

13 Elektromagnetische straling vwo

13.0 Overzicht

13.1 Licht als golf

- Hoe bereken je de frequentie uit de trillingstijd?
- Welke eigenschap van licht wordt bepaald door de frequentie?
- Welke eigenschap van licht wordt bepaald door de amplitude?
- Welke letter gebruik je voor de lichtsnelheid en hoe groot is deze in vacuüm?
- Hoe bereken je de golflengte van licht en wat is de eenheid van de golflengte?
- Wat is buiging (diffractie) van licht en wanneer treedt het op?
- Waarom is diffractie in een lichtmicroscop en bij fotolithografie belangrijk?
- Wat is interferentie van licht en wanneer treedt het op?
- Wat is een tralie en wat kan je met een tralie?
- Wat is de tralieconstante en wat is de eenheid van de tralieconstante?
- Hoe luidt de traliefomule en wat is het getal n in deze formule?

13.2 Elektromagnetische straling

- Wat is licht en hoe ontstaat het?
- Wat is het elektromagnetisch spectrum?
- Welke golflengten zijn zichtbaar voor een mens?
- Welke kleur licht heeft de grootste golflengte en welke de kleinste?
- Welke soorten EM-straling zijn er?
- Welke soort EM-straling heeft de grootste golflengte en welke de kleinste?

13.3 Licht als deeltje: fotonen

- Wat is warmtestraling en hoe ontstaat het?
- Wat is de wet van Wien en wat kan je ermee berekenen?
- Wat is de wet van Stefan-Boltzmann en wat kan je ermee berekenen?
- Wat is de intensiteit van de straling en wat is de eenheid van intensiteit?
- Hoe bereken je de intensiteit van de straling afkomstig uit één punt?
- Waarom neemt de intensiteit af als de afstand tot de bron toeneemt?
- Wat is een foton?
- Hoe bereken je de energie van een foton als je de frequentie weet?
- Hoe bereken je de energie van een foton als je de golflengte weet?
- Hoe reken je om van joule naar elektronvolt en omgekeerd?

13.4 Absorptie en emissie van licht

- Welke soorten lichtbronnen zijn er?
- Wat is spectroscopie?
- Wat is een absorptiespectrum en wat is een emissiespectrum?
- Wanneer wordt er een continu spectrum uitgestraald?
- Wanneer wordt er een spectrum met scherpe lijnen uitgestraald?

- Waarom kan een atoom maar enkele golflengten absorberen en uitstralen?
- Waarom zijn bij atomen de geabsorbeerde en de uitgestraalde golflengten aan elkaar gelijk?
- Waar staat de afkorting LASER voor?
- Waarom zijn er drie energieniveaus betrokken bij een laser?
- Wat is populatie-inversie?
- Wanneer ontstaat er gestimuleerde emissie?

13.5 Draadloze communicatie

- Waar wordt draadloze communicatie voor gebruikt?
- Wat is het verschil tussen analoge en digitale signalen?
- Hoe kun je analoge informatie versturen met EM-straling?
- Wat is amplitudemodulatie (AM) en wat is frequentiemodulatie (FM)?
- Waarom is frequentiemodulatie beter dan amplitudemodulatie?
- Hoe kun je digitale informatie versturen met EM-straling?
- Waarom is het versturen van digitale informatie beter dan van analoge informatie?
- Wat zijn binaire getallen?
- Wat is een bit en wat is een byte?
- Wat is een frequentieband en wat is de bandbreedte?
- Waarom is kanaalscheiding belangrijk?
- Wat is de functie van een antenne?
- Hoe werkt mobiele telefonie?
- Waarom zijn microgolven niet gevaarlijk?

13.6 Röntgenstraling

- Hoe wordt röntgenstraling verkregen?
- Hoe ontstaat remstraling?
- Waarom wordt röntgenstraling voor medische toepassing gebruikt?
- Welke informatie krijg je met een röntgenfoto?
- Wat is een CT-scan en hoe werkt een CT-scanner?
- Waarom is röntgenstraling gevaarlijk?
- Wat is de stralingsdosis en wat is de eenheid van stralingsdosis?

13.7 Magnetische resonantie: MRI

- Welke eigenschap van protonen is belangrijk in MRI?
- Waarom is MRI niet gevaarlijk?
- Wat bedoel je met parallelle en anti-parallelle oriëntatie van protonen?
- Waarom wordt bij MRI een patiënt in een sterk magnetisch veld gebracht?
- Wat meet je bij MRI en welke informatie krijg je hieruit?
- Hoe krijg je bij MRI informatie over de plaats in het lichaam?
- Wat is de T1 tijd en wat is de T2 tijd?
- Voor welk type weefsel is MRI geschikt?
- Waarom is MRI niet geschikt voor botbreuken?
- Wat is f-MRI en wat kan je er mee?

13.1 Licht als golf

Trillingstijd, frequentie, amplitude, golfsnelheid en golflengte

In deze paragraaf leer je dat licht een golf is. Alle eigenschappen van golven gelden daarom ook voor licht. Zo heeft licht een frequentie, een amplitude, een golfsnelheid en een golflengte. De formules die je hebt geleerd bij het hoofdstuk trillingen en golven gelden allemaal ook voor licht.

– Trillingstijd en frequentie –

De trillingstijd van zichtbaar licht is ongeveer $T = 2 \cdot 10^{-15}$ s. Dit is veel kleiner dan de trillingstijd van bijvoorbeeld watergolven en geluidgolven. De frequentie van zichtbaar licht bereken je met $f = 1/T$. Als $T = 2 \cdot 10^{-15}$ s vind je $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz. Dit betekent dat er iedere seconde bijna een miljoen keer een miljard trillingen plaatsvinden.

Rood licht heeft een lage frequentie en violet licht heeft een hoge frequentie. Het verschil tussen de laagste en de hoogste frequentie van het licht dat wij zien is niet groot. De frequentie van rood licht is ongeveer $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz en de frequentie van blauw licht ongeveer $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz.

**T is de trillingstijd van licht en f is de frequentie van licht.
T en f bepalen de kleur van een lichtgolf.**

$$f = \frac{1}{T} \quad \leftrightarrow \quad T = \frac{1}{f}$$

– Amplitude –

De amplitude van een lichtgolf bepaalt de intensiteit (felheid) van het licht. Hoe groter de amplitude is, hoe intenser (feller) het licht.

De amplitude bepaalt de intensiteit van een lichtgolf.

– Golfsnelheid –

Als een lichtbron wordt aangezet wordt de hele ruimte op vrijwel hetzelfde moment gevuld met licht. Het licht verplaatst zich bijzonder snel door de ruimte, zo snel dat de lichtsnelheid moeilijk is te meten. In vacuüm heeft iedere frequentie van licht (iedere kleur) dezelfde snelheid van $3,0 \cdot 10^8$ m/s. Per seconde kan het licht een afstand van 7,5 rondjes om de aarde afleggen. Deze unieke snelheid is een natuurconstante en wordt aangeduid met de letter c.

Lichtgolven verplaatsen zich door de ruimte met een vaste snelheid c.

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m / s}$$

– Golflengte –

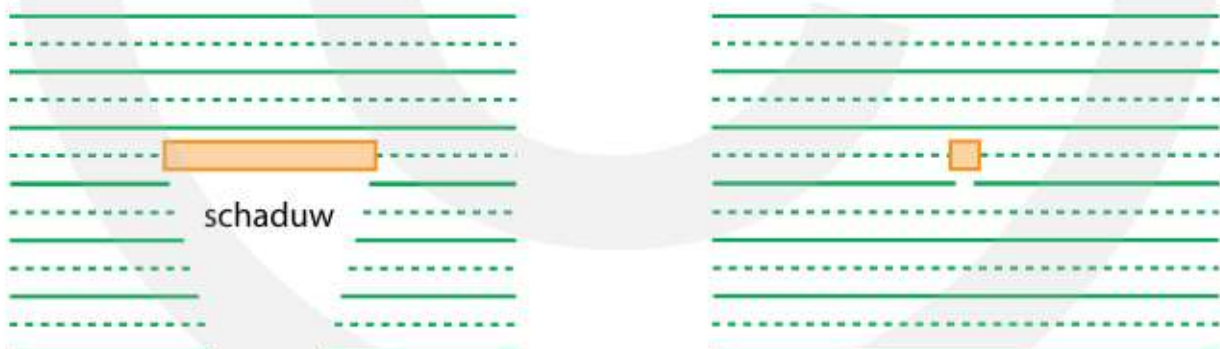
Voor lichtgolven geldt $v_{\text{golf}} = f \cdot \lambda$ met $v_{\text{golf}} = c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s in vacuüm. Voor $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz vind je een golflengte van $\lambda = c / f = 3,0 \cdot 10^8 / 5,0 \cdot 10^{14} = 6,0 \cdot 10^{-7}$ m = 600 nm.

$$c = f \cdot \lambda$$

Buiging (diffractie) van licht

Komt een golf een ondoordringbaar object tegen dat groter is dan de golflengte dan wordt de golf teruggekaatst of geabsorbeerd. Achter het object ontstaat een gebied zonder golven, de schaduw. Maar als het object kleiner is dan de golflengte gebeurt dit niet. De golf trekt zich dan weinig aan van het object en buigt er omheen. Er ontstaat dan geen schaduw.

Zo buigen watergolven om de pijlers van een brug en gaan daarna ongestoord verder. Lichtgolven buigen ook om voorwerpen die kleiner zijn dan de golflengte, maar omdat de golflengte van licht erg klein is merk je daar in het dagelijks leven niets van. Voorwerpen die kleiner zijn dan de golflengte veroorzaken geen schaduw. Het licht buigt om dit voorwerp heen. Zie figuur 1.



Figuur 1 Links: Een lichtgolf komt een object tegen groter dan de golflengte. Bij de randen buigt het licht een beetje af. Achter het object ontstaat een schaduw. Rechts: Achter een object kleiner dan de golflengte ontstaat geen schaduw, het licht gaat ongestoord verder.

Een vergelijkbaar verschijnsel treedt op als licht door een opening gaat. Zie figuur 2. Is de opening groter dan de golflengte van het licht dan gaat het licht zonder waarneembare afbuiging door de opening. Is de opening kleiner dan de golflengte dan gaat het licht er niet gewoon doorheen. De opening gaat als nieuwe lichtbron (trillingsbron) fungeren en uit deze nieuwe lichtbron ontstaat een nieuwe lichtgolf die alle kanten uitgaat. Dit is het principe van Christiaan Huygens (Nederland, 1629 – 1695).



Figuur 2 Links: Licht gaat door een opening groter dan de golflengte. Alleen bij de randen buigt het licht een beetje af. Rechts: De opening is kleiner dan de golflengte van het licht en gedraagt zich als nieuwe lichtbron. Uit de opening komt een lichtgolf die alle kanten uitgaat.

Lichtmicroscop

Het feit dat licht om kleine voorwerpen heen kan buigen is merkbaar in een lichtmicroscop. Voorwerpen kleiner dan de golflengte van licht kunnen niet scherp worden waargenomen. Zichtbaar licht heeft een golflengte van ongeveer 500 nm en dit bepaalt de kleinste details die nog zijn te zien. Een detail kleiner dan 500 nm wordt een vage vlek. Zo heeft een virus een typische afmeting tussen 30 en 300 nm en kan daarom niet met een lichtmicroscop worden waargenomen.

De maximale vergroting in een lichtmicroscop is ongeveer 1000 keer. Een voorwerp van 500 nm zie je dan met een afmeting van 0,5 mm. Maar je ziet het niet meer scherp omdat de lichtgolf voor een deel om het voorwerp heen buigt. Maak je met andere lenzen een vergroting van bijvoorbeeld 10.000 keer dan zie je het voorwerp als een vage vlek van 5 mm. Deze vage lichtvlek bevat geen details en je hebt er dus niets mee gewonnen.

Om voorwerpen kleiner dan de golflengte van licht toch waar te kunnen nemen heb je bijvoorbeeld een elektronenmicroscop nodig. Met een hoge-resolutie elektronenmicroscop (HR-TEM) kun je details van 0,1 nm nog van elkaar onderscheiden.

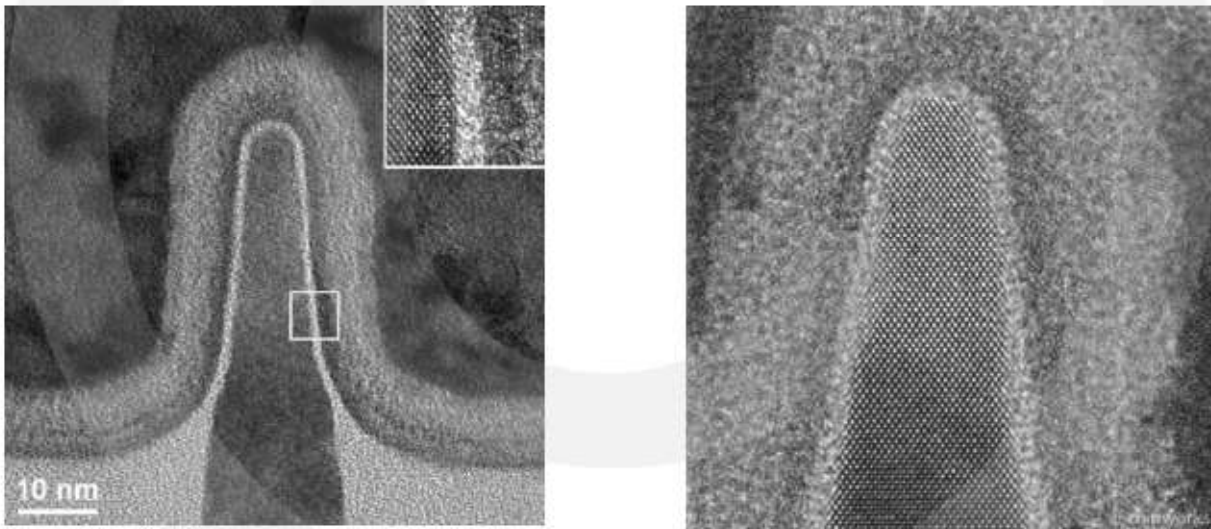
Figuur 3

Bewerkte opname van een virus verkregen met HR-TEM. Met een lichtmicroscop zijn dit soort gedetailleerde opnamen niet te maken.



Fotolithografie

Afbuiging van licht speelt ook een rol in de **fotolithografie**. Bij de fabricage van chips worden er kleine afbeeldingen op een plakje silicium gemaakt om elektronische componenten, zoals transistoren, te vervaardigen. Hierbij wordt fotolithografie gebruikt. Een dia waarop de elektronische schakeling is getekend wordt zo klein mogelijk op een plakje zuiver silicium afgebeeld. Doordat de componenten steeds kleiner worden speelt de golflengte van het licht een grote rol. Momenteel wordt ultraviolet licht van 193 nm gebruikt. Maar binnenkort is dit niet meer voldoende, omdat details kleiner dan 50 nm gangbaar gaan worden. Door een laagje water aan te brengen tussen de lens het silicium is het mogelijk om details van 50 nm te realiseren. Het einde hiervan is echter in zicht, want over enkele jaren zal de afmeting van elektronische componenten kleiner dan 50 nm zijn. In het productieproces wordt in de toekomst extreme UV-straling (EUV) met een golflengte tussen 5 en 10 nm gebruikt. Bedrijven zoals het Nederlandse ASML ontwikkelen momenteel de technologie die hiervoor nodig is. In figuur 4 zie je een 22 nm 3D transistor zoals in toekomstige chips zal worden toegepast. De afmeting van deze transistor is zo klein dat je op de HR-TEM beeld de atomen van het silicium kunt zien.



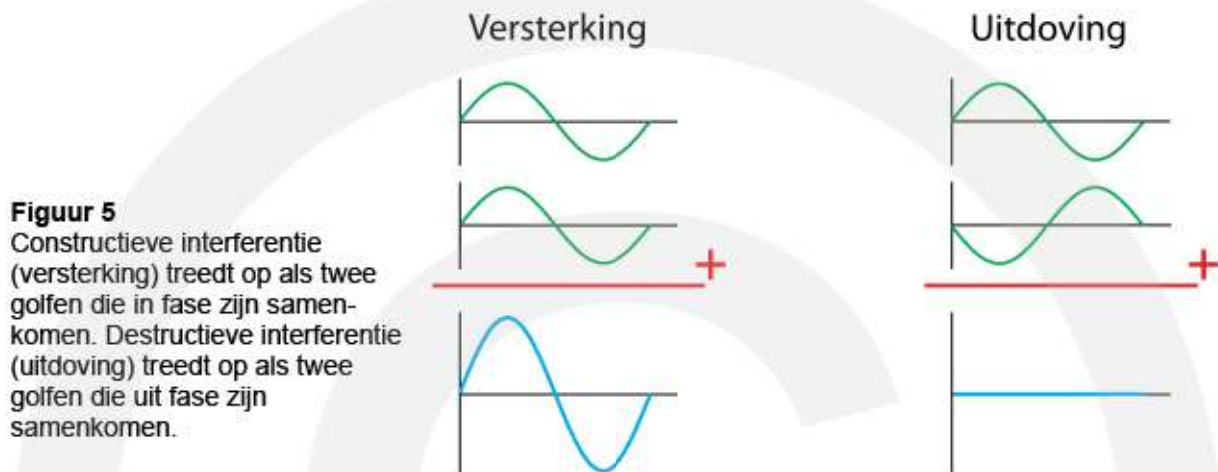
Figuur 4 HR-TEM beeld van een 22 nm 3D transistor die momenteel worden ontwikkeld. Bij de vergroting zie je siliciumatomen. Bij de vervaardiging wordt extreme UV-straling (EUV) met een golflengte tussen 5 en 10 nm gebruikt.

Interferentie van licht

Een bekende eigenschap van golven is dat ze met elkaar kunnen **interfereren**. Ook lichtgolven vertonen interferentie. Interferentie van licht treedt op als er twee (of meer) **coherente lichtbronnen** aanwezig zijn.

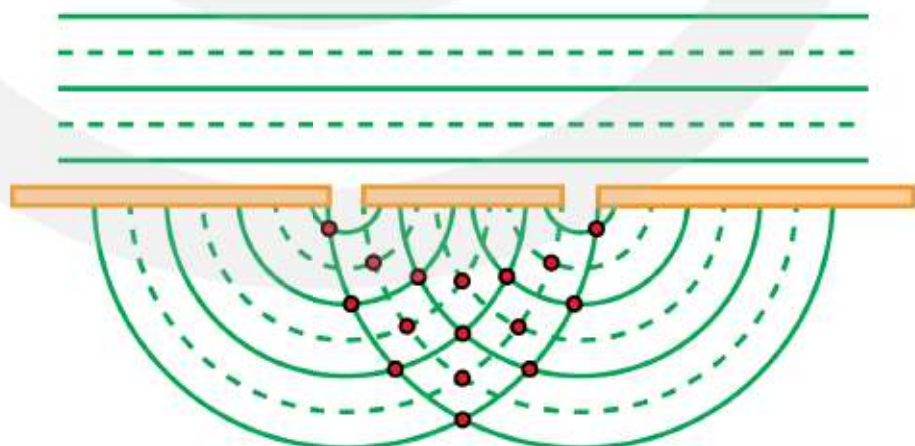
Coherente trillingsbronnen hebben dezelfde frequentie en beginnen op hetzelfde moment aan een nieuwe trilling.

Op plaatsen waar de lichtgolven dezelfde fase hebben versterken ze elkaar. De amplitude is op deze plaatsen de extra groot. Op plaatsen waar de lichtgolven een tegengestelde fase hebben doven ze elkaar uit. De amplitude is op deze plaatsen nul. Hierdoor ontstaan er gebieden met een extra grote intensiteit (buiken) en gebieden met een extra lage intensiteit (knopen).



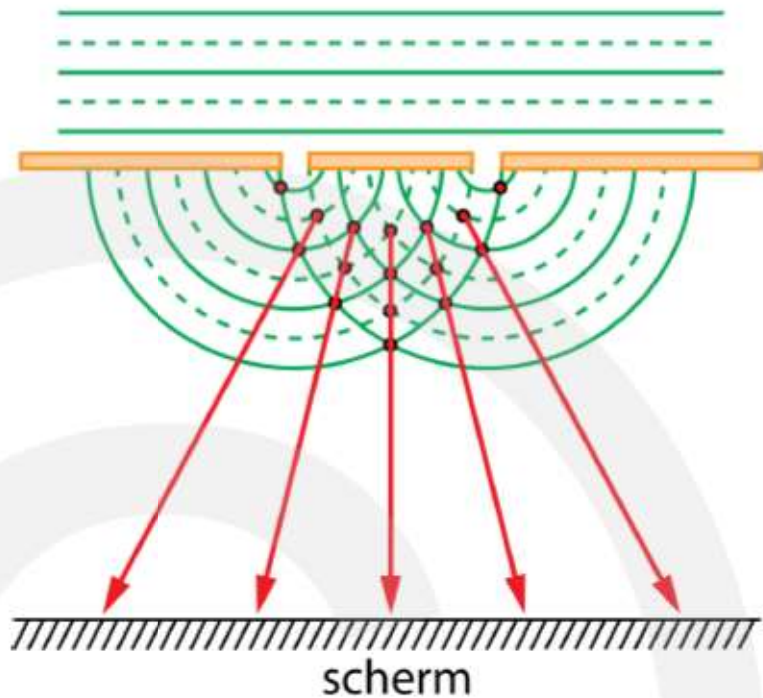
Figuur 5
 Constructieve interferentie (versterking) treedt op als twee golven die in fase zijn samenkomen. Destructieve interferentie (uitdoving) treedt op als twee golven die uit fase zijn samenkomen.

Stuur je licht afkomstig uit één smalle lichtbron door twee vlak naast elkaar gelegen smalle spleten, dan gaan deze spleten vanwege afbuiging (diffractie) zich als twee coherente lichtbronnen gedragen. Het licht uit deze lichtbronnen interfereert, waardoor er heldere en donkere gebieden ontstaan. In figuur 6 zie je een dubbele spleet en zijn de plaatsen waar versterking optreedt aangegeven met rode stippen.



Figuur 6
 Bij de rode stippen treedt er constructieve interferentie op.

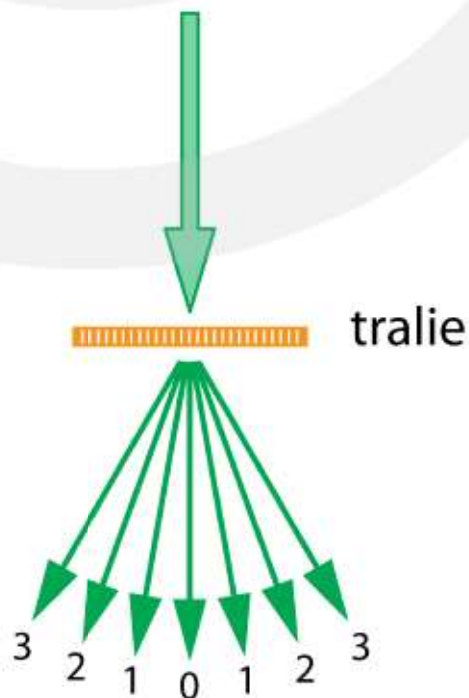
Plaatsen we een projectiescherm dan zien we op dit scherm heldere plekken en donkere plekken. In figuur 7 zie je de lichtbundels die door interferentie ontstaan (de buiklijnen). De plaatsen waar deze lichtbundels aankomen zie je op het scherm als de heldere plekken.



Figuur 7
 Interferentiepatroon op een scherm. Bij de rode pijlen zie je heldere lichtvlekken. Tussen de rode pijlen is het donker.

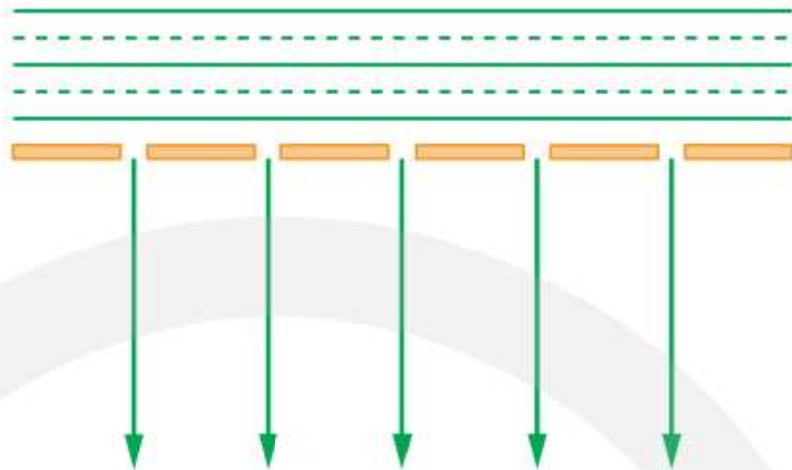
Een tralie

Bij een tralie gaat het licht niet door twee spleten, maar door een groot aantal smalle evenwijdige spleten op regelmatige afstand van elkaar. Omdat er nu veel coherente lichtbronnen samenwerken is het interferentie-effect sterker. Zet je een scherm achter een tralie dan zie je heldere strepen op de plaatsen waar de lichtstralen elkaar versterken. De lichtbundel midden achter de tralie heeft de grootste intensiteit en wordt de 0^e orde genoemd. Daarnaast komen aan weerszijden de 1^e orde bundels, dan de 2^e orde etc. Zie figuur 8.

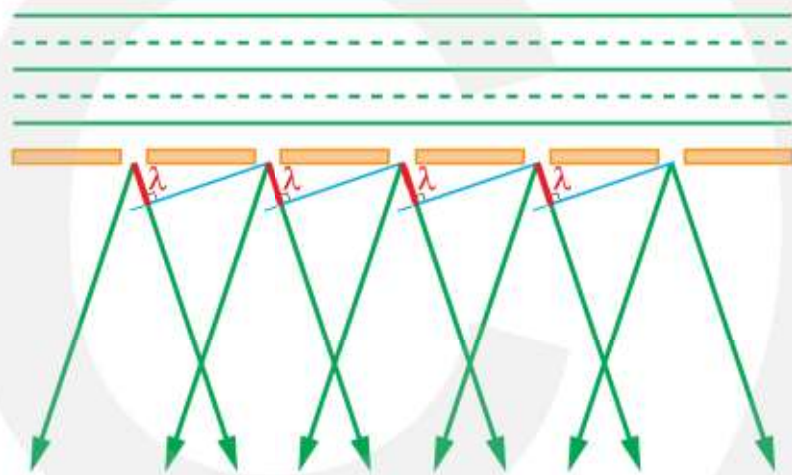


Figuur 8
 Een laserbundel gaat door een tralie. Door de tralie wordt de bundel gesplitst. De cijfers 0, 1, 2, 3, ... zijn de orde van de interferentie.

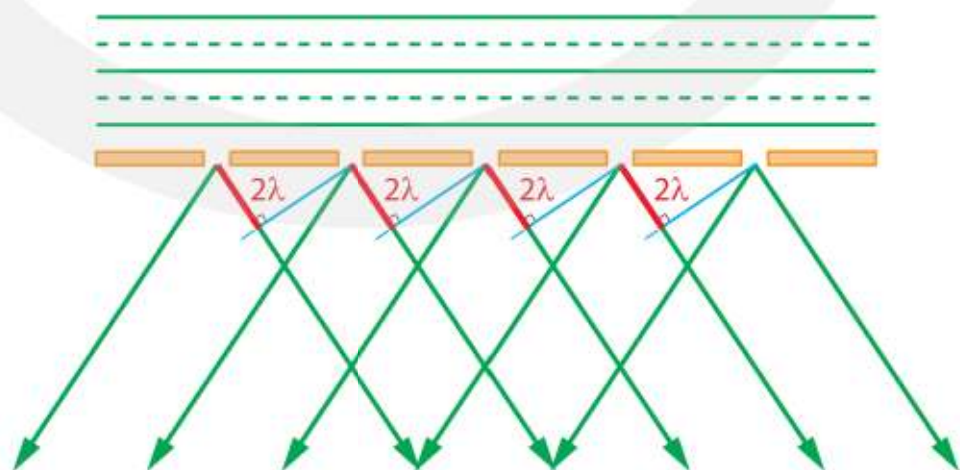
Figuur 9
Tralie met $n = 0$
0^e orde



Figuur 10
Tralie met $n = 1$
1^e orde.



Figuur 11
Tralie met $n = 2$
2^e orde.

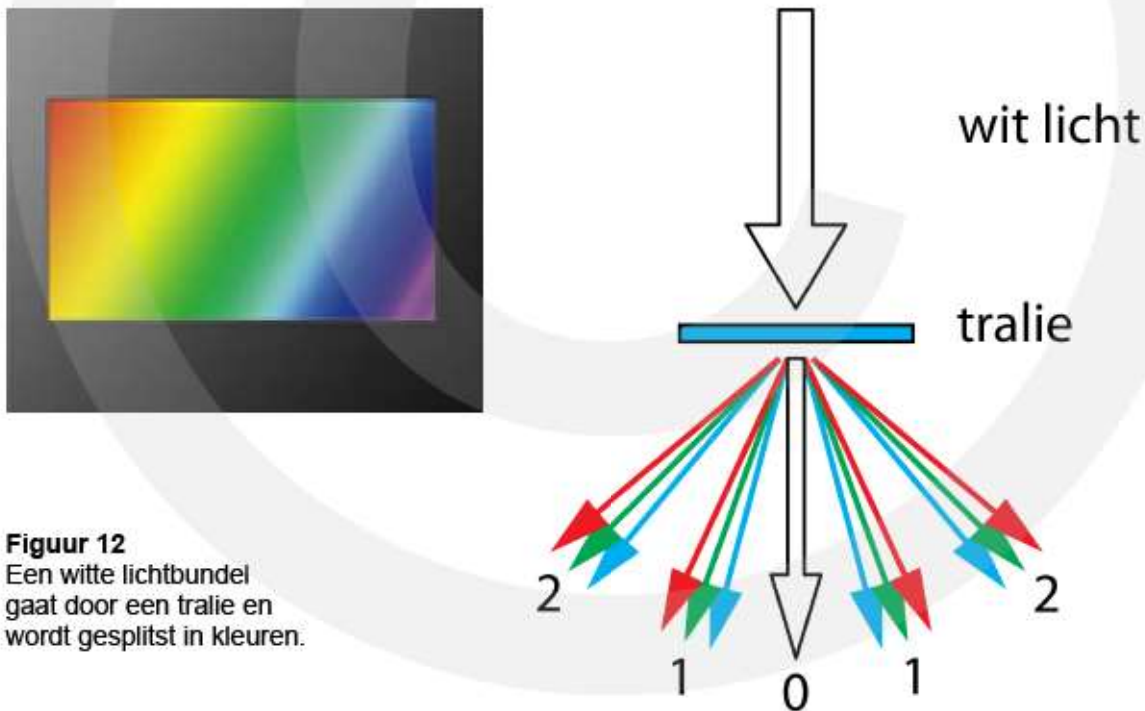


Het maken van een kleurenspectrum met een tralie

Zoals je kunt zien in de figuren 10 en 11 is de hoek waaronder een bundel de tralie verlaat afhankelijk van de golflengte van het licht. Bij de 1^e orde bundel past precies één keer de golflengte op het aangegeven lijnstuk. Bij de 2^e orde bundel past precies twee keer de golflengte op het aangegeven lijnstuk, enz.

Iedere kleur wordt dus onder een andere hoek afgebogen. Met een tralie kan daarom een kleurenspectrum worden gemaakt, waarbij wit licht wordt gesplitst in de kleuren waaruit het is samengesteld. Een prisma kan hiervoor ook worden gebruikt, maar bij een tralie is de hoek waarmee rood en violet licht van elkaar worden gescheiden veel groter.

Een **monochromator** en een **spectrometer** zijn instrumenten waarmee licht wordt gesplitst in kleuren. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de afstand tussen de spleten van de tralie. Hoe kleiner de afstand tussen de spleten is hoe groter de splitsing wordt. Tralies hebben vaak 300 tot 3000 spleten per millimeter. In figuur 12 zie je dat wit licht uit verschillende kleuren bestaat, die met een tralie zichtbaar worden.



Figuur 12
Een witte lichtbundel gaat door een tralie en wordt gesplitst in kleuren.

De afstand tussen de spleten in een tralie heet de **tralieconstante** d .

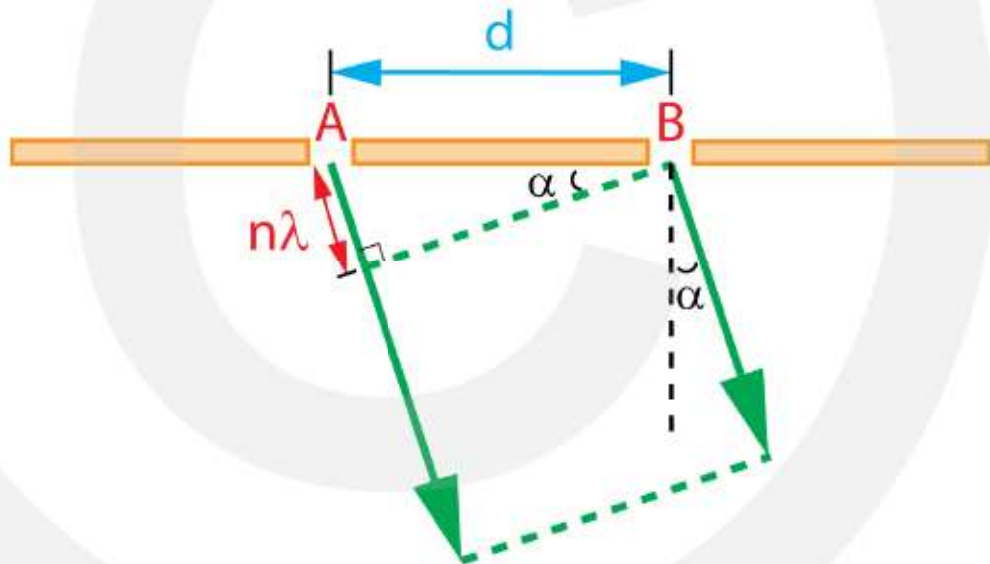
De tralieconstante d is de afstand tussen de spleten in meter (m).

Voor een tralie met tralieconstante d kun je berekenen onder welke hoek α licht met een golflengte λ wordt afgebogen. Je gebruikt hiervoor de **tralieformule**:

$$\sin \alpha = \frac{n \cdot \lambda}{d} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

- α is de hoek waaronder de lichtstraal wordt afgebogen in graden (°)
- n is de orde van de interferentie (geen eenheid)
- λ is de golflengte in meter (m)
- d is de tralieconstante (de afstand tussen de spleten) in meter (m)

De tralieformule kun je begrijpen door naar figuur 13 te kijken. Lichtstralen uit naburige spleten versterken elkaar als het verschil in weglengte een geheel aantal keer de golflengte is. In de figuur herken je een rechthoekige driehoek. De overstaande zijde is het verschil in weglengte. Dit verschil is $0 \cdot \lambda$ of $1 \cdot \lambda$ of $2 \cdot \lambda$ of $3 \cdot \lambda$, etc. Dit schrijven we als $n \cdot \lambda$ met $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. De schuine zijde is de afstand tussen de spleten, ofwel de tralieconstante. Hoek α is in figuur 13 aangegeven.



Figuur 13
Verklaring voor de tralieformule.

De hoek waaronder een bundel de tralie verlaat is afhankelijk van de afstand tussen de spleten en van de golflengte van het licht. Hoe kleiner de afstand tussen de spleten is hoe groter de spreiding wordt. Licht met een grotere golflengte wordt meer verspreid dan licht met een kleinere golflengte.

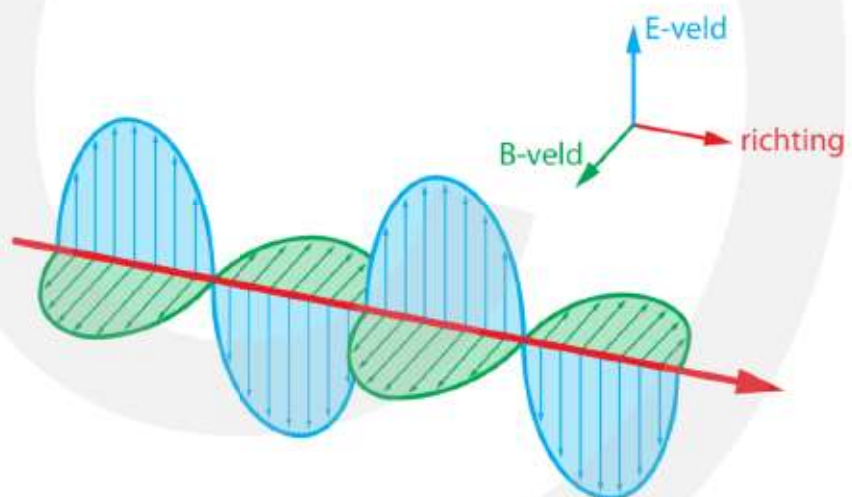
Bij de hierboven behandelde tralies gaat het licht door nauwe evenwijdige spleten. Dit zijn **transmissietralies**. Er zijn ook tralies waarbij het licht wordt teruggekaatst door nauwe evenwijdige spiegels. Dit zijn **reflectietralies**. Het werkingsprincipe van beide type tralies is hetzelfde. Lichtbundels afkomstig van naast elkaar gelegen spleten of spiegels ondergaan constructieve interferentie als het weglengteverschil een geheel aantal keer de golflengte is. In een **monochromator** en een **spectrometer** worden meestal reflectietralies toegepast, omdat die een hogere lichtopbrengst hebben.

13.2 Elektromagnetische straling

Licht als elektrisch en magnetisch verschijnsel

Net als de zwaartekracht werken ook de elektrische kracht en de magnetische kracht over een grote afstand. Voorwerpen met tegengestelde elektrische lading trekken elkaar aan. Magneten trekken elkaar aan als de noordpool van de ene magneet in de buurt komt van de zuidpool van een andere magneet. Als je een elektrisch geladen voorwerp, zoals een proton of een elektron, laat trillen dan worden de elektrische en magnetische krachten in de omgeving voortdurend groter of kleiner. Er wordt informatie door de ruimte gestuurd over de sterkte van deze krachten. De informatie over hoe sterk de elektrische en de magnetische kracht op een bepaalde plaats is wordt beschreven met een veld: het elektrische veld (E-veld) en het magnetische veld (B-veld).

Licht is een transversale golf van elektrische en magnetische velden die loodrecht op elkaar staan en die zich door de ruimte verplaatst in de derde loodrechte richting. Zie figuur 14.



Figuur 14
Trillingen in het elektrisch veld (E-veld) en magnetisch veld (B-veld) verspreiden zich gemeenschappelijk als elektromagnetische golf met een vaste snelheid door de ruimte.

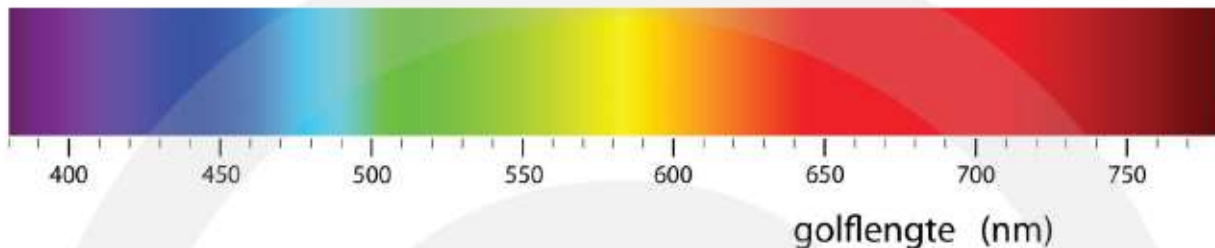
Elektromagnetische straling (EM-straling) ontstaat als een geladen deeltje versnelt of vertraagt. De verandering van het E-veld veroorzaakt een verandering van het B-veld wat weer een verandering van het E-veld geeft, etc. De veranderingen in het E-veld en in het B-veld wekken elkaar voortdurend op, waardoor er een elektromagnetische golf ontstaat die door zich de ruimte verplaatst. Deze golf noemen we licht.

Licht is een elektrisch en magnetisch verschijnsel.

Licht ontstaat als een elektrisch geladen deeltje versnelt of vertraagt.

Het elektromagnetisch spectrum

Zoals we hebben gezien wordt de kleur van licht bepaald door de frequentie van de EM-straling. In figuur 15 zie je het deel van de EM-straling dat mensen kunnen zien. Een frequentiegebied noem je een **spectrum**. Omdat de frequentie en de golflengte aan elkaar zijn gerelateerd ($\lambda = c/f$) wordt meestal de golflengte gebruikt om een kleur aan te geven.



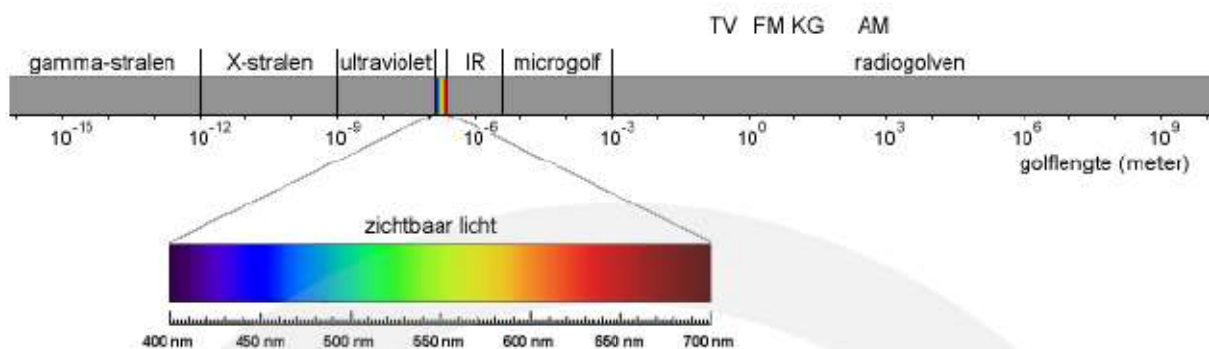
Figuur 15 Zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum.

In Tabel 1 staan de golflengte, de frequentie en de energie van een aantal kleuren.

Tabel 1 Het zichtbare deel van EM-straling.

Naam	Golflengte (nm)	Frequentie (Hz)	Energie (eV)
diep rood	700	$4,3 \cdot 10^{14}$	1,77
rood	650	$4,6 \cdot 10^{14}$	1,91
oranje	580	$5,2 \cdot 10^{14}$	2,14
geel	560	$5,5 \cdot 10^{14}$	2,21
groen	530	$5,7 \cdot 10^{14}$	2,34
groen/blauw	500	$6,0 \cdot 10^{14}$	2,48
blauw	480	$6,3 \cdot 10^{14}$	2,58
paars	460	$6,5 \cdot 10^{14}$	2,70
violet	440	$6,8 \cdot 10^{14}$	2,82
diep violet	400	$7,5 \cdot 10^{14}$	3,10

Zichtbaar licht is maar een klein deel van het volledige elektromagnetisch spectrum. Behalve zichtbaar licht bevat het EM-spectrum ook radiogolven, microgolven, infrarood, ultraviolet, röntgenstraling en gammastraling. Zie figuur 16. EM-straling met een lage frequentie, zoals microgolven, hebben weinig energie en zijn onschadelijk. Alleen bij hoge intensiteit, zoals in een magnetronoven, kunnen microgolven schade veroorzaken door verhitting. EM-straling met een hoge frequentie, zoals röntgenstralingen en gammastraling, bevatten veel energie en zijn daarom schadelijk. In tabel 2 staan verschillende soorten EM-straling.



Figuur 16 Elektromagnetische straling.

Tabel 2 Verschillende soorten EM-straling.

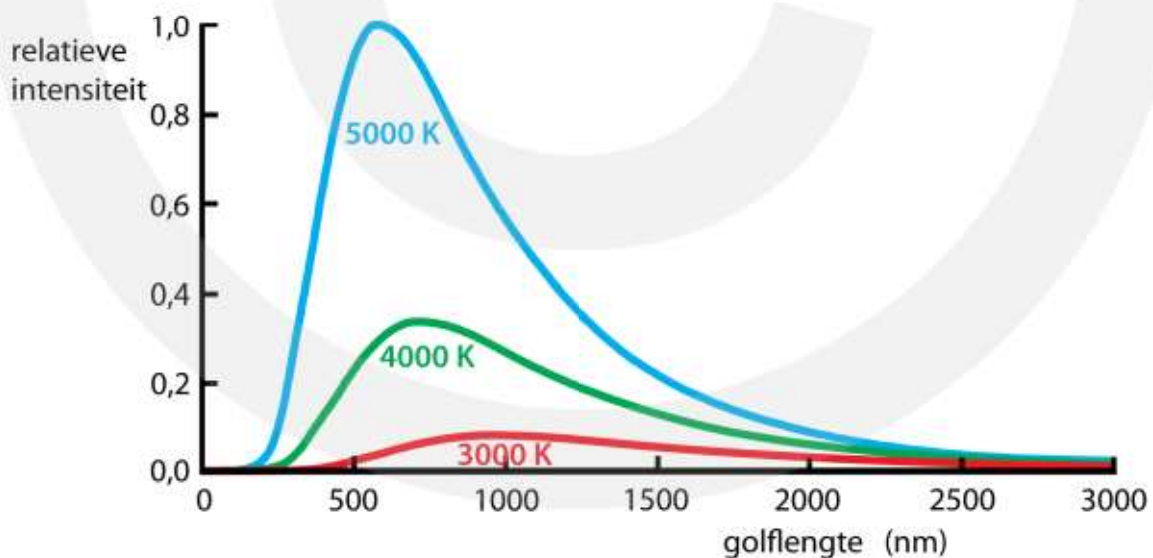
Naam	Golflengte (m)	Frequentie (Hz)	Energie (eV)
radio lange golf	10^3	10^5	10^{-9}
radio midden golf	10^2	10^6	10^{-8}
radio korte golf	10^1	10^7	10^{-7}
microgolven magnetron	10^{-1}	10^{10}	10^{-4}
microgolven radar	10^{-2}	10^{11}	10^{-3}
infrarood	10^{-4}	10^{13}	10^{-1}
nabij infrarood	10^{-6}	10^{14}	10^0
zichtbaar licht	$4 - 7 \cdot 10^{-7}$	$4 - 8 \cdot 10^{14}$	1,7 - 3,1
ultraviolet	10^{-7}	10^{15}	10^1
zachte röntgen	10^{-9}	10^{17}	10^3
harde röntgen	10^{-11}	10^{19}	10^5
zachte gamma	10^{-12}	10^{20}	10^6
harde gamma	10^{-14}	10^{22}	10^8

13.3 Licht als deeltje: fotonen

Warmtestraling

Als je een straalkachel aanzet voel je dat het verwarmingselement een hoge temperatuur krijgt nog voordat de kleur van het element verandert. Na korte tijd krijgt het element een rode kleur en uiteindelijk gaat het oranje-geel licht uitstralen. De oorzaak van deze warmtestraling is het trillen van de atoomkernen en van de elektronen in het materiaal. Omdat de trillende kernen en elektronen een elektrische lading hebben ontstaat er elektromagnetische straling. In figuur 17 zie je hoe voor een **zwart lichaam** de intensiteit van de uitgezonden straling afhangt van de temperatuur. Een **zwart lichaam** (Eng. black body) is een geïdealiseerd object dat alle elektromagnetische straling die erop valt absorbeert. Omdat er geen straling wordt teruggekaatst heeft een zwart lichaam geen kleur, wat de naam verklaart.

De golflengte van de straling die het meest wordt uitgezonden verschuift naar een kleinere waarde (hoge energie) als de temperatuur toeneemt. Bij hele kleine golflengtes en bij hele grote golflengtes wordt er geen energie uitgestraald. Verder straalt een voorwerp veel meer energie uit bij een hogere temperatuur. In figuur 17 staat op de verticale as de hoeveelheid uitgestraald lichtenergie per seconde per vierkante meter. Het maximum bij $T=5000\text{ K}$ is op 1,0 genormeerd. Op de horizontale as staat de golflengte.



Figuur 17 Ieder voorwerp zendt EM-straling uit. Als de temperatuur toeneemt wordt er meer straling uitgezonden en verschuift het maximum van de grafiek naar een kleinere golflengte.

De golflengte van de straling die het meest wordt uitgezonden verschuift naar een kleinere waarde (hoge energie) als de temperatuur toeneemt. De **wet van Wien** geeft het verband aan tussen dit maximum en de temperatuur.

$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T}$$

- λ_{\max} is de golflengte waarbij de intensiteit van de uitgezonden straling maximaal is in meter (m)
- k_W is de constante van Wien | $k_W = 2,8977721 \cdot 10^{-3} \text{ K}\cdot\text{m}$
- T is de temperatuur in kelvin (K)

Voor de hoeveelheid uitgestraalde energie per seconde geldt de **wet van Stefan-Boltzmann**:

$$P = \sigma \cdot A_{\text{bron}} \cdot T^4$$

- P is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- A_{bron} is de oppervlakte van de stralingsbron in vierkante meter (m^2)
- σ is de constante van Stefan-Boltzmann | $\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- T is de temperatuur van de stralingsbron in kelvin (K)

Intensiteit van EM-straling

Vaak gaat de uitgestraalde energie alle kanten uit. Verder van de bron is de straling zwakker dan dichtbij. Dit komt omdat bij een groter wordende afstand tot de bron de uitgezonden straling verdeeld wordt over een groter oppervlak. De sterkte van de straling wordt aangegeven met de **intensiteit**.

De intensiteit van straling is de hoeveelheid stralingsenergie die per seconde door een oppervlak van één vierkante meter gaat.

$$I = \frac{P}{A}$$

- I is de intensiteit van de straling in watt per vierkanter meter (W/m^2)
- P is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- A is de oppervlakte in vierkante meter (m^2)

Wordt de straling vanuit één punt in alle richtingen uitgezonden dan verdeelt de stralingsenergie zich over de oppervlakte van een bol. Hiervoor geldt:

$$A = 4\pi \cdot r^2$$

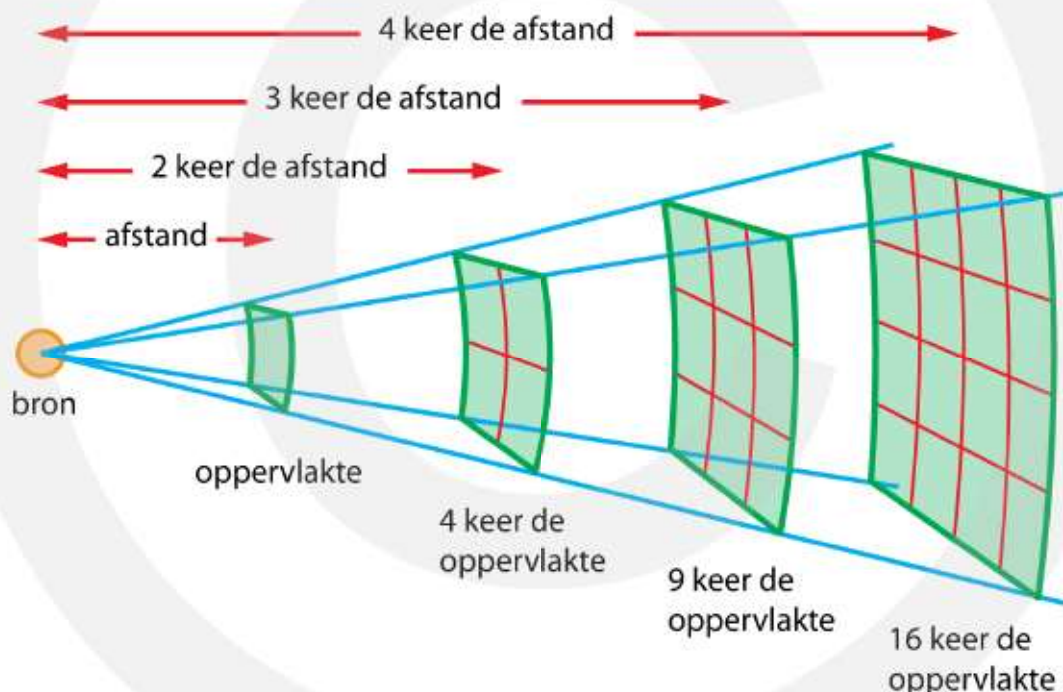
- A is de oppervlakte in vierkante meter (m^2)
- r is de straal in meter (m)

Voor de intensiteit van de EM-straling op een afstand r van de bron vinden we:

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

- I is de intensiteit van de straling in watt per vierkante meter (W/m^2)
- P is de uitgestraalde energie per seconde (het vermogen) in watt (W)
- r is de afstand tot de bron in meter (m)

In figuur 18 zie je een bron S die in alle richtingen evenveel uitstraalt. Hoe verder je van de bron bent hoe kleiner de intensiteit wordt. De intensiteit is **omgekeerd evenredig met de afstand in het kwadraat**. De afname in intensiteit gaat met $1/r^2$ en wordt daarom de (omgekeerde) kwadratenwet genoemd.



Figuur 18 De (omgekeerde) kwadratenwet. Als de afstand x -keer groter wordt neemt de intensiteit met $1/x^2$ af.

Fotonen

Het verloop van de grafieken in figuur 17 kun je niet verklaren met de golftheorie van licht. In plaats daarvan moet je aannemen dat EM-straling in energiepakketjes wordt uitgezonden in plaats van als golf. Als je een lichtbron heel zacht zet, zodat er maar weinig licht wordt uitgestraald, verwacht je met een golftheorie dat er continu EM-golven worden uitgezonden met een kleine amplitude. Maar dat gebeurt niet. Af en toe wordt er een pakketje licht uitgezonden. Hoe intenser het licht hoe vaker er een lichtpakketje wordt verstuurd. Een pakketje EM-straling noem je een **foton** (lichtdeeltje). Een voorwerp kan alleen hele fotonen uitzenden. Halve fotonen bestaan niet. De energie van een foton is afhankelijk van de frequentie, hoe groter de frequentie is hoe meer energie een foton bevat.

Het idee dat licht bestaat uit een stroom van deeltjes (fotonen) lijkt in tegenspraak te zijn met het idee dat licht een elektromagnetische golf is. Deze tegenspraak is de start geweest van de kwantumtheorie en heeft de natuurkunde ingrijpend veranderd. Voor de energie van een foton geldt:

$$E_f = h \cdot f$$

- E_f is de energie van een foton uitgedrukt in joule (J)
- h is de constante van Planck | $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ J·s
- f is de frequentie in Hertz (Hz)

Als je de golflengte weet moet je eerst de frequentie uitrekenen met $f = c/\lambda$. Als je dit invult vind je

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

- E_f is de energie van een foton uitgedrukt in joule (J)
- h is de constante van Planck | $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ J·s
- c is de lichtsnelheid in meter per seconde (m/s) | $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s
- λ is de golflengte in meter (m)

Vaak wordt de fotonenergie uitgedrukt in elektronvolt eV. Er geldt:

$$1 \text{ eV} = 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Het getal $1,602176565 \cdot 10^{-19}$ is de lading van een elektron. Deze lading wordt de elementaire ladingskwantum genoemd met als symbool de letter e.

De fotonenergie uitgedrukt in eV bereken je met:

$$E_f (\text{eV}) = \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda}$$

- E_f is de energie van een foton uitgedrukt in joule (J)
- h is de constante van Planck | $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ J·s
- c is de lichtsnelheid in meter per seconde (m/s) | $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s
- λ is de golflengte in meter (m)
- e is de elementaire ladingskwantum | $e = 1,602176565 \cdot 10^{-19}$ C

13.4 Absorptie en emissie van licht

Lichtbronnen

Licht wordt uitgestraald door een lichtbron. Er zijn drie manieren om licht te maken.

- Een voorwerp op hoge temperatuur brengen (gloeilamp).
- Een plasma maken in een gas (TL-buis en spaarlamp).
- Elektronen naar een lage energietoestand laten vallen (LED-lamp).

– Gloeilamp en halogeenlamp –

In een gloeilamp en een halogeenlamp zit een dunne gloeidraad, gemaakt van wolfram, in een vacuüm glazen omhulsel. Als er voldoende stroom door de gloeidraad gaat krijgt deze een temperatuur van meer dan 2500 °C. Bij deze temperatuur trillen de atomen zeer snel, waardoor er zichtbaar licht wordt uitgestraald. Tijdens het branden verdampt het wolfram langzaam en na een paar duizend uur brandt de gloeidraad door. Om de levensduur van een gloeilamp te verlengen wordt in het glazen omhulsel wat argon en stikstof gebracht. Bij een halogeenlamp wordt bovendien broom of jood toegevoegd en een kleine hoeveelheid zuurstof.



Het licht dat door een gloeilamp of halogeenlamp wordt uitgezonden bevat golflengtes tussen 450 en 10.000 nm. Alleen het deel tussen 450 en 700 nm is zichtbaar, de rest is onzichtbare infrarode warmtestraling. Meer dan 90% van de uitgezonden elektromagnetische straling is buiten het zichtbare gebied, waardoor gloeilampen en halogeenlampen een laag rendement hebben.

– TL-buis en spaarlamp –

Een TL-lamp en spaarlamp is een buisje gevuld met argon of neon gas met een verlaagde druk. Het gas wordt ontstoken met een korte hoogspanningspuls, waardoor er stroom gaat lopen. Door de hoogspanningspuls schieten er elektronen los van de atoomkernen en ontstaat er een gas met geïoniseerde atomen en vrij rondvliegende elektronen. Zo'n gas wordt een plasma genoemd. In een plasma bevinden zich vrije elektronen, wat elektrische geleiding mogelijk maakt. Als een losvliegend elektron wordt opgenomen door een positief ion komt er energie vrij. Deze energie wordt als foton uitgezonden.



De edelgassen helium, argon en neon zenden maar enkele specifieke kleuren uit. In een TL-buis wordt daarom een beetje kwik toegevoegd waardoor ultraviolet licht ontstaat. Door de binnenkant van een TL-buis te bedekken met een speciaal wit materiaal wordt het ultraviolette licht omgezet in zichtbaar licht. Ook in een TL-buis en spaarlamp wordt er veel onzichtbaar infrarood licht uitgezonden. Maar het rendement van een TL-buis of spaarlamp is ongeveer vier keer groter dan het rendement van een gloeilamp of halogeenlamp.

– LED-lamp –

In een LED-lamp bevindt zich een **Licht Emitterende Diode**. Dat is een kristal gemaakt van een halfgeleidend materiaal. Halfgeleidende materialen, zoals silicium, hebben een soortelijke weerstand groter dan die van een metaal maar kleiner dan die van een isolator. Ze zitten qua geleiding tussen de metalen en de isolatoren in, en vandaar de naam **halfgeleider**. Door goed gekozen verontreinigingen in het kristal aan te brengen kan een diode worden gemaakt. Laat je stroom door een diode lopen dan vallen de elektronen van hoge naar lage energie. Bij sommige halfgeleiders wordt hierbij zichtbaar licht uitgestraald.



– Lasers –

Een laser is een lichtbron met bijzondere eigenschappen. Laser staat voor **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**.



Eigenschappen van lasers zijn:

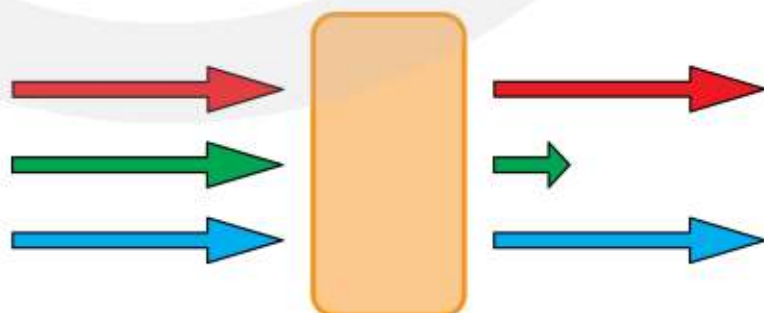
- laserlicht heeft maar één golflengte
- lasers zenden een smalle evenwijdige lichtbundel uit
- de lichtgolven zijn met elkaar in fase (coherent)
- de lichtintensiteit is hoog

Spectroscopie

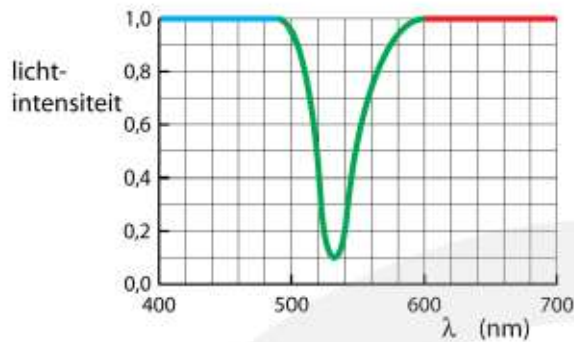
Het **absorptiespectrum** is de verzameling van opgenomen golflengtes. Om dit spectrum te verkrijgen wordt een stof bestraald met wit licht, waarin alle golflengtes aanwezig zijn. De stof neemt bepaalde kleuren op, de andere kleuren worden doorgelaten. Kijk je achter de stof dan zie je dat er golflengtes ontbreken. In figuur 19 neemt de stof groen licht op. Rood en blauw worden doorgelaten. Zie figuur 20.

Figuur 19

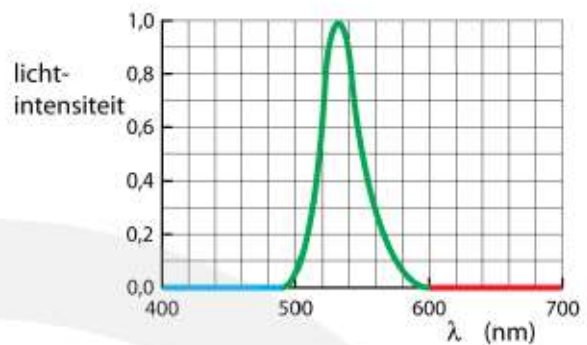
Absorptiespectroscopie. Het preparaat wordt met rood, groen en blauw licht (wit licht) bestraald. In dit voorbeeld wordt een deel van het groene licht geabsorbeerd. Rood en blauw worden niet geabsorbeerd.



Het **emissiespectrum** is de verzameling van golflengtes die worden uitgezonden. Om dit spectrum te verkrijgen moet je eerst energie aan een stof toevoegen om het in een hoge-energietoestand te brengen. Vervolgens verliest de stof deze energie door het uitzenden van fotonen. Zie figuur 21.



Figuur 20 Absorptiespectrum.
Groen licht wordt geabsorbeerd.
Blauw en rood licht worden doorgelaten.



Figuur 21 Emissiespectrum.
Groen licht wordt uitgestraald.
Blauw en rood licht worden niet uitgestraald.

Atoomspectroscopie

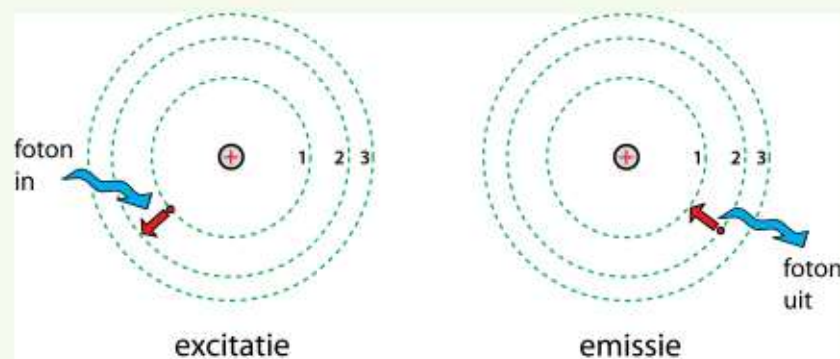
Atomen in de gasfase bij lage druk hebben geen binding met elkaar. Je kunt ze opvatten als losse atomen. Losse atomen absorberen maar enkele golflengtes. Deze geabsorbeerde golflengtes geven een absorptiespectrum met scherpe lijnen. Blijkbaar kunnen losse atomen alleen fotonen opnemen met een bepaalde hoeveelheid energie. Heeft een foton te weinig of te veel energie, dan wordt het niet opgenomen.

Fotonen die worden opgenomen kunnen ook weer worden uitgestraald. Het emissiespectrum van losse atomen heeft daarom ook scherpe lijnen. De golflengtes van het emissiespectrum zijn exact gelijk aan de golflengtes van het absorptiespectrum

Atoomspectroscopie is een belangrijk middel om te achterhalen uit welke atomen een stof bestaat. Het is een heel gevoelige techniek en wordt in de scheikunde veel toegepast. Ook voor sterrenkunde is atoomspectroscopie van grote betekenis. Vrijwel alle informatie die we uit de ruimte ontvangen komt van elektromagnetische straling. De hele ruimte is ermee gevuld. Met radio-, optische- en röntgentelescopen wordt het heelal nauwkeurig afgetast.

VOORBEELD waterstof

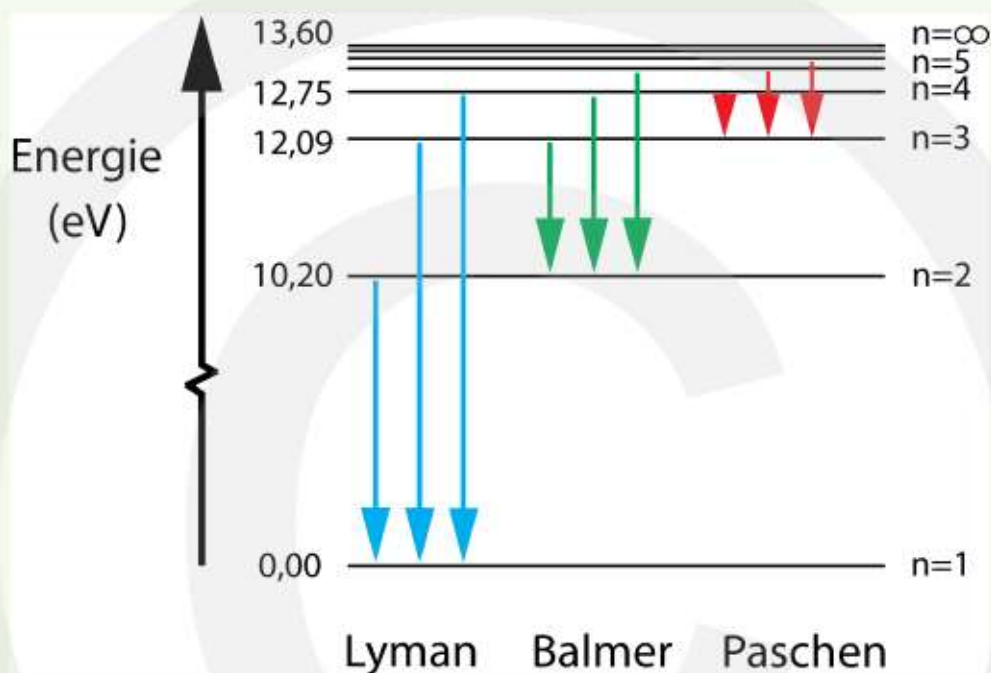
Het spectrum van waterstof is het meest bestudeerd omdat het waterstofatoom het eenvoudigste atoom is. Waterstof heeft een atoomkern met één proton en daaromheen één elektron. Zie figuur 22.



Figuur 22

Waterstofgas zendt elektromagnetische golven uit die in drie groepen zijn verdeeld:

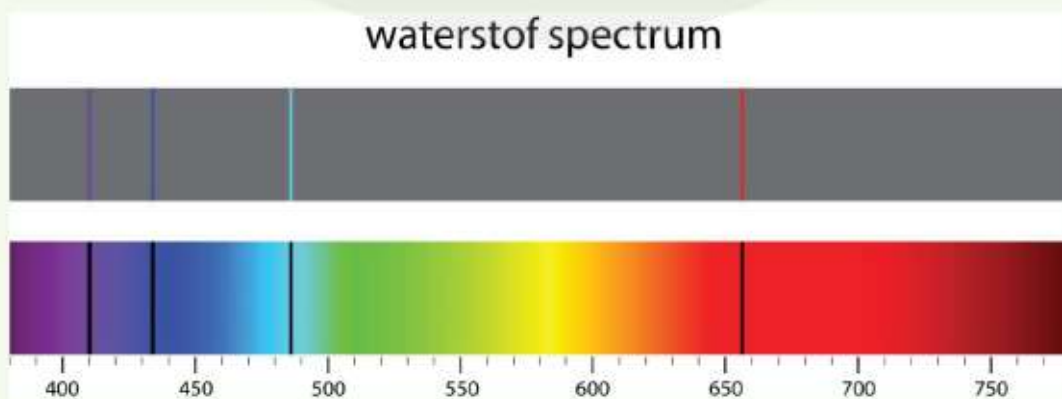
- De **Lyman** reeks zijn emissielijnen tussen 94 en 122 nm (ultraviolet).
- De **Balmer** reeks zijn emissielijnen tussen 397 en 656 nm (zichtbaar).
- De **Paschen** reeks zijn emissielijnen tussen 954 en 1870 nm (infrarood).



Figuur 23 Vereenvoudigd energieniveauschema voor waterstof.

VOORBEELD waterstofatomen

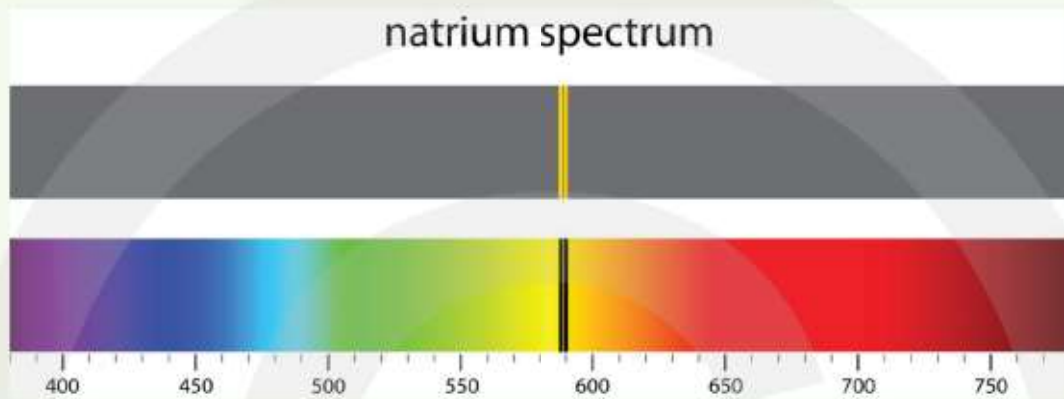
Een gas van waterstofatomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met scherpe lijnen bij 410, 434, 486, en 656 nm. Deze lijnen horen tot de Balmer reeks, zie figuur 24.



Figuur 24 Emissie- en absorptiespectrum van waterstof.

VOORBEELD natriumatomen

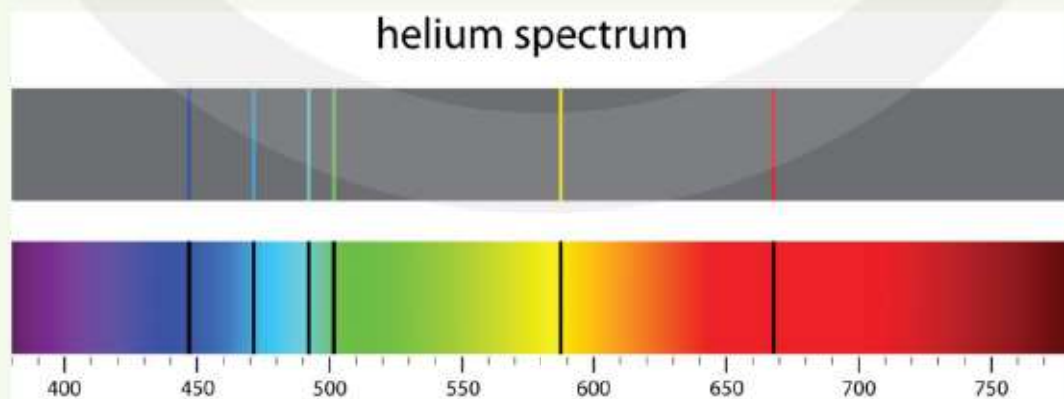
Een gas van natriumatomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met twee scherpe lijnen die vlak naast elkaar liggen bij 589 nm en 590 nm. Alleen deze twee golflengten worden geabsorbeerd en uitgezonden. Een lamp met natriumgas geeft oranje-geel licht. Zie figuur 25



Figuur 25 Emissie- en absorptiespectrum van natrium.

VOORBEELD heliumatomen

Een gas van heliumatomen bij lage druk heeft een emissiespectrum met scherpe lijnen bij 447, 471, 492, 502, 588 en 668 nm. Zie figuur 26. Dit spectrum is als eerste waargenomen bij zonlicht en vandaar dat helium genoemd is naar de zon: Helios. Ook op aarde komt helium voor.

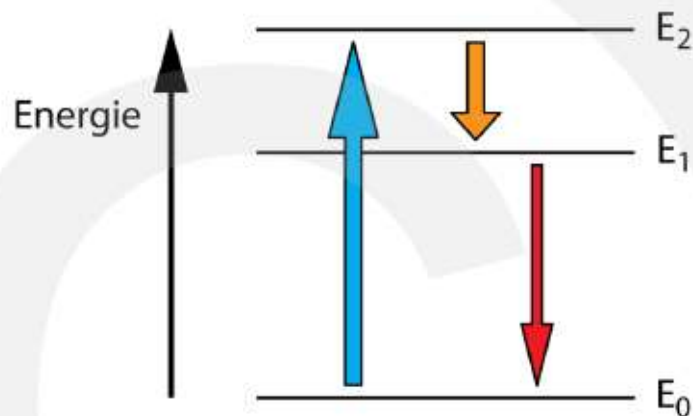


Figuur 26 Emissie- en absorptiespectrum van helium.

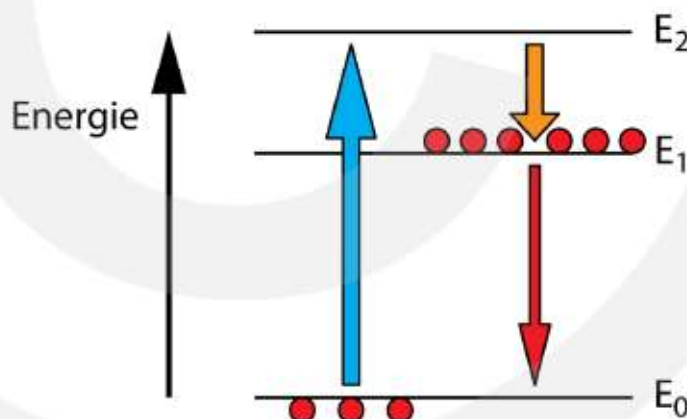
Spontane en gestimuleerde emissie in een laser

Emissie van licht door het terugvallen van elektronen naar een lagere schil gebeurt spontaan. De aangeslagen toestand leeft maar kort, meestal minder dan een miljoenste seconde. Behalve het spontaan terugvallen kunnen elektronen ook gestimuleerd worden om extra snel naar een lagere schil te springen. Dit proces heet **gestimuleerde emissie**. De werking van een laser is gebaseerd op gestimuleerde emissie. De afkorting LASER staat voor: "Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation". Een laser werkt als volgt. Er zijn atomen, zoals het element chroom, met drie energietoestanden E_0 , E_1 en E_2 . Zie figuur 27.

Figuur 27
Het drie niveau systeem in een laser.



Figuur 28
Populatie inversie.
In het hogere niveau E_1 bevinden zich meer elektronen dan in het lagere niveau E_0 .

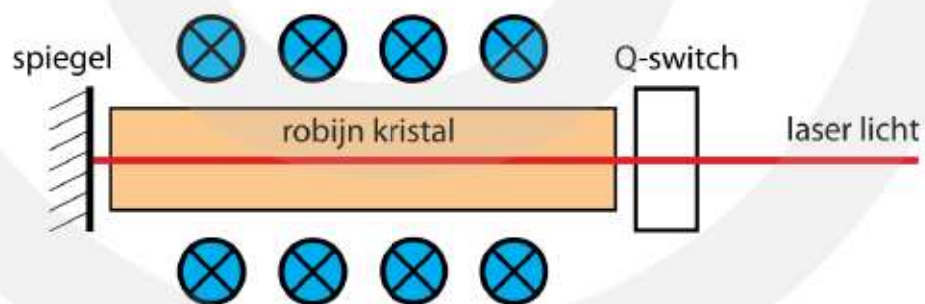


Laserlicht wordt als volgt verkregen.

- Met een flitslamp worden elektronen van E_0 naar E_2 gebracht. Dit heet **optisch pompen** (blauwe pijl omhoog).
- Vanuit toestand E_2 vallen de elektronen door spontane emissie omlaag naar E_1 (oranje pijl omlaag).
- De elektronen kunnen nog verder omlaag vallen van E_1 naar E_0 (rode pijl omlaag) maar bij de bouw van een laser wordt een stof is gekozen waarbij dit proces veel langzamer is dan de overgang van E_2 naar E_1 .
- Het resultaat is dat elektronen zich ophopen in niveau E_1 . Na een poosje zitten er meer elektronen in E_1 dan in E_0 . Dit noem je **populatie-inversie**, zie figuur 28.

- Elektronen in E_1 vallen af en toe spontaan terug naar E_0 waarbij ze fotonen uitzenden. Omdat er populatie-inversie is stimuleren deze fotonen weer andere elektronen in E_1 om terug te vallen naar E_0 .
- Er ontstaat een lawine van fotonen die door stimulatie zijn ontstaan. Deze fotonen zijn coherent met het foton dat de lawine van fotonen heeft veroorzaakt.
- Als er verder niets gebeurt is er slechts een beperkte stimulatie en verlaten de fotonen het optische medium. De truc is om de fotonen zo lang mogelijk met spiegels in het optische medium op en neer te kaatsen waardoor ze kunnen blijven stimuleren en er steeds meer coherente fotonen ontstaan.
- Regelmatig wordt één van de twee spiegels heel even transparant gemaakt. Hierdoor verlaat een groep coherente fotonen het medium en ontstaat er een intense lichtflits.

In 1960 is de **robijnlaser** uitgevonden, zie figuur 29. Een robijnlaser geeft rood licht met een golflengte van 694,3 nm. Een robijnkristal vormt het hart van deze laser. Robijn is een kristal van Al_2O_3 met daarin opgelost 0,1% Cr^{3+} . Het Cr^{3+} ion heeft het drie niveau systeem waarmee laserwerking kan worden verkregen. Om het robijnkristal worden flitslampen geplaatst waarmee elektronen optisch worden gepompt van E_0 naar E_2 . Aan de linkerkant is een vaste spiegel en aan de rechterkant een elektronisch schakelbare spiegel (Q-switch). Met een vaste frequentie (10 Hz) geven de flitslampen een flits en na een vertraging gaat de Q-switch open. Tussen het geven van de flits en het openen van de Q-switch vindt gestimuleerde emissie plaats.



Figuur 29
Robijnlaser.

Tegenwoordig wordt de robijnlaser niet meer gebruikt omdat er betere lasers zijn ontwikkeld. Maar het basisprincipe is voor alle lasers hetzelfde. In lasers die nu veel gebruikt worden (vaak ook in discotheken) is het robijnkristal vervangen door een kristal gemaakt van yttrium-aluminium oxide $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ met daarin opgelost neodymium Nd^{3+} ionen. Dit is de zogenaamde **Nd-YAG laser**, waar infrarood licht van 1064 nm uit komt. Met een truc wordt de golflengte van dit licht gehalveerd tot 532 nm wat intens groen licht oplevert.

Verder bestaan er lasers die gebruik maken van halfgeleidende kristallen. Dit zijn de **diodelasers** die je vindt in CD / DVD spelers en in laserpennen. In plaats van optisch pompen met flitslampen worden de elektronen in een aangeslagen toestand gebracht door een elektrische spanning. Rode diodelasers zijn rond 1980 als eerste ontwikkeld en geven licht met een golflengte van 671 nm. In 2000 zijn er ook groene diodelasers ontwikkeld en vanaf 2006 zijn er blauwe lasers te koop.

13.5 Draadloze communicatie

Draadloze communicatie met elektromagnetische golven

EM-straling ontstaat als elektrische lading wordt versneld. Bij wisselstroom van het lichtnet trillen de elektronen met 50 Hz waardoor EM-straling wordt opgewekt. De golflengte van deze straling is: $\lambda = c / f \rightarrow \lambda = 3,0 \cdot 10^8 / 50 = 6,0 \cdot 10^6$ meter. De energie van deze straling is: $E_{\text{foton}} = h \cdot f \rightarrow E_{\text{foton}} = 6,6260 \cdot 10^{-34} \cdot 50 = 3,3 \cdot 10^{-32}$ J ($2,1 \cdot 10^{-13}$ eV). De energie van deze fotonen is veel te klein om waargenomen te kunnen worden.

Om informatie te versturen is EM-straling met een hogere frequentie nodig. In onderstaande tabel vind je de namen en bijbehorende frequentiegebieden van de EM-straling die voor communicatie worden gebruikt. Bij radio en televisie worden frequenties in het megahertz (10^6 Hz) gebied gebruikt. Telefoon, WiFi en radar werken in het gigahertz (10^9 Hz) gebied.

Tabel 3 EM-straling voor draadloze communicatie.

Naam	Toepassing	Frequentie (MHz)
VLF very low frequency	militaire communicatie	0,001 – 0,1
LF low frequency	radio lange golf	0,1 – 0,5
MF medium frequency	radio midden golf	0,5 – 2,0
HF high frequency	radio korte golf	2 – 30
VHF very high frequency	radio ultra-korte golf	30 – 300
UHF ultra high frequency	radio, televisie, telefoon	300 – 3000
SHF super high frequency	satelliet radio en televisie	3000 – 30000

Naam	Frequentie (GHz)
telefoon GSM 850 (Azië)	0,85
telefoon GSM 900 (Europa)	0,90
telefoon GSM 1800 (Europa)	1,8
telefoon GSM 1900 (VS)	1,9
Wi-Fi	2,4
Wi-Fi	5,2
Radar (luchtverkeer, scheepvaart)	1,0 – 4,0
Radar (weerradar)	4,0 – 12
Radar (politie snelheid)	13, 24, 34
Radar (militair)	75 – 110

De frequenties voor draadloze communicatie worden opgewekt met elektronische schakelingen waarop een antenne is aangesloten. Informatie kan worden verstuurd als analoog of als digitaal signaal. Bij een **analoog signaal** worden signalen rechtstreeks via EM-straling door de ruimte verzonden. Bij een **digitaal signaal** worden

de signalen eerst omgezet in een reeks getallen. Daarna worden deze getallen omgerekend naar binaire codes van nullen en enen, vervolgens worden de binaire codes via EM-straling verstuurd. Dit lijkt op het versturen van een ouderwetse morsecode die uit lange en korte piepjes bestaat (SOS = . . . - - - . . .).

Analoog: signaal wordt rechtstreeks verstuurd.

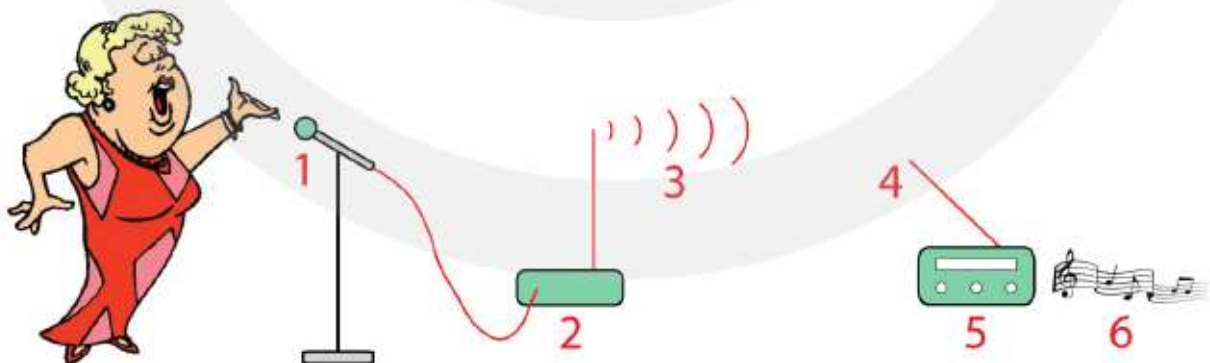
Digitaal: signaal wordt omgezet in een reeks getallen, die als binaire codes van nullen en enen snel na elkaar worden verstuurd.

Analoge informatie versturen met EM-golven

Portofoon (walky-talky), 27MC signalen en op dit moment nog de meeste radio-signalen worden analoog verstuurd met EM-golven. In het geval van 27MC zend-apparatuur heeft de EM-golf een frequentie van 27 MHz (27 MC betekent 27 Mega Cycles). FM radio wordt uitgezonden tussen 87,5 en 108 MHz.

Het zenden en ontvangen van **analoge signalen** bestaat uit de volgende stappen, zie figuur 30.

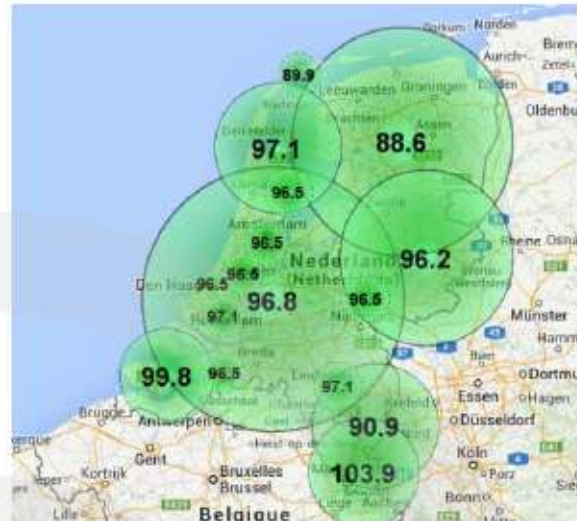
- 1 Een microfoon maakt van een geluidsgolf een wisselspanning (0,02 – 20 kHz), dit is het signaal dat moet worden verzonden.
- 2 Het signaal wordt toegevoegd aan een EM-draaggolf, dit heet **moduleren**.
- 3 De gemoduleerde EM-draaggolf wordt uitgezonden door de zender.
- 4 De gemoduleerde EM-draaggolf wordt opgevangen door de ontvanger.
- 5 In de ontvanger worden het signaal en de EM-draaggolf van elkaar gescheiden.
- 6 In de luidspreker wordt het signaal omgezet in een geluid.



Figuur 30 Analoge draadloze communicatie met EM-golven.

Om ervoor te zorgen dat radiosignalen van verschillende radiostations elkaar niet verstoren wordt er aan een radiostation een **frequentieband** toegewezen. Zo'n frequentieband heeft een breedte van bijvoorbeeld 0,2 MHz. Zo wordt 3FM door de zendmast in Lopik (bij Utrecht) uitgezonden op 96,8 MHz. Om storing te voorkomen mag in het frequentiegebied tussen 96,7 en 96,9 MHz geen ander radiostation signalen uitzenden.

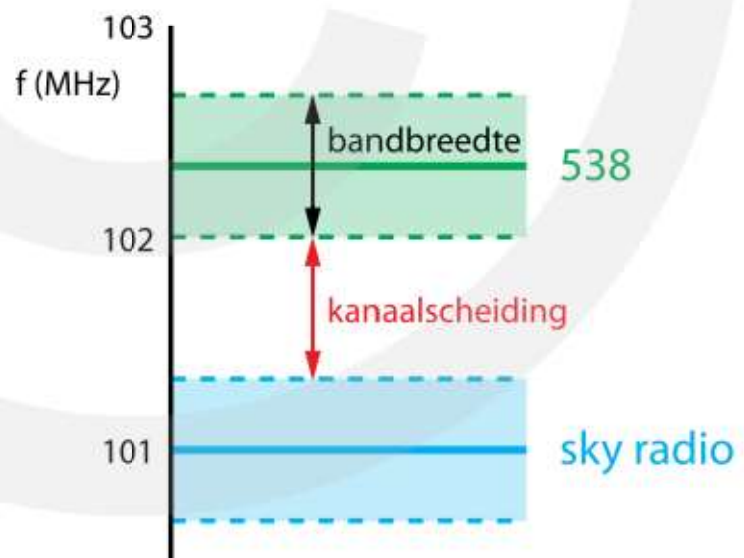
Het gebruik van EM-straling is aan strikte regelgeving gebonden. Frequenties voor portofoons, radio en televisiestations, etc. worden door de overheid beschikbaar gesteld. Zie figuur 31.



Figuur 31
3FM frequenties. Om storing door interferentie te voorkomen gebruiken de verschillende zendmasten verschillende frequenties voor de draaggolf.

Bandbreedte en kanaalscheiding

Om ervoor te zorgen dat signalen van verschillende bronnen elkaar niet verstoren wordt er aan iedere bron een **frequentieband** toegewezen. De frequentieband is het frequentiegebied waarin geen enkel andere bron mag uitzenden. De breedte van dit frequentiegebied heet de **bandbreedte**. Omdat de frequentiebanden van verschillende bronnen elkaar niet mogen overlappen zijn de frequenties van de draaggolven voldoende van elkaar gescheiden. Dit noem je de **kanaalscheiding**. Zie figuur 32.



Figuur 32
Aan ieder radiostation wordt een bandbreedte toegewezen. De afstand tussen twee radiostations is de kanaalscheiding. Kanaalscheiding zorgt ervoor dat er geen overlap is tussen naast elkaar gelegen frequentiebanden.

VOORBEELD kanaalscheiding

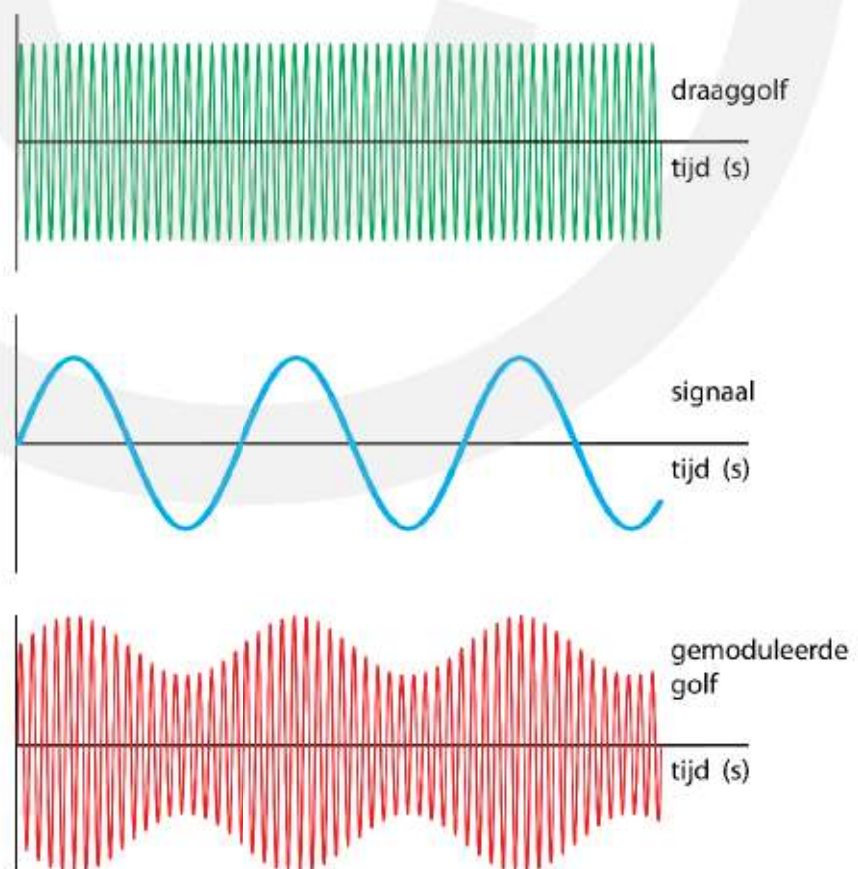
3FM wordt door de zendmast in Lopik (bij Utrecht) uitgezonden op 96,8 MHz. Om storing te voorkomen mag in het frequentiegebied tussen 96,7 en 96,9 MHz geen ander radiostation signalen uitzenden. In dit geval is de bandbreedte $96,7 - 96,9 = 0,2$ MHz. Radio 1 wordt op 98,9 MHz uitgezonden. De kanaalscheiding tussen Radio 1 en 3FM is $98,9 - 96,8 = 2,1$ MHz.

De bandbreedte bepaalt de maximale signaalfrequentie die kan worden overgebracht. Bij FM geldt: $f_{\max} = f_{\text{draaggolf}} + f_{\text{signaal max}}$ en $f_{\min} = f_{\text{draaggolf}} - f_{\text{signaal max}}$. Voor de minimale bandbreedte geldt daarom: $\text{bandbreedte} = f_{\max} - f_{\min} = 2 \cdot f_{\text{signaal max}}$.

Voor muziek is de maximale signaalfrequentie 20 kHz, zodat de bandbreedte groter moet zijn dan 40 kHz. Om er zeker van te zijn dat radiostations elkaar niet verstoren wordt in de praktijk een veel grotere bandbreedte aangehouden, bijvoorbeeld 175 kHz bij FM-radio. In Nederland wordt FM-radio uitgezonden tussen 88 en 108 MHz. De kanaalscheiding is 200 kHz zodat er in totaal plaats is voor $(108 - 88) / 0,2 = 100$ radiostations.

Amplitudemodulatie (AM)

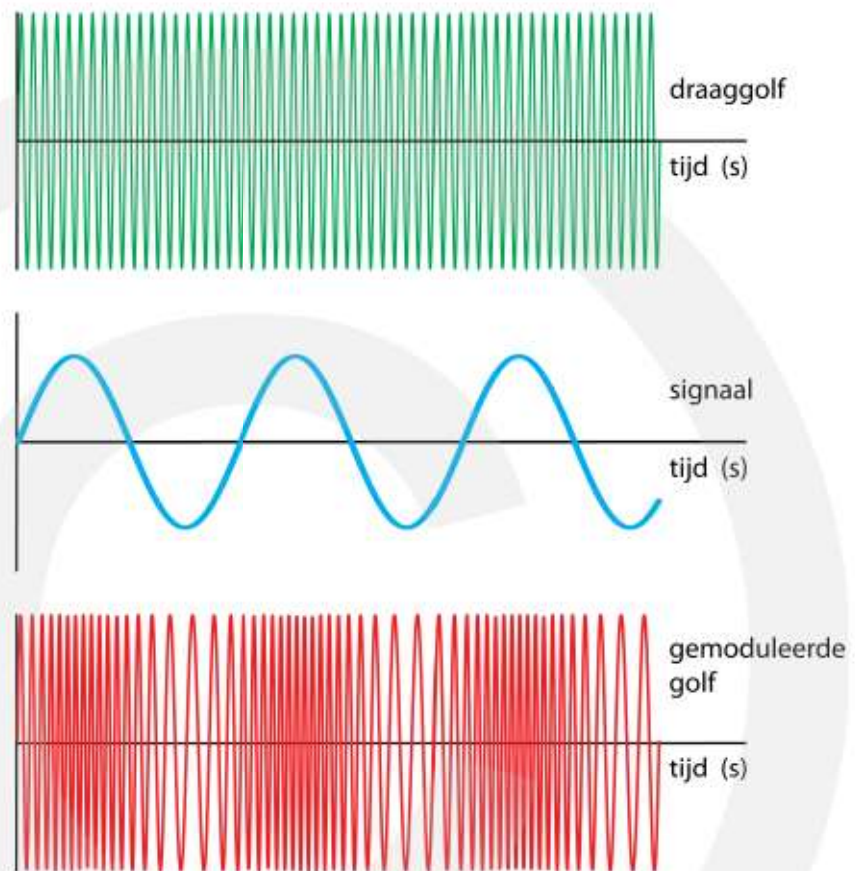
In stap 2 van bovenstaand schema wordt de wisselspanning toegevoegd aan de EM-golf. Dit proces heet **moduleren** en kan op twee verschillende manieren gebeuren, **amplitudemodulatie (AM)** en **frequentiemodulatie (FM)**. Frequentiemodulatie geeft mindere storingen dan amplitudemodulatie, en wordt om deze reden het meest gebruikt. Bij amplitudemodulatie wordt het signaal aan de amplitude van de draaggolf toegevoegd. De amplitude is dan niet meer constant, maar varieert in de tijd met de frequentie van het signaal. De frequentie van de draaggolf is veel groter (bijvoorbeeld 10 MHz) dan de frequentie van het signaal (bijvoorbeeld 1000 Hz).



Figuur 33
Amplitudemodulatie.

Frequentiemodulatie (FM)

Bij frequentiemodulatie wordt het signaal aan de frequentie van de draaggolf toegevoegd. De frequentie is dan niet meer constant, maar varieert in de tijd met de frequentie van het signaal.



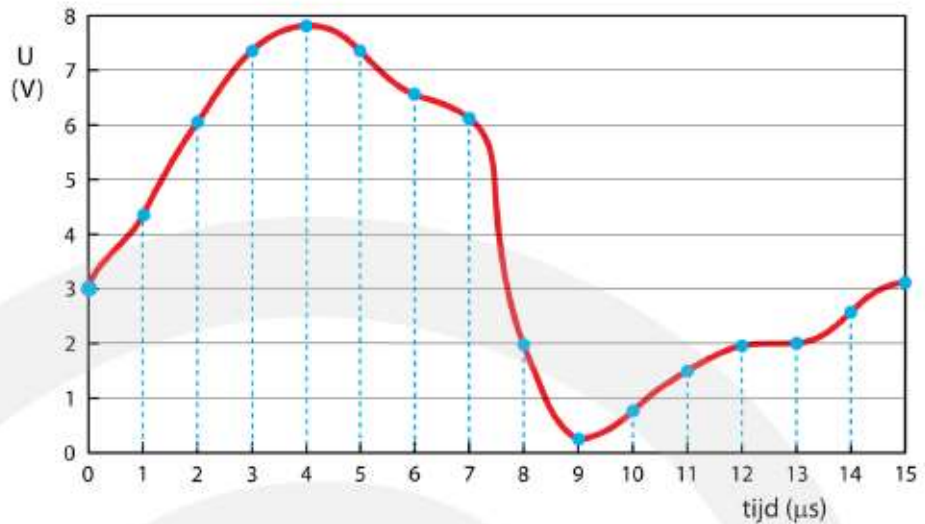
Figuur 34
Frequentiemodulatie.

Digitale informatie versturen met EM-golven

Op dit moment worden de meeste signalen digitaal verstuurd. Over een paar jaar zullen ook alle radiosignalen digitaal zijn. Het zenden en ontvangen van **digitale signalen** bestaat uit de volgende stappen:

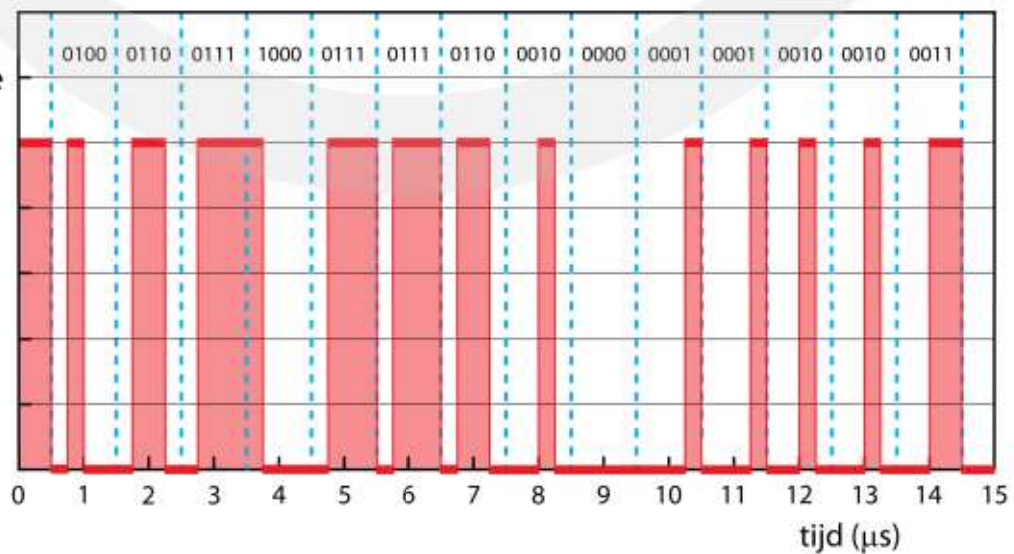
- 1 Een microfoon maakt van een geluidsgolf een wisselspanning (0,02 – 20 kHz), dit is het signaal dat moet worden verzonden.
- 2 Met een hoge frequentie wordt de wisselspanning gemeten, dit heet **monteren** of **bemonsteren**. De bemonsteringsfrequentie (aantal metingen per seconde) moet minstens twee keer zo hoog zijn als de grootste frequentie van het signaal.
- 3 De gemeten spanningen worden vertaald in binaire codes van een reeks bits (0 of 1). Voorbeeld: getal 87 wordt geschreven als 1010111
- 4 De binaire code wordt toegevoegd aan een EM-draaggolf, dit heet moduleren.
- 5 De gemoduleerde EM-draaggolf wordt uitgezonden door de zender.
- 6 De gemoduleerde EM-draaggolf wordt opgevangen door de ontvanger.
- 7 In de ontvanger worden de binaire code en de EM-draaggolf gescheiden.
- 8 De binaire code 1010111 wordt terugvertaald naar getal 87.
- 9 Getal 87 wordt omgezet naar een spanning (bijvoorbeeld 0,87 volt).
- 10 In de luidspreker wordt de spanning omgezet in een geluidsgolf.

Figuur 35
Digitale communicatie. Analog signaal wordt gesampled (bemonsterd).



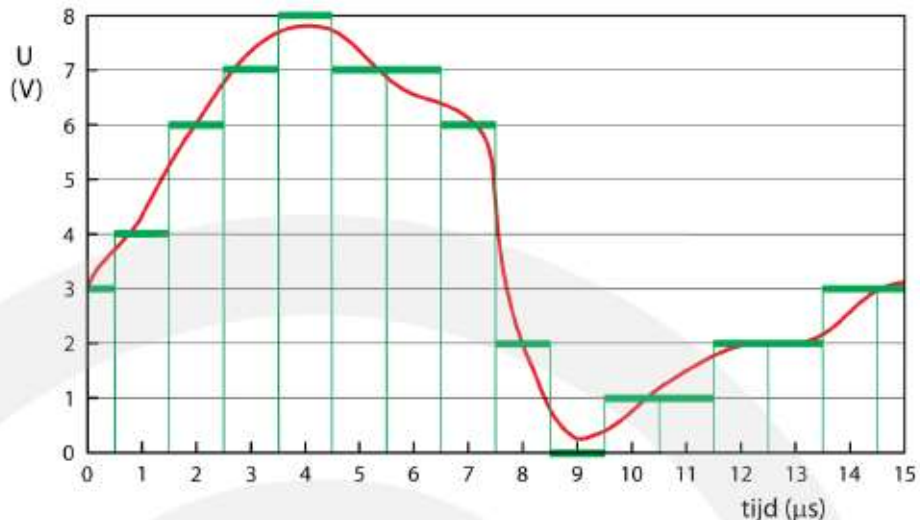
tijd (µs)	spanning afgerond op hele volt (V)	Binaire code
0	3	0011
1	4	0100
2	6	0110
3	7	0111
4	8	1000
5	7	0111
6	7	0111
7	6	0110
8	2	0010
9	0	0000
10	1	0001
11	1	0001
12	2	0010
13	2	0010
14	3	0011
15	3	0011

Gemoduleerde amplitude



Figuur 36 Een binaire code wordt uitgezonden door EM-straling met amplitudemodulatie.

Figuur 37
Digitale communicatie. Een binaire code wordt zonder storing ontvangen en omgezet in een spanning. Er is een afwijking tussen het oorspronkelijke signaal (rood) en het overgebrachte signaal (groen).



Het versturen van digitale informatie vergt meer stappen dan het versturen van analoge signalen. Door het bemonsteren (sampelen) gaat er informatie verloren. Om nauwkeurig te bemonsteren moeten het aantal bit dat wordt gebruikt en de bemonsteringsfrequentie zo groot mogelijk zijn.

- 4-bit: het signaal wordt opgedeeld in $2^4 = 16$ stappen
- 8-bit: het signaal wordt opgedeeld in $2^8 = 256$ stappen
- 16-bit: het signaal wordt opgedeeld in $2^{16} = 65.536$ stappen
- 24-bit: het signaal wordt opgedeeld in $2^{24} = 16.777.216$ stappen

Het grote voordeel van digitale informatieoverdracht is dat er bij het uitzenden en ontvangen van het signaal geen informatie verloren gaat. Verstuur je een analog signaal van bijvoorbeeld 0,87 volt dan kan vanwege storende invloeden in de atmosfeer dit signaal worden veranderd in 0,86 of 0,88 volt. Hierdoor ontstaat ruis. Bij digitale informatieoverdracht is de kans veel kleiner dat 0,87 verandert in 0,86 of 0,88, omdat een 0 niet in zomaar in een 1 kan veranderen of omgekeerd. 87 is 1010111, 86 is 1010110 en 88 is 1011000. Om van het getal 87 het getal 86 te maken moet het laatste bit van een 1 in een 0 veranderen, en dat gebeurt zomaar niet.

– Binaire getallen –

Bij digitale informatieoverdracht wordt gebruik gemaakt van binaire getallen. Er zijn twee symbolen 0 en 1 (laag en hoog). De kleinste hoeveelheid digitale informatie heet een bit (Engels: hapje), symbool kleiner letter b. Met 8 bits kun je $2^8 = 256$ combinaties maken en dus de getallen 0 t/m 255 opschrijven. Een serie van 8 bits wordt een byte (Engels: grote hap) genoemd. Het symbool voor byte is hoofdletter B. Een kB is een kilobyte (in werkelijkheid 1024 bytes. 1 MB is een megabyte en is 1024 kB. De snelheid waarmee informatie wordt overgedragen wordt uitgedrukt in bits per seconde. Eén kb/s is 1024 bits per seconde; één Mb/s is 1024 kilobits per seconde.

Antenne

Om EM-golven uit te zenden en te ontvangen zijn antennes nodig. Er zijn veel verschillende soorten antennes. De ideale afmeting van een antenne is een kwart van de uitgezonden of ontvangen golflengte. Meestal wordt voor het uitzenden een antenne gebruikt die de straling aan alle kanten uitzendt. De energie van de EM-straling verspreidt zich dan in alle richtingen. De antenne van de ontvanger is vaak richtingsgevoelig. Om zo veel mogelijk signaal op te vangen richt je de antenne naar de zender.

In figuur 38 zie je antennes die gebruikt worden voor het opvangen van EM-straling. De antenne op het linker plaatje is voor analoge radiogolven (VHF-gebied). Het middelste plaatje is een analoge televisieantenne (UHF-gebied). Het rechter plaatje is een schotelantenne voor digitale satelliettelevisie (UHF-gebied).



Figuur 38 Antennes voor het ontvangen van analoge radio (links), analoge televisie (midden) en digitale televisie (rechts).

Mobiele telefonie

Om draadloos te kunnen telefoneren is een mobiel netwerk nodig. Dit netwerk bestaat uit basisstations waarin signalen worden verwerkt. De eerste generatie, 1G, maakte gebruik van analoge signalen. **GSM** is de tweede generatie (2G) en staat voor Global System for Mobile Communication. Bij 2G wordt de informatie digitaal verstuurd met een snelheid van 10 kbit per seconde. **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System) is de derde generatie 3G en heeft een snelheid van 2 Mbit per seconde. UMTS werkt met 1,8 en 2,1 GHz.

Op dit moment is vierde generatie netwerk **LTE Advanced** (Long Term Evolution Advanced (4G) beschikbaar, waarmee in theorie een snelheid van 3 Gbit per seconde kan worden gehaald. In de praktijk is dit lager, bijvoorbeeld 200 Mbit per seconde. LTE-Advanced werkt op 1,8 en 2,6 GHz met een bandbreedte per kanaal van 20 MHz. Deze grote bandbreedte is nodig om data snel te kunnen versturen. Ter vergelijking, bij FM radio is de bandbreedte 0,2 MHz zodat de snelheid van data overdracht bij FM radio 100 keer kleiner is dan de datasnelheid van het 4G netwerk.

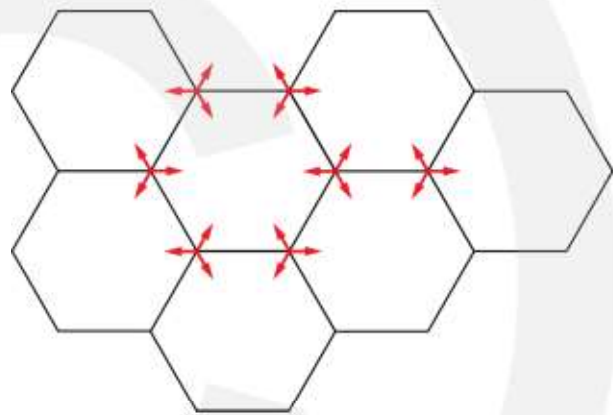
Een basisstation heeft antennes in drie richtingen onder een hoek van 120 graden. De antennes voor 1800 MHz zijn groter dan die voor 2100 MHz. Zie figuur 39.

Figuur 39

Links: antennes voor GSM op 1800 MHz.
Rechts: combinatie van antennes op 1800 MHz en UMTS op 2100 MHz.
Hoe hoger de frequentie hoe korter de antenne.



Basisstations vormen de hoekpunten van op elkaar aansluitende zeshoeken. Hierdoor ontstaat een cellenstructuur met een honingraat patroon. Zie figuur 40.



Figuur 40

Cellenstructuur van het mobiele netwerk.

Je telefoon legt verbinding met het basisstation die het sterkste signaal oplevert. Maar er moet ook plek voor je zijn. Een basisstation kan maar zo'n 500 telefoongesprekken tegelijkertijd afhandelen. De afstand tussen de basisstations is daarom afhankelijk van de bevolkingsdichtheid. In een stad staan ze op ongeveer 500 meter van elkaar en op het platteland op maximaal 20 km. Bij een nog grotere afstand tussen de masten wordt het signaal te zwak. Als je reist word je steeds overgeschakeld op de cel met het sterkste signaal, zonder dat je hier iets van merkt.

Straling en gezondheid

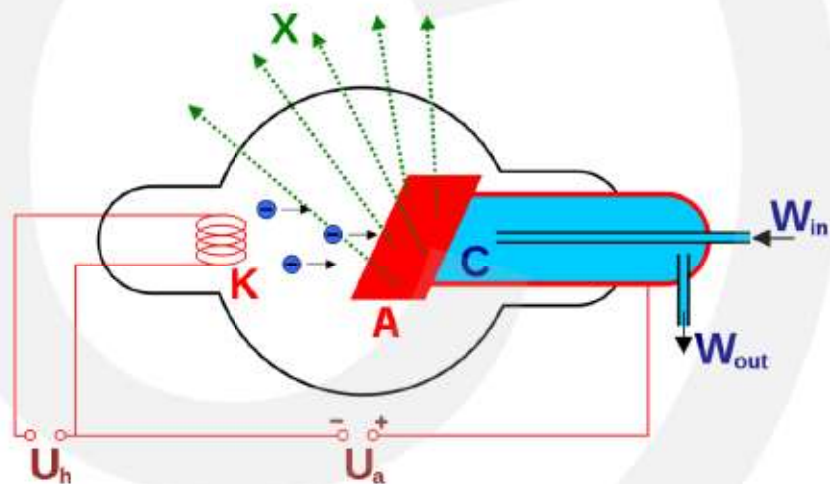
Met enige regelmaat verschijnen in de media berichten over mogelijke gezondheidseffecten van blootstelling aan radio- en microgolven. Onduidelijk blijft daarbij over welke effecten het gaat. Radio- en microgolven zijn niet-ioniserende straling. Dit betekent dat fotonen van deze straling niet voldoende energie hebben om elektronen uit een atoom vrij te maken. Er wordt daarom geen directe schade aan de cellen in je lichaam toegebracht. Bij ioniserende straling gebeurt dit wel. Bij ioniserende straling hebben de fotonen meer dan 3,5 eV energie, zoals bij ultraviolet licht, röntgenstraling en gammastraling. Het is onduidelijk of blootstelling aan niet-ioniserende straling helemaal zonder risico's voor de gezondheid is. Wel is het goed om te realiseren dat ook zonlicht elektromagnetische straling is en dat fotonen die door de zon worden uitgestraald tweehonderdvijftigduizend keer meer energie bevatten dan de fotonen die je mobiele telefoon uitzendt.

13.6 Röntgenstraling

Het opwekken van röntgenstralen

In 1894 ontdekt Wilhelm Conrad Röntgen (Duitsland, 1845 – 1923) bij toeval de straling die we nu röntgenstraling noemen. Zelf sprak hij van x-straling, waarbij de letter x, net als in de wiskunde, staat voor iets dat onbekend is. In het Engels worden röntgenstraling aangeduid als "x-rays".

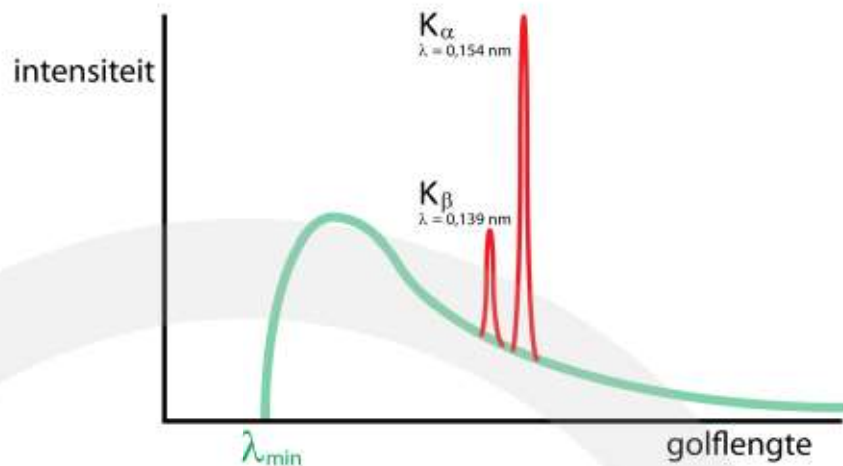
Röntgenstralen ontstaan als elektronen met hoge snelheid op een metaal botsen. In figuur 41 zie je een röntgenbuis waarmee dit mogelijk is. Links zie je een spiraal die aangesloten is op een spanningsbron U_h . Dit is de negatieve elektrode, de kathode K. Bij hoge spanning gaat de spiraal net als in een gloeilamp gloeien en treden er elektronen uit de kathode, die met spanningsbron U_a worden versneld naar de positieve elektrode, de anode. De elektronen botsen met hoge snelheid tegen de anode, waar hun kinetische energie wordt omgezet in warmte en in x-stralen.



Figuur 41
Vacuümbuis waarin röntgenstralen worden opgewekt.

Röntgenstraling is elektromagnetische straling met veel energie. De energie van een röntgenfoton zit tussen 1000 en 100.000 eV en is dus veel meer dan de 1,5 – 3 eV van zichtbaar licht. De golflengte van röntgenstraling is tussen 10^{-9} en 10^{-11} meter. Om een 1000 eV foton te maken is tenminste een spanningsverschil U_a van 1000 volt nodig. Niet alle kinetische energie van de elektronen wordt omgezet in röntgenstraling, de meeste energie gaat verloren als warmte. Vandaar dat de anode met water moet worden gekoeld, omdat het metaal anders smelt. In figuur 41 is de waterkoeling aangegeven in blauw.

Als voorbeeld kijken we naar de röntgenstralen die ontstaan bij een anode gemaakt van koper. Het spectrum bevat een brede band die bij een minimum golflengte λ_{\min} begint en doorloopt naar hoge waarden (groene lijn). Op deze band zitten scherpe pieken, aangegeven met K_α en K_β (rode pieken). Zie figuur 42.



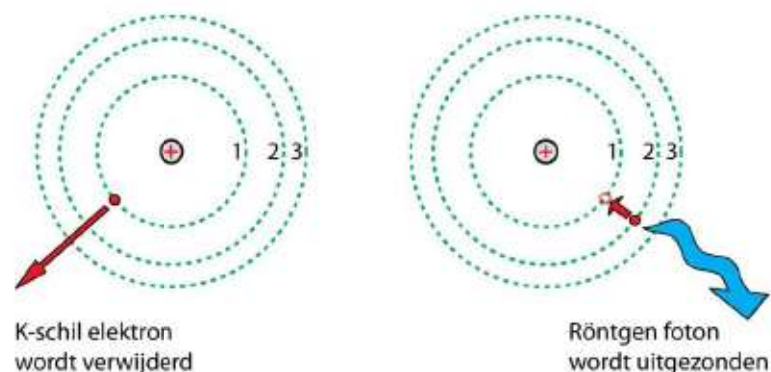
Figuur 42
Het spectrum van röntgenstralen opgewekt in een anode van koper.

De brede band (groene lijn) ontstaat doordat de elektronen in de anode heel snel afremmen. Zoals we eerder zagen ontstaat EM-straling als een geladen deeltje versnelt of vertraagt. Niet alle elektronen vertraagen even snel. Sommigen dringen dieper in de anode dan anderen. Dit verklaart het ontstaan van de brede band die **remstraling** wordt genoemd. De remstraling heeft een minimale golflengte λ_{\min} . Deze minimale golflengte wordt bepaald door het spanningsverschil dat wordt gebruikt. Stel we leggen 12.000 volt aan dan krijgen de elektronen een kinetische energie van 12.000 eV. Als deze hele voorraad energie terecht komt in één enkel foton dan heeft dit foton ook 12.000 eV energie, wat overeenkomt met een golflengte van 0,10 nm. Behoud van energie verhindert het opwekken van fotonen met een nog kleinere golflengte.

De scherpe pieken K_{α} en K_{β} zijn karakteristiek voor het metaal waaruit de anode is gemaakt. Als voorbeeld nemen we aluminium, Al. Aluminium is element nummer 13 en een Al-atoom heeft dus 13 elektronen. Deze elektronen zijn verdeeld over schillen:

- | | | |
|----------------------|-----------|--------------|
| 1 ^e schil | (K-schil) | 2 elektronen |
| 2 ^e schil | (L-schil) | 8 elektronen |
| 3 ^e schil | (M-schil) | 3 elektronen |

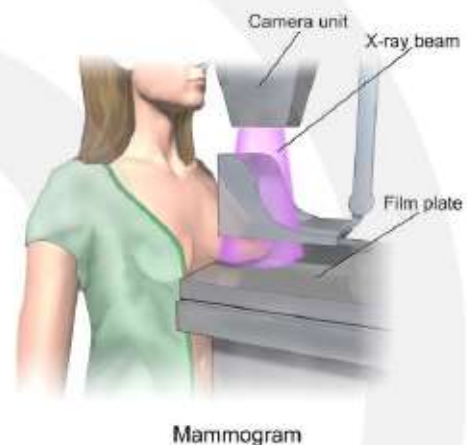
Bombarderen we aluminium met elektronen van voldoende energie dan wordt er een elektron uit de K-schil verwijderd. De lege plaats in de K-schil wordt opgevuld door een elektron uit de hoger liggende L-schil. Het elektron uit de L-schil komt in een lagere energietoestand en verliest dus energie. Voor aluminium is dit energieverval 1486,5 eV. In figuur 43 is dit proces weergegeven.



Figuur 43
Scherpe pieken in het röntgenspectrum ontstaan doordat een elektron uit de L-schil naar een vrijgekomen plaats in de K-schil springt en daarbij een röntgenfoton uitzendt.

Medische toepassingen van röntgenstralen

Röntgenstralen hebben een groot doordringend vermogen. Weefsels die voornamelijk bestaan uit de elementen waterstof, koolstof, stikstof en zuurstof, zoals huid- en spierweefsel, absorberen minder straling dan bijvoorbeeld botten, die opgebouwd zijn uit zware elementen zoals calcium. Gaat er een bundel röntgenstralen door het lichaam, dan ontstaat achter het lichaam een schaduw van de botten. Zetten we achter het lichaam een fotografische plaat dan wordt deze plaat zwart op plaatsen waar veel röntgenstraling komt. De plaatsen waar weinig straling komt blijven wit. Botten en eventueel botbreuken worden hierdoor zichtbaar. Met speciale apparatuur kunnen ook zachte weefsels worden onderzocht, zoals gebeurt bij onderzoek naar borstkanker "mammografie".



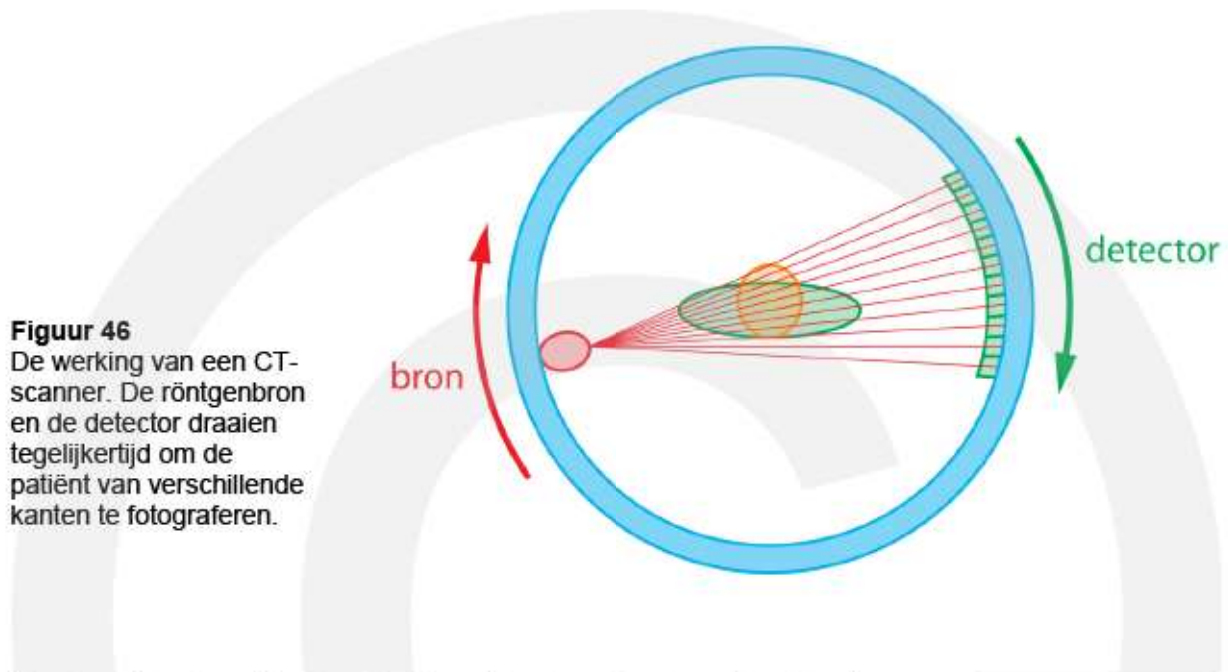
Figuur 44 Links, röntgenfoto van een gebroken schouder. Rechts: onderzoek naar borstkanker "mammografie".

Vanaf 1970 is er een nieuwe röntgentechniek beschikbaar: **Computer Tomografie, CT**. Bij deze techniek wordt een serie röntgenfoto's onder een steeds andere hoek gemaakt. Bij een **CT-scan** wordt de patiënt langzaam door de scanner geschoven terwijl er voortdurend röntgenfoto's onder verschillende hoeken worden gemaakt. Zie figuur 45.

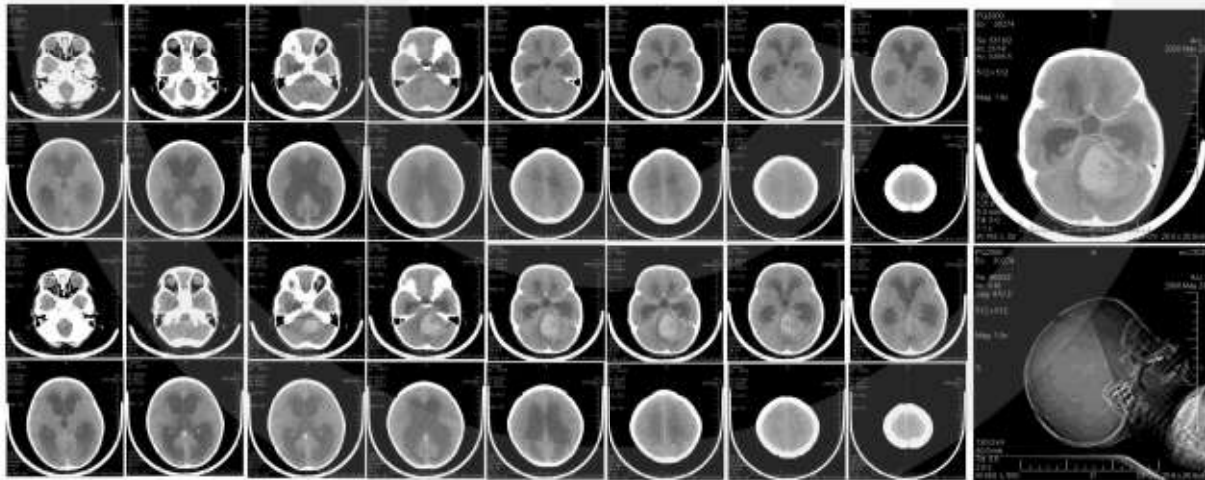


Figuur 45
CT-scanner.

Binnen in een CT-scanner zit een röntgenbron en een detector, die tegelijkertijd om de patiënt heen draaien. Zie figuur 46. De absorptie van röntgenstralen wordt onder verschillende hoeken gemeten. Deze informatie wordt door een computer verwerkt en levert een driedimensionaal beeld op. Dit beeld kan worden weergegeven als een serie plakjes, zoals te zien in figuur 47.

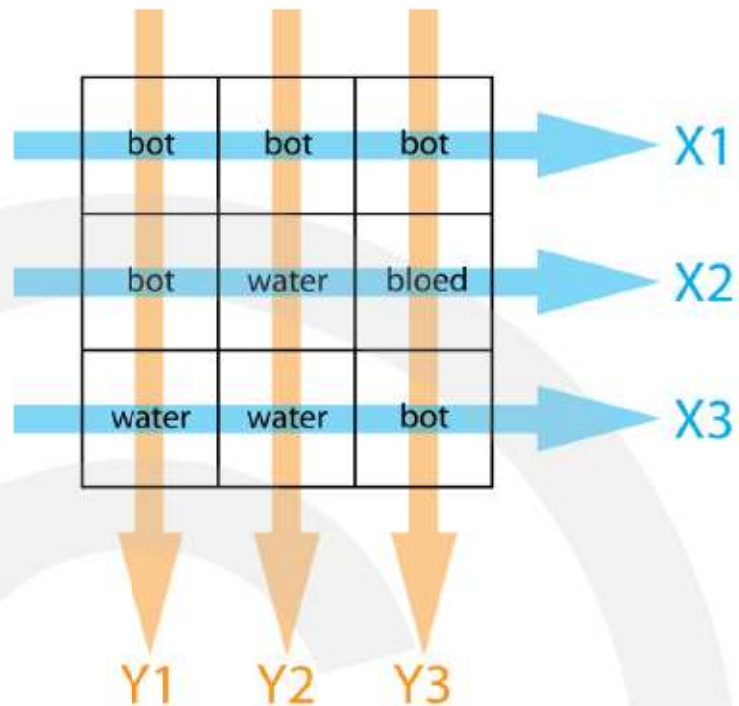


Figuur 46
De werking van een CT-scanner. De röntgenbron en de detector draaien tegelijkertijd om de patiënt van verschillende kanten te fotograferen.



Figuur 47 CT-scan van een kinderhoofdje.

Doordat de röntgenfoto's onder verschillende hoeken worden gemaakt kan de samenstelling van het bestraalde weefsel worden bepaald. Zie figuren 48. Het signaal X1 gaat door 3 stukjes bot en is daarom zwak. Dit geeft een witte plek op de foto. Het signaal Y2 gaat door 1 stukje bot en 2 stukjes water en is daarom sterker dan X1. Op de plaats Y2 is de röntgenfoto grijzer dan op X1.



Figuur 48
Röntgenstraling gaat in verschillende richtingen door de patiënt, zodat een 3-dimensionaal beeld kan worden berekend.

Veiligheid

De energie van een röntgenfoton is 1000 tot 100.000 eV. Eén röntgenfoton heeft daarmee ruim voldoende energie om een elektron van een atoomkern los te slaan, zodat er positieve ionen ontstaan. Röntgenstraling heeft ioniserende werking en wordt daarom **ioniserende straling** genoemd. Weefsel dat in aanraking komt met röntgenstraling wordt beschadigd. Weefsel van levende organismen bevat voornamelijk moleculen opgebouwd uit waterstof, koolstof, stikstof en zuurstof. De energie waarmee deze atomen chemisch zijn gebonden ligt tussen 3 en 10 eV.

C – C	3,6 eV		C – H	4,2 eV
C = C	6,3 eV		C = O	8,3 eV
C ≡ C	8,6 eV		C ≡ N	9,2 eV

Eén röntgenfoton is in staat om een groot aantal chemische bindingen kapot te maken, waardoor er radicalen (kapotte bindingen) ontstaan. Als radicalen worden gevormd in het DNA-molecuul kan een cel zich ongeremd gaan delen. Het organisme krijgt dan kanker. Blootstelling aan ioniserende straling moet daarom zoveel mogelijk worden vermeden.

De hoeveelheid geabsorbeerde straling per kilogram wordt de **stralingsdosis** genoemd. Dit wordt uitgedrukt in de eenheid **sievert** (Sv). Ook bij kernfysica gebruik je de sievert als eenheid van stralingsdosis.

Eén sievert is één joule geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram.

Kom je in aanraking met röntgenstraling dan wordt een gedeelte van deze straling geabsorbeerd. Hierbij wordt de energie van het röntgenfoton gebruikt om chemische bindingen te verbreken. Hoe hoger de fotonenergie, hoe meer kapotte bindingen en hoe groter de schade aan het weefsel is.

Een mens staat voortdurend bloot aan ioniserende straling. Per jaar ontvang je ongeveer 1,8 mSv aan ioniserende straling door natuurlijke bronnen uit de omgeving. Daar bovenop ontvang je gemiddeld zo'n 0,6 mSv per jaar door röntgenstraling voor medische diagnostiek. Het totaal van 2,4 mSv per jaar is zo weinig dat je lichaam in staat is om de opgelopen schade aan het weefsel te repareren. Een gezond lichaam heeft immers een goed ontwikkeld herstellend vermogen. Als de stralingsdosis veel groter is, bijvoorbeeld duizend keer zo groot, dan is je lichaam niet meer in staat om alle schade te repareren en heb je een grote kans dat je afweermechanisme onherstelbaar wordt beschadigd en je na enige tijd overlijdt. Bij een stralingsdosis van 50 sievert overlijdt je al na enkele uren of dagen. Onderstaande tabel geeft je een indruk van de stralingsbelasting die je oploopt.

Tabel 4 Overzicht van de stralingsbelasting uit verschillende bronnen.

Bijdrage uit	Stralingsbron	milli-sievert (mSv)
Leefomgeving	kosmische straling	0,25 / jaar
	bodem	0,05 / jaar
	water en voedsel	0,35 / jaar
	lucht	0,8 / jaar
	bouwmaterialen	0,35 / jaar
Vrije tijd	vliegreis op 10 km hoogte	0,005 / uur
	wintersport op 2 km hoogte	0,03 / week
Medisch	röntgenfoto borstholte	0,09 / keer
	röntgenfoto gebit	0,1 / keer
	röntgenfoto borsten (mammografie)	0,1 / keer
	röntgenfoto hoofd en nek	0,2 / keer
	röntgenfoto heup	0,8 / keer
	röntgenfoto beenbreuk	1,0 / keer
	CT-scan hoofd	1,2 / keer
	CT-scan lichaam	1,2 / keer

13.7 Magnetische resonantie: MRI

De spin van elektronen en protonen

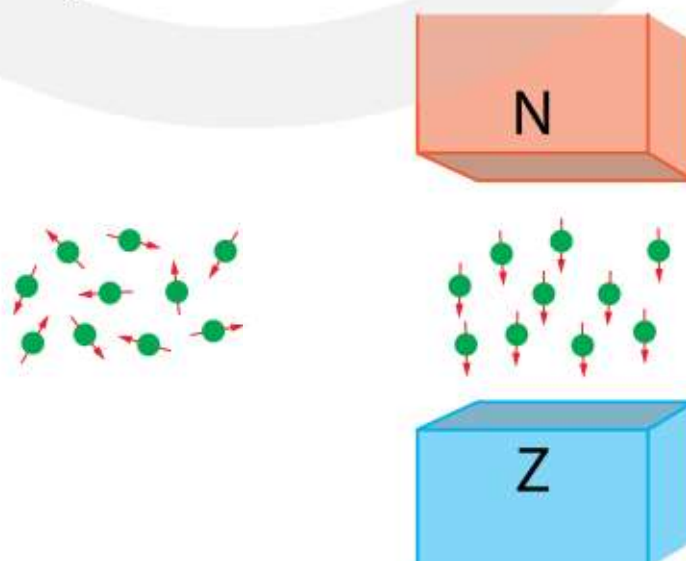
Het toepassen van röntgenstralen voor medische diagnose heeft als nadeel dat je lichaam wordt blootgesteld aan ioniserende straling. Bij magnetische resonantie imaging (MRI) gebeurt dit niet. MRI werkt met EM-straling in het radiogebied 30 – 300 MHz.

De werking van MRI is totaal anders dan van röntgenstralen. MRI maakt gebruik van een bijzondere eigenschap van protonen. Protonen hebben niet alleen een lading maar gedragen zich ook als kleine **magneetjes**. Deze eigenschap wordt de **spin** genoemd. Het lijkt namelijk alsof protonen voortdurend om hun eigen as tollen (Engels: spinnen) en daardoor minuscule elektromagneetjes zijn. De werkelijkheid is veel complexer maar om een indruk te krijgen van de werking van een MRI is dit niet belangrijk. Bij MRI wordt gebruik gemaakt van de magnetische eigenschappen van het proton. We geven dit magnetisme aan met een pijltje dat wijst in de richting van de magnetische noordpool. De richting van dit pijltje wordt de **oriëntatie** van de protonspin genoemd.

Bij MRI wordt geen schadelijke ioniserende straling gebruikt.

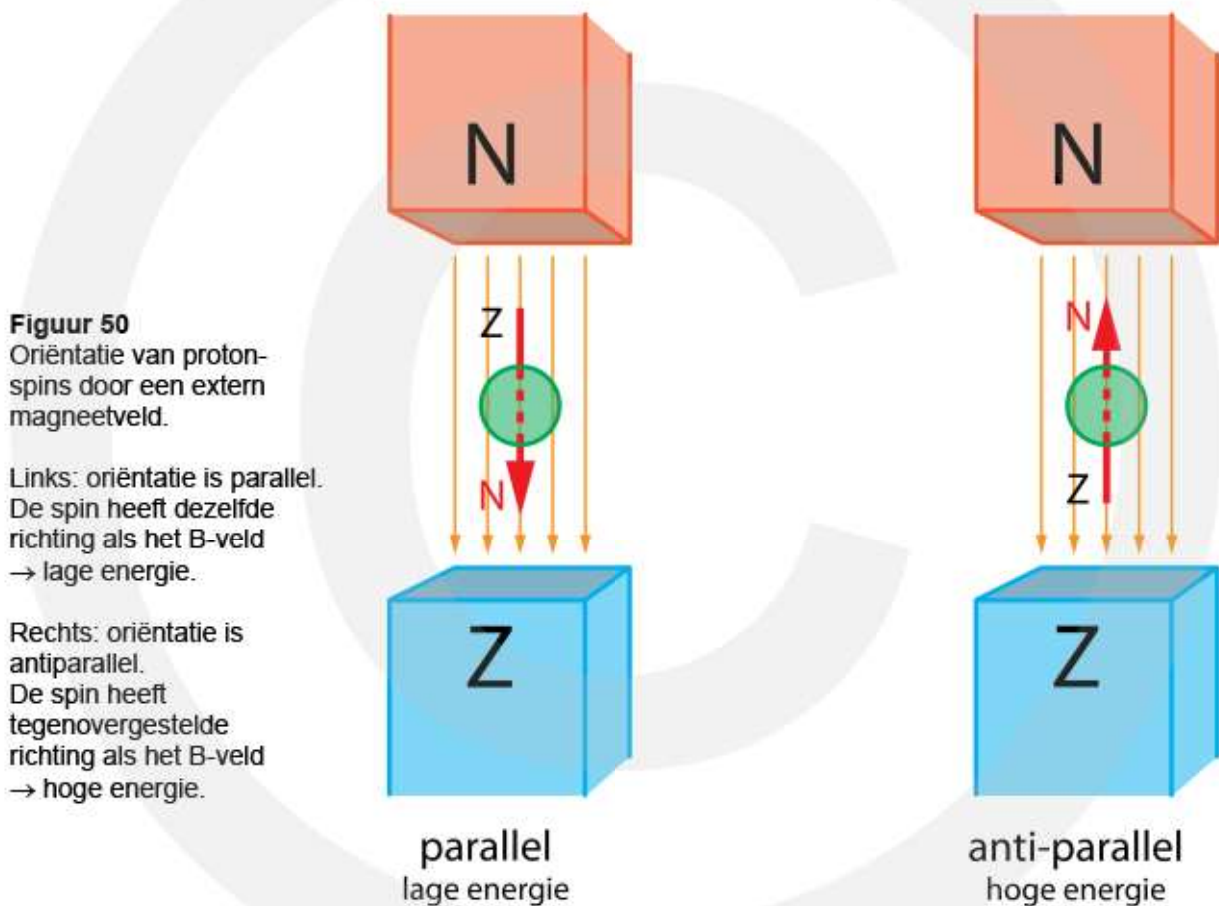
MRI maakt gebruik van het magnetisme van protonen.

In het lichaam bevinden zich veel waterstofatomen, waarvan de kern een proton is. Je lichaam bevat dus ontelbaar veel magneetjes. In het dagelijks leven merk je hier niets van, omdat deze magneetjes een willekeurige oriëntatie hebben. Neem je een bepaalde richting, bijvoorbeeld noord – zuid, dan zijn er evenveel protonen met een magnetische oriëntatie naar het noorden als protonen met een oriëntatie naar het zuiden. Deze magneetjes heffen elkaars werking op. Zolang de magnetische oriëntatie lukraak over alle richtingen is verdeeld is er van het magnetisme in je lichaam niets te merken. Zie figuur 49.

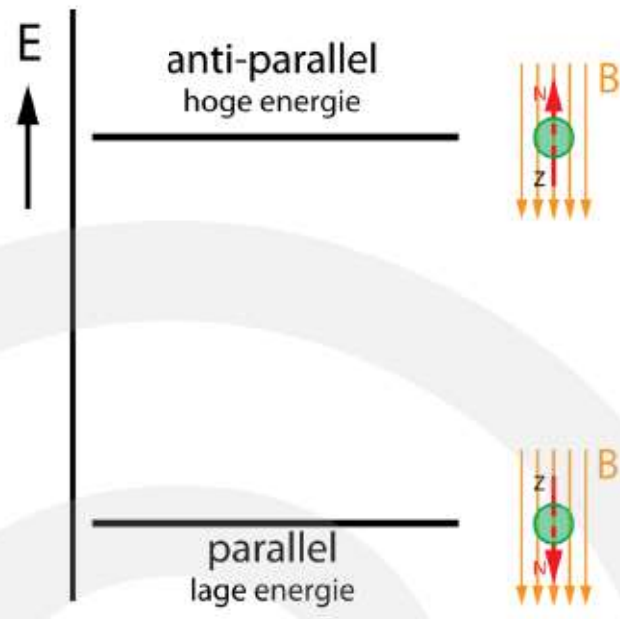


Figuur 49
Een extern magneetveld zorgt ervoor dat protonen dezelfde oriëntatie krijgen.

Door een patiënt in een sterk magnetisch veld te brengen is het niet langer zo dat de protonspins lukraak zijn verdeeld over alle richtingen. Net als gewone magneetjes gaan de protonen zich oriënteren in de richting van het externe magneetveld. Is het externe magneetveld gericht van noord naar zuid, dan zullen er meer protonen met een zuid→noord oriëntatie zijn dan met een noord→zuid oriëntatie. Je lichaam wordt een beetje magnetisch gemaakt, net zoals gebeurt als je een spijker in de buurt van een externe magneet brengt. Het magnetisch maken van een voorwerp door een extern magneetveld heet **magnetische inductie**. Zie figuur 49 en figuur 50.



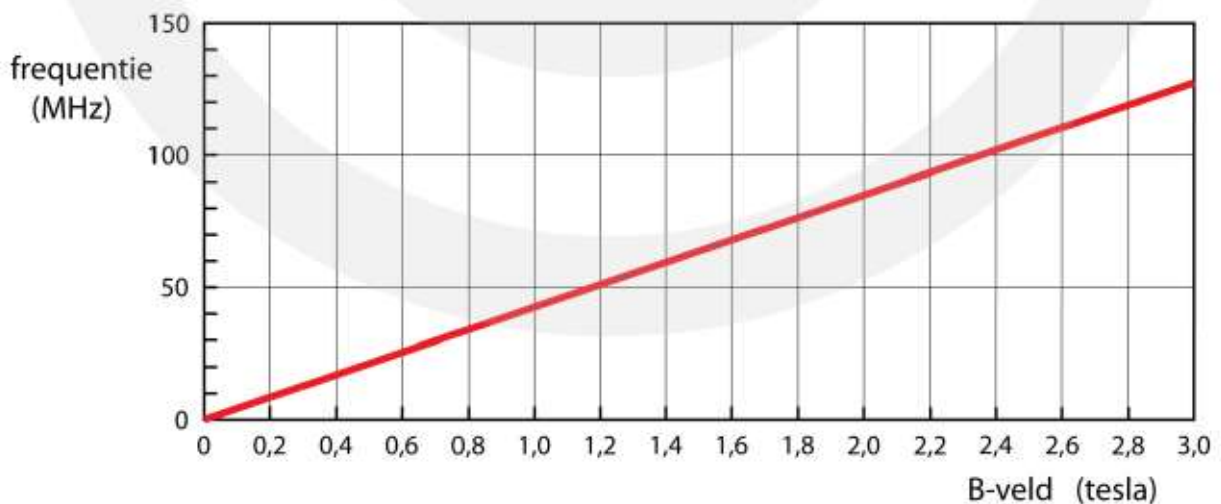
De aanwezigheid van georiënteerde protonen kun je vaststellen met elektromagnetische straling. Stel er is een extern magneetveld (B-veld) waarin zich een georiënteerd proton bevindt. De noordpool van het proton wijst dus naar de zuidpool van de externe magneet. Wil je het proton 180 graden draaien, zodat hij met zijn noordpool naar de noordpool van de externe magneet wijst, dan kost dit energie. Bij magneten stoten twee noordpolen elkaar immers af. De energie die het kost om één proton in een B-veld van één tesla om te keren is $2,821255 \cdot 10^{-26}$ J. Uit de formule $E_{\text{foton}} = h \cdot f$ volgt dat deze energie overeenkomt met een fotonfrequentie van 42,5781 MHz. Deze frequentie is radiostraling in het VHF-gebied. Georiënteerde protonen in een extern magneetveld van 1 tesla kunnen door het absorberen van EM-straling met een frequentie van 42,5781 MHz genoeg energie opnemen om 180 graden te draaien.



Figuur 51
De energie van de
parallele oriëntatie is
lager dan die van de
anti-parallele oriëntatie.

De energie die nodig is om een oriëntatie tegengesteld aan het externe B-veld te krijgen is afhankelijk van de sterkte van het B-veld. Hoe sterker het veld is hoe meer energie het kost om de oriëntatie om te keren. Er is een recht-evenredig verband. Bij een veld van 2 tesla is EM-straling van 2 keer 42,5781 MHz = 85,1562 MHz nodig.

Een MRI-scanner heeft een magneetveld van 1 – 3 tesla. Dit is een erg sterk B-veld. Het magneetveld van de aarde varieert tussen $3 \cdot 10^{-5}$ en $5 \cdot 10^{-5}$ tesla en is dus 100.000 keer zwakker dan het B-veld in een MRI-scanner.



Figuur 52 Er is een recht evenredig verband tussen de magnetische veldsterkte en de frequentie van de EM-straling waarbij de oriëntatie van de protonspins omkeert.

MRI als diagnostische methode

Een MRI-scanner bestaat uit een grote magneet waarin de patiënt wordt geschoven, zie figuur 53. Verder is er een bron die korte pulsen EM-straling van 30 – 300 MHz geeft en een ontvanger die meet hoeveel EM-straling door het lichaam na een vertraging wordt uitgezonden.



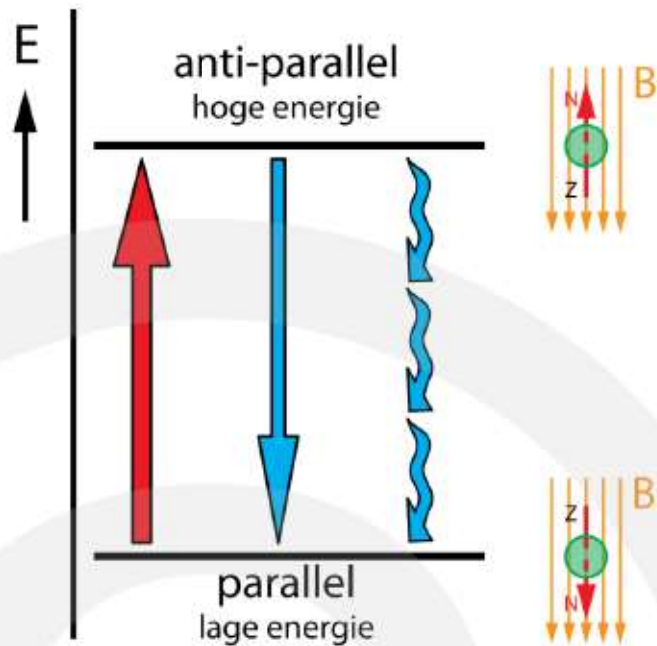
Figuur 53
MRI-scanner.

Om te weten hoeveel protonen er goed zijn georiënteerd geef je een korte puls EM-straling met de juiste frequentie. Deze puls zorgt ervoor dat parallelle spins met lage energie een foton absorberen en omklappen naar de anti-parallelle oriëntatie. Na een poosje vallen het protonen terug naar de grondtoestand, waarbij hij een foton uitzenden.

De frequentie van de EM-straling die wordt geabsorbeerd en uitgezonden moet exact kloppen met het energieverval tussen de parallelle en anti-parallelle oriëntatie. Fotonen met te weinig of te veel energie worden niet geabsorbeerd of uitgezonden. Vandaar dat er sprake is van **resonantie**. De hoeveelheid geabsorbeerde EM-straling is afhankelijk van:

- de sterkte van het externe magneetveld, dit moet kloppen met de EM-frequentie
- het aantal parallel georiënteerde protonen

In figuur 54 worden deze processen weergegeven. De rode pijl omhoog is de absorptie van een puls EM-straling met de juiste frequentie. Hierdoor worden de protonen met parallelle oriëntatie omgeklapt naar een anti-parallelle oriëntatie, waarbij ze een hogere energie krijgen. De protonen blijven maar kort in de hoge-energiestoestand. Ze kunnen terugkeren naar de lage-energiestoestand door een foton van de juiste frequentie uit te zenden (blauwe pijl omlaag) of ze kunnen hun overblijvende energie afstaan aan de omgeving, die daardoor een beetje warmer wordt (drie kronkelige blauwe pijlen omlaag).



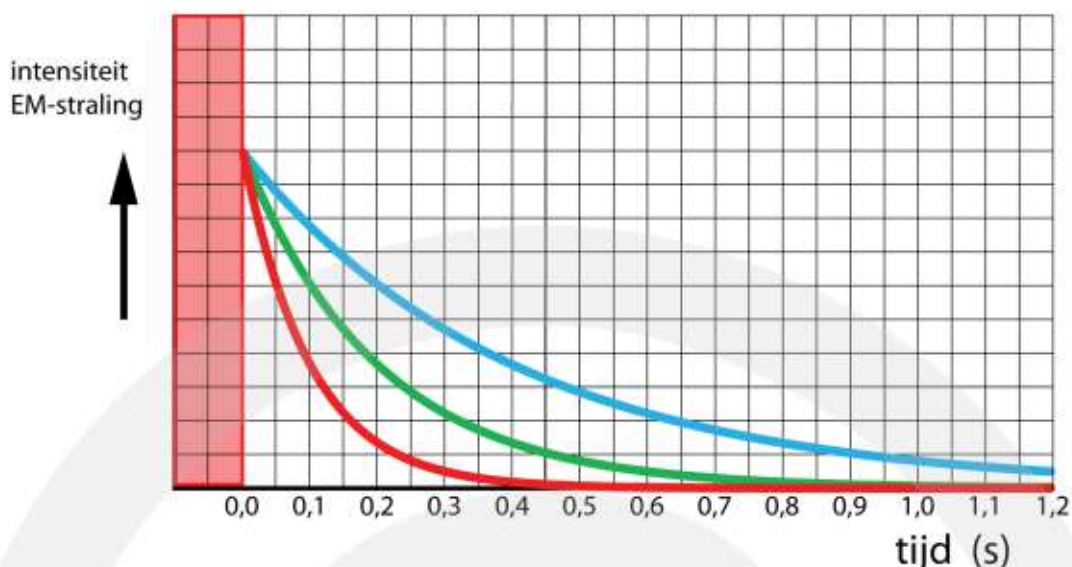
Figuur 54
Absorptie en emissie van EM-straling bij MRI.

Bij een MRI-diagnose wil je vaststellen of er plaatsen in het lichaam zijn waarbij het weefsel anders is dan gewenst, bijvoorbeeld vanwege een kankergezwell. De absorptie van de EM-straling moet dus afhankelijk zijn van de plaats in het lichaam. Dit bereik je door een extern magneetveld te maken met een verloop in sterkte. Over een lengte van 1,0 meter kan het B-veld aan de ene kant 1,45 tesla zijn en aan de andere kant 1,55 tesla. Bij 1,45 tesla hoort $1,45 \cdot 42,5781 = 61,7382$ MHz en bij 1,55 tesla hoort $1,55 \cdot 42,5781 = 65,9961$ MHz. De frequentie waarbij de EM-straling wordt geabsorbeerd geeft informatie over de plaats in het lichaam. De hoeveelheid EM-straling die wordt geabsorbeerd en uitgezonden geeft informatie over het aantal aanwezige georiënteerde protonen op de plaats waar resonantie optreedt.

Door het verloop in de magnetische veldsterkte in een MRI-scanner is de resonantiefrequentie afhankelijk van de plaats.

De T1 tijd

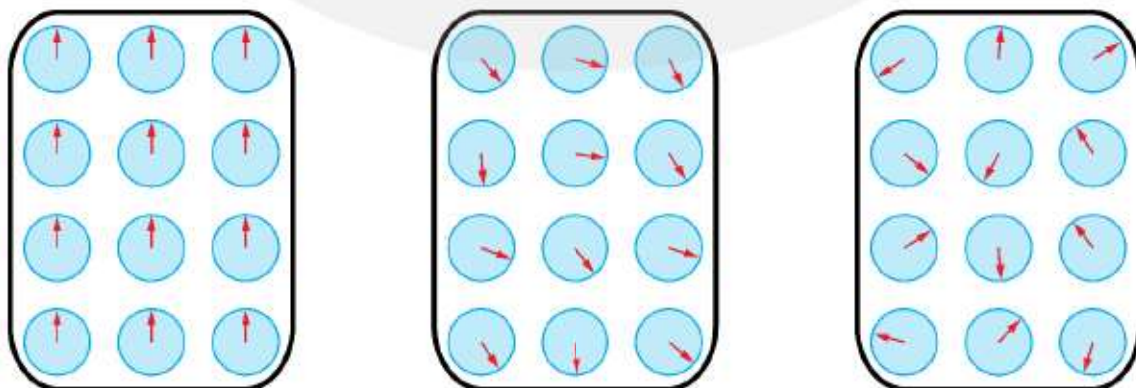
Omdat het MRI-signaal afhankelijk is van het aantal parallel georiënteerde protonen kun je met MRI het verschil zien tussen plaatsen waar de protonconcentratie hoog of laag is. Maar bij MRI meet je niet alleen hoeveel EM-straling er wordt uitgezonden maar ook hoe lang het uitzenden duurt. In figuur 55 zie je eerst de EM-puls die ervoor zorgt dat de oriëntatie van de spins omklapt van parallel naar anti-parallel. Dit is het rode vlak. Vanaf $t=0$ vallen de protonspins terug naar de lage-energiestoestand. De karakteristieke tijd die hiervoor nodig is heet de T1 tijd. Bij de rode grafiek is de T1 tijd klein, bij de groene grafiek gemiddeld en bij de blauwe grafiek groot.



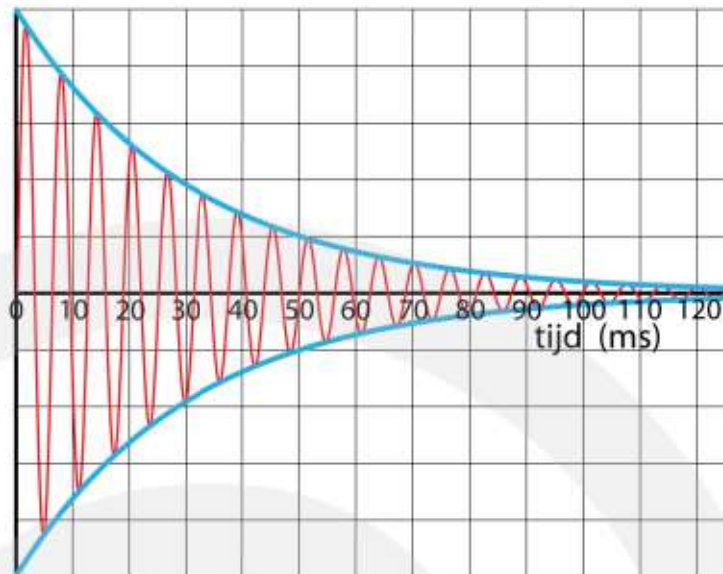
Figuur 55 Met een EM-stalingspuls worden protonspins omgeklapt die na een poosje weer teruggaan naar de lage energietoestand. De karakteristieke tijd om terug te vallen is de T1 tijd.

De T2 tijd

Bij een MRI-scan wordt ook nog een andere tijd gemeten, de T2 tijd. De T2 tijd heeft te maken met het uit fase raken van spins die op hetzelfde moment beginnen rond te draaien. Het idee is als volgt. Nadat de spins door een EM-puls in de hoge energietoestand zijn gebracht wordt een tweede EM-puls gegeven waardoor de spins tegelijkertijd gaan ronddraaien. De oriëntatie gedraagt zich als de wijzer van een klok. Bij de tweede EM-puls starten alle spins in dezelfde positie. Omdat de omgeving van ieder proton een beetje anders is hebben ze niet allemaal dezelfde periode (omlooptijd). De periode wordt bovendien verstoord door fluctuaties, waardoor de spins na enige tijd in hun eigen tempo gaan ronddraaien. Het gegeven dat ze ooit tegelijkertijd zijn begonnen gaat langzaam verloren. De spins verliezen als het ware hun geheugen en de karakteristieke tijd waarin dit geheugenverlies optreedt is de T2 tijd. In figuur 56 wordt dit proces uitgebeeld. Op $t=0$ beginnen alle spins tegelijkertijd met ronddraaien. Na een poosje zijn de spins niet meer helemaal synchroon en na langere tijd is de informatie van het gemeenschappelijke startpunt verloren gegaan.



Figuur 56 Op $t=0$ hebben alle spins dezelfde fase. Langzaam raken ze uit fase en de karakteristieke tijd die hierbij hoort is de T2 tijd.



Figuur 57
Spins raken langzaam uit fase waardoor het signaal met een karakteristieke tijd afneemt

MRI vergeleken met Röntgen

Behalve het voordeel dat bij MRI geen ioniserende straling wordt gebruikt heeft MRI nog andere pluspunten. In vergelijking met een CT-scan levert een MRI-scan een scherper beeld op. Dit komt omdat bij MRI meer verschillende soorten weefsel afzonderlijk zichtbaar gemaakt kunnen worden. Verschillende weefsels geven een verschillend MRI-signaal. In onderstaande tabel zie je typische T1 en T2 tijden voor verschillende soorten weefsel.

Tabel 5 Overzicht van T1 en T2 tijden bij verschillende soorten weefsel.

Weefsel	T1 (ms)	T2 (ms)
water	4000	2000
grijs hersenweefsel	900	90
spier	900	50
lever	500	40
vet	250	70
pees	400	5
proteïnen	250	0,1 – 1
ijs	5000	0,001

Functionele MRI (f-MRI)

Met MRI kun je ook processen in de tijd volgen. Je spreekt dan van **functionele MRI** (f-MRI). Bij functionele MRI wordt snel na elkaar een nieuwe MRI-scan gemaakt. Hierdoor kun je zien of de concentratie van waterstofatomen in de tijd verandert. Maak je bijvoorbeeld een f-MRI scan van het hoofd dan kun je daarmee de hersenactiviteit in kaart brengen. Veel hersenactiviteit gaat samen met veel aanvoer van bloed en dat is zichtbaar in een f-MRI scan.