bandenstructuur

niveaus van het kristal. Deze energieniveaus noemen we *banden*.

De hoogst bezette band heet de emivalentieband, net zoals we de buitenste elektronen van een atoom de

In vaste stoffen die alleen uit atomen bestaan (en dus niet uit moleculen) zitten deze atomen dicht op elkaar gepakt. Zo dicht dat ze hun elektronen eigenlijk delen met de deeltjes om zich heen. De schillen van de elektronen zijn als het ware gefuseerd met die van omliggende atomen. Die elektronen zijn, net zoals bij losse atomen, weer verdeeld over verschillende energieniveaus, waarbij de laagste energieniveaus het eerste worden opgevuld (*aufbau*-principe). Vergelijkbare energieniveaus van losse atomen vloeien samen tot gezamenlijke energie-

valentie-elektronen noemen. De laagste niet bezette band noemen we de *geleidingsband*. Daartussen zit een energiekloof, de *bandafstand*. Hier kunnen zich geen elektronen bevinden. Afhankelijk van de eigenschappen van de vaste stof kan deze groot of klein zijn. De grootte van de energiekloof wordt vaak uitgedrukt in elektronvolt, eV. Eén eV is de energie die een elektron nodig heeft om een potentiaalverschil van 1 V te overbruggen. Deze energie bedraagt $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Eén elektronvolt komt dus overeen met $1,6 \cdot 10^{-19}$ J (BINAS 4).

Om stroom te geleiden, zijn er twee dingen nodig: ladingen die vrij moeten kunnen bewegen. Als alle elektronen vast zitten in de valentieband, is dat niet mogelijk. Het kan wel zo zijn dat de valentieband en de geleidingsband deels overlappen. In dat geval kunnen er eenvoudig elektronen van de valentieband naar de geleidingsband. In de geleidingsband kan een elektron (-lading) vrij bewegen. In de valentieband is er nu een gat ontstaan, een lege plek waar eerst een elektron zat (met een +lading). Dat gat kan opgevuld worden door een elektron dat bij een naburig atoom zat, waarna het gat verschuift. Zowel in de geleidingsband als in de valentieband kunnen er nu geladen 'deeltjes' vrij bewegen: de stof geleidt.

Is de bandafstand heel groot, dan kunnen er geen elektronen van de valentieband naar de geleidingsband toe. De vaste stof kan geen stroom geleiden en is een isolator.

Maar wat als er nu een relatief kleine bandafstand zit tussen de twee banden? Zo klein dat de warmte-energie van de omgeving of van invallend licht voldoende is om een paar elektronen in de hogere energietoestand van de geleidingsband te brengen? Dan hebben we te maken met een halfgeleider. Een halfgeleider lijkt in eerste instantie op een isolator, maar met een klein beetje moeite kun je hem wel laten geleiden.

n-type en p-type halfgeleiders Door enkele atomen van een andere stof toe te voegen aan het rooster van een halfgeleider (doperen), kunnen we de eigenschappen van de halfgeleider aanpassen aan onze wensen en gebruiken voor allerlei elektronica.

Stel dat we een kristal silicium hebben. Silicium heeft de volgende elektronenconfiguratie: 2,8,4 (BINAS 99). Twee elektronen in de binnenste, acht in de tweede en vier in de buitenste schil. Deze vier buitenste elektronen, of valentie-elektronen, worden gebruikt om bindingen aan te gaan met naburige siliciumatomen, die daardoor allemaal acht elektronen om zich heen hebben (octetregel). Als een stukje silicium nu wordt verontreinigd (gedoteerd) met enkele fosforatomen (elektronenconfiguratie 2,8,5), dan blijft er een elektron over. Immers, ook fosfor heeft slechts vier elektronen nodig om aan de naburige siliciumatomen te binden. Het laatste elektron is daardoor veel vrijer in zijn beweging en draagt bij aan geleiding. Het resultaat noemen we een n-type halfgeleider (van negatief, vanwege het extra elektron van fosfor).

Hetzelfde kunnen we doen door een atoomsoort te introduceren met een elektron minder, zoals boor (elektronenconfiguratie 2,3). Deze wil ook vier bindingen maken met naburige siliciumatomen, maar komt hiervoor een elektron tekort. Deze kan hij wel 'lenen' van een naburig atoom, maar dan heeft deze weer een tekort. Dit tekort noemen we een gat. Het gat zorgt ervoor dat er ruimte is voor een elektron, waardoor elektronen door 'over te springen' door het kristal kunnen reizen, een beetje zoals een schuifpuzzel (zie figuur 2.14), waarin een ontbrekend puzzelstukje, een 'gat,' ervoor zorgt dat de andere stukjes kunnen schuiven. Hierdoor verplaatst het gat zich en vormt hiermee een positieve ladingsdrager. Deze halfgeleider noemen we van het p-type (van positief, door een tekort aan elektronen). Ook dit kristal kan elektrische stroom geleiden.



Figuur 2.14: Net als in een schuifpuzzel waarin blokjes kunnen schuiven doordat er één blokje ontbreekt, kunnen gaten in een p-type halfgeleider voor geleiding zorgen.

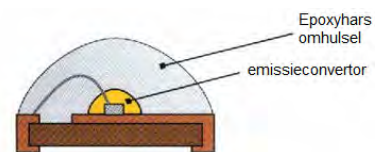
Diode Een van de belangrijkste toepassingen van deze halfgeleiders, is de diode. Een diode bestaat uit een combinatie van een p-type en een n-type halfgeleider. Waar deze elkaar raken, bevindt zich de zogenaamde *p/n-overgang*. Rond dit grensvlak zullen de elektronen die in de n-type halfgeleider 'over' zijn combineren met gaten in de p-type halfgeleider. De elektronen uit het n-type worden zo gebonden in de gaten van het p-type. Deze elektronen gaan niet meer van hun plaats: in het gebied rondom het grensvlak bevinden zich dus geen vrije elektronen en gaten meer: de *uitputtingszone*. De p/n-overgang geleidt dan ook geen stroom. Als we een spanning aanleggen tussen over de diode, dan wordt ofwel de uitputtingszone vergroot

(en geleidt dus niet), ofwel worden de elektronen teruggedreven en gaat de diode geleiden. Een diode geleidt dus maar in één richting, elektronen kunnen alleen van n-type naar p-type.

Hoe geeft een LED licht? In een p-type halfgeleider worden de 'gaten' gevormd die zich bevinden in de valentieband. De vrije elektronen in een n-type halfgeleider bevinden zich in de geleidingsband. Hiertussen bevindt zich een energieverschil (de *bandafstand*). Wanneer een vrij elektron uit de geleidingsband gevangen wordt in een gat, verliest hij dus een deel van zijn energie, de geleidingsband ligt immers op een hoger energieniveau dan de geleidingsband. Deze recombinatie van vrij elektron en gat komt het energieverschil vrij in de vorm van een foton. Iedere diode produceert daarmee licht, hoe groter het energieverschil, hoe 'blauwer' het licht. Wel is het zo dat wij dit uitgezonden licht alleen kunnen zien als het energieverschil tussen beide banden zo is, dat er fotonen uitgezonden worden met een golflengte tussen de 400 nm en 700 nm (*zichtbaar licht*). Is de terugval in energie groot genoeg om zichtbaar licht te produceren, dan noemen we het een led, een *light emitting diode*.

Afhankelijk van de bandafstand zendt een LED dus licht uit van een bepaalde golflengte, maar wel slechts van één golflengte. Licht van één golflengte noemen we *monochromatisch* licht. Het is geel, blauw, oranje, rood of bijvoorbeeld groen. In elk geval is het niet wit, want wit licht bestaat uit licht van allerlei verschillende golflengtes. Wanneer je licht van verschillende golflengtes in de juiste verhouding mengt, ontstaat er wit licht. Een witte LED kan op drie verschillende manieren worden gemaakt: I) door een combinatie van een rode, een blauwe en een groene led in één omhulsel, II) een UV-LED omhuld door een combinatie van drie fluorescente stoffen, die UV-licht opnemen en rood, blauw en groen licht uitzenden en III) een blauwe LED deels omhuld in een geel fluorescente stof, die een deel van het blauwe licht omzet in geel licht. Al deze LEDs zenden op het oog wit licht uit, maar de laatst genoemde variant wordt het meest gebruikt.

De LEDs voor de achtergrondverlichting kunnen op verschillende manieren geplaatst zijn. De goedkoopste oplossing is om een rij van witte LEDs langs de rand van de achterkant van de LCD te plaatsen (EL-LED, 'edge-lit LED'). Een zogenaamde 'diffusor' zorgt dat de intensiteit van het licht zo gelijkmatig mogelijk over het scherm wordt verdeeld. Een mooiere, maar minder zuinige en ook duurder oplossing is om de hele achterkant van de LCD te bedekken met witte LEDs. Dat wordt wel eens 'full-LED' genoemd. Er zijn ook varianten, waarbij een combinatie van rode, groene en blauwe LEDs over het oppervlak verspreid wordt (RGB-LED) of waarbij quantum dots (nanokristallen van halfgeleidermateriaal) gebruikt worden voor achtergrondverlichting.



Figuur 2.15: Schematische weergave van het meest gebruikte type witte LED. Om het blauw-emitterende halfgeleidermateriaal heen zit een emissieconvector die een deel van dit blauw omzet in geel licht. Het geheel wordt beschermd door een omhulsel van epoxyhars.

Opdracht: LEDs Bepaal welke kleur licht LEDs die gemaakt zijn van onderstaande halfgeleiders uitzenden. Maak gebruik van BINAS en licht je antwoord steeds toe aan de hand van een berekening.

- Galliumnitride, een halfgeleider met een bandafstand van 3,4 eV.
- Aluminiumgalliumindiumfosfide, een halfgeleider met een bandafstand van 1,81 eV.

2.3 De aansturing: passieve of actieve matrix

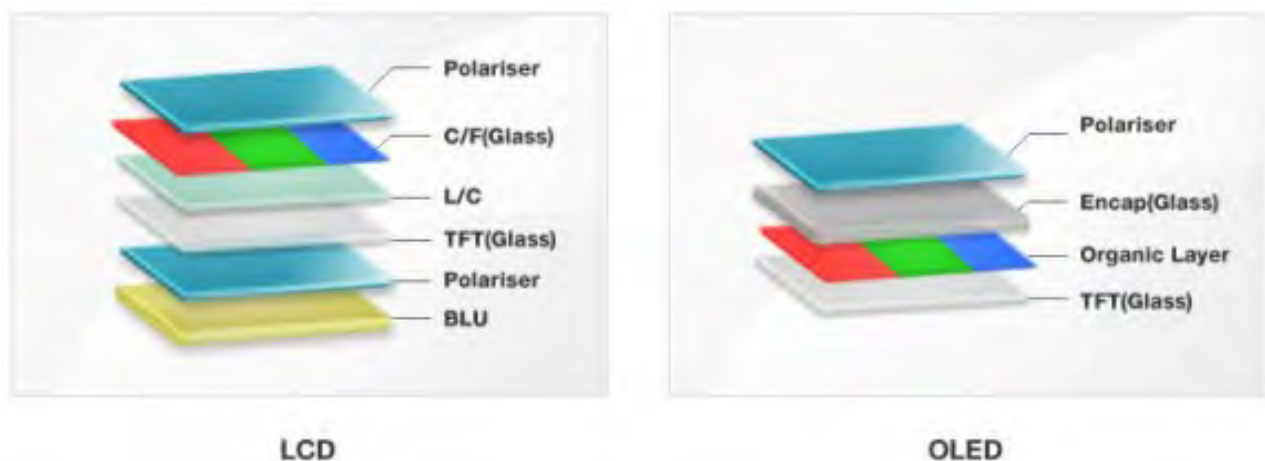
Het aan- en uitschakelen van pixels kan op verschillende manieren gebeuren: passief of actief. Passieve matrix LCDs maken gebruik van een eenvoudig netwerk. Over de LCD loopt een netwerk van horizontale en verticale draden. Waar deze kruisen, zijn zij door middel van een pixel verbonden. Je kunt het je voorstellen als een groot assenstelsel, waarin bijvoorbeeld alle verticale lijnen negatieve elektroden zijn en alle horizontale lijnen positieve. Op ieder kruispunt in het assenstelsel (coördinaat) bevindt zich een pixel. Door tegelijkertijd spanning te zetten over een horizontale en een verticale elektrode kan een pixel worden aangestuurd die zich bevindt op het snijpunt van deze elektroden. Door de aangelegde spanning verandert de rangschikking van de vloeibare kristallen op dit punt en wordt er meer of minder licht doorgelaten.

Het grote voordeel van een passieve matrix is dat het een relatief eenvoudig systeem is, maar er zijn ook grote nadelen. Het systeem mist precisie, waardoor ook vloeibare kristallen in naburige pixels gedeeltelijk van oriëntatie veranderen en het beeld waziger wordt. Daarnaast is de responstijd laag: het kost het scherm relatief veel tijd om het beeld te verversen. Nu is dat voor een digitale radiowekker niet zo'n probleem, maar voor het afspelen van bewegende beelden wel. Een passief aangestuurd LCD heeft dan ook vaak last van *ghosting*.

De meeste hedendaagse LCDs maken dan ook gebruik van een actieve matrix. Actieve matrices zijn gebaseerd op dunne laag transistoren (*Thin Film Transistor*, of TFT). In een actieve matrix is iedere pixel voorzien van een kleine schakeltransistor en een condensator. Door weer tegelijkertijd een rij en een kolom van spanning te voorzien, wordt een condensator van een pixel opgeladen. Door deze te ontladen wordt er spanning aangelegd over de vloeibare kristallen waardoor deze hun oriëntatie veranderen en hiermee de mate waarin zij licht doorlaten. Tegelijkertijd heeft de transistor voldoende lading om de pixel actief te houden tot de volgende verversingscyclus. Dit voorkomt de bovengenoemde nadelen van de passieve matrix (*ghosting* en onscherpte) en heeft als bijkomend voordeel dat door het aangebrachte voltage zeer nauwkeurig te doseren er meer grijs- en kleurschakeringen kunnen worden gemaakt.

2.4 Het amoled-scherm: elektroluminescentie

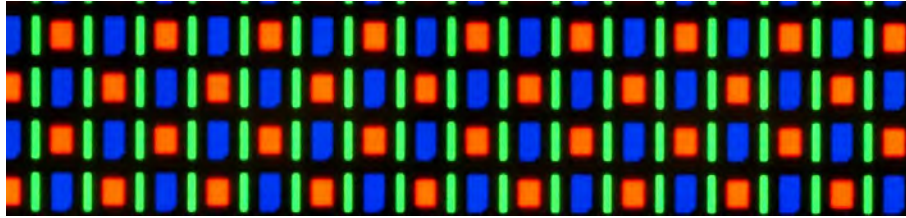
Een LCD bestaat, zoals we hebben gezien, uit behoorlijk wat onderdelen: een lichtbron, vloeibare kristallen op een actieve matrix, verschillende kleuren, polarisatoren en plaatjes glas. Er wordt licht gemaakt en door deze selectief te filteren door middel van de vloeibare kristallen kunnen we een beeld laten ontstaan. Dat zou



Figuur 2.16: Schematische weergave van de opbouw een LCD (links) en een OLED-scherm (rechts). Waar de LCD bestaat uit achtergrondverlichting (BLU), twee polarisatiefilters, een TFT-matrix, een kleurenfilter (C/F) en een laag vloeibare kristallen (L/C), bestaat het OLED-scherm slechts uit een TFT-matrix, een organische LED-laag een polarisatiefilter en een laagje glas dat de LED-laag beschermt tegen vocht en lucht.

eenvoudiger moeten kunnen, zou je denken. Kunnen pixels niet zelf licht geven? Dan hebben we geen laag vloeibare kristallen meer nodig en ook geen aparte lichtbron (achtergrondverlichting of 'backlight'). Zo'n scherm kan met minder verschillende onderdelen, zou efficiënter kunnen zijn, lichter zijn, wellicht zuiniger en door een dunner paneel minder last hebben van een beperkte inblikhoek.

Zulke schermen bestaan inmiddels en heten AMOLED: Active Matrix Organic Light Emitting Diode. De pixels op een AMOLED-scherm zijn verdeeld in een rode, een blauwe en een groene subpixel (zie figuur 2.17). Deze kunnen in verschillende mate van elkaar aan staan of uit staan. Wanneer pixels uit staan, verbruiken ze ook geen energie. Een zwarte pixel is bij een AMOLED echt zwart, in tegenstelling tot een zwarte pixel bij een LCD, waar de permanent ingeschakelde achtergrondverlichting ervoor zorgt dat er altijd wel een beetje door de vloeibare kristallen heen 'lekt,' ook als deze 'uit' staan. Een groot voordeel van een AMOLED-scherm boven een LCD is dan ook het hoge contrast (de mate van tegenstelling tussen licht en donker, hier: het verschil tussen 100% zwart en 100% wit).



Figuur 2.17: Microscopieopname van de pixels van een AMOLED-scherm. Het formaat van de verschillende subpixels zijn verschillend. Zo heeft de groene subpixel een kleinere oppervlakte dan de beide andere subpixels, omdat het menselijk oog het gevoeligst is voor groene tinten. Een grotere, groene subpixel zou ertoe kunnen leiden dat het scherm er 'groen' uitziet. Blauwe LEDs zijn vaak gevoeliger voor degradatie, deze gaan in lichtopbrengst sneller achteruit dan de andere twee. Om de kleurechtheid van het scherm ook halverwege de levensduur op peil te houden, zijn de blauwe subpixels in verhouding wat groter.

Opdracht: Kijkhoek Leg uit dat een OLED-scherm door zijn geringere dikte een veel betere kijkhoek geeft dan een LCD. Tip: maak een tekening van een dwarsdoorsnede en gebruik zichtlijnen.

Hoofdstuk 3

De accu

Waarom moet een goede accu voldoen?

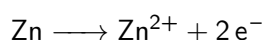
Een goede accu beschikt over:

- een grote capaciteit,
- een kleine massa en afmetingen,
- is veilig,
- en vaak oplaadbaar,
- waarbij zo min mogelijk capaciteitsverlies optreedt.

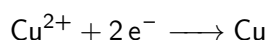
3.1 Redox

Een batterij of accu is een apparaat dat elektrische energie opslaat en deze weer kan leveren door middel van een gecontroleerde elektrochemische reactie (een redoxreactie). Een accu is daarmee een *elektrochemische cel*: door een chemische reactie gaat er een stroom lopen. Deze cel bestaat uit twee onderdelen, of *halfcellen*. In de eerste worden elektronen vrijgemaakt, in de tweede worden deze elektronen opgenomen.

Het deeltje dat elektronen afstaat, noemen we *reductor* en het deeltje dat elektronen opneemt *oxidator*.

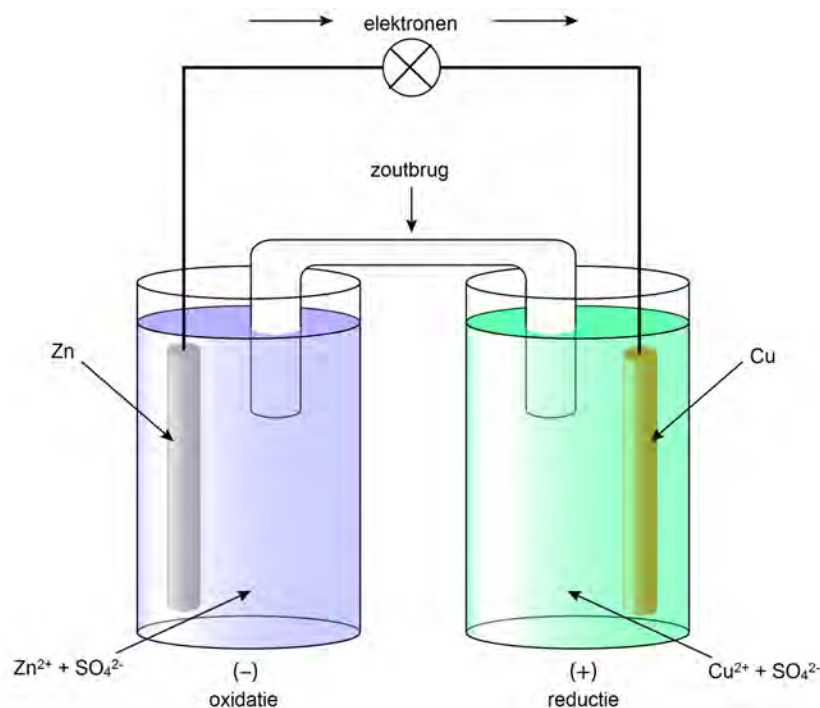


Het vrijgekomen elektron kan in dezelfde oplossing gebruikt worden om een reductor te oxideren, zoals koper(II)-ionen.



3.2 Elektrochemische cellen: redox op afstand

We kunnen ook de elektronen die vrijkomen bij de oxidatie transporteren naar een andere oplossing waar de reductiereactie plaatsvindt. Deze twee oplossingen noemen we *halfcellen*. We plaatsen een elektrode in elk van beide oplossingen die we verbinden met een geleidende draad en om de stroomkring sluitend te maken, gebruiken we een *zoutbrug*. Vertrekkende elektronen zorgen voor een overschot aan positieve lading. Opname van elektronen in de tweede oplossing zorgt voor een overschot aan negatieve lading. Om transport van deze elektronen dus mogelijk te maken, moeten deze overschotten gecompenseerd worden: de stroomkring moet worden gesloten. De zoutbrug bestaat uit een *elektrolyt*, vaak een oplossing van kaliumchloride of kaliumjodide in agargel die beide oplossingen verbindt. Ook kan in plaats van een gel in elektrolytoplossing gedrenkt filtreerpapier gebruikt worden. In moderne, geavanceerde accu's zie je ook dat er vaste (polymeer)elektrolyten worden gebruikt. Belangrijk is dat de oplossingen in beide halfcellen niet direct met elkaar in contact staan, dan treedt er kortsluiting op en verloopt de reactie direct tussen de reductor en de oxidator. In dat geval worden er geen elektronen door de draad getransporteerd.



Figuur 3.1: In 1836 vond de Britse chemicus John Frederic Daniell de naar hem vernoemde batterij uit, de Daniellcel. Hier zie je een schematische weergave van deze elektrochemische cel. In de linker halfcel bevindt zich een zinksulfaatoplossing en een elektrode van zink. Hiervindt de oxidatie van zink naar zinkionen plaats. De hierbij gevormde elektronen worden door de draad getransporteerd naar de rechter halfcel waarin zich een koper(II)sulfaatoplossing en een koperelektrode bevinden. Hier worden koper(II)-ionen gereduceerd tot koper. Tussen beide halfcellen bevindt zich een zoutbrug. De stroom van elektroden laat het lampje branden.

Zonder zoutbrug zou de weerstand die elektronen in de draad ondervinden zo groot zijn, dat er geen transport zou plaatsvinden. Als er elektronentransport plaatsvindt, wordt het tekort in de eerste halfcel opgelost doordat er negatieve ionen uit de zoutbrug in de oplossing diffunderen en het overschot in de tweede halfcel doordat er positieve ionen uit de zoutbrug in de oplossing diffunderen. Ook het diffunderen van positieve ionen uit de eerste halfcel de zoutbrug in en van negatieve ionen uit de tweede halfcel de zoutbrug uit kan de ladingsbalans compenseren.

Splitsen we de redoxreactie op die manier in twee halfreacties die gescheiden plaatsvinden ('redox op afstand'), dan kunnen we de elektronen die van de ene halfcel naar andere gaan, gebruiken om bijvoorbeeld een lampje te laten branden. In figuur 3.1 zie je een voorbeeld van zo'n elektrochemische cel, de Daniellcel.

We zien dus dat we door middel van een chemische reactie een stroom kunnen laten lopen. We kunnen de spanning tussen beide halfcellen meten. Maar hoeveel spanning staat er nu op? Dat is afhankelijk van de gebruikte redoxkoppels. Voor standaardoplossingen geldt:

$$V_{bron} = V_{ox} - V_{red}$$

Hierin is V_{bron} de bronspanning van de elektrochemische cel, V_{ox} de standaardelektrodepotentiaal van de oxidator en V_{red} de standaardelektrodepotentiaal van de reductor. In de Daniellcel (figuur 3.1) geldt dan: $0,34V - (-0,76V) = 1,10V$. Een Daniellcel van standaardoplossingen (1M) levert dus een bronspanning van 1,10 V.

Proef: de Daniellcel Benodigdheden: twee beker glazen, zoutbrug, 1M CuSO_4 -oplossing, 1M ZnSO_4 -oplossing, staafje koper, staafje zink, voltmeter, twee elektriciteitssnoeren, krokodillenbekjes.

- Bouw een Daniellcel en meet de spanning.
- Sluit nu je Daniellcel in serie aan op die van je burens. Welke spanning meet je nu?
- En als je er nog een cel op aansluit?

Opdracht: redoxreacties Geef de halfreacties en totaalreacties die zich voordoen in de volgende situaties:

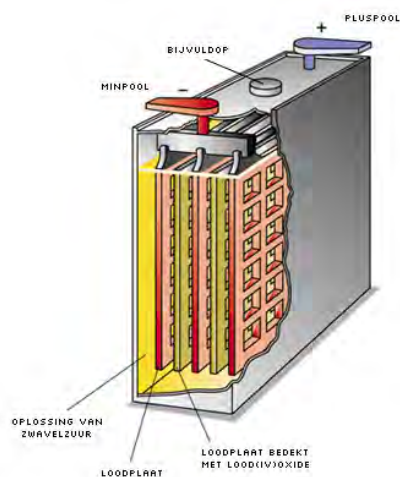
- een kobalt(II)chloride-oplossing met een zinkstaaf
- een ijzer(III)nitraatoplossing met een kaliumjodide-oplossing
- een zilvernitraatoplossing met een koperen munt
- broomwater met een waterstofsulfide-oplossing
- chloorwater met een ijzer(II)jodide-oplossing

Opdracht: elektrochemische cellen Geef van onderstaande elektrochemische cellen de +pool en de -pool aan.

- Halfcel 1: een oplossing van zinknitraat met een zinkelektrode.
Halfcel 2: broomwater met opgelost natriumbromide en een platina-elektrode.
- Halfcel 1: een oplossing van cerium(III)nitraat en cerium(IV)nitraat met een platina-elektrode.
Halfcel 2: een koper(II)sulfaatoplossing met een koper elektrode.
- Halfcel 1: een oplossing van zilvernitraat met een zilverelektrode.
Halfcel 2: een oplossing van ijzer(II)nitraat met een ijzeren elektrode.

Opdracht: de loodaccu De accu in een auto is een lood(zuur)accu en bestaat uit een aantal in serie geschakelde elektrochemische cellen. Iedere cel bestaat uit twee loodplaten waarvan er één bedekt is met een laagje lood(IV)oxide. De accu is gevuld met een oplossing van verdund zwavelzuur die dienst doet als elektrolyt.

- Stel met behulp van BINAS beide halfreacties op die plaatsvinden in de loodaccu.
- Welke halfreactie vindt plaats aan de positieve en welke aan de negatieve elektrode?
- Geef het celdiagram van deze elektrochemische cel.
- De accu van een auto levert iets meer dan 12 V. Hoeveel standaardcellen zul je in serie moeten schakelen om deze totale spanning te bereiken als je uitgaat van de bronspanning van één zo'n cel?



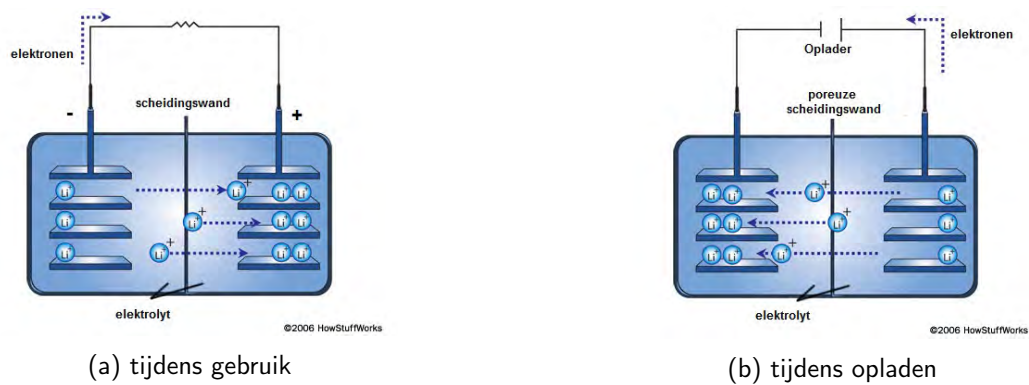
Figuur 3.2: Schematische weergave van een loodaccu. Iedere cel bestaat uit twee platen lood waarvan er één bedekt is met een laagje lood(IV)oxide. Verdund zwavelzuur doet dienst als elektrolyt.

3.3 De Li-ionaccu

In mobiele telefoons en andere draagbare elektronica als laptops, tablets en fotocamera's, maar bijvoorbeeld ook in draadloze boormachines en ander gereedschap wordt tegenwoordig gebruik gemaakt van zogenaamde li-ion batterijen. Deze accu's hebben een hoge energiedichtheid. Andere voordelen zijn een geringe zelfontlading, het ontbreken van een geheugeneffect (geen capaciteitsvermindering bij het laden van een niet-lege accu), een hoge mate van milieuvriendelijkheid ten opzichte van andere typen accu's en een lange levensduur.

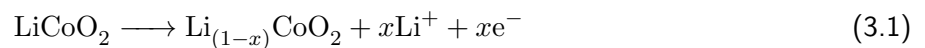
Nadelen zijn onder andere de hoge kostprijs en het feit dat iedere Li-ionaccu voorzien moet zijn van een elektronisch regelsysteem om het te leeg raken van de batterij te voorkomen, het zogenaamde *diepontladen*. Bij diepontlading kan de accu intern beschadigen waarna hij helemaal niet meer werkt. Ook zijn er gevallen van explosie en brand door hoge temperaturen bekend bij dit type batterijen.

De meestgebruikte Li-ionaccu's van dit moment maken gebruik van een positieve elektrode van lithiumkobaltoxide (LiCoO_2) en een negatieve elektrode van grafiet. Uit dit LiCoO_2 kunnen Li^+ -ionen worden vrijgemaakt, waarbij voor elk Li^+ -ion een elektron vrijkomt. Het Li^+ -ion verplaatst zich vervolgens door



Figuur 3.3: Schematische weergave van een Li^+ -accu (LiCoO_2 -accu) tijdens gebruik (ontladen) en tijdens het opladen.

het elektrolyt naar de negatieve elektrode, waar hij wordt gebonden in het grafiet (vaak weergegeven als C_6 , vanwege het feit dat het Li^+ -ion wordt gebonden door een C-zesring in het grafiet). Dit proces, dat *intercalatie* genoemd wordt, kost energie en deze wordt geleverd door de overdracht van een elektron. Dat elektron wordt opgenomen door de grafielektrode. De reactievergelijkingen van de reacties aan de positieve en de negatieve elektrode zijn hieronder weergegeven in vergelijkingen 3.1 en 3.2. Voor een schematische weergave van beide processen, zie figuur 3.3.



De standaard elektrodepotentiaal van een LiCoO_2 -accu bedraagt 3,7 V.

Hoofdstuk 4

De Zender

Heel belangrijk is natuurlijk de zender van de mobiele telefoon. Zonder zender en ontvanger kun je helemaal niet bellen, internetten en sms'en. In een hedendaagse smartphone zitten veel verschillende zenders: voor het WiFi-sigitaal, bluetooth en natuurlijk die voor het telefoonsigitaal, waarover ook data en sms wordt verstuurd. Deze laatste is natuurlijk het belangrijkste voor een telefoon: zonder verbinding met een telecommunicatie-antenne, kun je niet bellen.

4.1 Draadloze verbinding

Voor ons is het vanzelfsprekend: je pakt je telefoon, je toetst een nummer in – of duikt het op in je telefoonboek of 'favorieten' – je drukt de knop in en er wordt gebeld. Na een paar keer overgaan, krijg je die persoon aan de lijn, zonder merkbare vertraging. Toch gebeurt er veel terwijl jij praat en de ander luistert. De trillingen van je stembanden in combinatie met de bewegingen van en in je mond produceren trillingen in de lucht – geluid – maar dat geluid kan de telefoon niet doorgeven. De microfoon in je telefoon zet het geluid eerst om in een elektrisch signaal. Dat signaal wordt vervolgens omgezet in een digitaal signaal van nullen en enen. Dat heet *bemonsteren*. Deze informatie wordt op een draaggolf gezet (*moduleren*) door de amplitude, frequentie of de fase van de draaggolf te veranderen. Door dit signaal naar een antenne te leiden, wordt het omgezet in een elektromagnetische golf.

Aan de andere kant gebeurt het tegenovergestelde: de telefoon van je gesprekspartner ontvangt (via centrales en antennes) een elektromagnetische golf. Deze wordt omgezet in een elektrisch signaal dat in het luidsprekertje van de telefoon weer wordt omgezet in trillingen, in geluid. Nu kan je gesprekspartner je horen.

De communicatie tussen de mobiele telefoon en centrale verloopt zoals gezegd met elektromagnetische straling, door middel van licht dus. Aangezien dat zich voortplant met de lichtsnelheid, verloopt de communicatie heel snel. Het is echter geen zichtbaar licht dat wordt gebruikt, maar licht met een andere golflengte. Aangezien de lichtsnelheid, c , constant is (ca. $2,9 \cdot 10^8$ m/s, zie BINAS), kun je uit de frequentie de golflengte uitrekenen en omgekeerd, via formule 2.5 op bladzijde 9.

Opdracht: Golflengte Veel gebruikte elektromagnetische frequenties voor mobiele telefonie zitten rond de 900 MHz en de 1800 MHz.

- Welke golflengtes horen hierbij?
- Over wat voor type golven hebben we het dan? Raadpleeg zo nodig figuur 2.7 op bladzijde 10.
- Waar ken je dit type straling nog meer van?

4.2 Bereik, bandbreedte en antenne

Het deel van het elektromagnetisch spectrum dat gebruikt kan worden voor radiotelecommunicatie loopt ruwweg van 9 kHz tot 300 GHz. Binnen dit enorme stuk van het spectrum zijn het vooral bepaalde frequentiegebieden die worden gebruikt voor mobiele telefonie. Dat is niet toevallig zo. Niet voor iedere toepassing kan zomaar met een willekeurige frequentie kunnen volstaan. Het voor telecommunicatie geschikte deel van het spectrum is opgedeeld in een aantal frequentiegebieden met ieder hun eigen specifieke eigenschappen. Deze maken een frequentie meer of minder geschikt voor een bepaalde toepassing. Bij de verdeling van deze frequentiegebieden spelen een aantal overwegingen een rol.

Bereik Lange golven dringen dieper door dan korte golven. Denk aan de diepe basstem van oom Bas tegenover hoge kinderstemmetjes. De stem van oom Bas is van veel grotere afstand prima te horen – en te verstaan – en dringt ook veel gemakkelijker door muren. Dat geldt in zekere zin ook voor elektromagnetische straling: hoe groter de frequentie, hoe kleiner de maximaal te overbruggen afstand. Bij grotere frequenties gaan obstakels als huizen, auto's, bomen en flatgebouwen een rol spelen. Bij heel hoge frequenties, denk aan frequenties groter dan behorende bij 5 GHz, dan wordt het signaal ook gedempt door de aanwezigheid van zuurstof en waterdruppels. Een regenbui heeft dan grote gevolgen voor je verbinding. Hoe kleiner de golflengte – en dus hoe groter de frequentie – hoe korter het signaal draagt. Hoe korter het signaal draagt, hoe meer antennes er nodig zijn. Om het aantal antennes te beperken, moet de frequentie van de verbinding dus niet té hoog zijn.

Bandbreedte Bij een toenemende frequentie neemt ook de beschikbare *bandbreedte* toe. De bandbreedte is de hoeveelheid frequenties die nodig is om de informatie over de verbinding te versturen. Hoe meer informatie, hoe groter de bandbreedte. Voor een hogere kwaliteit van de overdracht neemt de bandbreedte ook toe. Zo is er bijvoorbeeld voor een FM-radiosignaal (ultrakorte golf, 87,5–108 MHz) 200 kHz bandbreedte nodig, terwijl een AM-radiosignaal (middengolf, 526,5–1606,5 kHz) 9 kHz nodig heeft. De kwaliteit van een FM-radiozender is dan ook veel hoger dan die van een AM-radiozender. De hele middengolfband is slechts vijf keer zo breed als de bandbreedte benodigd voor een enkel FM-radiozender. Bij hogere frequenties is er dus meer bandbreedte beschikbaar.

Hoe meer telefoons, hoe meer bandbreedte er benodigd is. Immers, hoe meer telefoons, hoe meer informatie er moet worden uitgewisseld. Daarnaast neemt het bandbreedte gebruik per toestel enorm toe door het gebruik van allerlei internettoepassingen. Doordat mobiel internet steeds sneller wordt, neemt ook de vraag naar bandbreedte toe. In het begin werden er vooral e-mail verstuurd en een stuk of wat internetpagina's bezocht. Nu mobiel internet veel sneller geworden is, is het mogelijk geworden muziek en video's af te spelen, die weer meer bandbreedte en snelheid vragen. Als die beschikbaar komen, zijn er meer toepassingen die nog weer meer snelheid en bandbreedte vereisen. Dit heeft een almaar grotere behoefte aan bandbreedte tot gevolg. Met de opkomst van mobiel internet is de vraag naar bandbreedte daarom dan ook explosief gestegen.

Antennes en andere zaken Daarnaast is de antenne belangrijk. Voor een goed ontvangst dient de antenne een grootte te hebben in de orde van grootte van een kwart tot een halve golflengte van het signaal dat opgevangen moet worden. Verschillende toepassingen in afzonderlijke frequentiegebieden vragen dan ook andere antennes.

Lage frequenties hebben daarnaast last van verstoring die door de mens wordt veroorzaakt. Denk aan de elektrische ontstekingen van motoren, elektronische schakelaars, stralende kabels en andere elektronica. Daarnaast zijn er steeds meer frequentiebanden bezet: in gebruik voor andere diensten en is het voor nieuwe diensten dus alleen mogelijk om gebruik te maken van een hoger frequentiegebied.

Je ziet dus dat voor een bepaalde draadloze toepassing verschillende afwegingen moeten worden gemaakt. Een groot bereik gaat niet samen met een grote bandbreedte. Ook wordt men er steeds vaker mee geconfronteerd dat frequentiebanden die de gunstigste eigenschappen hebben voor een bepaalde nieuwe toepassing, al in gebruik zijn voor andere, bestaande – maar nog steeds gebruikte – toepassingen. In dat geval moet er een andere frequentieband worden gekozen.

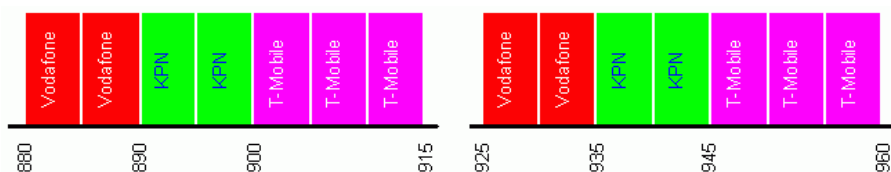
Opdracht: Antenne UMTS-verkeer ('3G') vindt plaats op de 2100 MHz frequentieband.

- Welke golflengte hoort hierbij?
- Hoelang zou de antenne hiervoor minimaal moeten zijn? Geef je antwoord in cm.
- Past deze in je telefoon? Wat voor oplossing zou je hiervoor kunnen verzinnen?

4.3 Frequentiebanden

Misschien heb je wel eens gehoord van een 'tri band' of een 'quad band' toestel. Dat heeft te maken met de frequenties waarop de telefoon kan uitzenden en ontvangen. Voor UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, ook aangeduid als '3G', omdat het de derde generatie mobiele telefonie is) worden bijvoorbeeld de 800 MHz, 1800 MHz en 2100 MHz *frequentiebanden* gebruikt. Dat betekent dat voor die signalen frequenties worden gebruikt die rond dat aantal Hertz zit. De 1800 MHz band in Nederland bestrijkt bijvoorbeeld het frequentiegebied van 1710 MHz tot en met 1880 MHz.

Bij de introductie in Nederland in 1994 ging al het GSM-verkeer (GSM: Global System for Mobile Communications, de tweede generatie ('2G') mobiele netwerken) over de 900 MHz-band, maar door de snelle toename van het mobiele telefoongebruik werd het al snel nodig om een tweede frequentieband te gaan gebruiken, de 1800 MHz. Telefoons die zowel de 900 MHz band als de 1800 MHz band konden gebruiken om contact te leggen met een telecomantenne, werden toen 'dual band'-toestellen genoemd. Daarna zijn toestellen gekomen die ook in de 1900 MHz band werken. In Noord-Amerika werd deze frequentieband gebruikt, waardoor alleen toestellen die in de 1900 MHz band konden zenden daar bruikbaar waren. Daarom werden deze 'tri band'-telefoons ook wel 'world-phones' genoemd. Sinds 2004 zijn er 'quad band' GSM-toestellen, die daarnaast gebruik kunnen maken van de 850 MHz band, die onder andere in Azië en Zuid-Amerika worden gebruikt.

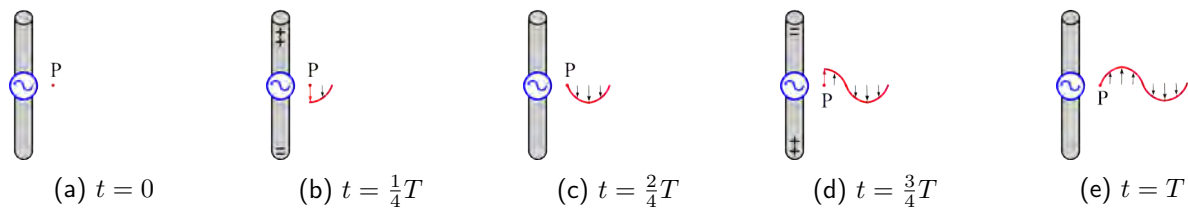


Figuur 4.1: Verdeling van de 900 MHz GSM-frequentieband in Nederland.

Binnen de frequentiebanden zijn er blokken van minimaal 5 MHz toebedeeld aan de verschillende telecomleveranciers. Voor de verdeling van de 900 MHz band in Nederland, zie figuur 4.1. De providers gebruiken verschillende blokken voor het verzenden en het ontvangen, daarom hebben de providers altijd een even aantal blokken. Dit systeem van frequentiebanden geldt zowel voor het oudere GSM als het nieuwere UMTS.

4.4 Principes achter draadloze gegevensoverdracht

Een eenvoudige manier om elektromagnetsche straling te genereren is door twee rechte metalen draden te verbinden met de polen van een wisselstroombron. De draden werken hierbij als antenne, zie figuur 4.2. Bij wisselstroom wisselt het potentiaalverschil tussen de polen volgens het verloop van een sinusfunctie in de tijd t en met een periode T . Figuur 4.2a toont $t = 0$, waarop er geen lading is aan de uiteinden van beide draden. Aangezien er geen lading is, is er geen elektrisch veld in punt P direct rechts van de antenne. Een moment later wordt de bovenste draad positief geladen en de onderste negatief, zodat de ladingen op $t = \frac{1}{4}T$ hun maximale waarden hebben bereikt, zoals figuur 4.2b laat zien. Het bijbehorende elektrische veld $\vec{E}$ op punt P wordt weergegeven door de rode pijl. Deze is toegenomen tot zijn maximale grootte in neerwaartse richting (men kan de richting van een elektrisch veld krijgen door zich voor te stellen dat er zich een positieve lading bevindt op punt P en de richting te bepalen waarin deze zou worden verplaatst door de



Figuur 4.2: In elk plaatje stelt de rode pijl het elektrisch veld voor dat geproduceerd wordt op punt P door de oscillerende ladingen op de antenne op de aangegeven tijd. De zwarte pijlen stellen de elektrische velden op eerdere tijdstippen voor. Om wille van de eenvoud zijn alleen de velden naar rechts afgebeeld.

ladingen op de draden). Het elektrisch veld op eerdere tijdstippen is niet verdwenen, maar heeft zich verder van de antenne naar rechts verplaatst. De propagatie van het veld met de verandering in de ladingen op de draden is te zien in figuren figs. 4.2c to 4.2e. Het elektrisch veld dat veroorzaakt wordt door de ladingen is op punten verder van de antenne af niet direct merkbaar: het veld wordt eerst gecreëerd bij de draden en verplaatst zich dan als een golf in alle richtingen. Je kunt het vergelijken met een kiezel die je in een vijver gooit: vanaf het punt waar de kiezel het wateroppervlak raakt vormen zich golven in het wateroppervlak.

Tegelijkertijd ontstaat er een magnetisch veld $\vec{B}$, door de stroom van lading in de draden. Door de wisselende stroom in de draden wisselt ook de richting van het magnetisch veld, met dezelfde snelheid als die van het elektrisch veld. Beide velden hebben dus dezelfde fase. Het magnetisch veld staat loodrecht op het elektrisch veld (loodrecht op het papier, zoals te bepalen met de rechterhandregel) en plant zich net zoals het elektrisch veld in alle richtingen voort. Net zoals het elektrisch veld staat het magnetisch veld loodrecht op de voortplantingsrichting. [plaatje]

Het ontvangen van een signaal werkt omgekeerd. Als uitgezonden golven een ontvangende antenne bereiken, gaan deze een interactie aan met de elektrische ladingen in de draden van de antenne. Hiervoor kan zowel het elektrische veld als het magnetische veld worden gebruikt. Voor een optimale overdracht moet de antenne parallel zijn aan de richting van het elektrisch veld.

Onder invloed van het elektrisch veld gaan de elektronen in de draden van de ontvangende antenne oscilleren over de lengte van de draad. Hierdoor ontstaat een wisselstroom in de antenne en in de schakeling waar de antenne deel van uitmaakt. Met een variabele condensator kan de frequentie worden ingesteld van de golven die de antenne ontvangt. Het ontvangen signaal kan vervolgens worden versterkt en verder verwerkt.