

TRILLINGEN EN GOLVEN

1 TRILLINGEN

1.1 Wat zijn trillingen?

PROEF

Houd één uiteinde van een lat goed vast op de rand van een tafel. Geef een flinke tik tegen het andere uiteinde.

Waarneming

De lat voert een trillende beweging uit, waarbij ze voortdurend heen en weer beweegt rond het evenwichtspunt.

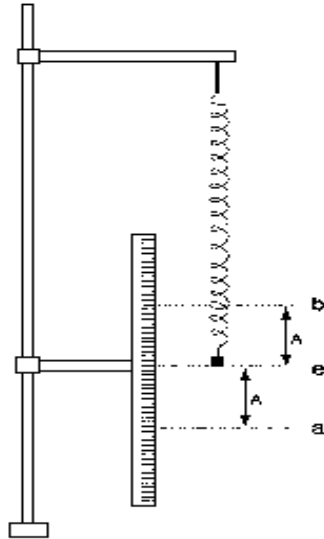
We kunnen talloze voorbeelden van trillingen aanhalen:

- de beweging van de slinger van een klok
- het trillen van een stemvork
- het trillen van je stembanden; je kunt dat heel duidelijk voelen wanneer je met je vingers het strottenhoofd aanraakt terwijl je praat.
- de trilling die ontstaat door over de rand van een kristallen glas te wrijven, waarbij je een zingend geluid hoort
- het trillen van een gespannen elastiekje.

1.2 Trillingen nader bekeken

PROEF

We hangen een spiraalveer aan een statief en bevestigen aan het vrije uiteinde een massa (afhankelijk van de sterkte van de veer).



We monteren een meetlat zoals op de figuur en bepalen nauwkeurig de plaats van de massa in rusttoestand.

We halen nu de massa uit haar evenwichtsstand door ze over een bepaalde afstand naar beneden te trekken. We nemen daarbij nauwkeurig de tijd op die nodig is om 10 keer op en neer te bewegen.

Noot

Let op! Je moet de tijd meten over tien volledig op- en neergaande bewegingen (van a naar b en terug). Stop de chronometer dus niet bij het begin van de tiende beweging, maar wel op het eind ervan.

We zetten alles even op een rijtje.

- Een **cyclus** is één op- en neergaande beweging rond het evenwichtspunt 'e'.
- De **periode** (T) is de tijd die nodig is om één cyclus te doorlopen. Vermits we in ons voorbeeld de tijd opgenomen hebben om 10 cycli te doorlopen, moet je de opgenomen tijd delen door 10.

$$T = \text{opgenomen tijd} / 10$$

De periode wordt uitgedrukt in seconde.

- De **frequentie** duidt het aantal cycli per seconde aan. Stel dat in ons voorbeeld de periode gelijk is aan 0,25 s, dan vinden we dat het aantal cycli per seconde gelijk is aan 4, of $1/T$.

Wanneer we de frequentie voorstellen door f , is de formule:

$$f = 1 / T$$

De frequentie wordt uitgedrukt in een aantal cycli per seconde of hertz (Hz). In ons voorbeeld is $f = 4$ Hz.

De amplitude ten slotte kunnen we gemakkelijk bepalen met behulp van de meetlat: het is de maximale uitwijking ten opzichte van het evenwichtspunt. Het symbool voor amplitude is 'A' en ze wordt uitgedrukt in meter (m).

Enkele andere voorbeelden scheppen nog een duidelijker beeld van periode en frequentie.

- De netspanning in Europa heeft een frequentie van 50 Hz. Dat betekent dat bij wisselstroom de polen 50 maal per seconde omwisselen. Kun je berekenen hoe groot de periode is?

- De frequentie van onze hartslag bedraagt 1 tot 2 Hz. In normale omstandigheden schommelt de periode dan tussen 1 en 0,5 seconde.

De trilling van de massa aan de veer noemen we ook een periodiek verschijnsel: dezelfde toestand herhaalt zich voortdurend.

Na verloop van tijd sterft de beweging uit door de wrijving. Daarom spreken we van een gedempte trilling: de amplitude neemt voortdurend af.

Als er geen wrijving is, sterft de trilling niet uit. De trilling is dan ongedempt; de amplitude verandert niet. In werkelijkheid zijn trillingen altijd gedempt.

Schematisch

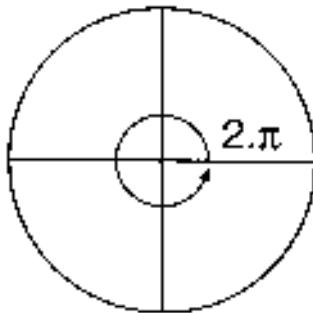
- Bij een periodiek verschijnsel worden in gelijke tijdsintervallen (cyclussen) steeds dezelfde toestanden doorlopen.
- De periode is de tijdsduur van één cyclus. Het symbool is T ; de eenheid is de seconde (s).
- De frequentie is het aantal cyclussen dat per tijdseenheid doorlopen wordt. Het symbool is f , de eenheid is de hertz (Hz).
- De amplitude is de maximale uitwijking uit de evenwichtsstand. Bij een ongedempte trilling blijft de amplitude gelijk; bij een gedempte trilling wordt de amplitude steeds kleiner.

2 WISKUNDIGE BENADERING VAN TRILLINGEN

2.1 Hoekeenheid 'radiaal'

Gewoonlijk meten we hoeken in zestigdelige graden. Het is echter eenvoudiger de 'radiaal' (symbool: rad) als hoekeenheid te gebruiken.

Die definiëren we als volgt. Eenmaal volledig rondgaan in een cirkel komt overeen met een hoek van 2π rad. ($\pi = 3,14159\dots$)



Dus: $360^\circ = 2\pi$ rad

$180^\circ = \pi$ rad

$90^\circ = \pi/2$ rad

$45^\circ = \pi/4$ rad

$1^\circ = \pi/180$ rad

We kunnen het ook omkeren.

π rad = 180°

$1,0$ rad = $180^\circ/\pi = 57^\circ$

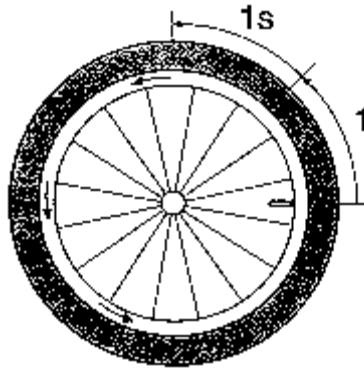
Hoeken omrekenen wordt nu eenvoudig.

$27^\circ = 27 \cdot \pi/180 = 0,47$ rad

$0,35$ rad = $0,35 \cdot 180/\pi = 20^\circ$

2.2 Hoeksnelheid van een cirkelbeweging

Hef je fiets bij het stuur omhoog en geef een duw tegen het voorwiel. Het ventiel voert dan een cirkelbeweging uit.



Als je ervoor zorgt dat het wiel 'regelmatig' draait (zonder versnellen of vertragen) spreken we van een eenparige cirkelbeweging. Veronderstel dat het ventiel elke seconde een hoek van 45° aflegt, dan zeggen we dat de hoeksnelheid van het ventiel $45^\circ/s$ is. De hoeksnelheid stellen we voor door het symbool ω (lees: omega); als eenheid gebruiken we de radiaal per seconde (rad/s). In ons voorbeeld bedraagt de hoeksnelheid: $\omega = \pi/4$ rad/s.

Wanneer is een cirkelvormige beweging eenparig?

Een cirkelvormige beweging is eenparig wanneer in gelijke tijdsintervallen hoe klein ook genomen gelijke cirkelbogen worden afgelegd.

Bij een e.c.b. zijn er twee mogelijkheden om de snelheid te beschrijven.

De **baansnelheid** is de verhouding van de afgelegde cirkelboog Δx tot het tijdsverloop Δt .

$$v = \Delta x / \Delta t \text{ (in m/s)}$$

De **hoeksnelheid** is de verhouding van de beschreven middelpuntshoek $\Delta \alpha$ tot het tijdsverloop Δt .

$$\omega = \Delta \alpha / \Delta t \text{ (in rad/s)}$$

De e.c.b. is een periodiek verschijnsel.

Veronderstel dat T de periode is en dat r de straal van de cirkel is, dan is na één omwenteling:

$$\Delta x = 2\pi r \text{ en } \Delta t = T$$

$$\text{zodat } v = 2\pi r / T$$

$$\text{met } f = 1/T$$

of $v = 2\pi \times f \times r$

daar $\omega = 2\pi/T$ of $\omega = 2\pi f$

Het verband tussen hoeksnelheid en baansnelheid wordt dan door de volgende formule gegeven:

$$v = r \times \omega$$

Om een lichaam een e.c.b. te laten uitvoeren hebben we een kracht nodig. De centripetale kracht is de kracht die de eenparig cirkelvormige beweging doet ontstaan en naar het middelpunt van de cirkel gericht is.

LABPROEF

De resultaten van de proef in het lab tonen aan dat:

$$F = m \times \omega^2 \times r = \frac{m \times v^2}{r}$$

met $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$

2.3 Gevolgen en toepassingen

De centripetale kracht geeft aanleiding tot talrijke toepassingen in de praktijk zoals:

- centrifugeren van neerslag in chemische reacties
- het afromen van melk
- de droogzwierder in de wasserij
- het afplatten van de aarde
- het hellen van banen in de bochten
- het maken van loopings

2.4 Wiskundige uitbreiding

De e.c.b. kan ook met vectoren (of fasoren) beschreven worden.

De plaats van een punt kan met een plaats vector \vec{r} beschreven worden.

Kent men de plaats vector dan kan men ook een snelheidsvector invoeren

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$$

en dan is

$$\vec{v} = \frac{d \vec{r}}{dt} \quad \text{of} \quad v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

De versnellingsvector \vec{a} kan op dezelfde manier ingevoerd worden:

$$\vec{a} = \frac{d \vec{v}}{dt} \quad \text{en} \quad a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Voor $\vec{a} = d \vec{v}/dt$ krijgen we een tangentiële versnelling (bij rechte bewegingen) en een normale versnelling (bij cirkelvormige bewegingen).

Terwijl $a = dv/dt$ alleen de tangentiële component oplevert.

De krachtvector $\vec{F} = m \times \vec{a}$

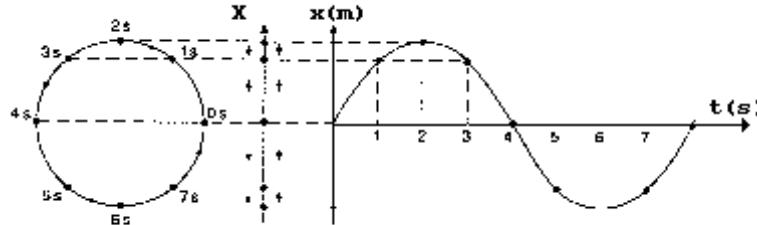
1) is de kracht F evenwijdig met de baan dan is de versnelling a_t , de grootte van de snelheid verandert maar de richting niet

2) is de kracht F loodrecht op de baan dan is de (normaal) versnelling a_n , de richting van de snelheid verandert maar de grootte niet.

3) is de kracht F schuin op de baan dan kunnen we a ontbinden in twee componenten, nl. a_t en a_n .

3 HARMONISCHE TRILLINGEN

3.1 Wat is een harmonische trilling?



Op de figuur zie je een punt dat een eenparige cirkelbeweging uitvoert. De cirkel heeft een straal r .

Op de tijdstippen 0 s, 1 s, 2 s.... projecteren we het punt op de X - rechte. Je ziet meteen dat het geprojecteerde punt op en neer beweegt, terwijl het punt op de cirkel ronddraait. De beweging op de X - rechte noemen we een harmonische trilling. Na 1 s is de uitwijking (x) van de harmonische trilling de afstand 0 s-1 s op de X - rechte, na 2 s is de uitwijking de afstand 0 s-2 s op X, na 3 s is de afstand 0 s-3 s op X, enz.

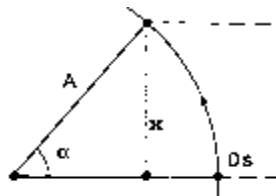
Door een eenvoudige constructie kunnen we nu ook een $x(t)$ -diagram tekenen. Wellicht herken je de vorm van een sinusoïde.

3.2 Formules van de harmonische trilling

Het punt op de cirkel maakt een volledige omwenteling in 8 s. Dat is ook de tijd voor een volledige heen en weer beweging op de X-rechte. De periode van de harmonische trilling is dus: $T = 8$ s.

De hoeksnelheid op de cirkel bedraagt dan: $\omega = \pi/4$ rad/s.

Het getal ω noemen we ook de pulsatie van de trilling.



Wanneer we de pulsatie vermenigvuldigen met de periode verkrijgen we:

$$\omega \times T = \pi/4 \times 8 = 2\pi$$

Die formule geldt voor alle harmonische trillingen en kunnen we ook schrijven als: $\omega = 2\pi/T$

De hoek α die de straal van de cirkel doorloopt neemt elke seconde toe met de waarde ' ω '. Daarom geldt: $\alpha = \omega \times t$.

Uit de lessen goniometrie herinner je je misschien nog wel dat in een rechthoekige driehoek:

$$x = r \times \sin \alpha.$$

De uitwijking van de harmonische trilling is dus:

$$x = r \times \sin \omega t$$

De tabel geeft je een idee van enkele punten op het diagram.

tijd t	0	T/12	T/4	5T/12	T/2	7T/12	3T/4	11T/12	T
fase α	0	30°	90°	150°	180°	210°	270°	330°	360°
elongatie. x	0	r/2	r	r/2	0	-r/2	-r	-r/2	0

3.4 Snelheid en versnelling van een H.T.

De snelheid van het punt P' wordt gegeven door

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{d}{dt} (r \times \sin \omega t) = r \times \frac{d}{dt} (\sin \omega t)$$

$$= r \cdot \cos \omega t \cdot \frac{d}{dt} (\omega t)$$

$$v = r \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

met $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$

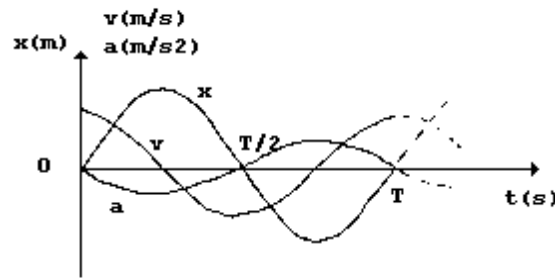
De versnelling van het punt P' bekomt men uit

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} (r \cdot \omega \cdot \cos \omega t) = \omega \cdot r \cdot \frac{d}{dt} (\cos \omega t) = -\omega^2 \cdot r \cdot \sin \omega t$$

$$a = -r \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$$

met $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$

Zetten we x , v en a uit in functie van t dan bekomen we onderstaande figuur.



3.5 Kracht van een H.T.

De wet van Newton $F = m \cdot a$ wordt hier:

$$F = m \cdot (-\omega^2 \cdot r \cdot \sin \omega t)$$

$$F = -m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \omega t$$

$$\text{met } \omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

Het minteken wijst erop dat de kracht F tegengesteld is aan de elongatie $x = r \cdot \sin \omega t$. De trillende massa wordt naar de evenwichtsstand teruggetrokken.

$$\text{Uit } x = r \cdot \sin \omega t \text{ en } F = -m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$$

$$F = -m \cdot \omega^2 \cdot x$$

Stel je nu:

$$k = m \cdot \omega^2 \text{ dan is } F = -k \cdot x$$

met k de krachtconstante of constante van Hooke. (zie krachten) Uit bovenstaande formule blijkt dat F evenredig is met x .

Vermits $k = m \cdot \omega^2$ en $\omega = 2\pi/T$ kan, als k gekend is bv. uit $k = |F/x|$ men de periode berekenen uit:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

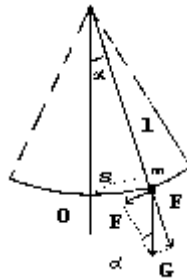
We stellen vast dat de periode en de frequentie onafhankelijk zijn van de amplitude. (wet van isochronisme)

LABPROEVEN

In het lab zullen we dit met proeven aantonen o.a. met een veer en een dobberend lichaam.

3.6 Toepassing: de slinger

LABPROEF



Een wiskundige slinger met massa m beschrijft een harmonische trilling. Is l de lengte van de slinger dan is de elongatie:

$$x = l \cdot \sin \alpha.$$

Op de massa m werkt een kracht $F_g = m \cdot g$ die kan ontbonden worden in twee krachten: $F = F_g \cdot \sin \alpha$ de terugroepende kracht voor niet te grote hoeken en F' die door de spanningskracht van de draad wordt opgegeven.

Uit $F = F_g \cdot \sin \alpha$ en daar $\sin \alpha = x/l$ wordt na substitutie

$$F = F_g \cdot x/l \quad \text{of} \quad F = m \cdot g \cdot x/l$$

hier is $k = m \cdot g/l$ of uit

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \qquad T = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{mg}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Dit is niets anders dan de formule voor de slinger die we in het vierde jaar gezien hebben.

3.7 Energie van een H.T.

Om een veer uit haar evenwichtsstand te trekken moeten we arbeid verrichten. De formule voor de arbeid is $W = F \cdot x$. Vóór we de veer uittrekken is $W = 0$, daarna is $W = F \cdot x$. De gemiddelde arbeid W gegeven wordt door:

$$W = \frac{0 + F \cdot x}{2} = \frac{F \cdot x}{2}$$

Deze arbeid werd nu aan de veer geleverd, zodat haar potentiële energie is toegenomen met het bedrag $E_p = F \cdot x / 2$

met $F = -m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \omega t$ en $x = r \cdot \sin \omega t$

De potentiële energie van de veer wordt gegeven door:

$$E_p = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2 \omega t}{2} \quad (1)$$

Naast potentiële energie bezit de veer ook kinetische energie

$$E_k = m \cdot v^2 / 2$$

en vermits $v = r \cdot \omega \cdot \cos \omega t$ wordt

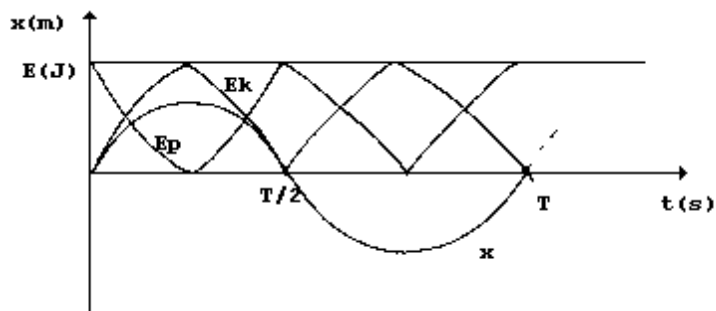
$$E_k = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \omega t}{2} \quad (2)$$

De totale mechanische energie is dan $E = E_p + E_k$

$$E = 1/2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \sin^2 \omega t + 1/2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \omega t$$

$$E = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2}{2}$$

vermits $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$



Besluit

Uit de bovenstaande formule blijkt dat de trillingsenergie onafhankelijk is van de tijd. Er wordt voortdurend potentiële energie in kinetische energie omgezet.

$$E \sim m$$

$$E \sim r^2$$

$$E \sim f^2 \text{ vermits } \omega = 2\pi f$$

In de praktijk zal er echter steeds een demping optreden door wrijvingsverliezen. Men heeft dan gedempte trillingen (de periode T blijft echter ongewijzigd!)

3.8 Vragen en opgaven

- 1 Een H.T. heeft een amplitude van 8,0 cm, een hoeksnelheid van 12 rad/s, waar bevindt de massa van 60 g zich na 1/10 s? Bereken de elongatie, de snelheid, de versnelling en de kracht. Maak een figuur op schaal.
- 2 Een veer wordt 6,0 cm uitgetrokken met een kracht van 0,980 N. Bereken de periode en de frequentie als we de veer belasten met een massa van 200 g.
- 3 Hoe lang moet een slinger zijn die 1 slingering in 4,0 s uitvoert?
- 4 Een proefbuisje met diameter 2,0 cm wordt met loodkorrels gevuld en men duwt het 3,0 cm diep in water. Het maakt een dobberende beweging. Bereken de frequentie en de periode als de massa van de gevulde proefbuis 35 g is.

4 SAMENSTELLEN VAN TRILLINGEN

4.1 Voorstelling van een harmonische trilling

De elongatie van een H.T. is een sinusfunctie. Zijn er meerdere harmonische trillingen dan kunnen deze op eenzelfde diagram worden voorgesteld door

$$x_1 = r_1 \cdot \sin \alpha$$

$$x_2 = r_2 \cdot \sin \beta$$

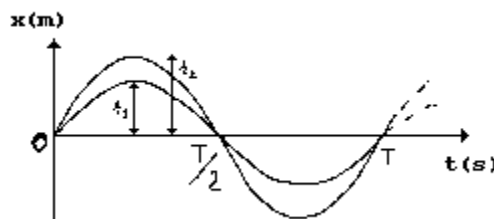
r is de amplitude en x de elongatie

4.2 Twee H.T. in fase

Dit gebeurt als 2 H.T. dezelfde frequentie hebben en t.z.t. nul, maximum positief en maximum negatief worden of als

$$x_1 = r_1 \cdot \sin \alpha$$

$$x_2 = r_2 \cdot \sin \beta \text{ met } \beta = \alpha = \omega t$$



4.3 Twee H.T. met faseverschil

Dit gebeurt als de 2 H.T. wel dezelfde frequentie hebben maar niet t.z.t. nul, maximum positief en maximum negatief zijn.

$$\text{of } x_1 = r_1 \cdot \sin \alpha$$

$$x_2 = r_2 \cdot \sin \beta \text{ met } \alpha = \omega t$$

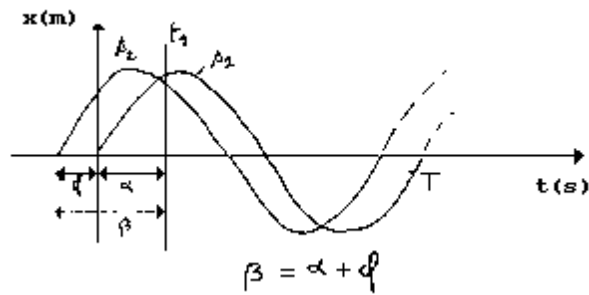
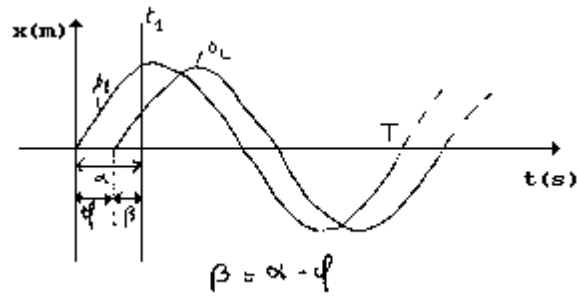
$$\beta = \omega t - \varphi \text{ met } \varphi \text{ het faseverschil}$$

Een minteken wijst op na-ijlen (x_1 begint en x_2 pas later)

$$\beta = \alpha - \varphi$$

Een plusteken wijst op voorijlen (als x_1 begint is x_2 al begonnen)

$$\beta = \alpha + \varphi$$



Bijzondere gevallen

$\varphi = \pi/2$ of $3\pi/2$ dan zijn de trillingen in kwadratuur

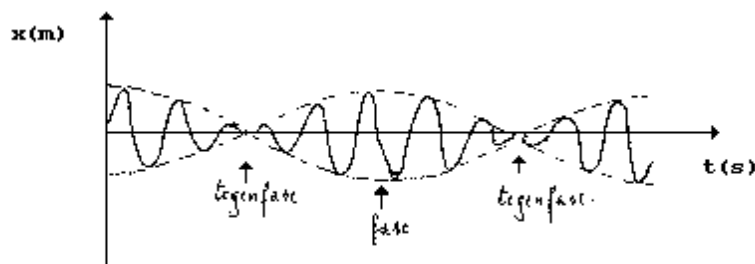
$\varphi = \pi$ dan zijn de trillingen in tegenfase

$\varphi = 0$ dan zijn de trillingen in fase

Bij twee trillingen met verschillende frequentie bekomt men figuren van Lissajous.

4.4 Zwevingen

Stelt men 2 H.T. samen waarvan de frequenties weinig verschillen dan bekomt men zwevingen. Dit zijn H.T. waarvan de amplitude periodiek verandert, afwisselend versterkt en verzwakt.



De computersimulatie geeft een duidelijk beeld van zwevingen.

5 LOPENDE GOLVEN

5.1 Trillingen die zich voortbewegen

Werpen we een steen in het water dan ontstaan cirkelvormige golven. De hypothese van Huygens zegt dat van een golffront F op een bepaald ogenblik, elk punt van F zich als nieuwe trillingsbron voordoet zodat de samenstelling van al deze elementaire golffronten aanleiding geven tot een nieuw golffront F'.

De trillingsenergie die door een bron aan het midden wordt doorgegeven verplaatst zich volgens rechte lijnen die we golfstralen noemen. Deze snijden de golffronten loodrecht. Een trilling of evenwichtsverstoring die zich voortbeweegt is een lopende golf. Bij een golfbeweging heeft men energieoverdracht zonder massatransport.

We veronderstellen dat er geen energie verloren gaat zodat de amplitude steeds gelijk blijft, want anders heeft men een gedempte golf.

5.2 Soorten golven

a Volgens hun dimensie

Het uiteinde van een rubberkoord wordt heen en weer bewogen. Er ontstaat een golflijn die zich langs de koord voortbeweegt. Een steen in het water werpen doet eveneens golven ontstaan, maar nu bewegen de golven zich over een oppervlakte. Bij een ontploffing heeft men een voortbeweging hebben van geluidsgolven in de ruimte. De golffronten, dit zijn alle punten die op hetzelfde ogenblik trillen en in fase blijven, kunnen rechtlijnig, cirkelvormig of sferisch zijn. Een golffront kan zich dus 1, 2, of 3-dimensionaal voortbewegen.

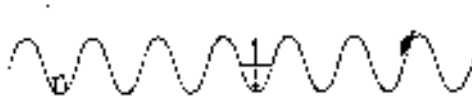
b Volgens hun midden

Om zich te kunnen voortbewegen hebben we een medium nodig, dit kan zowel een vaste stof, een vloeistof of een gas zijn. Dergelijke golven noemen we mechanische golven.

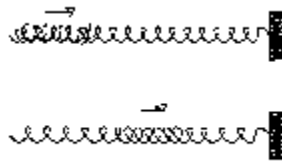
Trillingen die zich ook in het luchtledige voortbewegen noemen we elektromagnetische golven.

c Volgens hun trilrichting

- Plaatst men een kurk op het wateroppervlak, dan ziet men de kurk op en neer dobberen, de golf verplaatst zich horizontaal, de kurk zelf ondervindt een H.T. en verplaatst zich verticaal. De trillingen bewegen zich voort in een richting die loodrecht staat op de trillingen. Men spreekt over een transversale golf.



- Spant men een schroefveer tussen twee vaste punten en knijpt men enkele wikkelingen samen, dan ontstaat eveneens een zich voortbewegende trilling, de voortbeweging geschiedt in de richting van de trilling. Men spreekt over een longitudinale golf.



Longitudinale golven kunnen we ook visualiseren. In een stevig stuk karton knip je een gleuf van 11 cm op 2 mm. Beweeg dan de gleuf van boven naar onder op de onderstaande figuur. Bekijk het golfpatroon dat ontstaat.

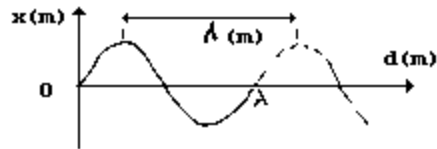


5.3 Golflengte - snelheid - bewegingsvergelijking

Een lopende golf beweegt zich voort volgens een sinusfunctie. De afstand tussen twee punten die in fase trillen noemt men de golflengte λ in m, dit gebeurt na 1 periode T , zodat de voortbewegingssnelheid of snelheid v van de golf gegeven wordt door:

$$v = \lambda/T \text{ of } v = \lambda \cdot f$$

vermits $f = 1/T$ met f de frequentie in Hz



Bij een transversale golf spreekt men van een golfberg en een golfdal. Bij een longitudinale golf heeft men het over een verdunning en een verdichting.

Hoe kunnen we nu de bewegingsvergelijking van een golf vinden?

Een punt P op een afstand d van de bron zal pas later trillen, te weten na een tijdsverloop t' gegeven door:

$$t' = d/v = d \cdot T / \lambda$$

Veronderstel dat $x_0 = r \cdot \sin \omega t$ de trilling op het ogenblik t is. De trilling van een punt P dat een tijdstip t' later trilt is dan:

$$x = r \cdot \sin \omega(t - t')$$

$$x = r \cdot \sin \omega(t - d/v) = r \cdot \sin 2\pi/T(t - d/v)$$

$$x = r \cdot \sin 2\pi(t/T - d/\lambda)$$

r de amplitude in m

t de tijd in s

T de periode in s

d de afstand van het punt P tot het midden in m

λ de golflengte in m

5.4 Absorptie, terugkaatsing en breking van golffronten

1 Golven kunnen geabsorbeerd worden

Absorptie doet zich voor als een golf door een lichaam opgeslorpt wordt. Het lichaam dat de golf absorbeert krijgt de energie van de golf. Daardoor zal de temperatuur van het lichaam toenemen.

PROEF

Laat een wekker rinkelen in een isomoverpakking

Waarneming

Het gerinkel is moeilijker te horen

Besluit

Wanneer geluidsgolven invallen op poreuze en energie absorberende stoffen worden ze grotendeels geabsorbeerd.

Voorbeelden

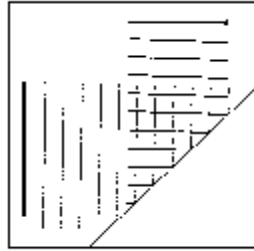
- bomen en struiken langs een autoweg absorberen het geluid, zodat het minder storend wordt voor omliggende woningen.
- in concertzalen worden de wanden onder andere bedekt met geluidsabsorberend behang of wandtapijt.
- lichtgolven die invallen op een zwart oppervlak worden beter geabsorbeerd. De temperatuur van het zwart oppervlak zal stijgen.

2 Golven kunnen teruggekaatst worden

Terugkaatsing doet zich voor als een golf op een lichaam botst en onder een andere hoek opnieuw tevoorschijn komt. De invalshoek i is de scherpe hoek tussen het invallend golffront en de hindernis. De terugkaatsingshoek t is de hoek tussen het teruggekaatst golffront en de hindernis. Bij terugkaatsing van golffronten vinden we dat de invalshoek gelijk is aan de terugkaatsingshoek of $i = t$.

Proef

In de rimpeltank monteren we een wand in een hoek van 45° ten opzichte van een lijnvormige trillingsbron.



Waarneming

De invallende golven worden teruggekaatst onder een hoek van 90° . Dit betekent dat de invalshoek (45°) gelijk is aan de terugkaatsingshoek (45°)

Toepassing

Tijdens de tweede wereldoorlog waren de torpedojagers uitgerust met een sonarsysteem om de ligging van ondergedoken duikboten te bepalen. De torpedojager zond ultrageluidsgolven uit die op de metalen wand van de duikboot teruggekaatst werden. Aan de hand van die teruggekaatste golven kon de ligging van de vijandelijke duikboot gedetecteerd worden.

3 Golven kunnen breking vertonen

Breking doet zich voor als de golf van een midden naar een ander midden overgaat. Bij breking van golfvronten is de verhouding van de sinus van de invalshoek tot de sinus van de brekingshoek gelijk aan de verhouding van de overeenkomstige snelheden.

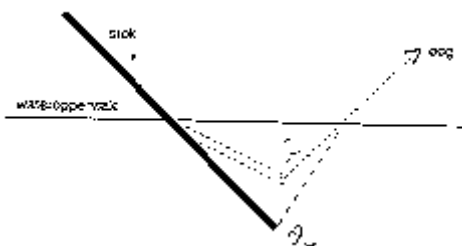
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\text{met } v = \lambda \cdot f$$

Vroeger was $\sin i / \sin r = n_2 / n_1$: zie verder

PROEF

We nemen een bak met water gevuld en brengen hierin een stok die we schuin inbrengen.



Waarneming

De stok lijkt gebroken

Besluit

Wanneer je naar een voorwerp kijkt in het water, dan lijkt het minder diep te zitten dan in werkelijkheid. Wanneer golven overgaan van één middenstof naar een andere, dan wordt de voortplantingsrichting van de golf gewijzigd. Er treedt breking op.

Voorbeeld

In ondiep water is de voortplantingssnelheid van watergolven kleiner dan in diep water. Daardoor worden watergolven gebroken bij de overgang van diep naar ondiep water. De voortplantingsrichting verandert voortdurend tot ze tenslotte loodrecht op de strandlijn komt te staan. Dit geeft meteen ook de verklaring voor het feit dat golffronten altijd evenwijdig op het strand afkomen, ongeacht de windrichting.

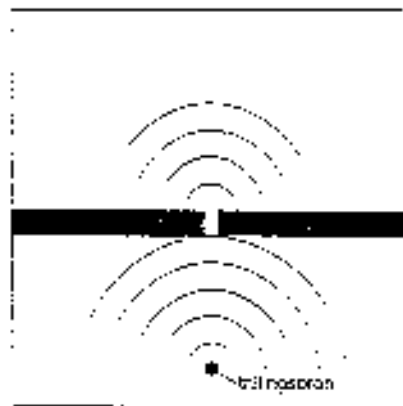
5.5 Buiging of diffractie van golven

Jullie weten allemaal dat geluidsgolven zich rechtlijnig voortplanten in alle richtingen. Maar toch weten jullie ook dat je bij voorbeeld achter een muurtje of een glazen loket kan horen wat er gezegd wordt.

Blijkbaar laten golven zich niet kooien door een hindernis, maar buigen ze er gewoon omheen. Ook dit kunnen we illustreren met tal van proeven.

PROEF

In een rimpeltank zetten we twee plexiplaten op korte afstand van elkaar (zie tekening). Daarna laten we een puntvormige trillingsbron relatief snel (hoge frequentie) trillen.

Waarneming

Achter de opening ontstaat opnieuw een golfpatroon, dat identiek is aan het patroon voor het obstakel.

Verklaring

Een trilling plant zich voort via golven. Elk punt waar de golf voorbijkomt, voert dus op zijn beurt een trilling uit, die analoog is als die van de oorspronkelijke trillingsbron. Als zo'n golf in de buurt van de opening komt worden een groot deel van de trillingen tegengehouden door de 'muur'. Een deel van de trillingen wordt echter onbelemmerd door de opening gelaten en kam daar, fungeren als nieuwe trillingsbron.

Besluit

Elk deel van een golf kan als nieuwe trillingsbron functioneren

Dit principe staat bekend als het beginsel van Huygens.

Dit fenomeen is er de oorzaak van dat golven als het ware rond een hindernis kunnen buigen. Immers: wanneer een golf invalt op een hindernis kunnen de punten naast de hindernis functioneren als nieuwe puntvormige trillingsbron.



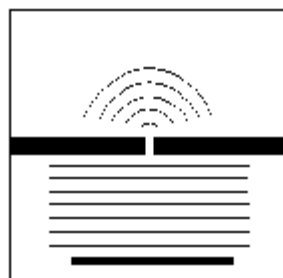
Je begrijpt meteen dat bij stormweer beschutting zoeken achter een rots in de branding, uitermate gevaarlijk is.

Immers: zodra de golven de rots bereikt hebben kunnen ze er omheen buigen.

Hierdoor botsen de twee golven op elkaar, zodat er golftoppen met dubbel zo grote amplitude kunnen gevormd worden (zie figuur).

PROEF

We herhalen de voorgaande proef, maar nu werken we met een staafvormige trillingsbron.



Waarneming

Achter de opening ontstaat een golfpatroon zoals bij een puntvormige trillingsbron.

Verklaring

Een staafvormige trillingsbron kan beschouwd worden als een opeenvolging van puntvormige trillingsbronnen. Het resultaat van al die, dicht opeengepakte, uitdijende cirkels is een lijnvormige golf. Wanneer zo'n lijnvormig golffront echter invalt op de opening is het net of er een puntvormige trillingsbron werkzaam is.

PROEF

We wijzigen de opstelling van de vorige proef door de verschuifbare wanden een beetje uit elkaar te bewegen.

We laten de trillingsbron trillen met een vrij hoge frequentie.



Waarneming

Vorbij de hindernis wordt een lijnvormig golfpatroon gevormd, waarbij de randen weinig afgebogen zijn.

Verklaring

Door de opening te vergroten, kunnen nu meer trilling punten terzelfdertijd voorbij de opening passeren, zodat de situatie voorbij de opening lijkt op een staafvormige trillingsbron.

PROEF

Tot slot voeren we de proef nog eens uit, maar we verkleinen de opening en verlagen de trilfrequentie. Hierdoor ontstaan er dus golven met een grotere golflengte.



Waarneming

Na de hindernis ontstaat weer hetzelfde patroon als bij een puntvormige lichtbron. Aan de randen treedt duidelijk buiging op.

Besluit

Uit deze proeven reeks kunnen we besluiten dat de sterkte van de buiging en de aard van het buigingspatroon bepaald wordt door de verhouding van de grootte van de opening tot de golflengte.

Op die manier kunnen we vier verschillende situaties schetsen.

- Een kleine golflengte en kleine opening veroorzaken een sterke buiging.
- De combinatie van een grote golflengte en een kleine opening geeft aanleiding tot een sterke buiging.
- Een kleine golflengte en grote opening geven aanleiding tot een zwakke buiging.
- Wanneer een grote golflengte gecombineerd wordt met een grote opening ontstaat opnieuw een zwakke buiging.

Kun je nu verklaren waarom het spreekgedeelte in de glazen wand van een loket dikwijls bestaat uit een veelvuldig doorboorde glazen plaat?

Voorbeelden

- surfen gaat gemakkelijkst aan de achterkant van een eiland omdat daar de golven het grootst zijn.
- diffractieverschijnselen treden op bij geluidsgolven. Je kan een persoon in de naburige kamer horen spreken door de openstaande deur of zelfs door het sleutelgat.
- bij lichtgolven moet de opening zeer klein zijn om het diffractieverschijnsel waar te nemen.

5.6 Interferentie van golven

PROEF

We monteren een dubbele trillingsbron op de rimpeltank. De trillingsbron wordt aan het trillen gebracht met een vrij hoge frequentie.

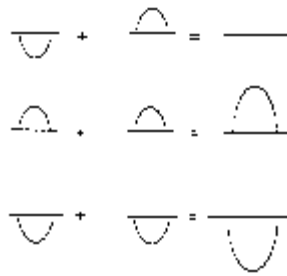
Waarneming

Er tekent zich een patroon van rechte lijnen af over de beide golfpatronen.



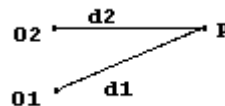
Verklaring

Als twee golven op elkaar inwerken, kunnen ze elkaar ofwel versterken ofwel uitdoven. Maximale versterking treedt op als de twee golftoppen of golfdalen samenvallen (lichte lijnen). Als een golftop en een golfdal samenvallen doven ze elkaar uit (donkere lijnen). Op die manier ontstaat een lijnenpatroon door een opeenvolging van versterken en uitdoven. We noemen het een interferentiepatroon.



De verschijnselen die optreden als twee golfbewegingen t.z.t. eenzelfde gebied in eenzelfde midden bestrijken noemt men interferentie.

Veronderstel twee trillingsbronnen O_1 en O_2 die in fase zijn. Hun trillingstoestand wordt door $x_0 = r \cdot \sin \omega t$ voorgesteld.



Beschouwt men een punt P op resp. d_1 en d_2 van O_1 en O_2 gelegen dan zijn de trillingstoestanden van deze golven:

$$x_1 = r \cdot \sin 2\pi (t/T - d_1/\lambda)$$

$$x_2 = r \cdot \sin 2\pi (t/T - d_2/\lambda)$$

De resultante van deze 2 trillingstoestanden in P is dan

$$x = x_1 + x_2 = r \cdot \sin 2\pi (t/T - d_1/\lambda) + r \cdot \sin 2\pi (t/T - d_2/\lambda)$$

Uit de formules van Simpson in de goniometrie

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \cdot \sin [(\alpha + \beta)/2] \cdot \cos [(\alpha - \beta)/2]$$

vinden we na berekening

$$x = 2 \cdot r \cdot \cos \frac{\pi(d_2 - d_1)}{\lambda} \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d_1 + d_2}{2\lambda} \right) (*)$$

De uitdrukking (*) is van de vorm $x = A \cdot \sin B$ met A een constante en B een tijdsfunctie, hetgeen betekent dat in het punt P weer een H.T. optreedt.

De amplitude is $A = 2 \cdot r \cdot \cos [\pi(d_2 - d_1)/\lambda]$

Is de amplitude $A = 0$ dan is er een **knoop** (er is rust op die plaats).
Is de amplitude A maximaal dan is er een **buik** (de 2 golven trillen in fase).

1. We berekenen de plaatsen waar er een knoop is. We vinden een knoop als: $\cos [\pi(d_2 - d_1)/\lambda] = 0$

of $\pi(d_2 - d_1)/\lambda = (2n + 1) \cdot \pi/2$ met $n =$ geheel getal

$$d_2 - d_1 = (2n + 1)\lambda/2$$

Bij alle oneven halve golflengten is er een knoop.

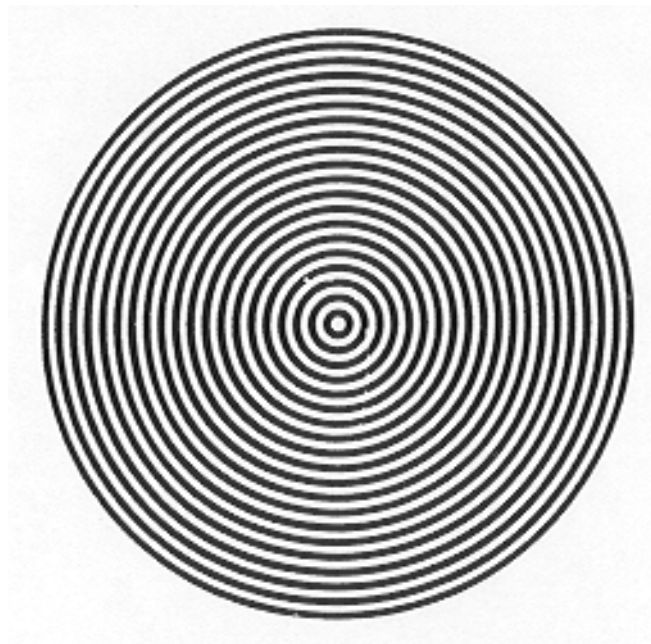
2. We berekenen de plaatsen waar er een buik is. We vinden een buik als: $\cos [\pi(d_2 - d_1)/\lambda] = \pm 1$

of $\pi(d_2 - d_1)/\lambda = n \cdot \pi$ met $n =$ geheel getal

$$d_2 - d_1 = n \cdot \lambda$$

Bij elke gehele golflengte ontstaat een buik.

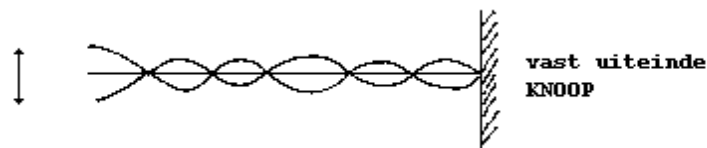
Onderstaande figuur toont duidelijk het interferentieverschijnsel aan als je van de figuur een kopie neemt op een transparant. Met deze transparant heb je dan de mogelijkheid om het interferentieverschijnsel waar te nemen.



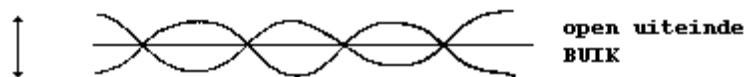
6 STAANDE GOLVEN

6.1 Ontstaan van staande golven

Houden we een rubberkoord aan een uiteinde stevig vast terwijl we met het andere uiteinde op en neer bewegen dan ontstaan staande golven zoals op onderstaande figuur. De punten die in rust blijven noemen we knopen, de punten met maximale amplitude noemen we buiken. Dit beeld krijg je echter alleen maar bij wel bepaalde frequenties, de eigenfrequentie en die is afhankelijk van het gebruikte touw.



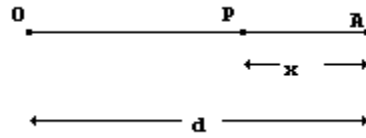
Houden we het andere uiteinde niet vast, dan ontstaan eveneens staande golven zoals op onderstaande figuur.



Besluiten

- Staande golven ontstaan door de terugkaatsing van een lopende golf. Aan een vast uiteinde keert de storing terug in tegenfase. Er ontstaat een knoop aan het vast uiteinde. Aan een vrij uiteinde keert de storing terug in fase. Er ontstaat een buik aan het vrij uiteinde.
- Bij lopende golven trillen alle punten met dezelfde amplitude doch met een verschillende fase.
- Bij staande golven hebben de trillende punten tussen 2 opeenvolgende knopen gelegen verschillende amplituden doch ze trillen in fase. Aan weerszijden van een knoop trillen ze in tegenfase.

6.2 Bewegingsvergelijking van een staande golf



Veronderstel dat de trillingsbron O zich op een afstand d van een vast uiteinde bevindt en een punt P op een afstand x van dit uiteinde. De trillingsbron is $x_0 = r \cdot \sin \omega t$ en dan zal de heengaande golf het punt P bereiken na

$$dt_1 = (d - x)/v$$

$$\text{de toestand in P is dan } x_1 = r \cdot \sin 2\pi[t/T - (d - x)/\lambda]$$

De teruggekaatste golf bereikt P na

$$dt_2 = (d + x)/v$$

en heeft een faseverschil van 180° ondergaan

$$\text{de toestand in P is dan } x_2 = - r \cdot \sin 2\pi[t/T - (d + x)/\lambda]$$

Door interferentie krijgen we dan $x_t = x_1 + x_2$

Passen we de formule van Simpson toe:

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cdot \sin (\alpha - \beta)/2 \cdot \cos (\alpha + \beta)/2$$

dan krijgen we na berekening:

$$x_t = 2 \cdot r \cdot \sin 2\pi \cdot x/\lambda \cdot \cos 2\pi(t/T - d/\lambda)$$

waarbij we weten dat $\cos x = \sin (\pi/2 + x)$!!

Dit geeft dan onderstaande bewegingsvergelijking voor een staande golf:

$$x_t = 2r \sin 2\pi x/\lambda \cdot \sin 2\pi(t/T - d/\lambda + 1/4)$$

De amplitude is hier $A = 2 \cdot r \cdot \sin 2\pi x/\lambda$ met A afhankelijk van x , er zijn dus verschillende amplitudes!!

We zoeken weer de plaats van knopen en buiken.

$$\text{Is } A = 0 \text{ dit is als } 2\pi \cdot x/\lambda = n\pi$$

$$x = n\lambda/2$$

We hebben **knopen** vanaf het vast uiteinde op halve golflengte.

$$\text{Is } A = \text{maximum dit is als } 2\pi \cdot x/\lambda = (2n + 1)\pi/2$$

$$x = (2n + 1)\lambda/4$$

We hebben **buiken** die steeds in het midden tussen twee knopen liggen.

De fase $2\pi(t/T - d/\lambda + 1/4)$ is onafhankelijk van x , alle punten trillen dus in fase of in tegenfase!

6.3 Eigenfrequentie

We weten al dat in een begrensd elastisch midden slechts wel bepaalde frequenties optreden die afhankelijk zijn van de afmetingen in de elasticiteit van het voorwerp. Men noemt ze eigenfrequentie.

De eigenfrequenties van een aan beide uiteinden vastgemaakte koord zijn veelvoud van de grondfrequentie, die afhankelijk is van de spanning in de koord, de lengte en de massa van de koord.

- Zijn er twee vaste uiteinden of twee vrije uiteinden dan:

$$l = n \cdot \lambda/2$$

Daar nu $f = v/\lambda$ is $f = n \cdot v/2l$

Voor een bepaalde spanning en massa is v constant zodat

$$f_1 = v/2l$$

$$f_n = n \cdot f_1$$

- Is er een vast en een vrij uiteinde dan vinden we:

$$l = n \cdot \lambda/4$$

Weer is $f = v/\lambda$ en $f = n \cdot v/4l$

Voor een bepaalde spanning en massa is v constant zodat

$$f_1 = v/4l$$

$$f_n = n \cdot f_1$$

6.4 Resonantie

Het verschijnsel waarbij een voorwerp aan het trillen gaat, onder invloed van het trillen van een ander voorwerp met dezelfde eigenfrequentie noemt men resonantie.

Voorbeelden

- Bij een bepaalde snelheid trillen sommige motoronderdelen mee met de motor.
- Een groep soldaten mag niet over een brug marcheren uit vrees dat hun stapfrequentie in resonantie zou komen met de frequentie van de pijlers van de brug.
- Kristallen en porseleinen voorwerpen springen soms als ze door een gelijke geluidsfrequentie getroffen worden.

6.5 Vragen en opgaven

1 Men doet staande golven ontstaan in een rimpeltank van 1,0 m lengte. De golflengte van de gebruikte vlakke golven bedraagt 4,0 cm. Hoeveel knopen komen in de tank voor?

2 Vanuit een vuurtoren ziet men de golven komen aanrollen met een snelheid van 6,0 m/s. Er is een afstand van 6,6 m tussen twee opeenvolgende golftoppen. Bereken de frequentie en de periode van de golfbeweging.

3 Een lopende golf heeft een voortbewegingssnelheid van 2.4 m/s, een frequentie van 4,0 Hz en een amplitude van 2,0 cm.

1) Hoeveel is een punt P in fase achter op het beginpunt A als de afstand $AP = 0,50$ m is?

2) Welke fase heeft P op het ogenblik dat A de fase nul heeft?

3) Hoe groot is op dat ogenblik de elongatie van P?

4 Een transversale golf met amplitude 10 cm en frequentie 0.25 Hz beweegt zich met een snelheid van 3,0 m/s.

1) Hoe groot is de golflengte?

2) Na welke tijd begint een deeltje dat zich op 120 m van de bron bevindt te trillen?

3) Welke elongatie bezit dit deeltje 50 s nadat de bron golven begon uit te zenden?

GELUIDSGOLVEN

1 Trillingsbronnen

Dat trillingen geluid kunnen veroorzaken kunnen we met een aantal proeven aantonen.

Proef Het zingende wijnglas

Je neemt een wijnglas op voet (het glas moet zo fijn mogelijk zijn). Maak de rand van het glas nat en zet het op tafel. Hou de voet vast met de linkerhand en wrijf met de middenvinger van de rechterhand in een draaiende beweging over de rand van het glas.



Waarneming

Je hoort een heldere, hoge toon: het glas zingt.

Proef

Vul het glas gedeeltelijk met water en herhaal de proef.

Waarneming

De toonhoogte is veranderd. Wordt hij hoger of lager? Probeer het eens.

Proef De trillende stemvork

Een stemvork wordt gebruikt om 'de juiste toon' te laten horen. Meestal wordt die stemvork vastgezet in een opening bovenaan een houten kistje: de klankkast. Met een rubberen hamertje geven we een korte tik tegen een van de benen van de stemvork, die we losgemaakt hebben van de klankkast.

Waarneming

Eerst hoor je een heldere toon, die erg zwak klinkt. Op de klankkast klinkt de toon veel luider.

Proef Het waterorgel

We blazen over de rand van een glazen fles. Daarna vullen we de fles gedeeltelijk met water en herhalen de proef.

Waarneming

Je hoort een aanhoudende, ijle toon. Wanneer de fles gevuld is met water hoor je een andere toon.

Verklaring

Door het blazen begint de lucht binnen de fles te trillen. Op die manier kan je zeven gelijke flessen met verschillende hoeveelheden water vullen om het bekende do, re, mi... te maken. De toonhoogte hangt af van de hoeveelheid lucht die je aan het trillen brengt. Dus hoe meer lucht in de fles, hoe... Probeer het zelf eens uit.

We kunnen de trillingen niet alleen laten horen, we kunnen ze ook laten zien!

Proef

Hang een pingpongballetje aan een fijn draadje. Hou dan de trillende stemvork tegen het balletje.

Waarneming

Het balletje beweegt heen en weer.

Proef

Hou een trillende stemvork tegen een wateroppervlak.

Waarneming

Waterdruppels spatten aan alle kanten weg. De trilling houdt zeer snel op.

Ook in het dagelijks leven kunnen we tal van trillingsbronnen opsommen die geluid veroorzaken.

- Tijdens het praten kan je met je vingers voelen dat je stembanden trillen.
- Voel eens aan de luidsprekers van de radio als je hem keihard opendraait.
- Bij stormachtig weer "zingen" de draden van een hoogspanningsleiding.
- Een daverend applaus veroorzaakt een 'massatrilling' van de lucht.
- Bij het inschakelen van een zaagmachine worden hevige trillingen veroorzaakt.

Bij de laatste twee voorbeelden zijn de trillingen totaal ordeloos en chaotisch. We nemen ze waar als lawaai. Zachter klinkend, aanhoudend lawaai noemen we ruis. Je hoort het als je een radio of TV afstemt op een kanaal waar geen zender gebruik van maakt.

Bij de eerste voorbeelden zijn de trillingen regelmatig. Daarom nemen we ze waar als een toon, muziek, of een letter.

2 Geluid beweegt door een middenstof

2.1 Geluid kan niet zonder middenstof

Proef

We hangen een zoemer los op aan zijn toevoerdraden en plaatsen het onder de glazen klok van een vacuümpomp. We schakelen eerst de zoemer in zuigen daarna vacuüm onder de klok.

Waarneming

Naargelang de lucht wordt weggezogen, sterft het geluid uit.

Besluit

Trillingen moeten zich voortbewegen via een middenstof. Een trilling die zich voortbeweegt door een middenstof noemen we een golf.

2.2 Middenstoffen

Geluidstrillingen verplaatsen zich meestal door de lucht. De middenstof kan echter ook een ander **gas** zijn. Duikers die op grote diepte moeten werken nemen geen zuurstofgas - stikstofgas mengsel mee, maar een mengsel van zuurstofgas en helium. Dit doen ze om de gevreesde 'caissonziekte' te vermijden. Ook in een gasmengsel van zuurstof en helium kan geluid zich verplaatsen. Je kent dan vast de 'Donald Duck achtige' stemvorming wanneer je spreekt in zo'n ademlucht.

Geluidstrillingen kunnen zich ook verplaatsen doorheen **vloeistoffen**. Onder water in een zwembad bijvoorbeeld hoor je een heleboel geluiden die uit de omgeving afkomstig zijn. Ook sonar, echografie en niersteenverbrijzelaars werken met speciale geluidsgolven die door een vloeistof gestuurd worden. Die golven worden bovendien teruggekaatst naar het toestel dat uitgezonden heeft.

Geluidstrillingen kunnen ook door **vaste stoffen** bewegen. Leg je oor maar eens op een metalen balk waarop iemand een tik geeft.

Dat geluid zich door al die middenstoffen kan verplaatsen, kunnen we mooi illustreren met een aantal voorbeelden.

- Wil je een primitieve telefoon maken? Je hebt er alleen een stuk koperdraad en twee lege drankblikken voor nodig. Haal de deksels van de blikken; maak een fijn gaatje in elke bodem en verbind de beide blikjes (door de gaatjes) met de koperdraad. Terwijl de ene persoon in het blik praat, kan de andere in het andere blik de stem opvangen. Er is echter nog een voorwaarde: de koperdraad moet goed gespannen blijven.

- Tijdens popconcerten voelen personen die dicht bij de luidsprekers staan, hun borstkas meetrillen met de muziek.

- Beethoven componeerde nog muziek toen hij al volslagen doof was. Hij kon doodeenvoudig de trillingen van de piano voelen en er de juiste toon aan koppelen.

Ook een doof geworden balletdanseres was nog in staat om haar beroep uit te oefenen.

- In het kuifjesalbum 'Mannen op de maan' voelen Kuifje en Haddock achter zich een meteoriet inslaan. Horen konden ze dat niet! Weet je ook waarom?

2.3 Verdichting, verdunning

Proef

We plaatsen een brandende kaars vóór een luidspreker. Daarna raken we de toevoerdraden van de luidspreker verschillende keren aan met een 4,5 V-batterij.

Waarneming

Bij elke aanraking kraakt de luidspreker. Telkens zie je de conus van de luidspreker voor- en achterwaarts bewegen. Tegelijkertijd zie je de kaarsvlam voor- en achterwaarts bewegen.

Verklaring

Op het moment dat de conus van de luidspreker naar voor beweegt, wordt de lucht vlakbij wat samengeperst. Dat noemen we een verdichting, die naar voor beweegt. Onmiddellijk daarna beweegt de conus naar achter; de lucht zet nu een beetje uit. Dat is een verdunning. Ook die verdunning beweegt naar voor. Als een luidspreker continu muziek weergeeft volgen de verdichtingen en verdunningen elkaar voortdurend op.

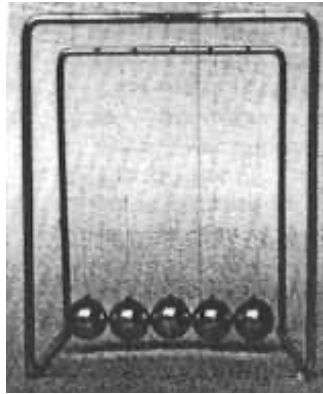
We hebben al geleerd dat een golf een trilling is die zich door een middenstof beweegt. Vermits geluid zich door een middenstof verplaatst, is geluid een golf. Geluidsgolven zijn longitudinale golven. Dat wil zeggen dat de deeltjes waaruit de middenstof bestaat trillen in de richting waarin de golf zich voortbeweegt.

Noot

De deeltjes van de middenstof trillen ter plaatse, de golf beweegt vooruit. Dat kunnen we aantonen met de volgende proef.

Proef

Je ziet duidelijk dat het afgebeelde botsingtoestel bestaat uit vijf bolletjes, die als slingers achter elkaar opgehangen zijn. We geven een uitwijking aan het linker bolletje en laten los.



Waarneming

Alleen het rechter bolletje wijkt uit. De drie middelste bolletjes bewegen nauwelijks van hun plaats.

2.4 Knutselwerk

Knip een smalle gleuf in een stuk karton. Leg de gleuf op de bovenrand van de volgende figuur en schuif het stuk karton traag naar beneden. Elk stukje lijn dat je door de gleuf ziet stelt een luchtdeeltje voor.



Bekijk nauwkeurig wat er gebeurt: elk deeltje trilt horizontaal heen en weer maar verlaat eigenlijk nooit zijn plaats. De opeenvolgende verdichtingen en verdunningen daarentegen schuiven op naar rechts. Op die manier kan je zien hoe een geluidsgolf zich horizontaal beweegt door de lucht.

Twee luchtdeeltjes zijn aangeduid door een dikke zwarte lijn. Ze trillen steeds gelijktijdig naar links of naar rechts: ze trillen in fase. De afstand tussen die twee deeltjes noemen we de golflengte. De maximale uitwijking die één deeltje kan vertonen naar links of naar rechts (gezien vanuit het evenwichtspunt) is de amplitude.

3 Eigenschappen van geluidsgolven

3.1 Snelheid van geluidsgolven

Als je een steen in het midden van een vijver gooit, duurt het even vooraleer de golven de oever bereiken. Dit gebeurt ook met geluidsgolven. Het duurt even voordat de trillingen je oor bereiken zodat je een geluid hoort.

Zo zie je bij een onweer eerst de bliksem; de donder hoor je pas een tijd later. Het licht beweegt echter razendsnel, terwijl het geluid er op zijn gemak achteraan hobbelt. Alhoewel.

De geluidssnelheid is afhankelijk van de aard en de temperatuur van de middenstof. Hoe kleiner de bewegingsvrijheid van de deeltjes, waaruit een middenstof is opgebouwd, hoe sneller een trilling er doorheen beweegt. Daarom is de geluidssnelheid in een vaste stof groter dan in een vloeistof. De snelheid in een vloeistof is op haar beurt weer groter dan in een gas.

Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller een trilling doorgegeven wordt van deeltje naar deeltje. Daarom wordt de geluidssnelheid groter als de temperatuur stijgt.

De tabel hieronder illustreert wat we hierboven verteld hebben.

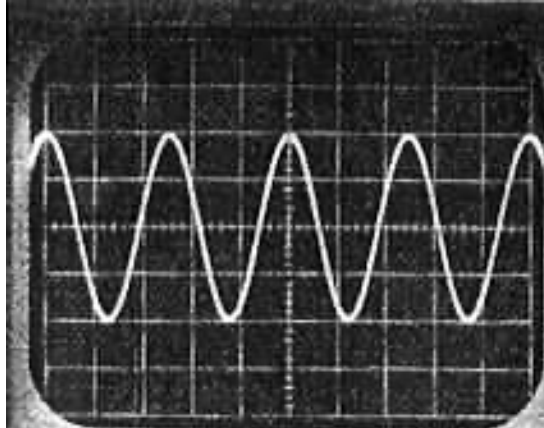
Middenstof	temperatuur(°C)	Snelheid(m/s)
Lucht	0	331
	15	340
	100	486
Water	15	1437
Alcohol	15	1270
Lood	20	1227
Koper	20	3560
Glas	20	5000
IJzer	20	5130

De geluidssnelheid is echter onafhankelijk van de toonhoogte: hoge en lage tonen bewegen even snel door een middenstof. Hoe hard de toon is maakt ook niet uit. Elke toon heeft precies dezelfde snelheid.

3.2 Frequentie, toon, golflengte

Proef

We verbinden een microfoon met een oscilloscoop. We houden een microfoon voor een stemvork en geven er een tik tegen.



Waarneming

We horen de heldere toon van de stemvork. Tezelfdertijd zien we een sinusoïde op het oscilloscoopscherm.

Besluit

Zo'n trilling waarvan het oscilloscoopbeeld een sinusoïde is noemen we een harmonische trilling.

Met een oscilloscoop kunnen we het tijdsverloop van elektrische signalen zichtbaar maken. Omdat een geluidstrilling een opeenvolging is van verdichtingen en verdunningen van de lucht veroorzaakt de trilling in de microfoon een voortdurend veranderend elektrisch signaal.

Horizontaal kunnen we op het scherm de tijd aflezen, verticaal lezen we de veranderende sterkte van het signaal af.

Op het getoonde oscilloscoopbeeld stemt één vakje horizontaal overeen met 1 ms (milliseconde).

Op die manier kunnen we mooi aflezen dat de periode van de trilling gelijk is aan:

$$T = 2,5 \text{ ms} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

De frequentie van de trilling is dan:

$$f = 1/T = 1/2,5 \cdot 10^{-3} = 400 \text{ Hz}$$

De golflengte van de trilling is:

$$\lambda = v/f = 340/400 = 0,850 \text{ m}$$

3.3 Frequentiegrenzen

Proef

We voeren de proef uit met een functiegenerator of synthesizer.

Deze elektronische toestellen kunnen gelijk welke frequentie door een luidspreker weergeven.

We stellen het toestel in op "sinus" en laten de weergegeven frequentie veranderen van "zo laag mogelijk" tot "zo hoog mogelijk".

Waarneming

Frequenties beneden de 15 Hz kunnen we niet meer waarnemen als een toon.
Frequenties boven de 20 kHz zijn voor de meeste personen niet meer hoorbaar.

Besluit

Opdat geluid door ons zou kunnen waargenomen worden, moet de frequentie van de trillingen tussen bepaalde grenzen liggen: 15 Hz is de onderste grens, terwijl 20 kHz de bovenste grens afbakent.

Deze grenzen zijn niet absoluut: ze verschillen lichtjes van persoon tot persoon en variëren bovendien met de leeftijd. De bovengrens schuift naar beneden naargelang men ouder wordt; een vijftigjarige bijvoorbeeld hoort meestal slechts tot 15 kHz.

Geluid beneden 15 Hz noemen we infrageluiden of infrasone geluiden. Geluiden met deze frequentie worden gebruikt om aardbevingen op te sporen.

Boven de 20 kHz spreken we van ultrageluiden of ultrasone geluiden. Bepaalde dieren kunnen wel de hogere frequenties waarnemen.

Vleermuizen zenden dergelijke trillingen (tot 200 kHz) voortdurend uit en 'beluisteren' deze na terugkaatsing op insecten, bomen, Zo kunnen ze zich oriënteren of een prooi bemachtigen.

Om honden af te richten wordt een fluitje gebruikt dat enkel ultrasone trillingen uitzendt (25 kHz). De hond reageert er meteen op, maar mensen horen niets.

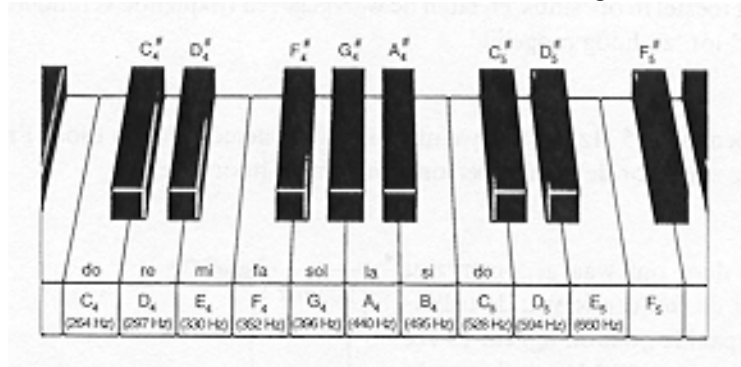
In praktijk kennen we een groot aantal toepassingen:

- voor het lokaliseren van visscholen
- om de diepte van de oceaانبodem te bepalen
- om mist boven vliegvelden te verdrijven
- om water te desinfecteren (hoge tonen kunnen bacteriën doden)

3.4 Frequentie en toon in de muziek

Op een stemvork staat gewoonlijk de frequentie gegraveerd. In de muziek is de frequentie van een toon natuurlijk heel belangrijk. Zo is internationaal overeengekomen dat de 'la' een toon is met frequentie 440 Hz.

Op een piano vind je die terug in het één gestreepte (= het vierde) octaaf. Je vind er ook de andere tonen van het bekende 'do - re - mi...' terug.



Een gitaar wordt weer anders gestemd:

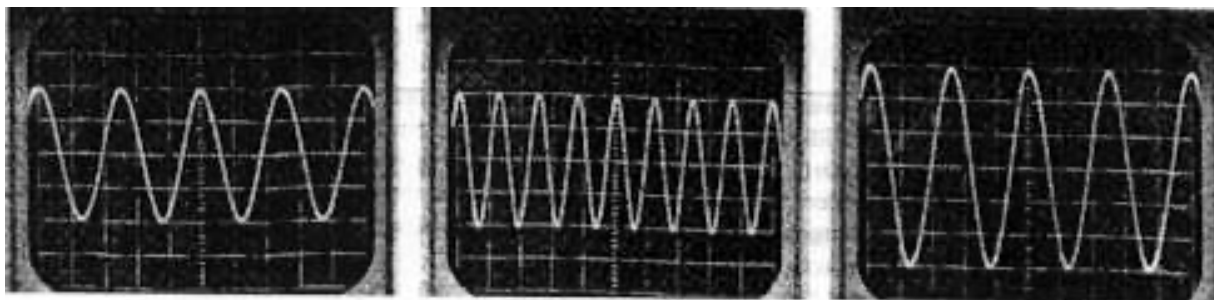
snaar		E	a	d	g	b	e'
frequentie	Hz	83	110	147	196	247	330

Proef

We gebruiken opnieuw de opstelling van proef in 3.2. We slaan drie stemvorken (110 Hz, 220 Hz, 440 Hz) achtereenvolgens aan.

Waarnemingen

Telkens horen we de toon 'la'. De derde stemvork klinkt echter hoger dan de tweede en die hoger dan de eerste. De oscilloscoopbeelden van de 3 tonen zien er zo uit:



toon

hogere toon
(grotere frequentie)

hardere toon
(grotere amplitude)

Besluiten

Een toon klinkt hoger naarmate de voortgebrachte frequentie groter is. Een dubbele frequentie nemen we waar als dezelfde toon, hij klinkt wel hoger.

Toepassingen in de muziek

We bekijken nog eens de figuur van de piano. De linker 'do' heeft een frequentie van 264 Hz, de rechter 528 Hz. Dit is dus net het dubbele! De frequentieafstand tussen twee dergelijke tonen noemen we een **octaaf**.

De zwarte toetsen (halve tonen) helpen om het octaaf in twaalf gelijke intervallen te verdelen. Je kan de opeenvolgende frequenties bij benadering narekenen:

$$264 \text{ Hz} * 1,0595 = 280 \text{ Hz (c\#)}$$

$$280 \text{ Hz} * 1,0595 = 297 \text{ Hz (d)}$$

$$297 \text{ Hz} * 1,0595 = 315 \text{ Hz (d\#)}$$

3.5 Samengestelde tonen

Proef

We gebruiken opnieuw het materiaal van proef in 3.2. Voor de microfoon maken we volgende geluiden:

- een stemvork aanslaan
- een gitaarsnaar tokkelen
- een blokfluittoon blazen
- één toon (c-toets) spelen op de piano
- langgerekt fluiten
- langgerekt en met hoge stem de klinker 'U' uitspreken
- herhaald de klinker 'A' uitspreken

Waarneming

De stemvork, de blokfluit en de klinker 'U' geven op de oscilloscoop min of meer eenvoudige sinusoiden. De andere trilling vormen zijn weliswaar periodiek (d.w.z. een vorm wordt voortdurend herhaald) maar geen sinusoiden.

Verklaring

Een toon die gespeeld wordt op een instrument is een **mengsel** van een zeer groot aantal zuivere sinusoiden, die weliswaar gelijktijdig klinken, maar met een verschillende frequentie.

Met welke frequentie ze trillen en de sterkte ervan kan je aflezen in een frequentieanalyse diagram.

De gegevens die je hier afleest zijn dezelfde als die welke je ziet op de equalizer van je versterker.

Op de piano trilt de c' toets bij een frequentie van 440 Hz. Tegelijkertijd klinken ook 850 Hz, 1300 Hz, enz. De klinker 'A' bestaat uit de frequenties 225 Hz, 450 Hz, 675 Hz, 900 Hz, enz.

Een synthesizer is een elektronisch toestel dat zo'n mengsel van frequenties kan maken. Daardoor kan men er muziekinstrumenten en de menselijke stem mee nabootsen.

3.6 Intensiteit en intensiteit niveau van geluid

Het menselijk oor is een uiterst gevoelig orgaan: de zwakste geluiden die het kan onderscheiden zijn meer dan een biljoen keer zwakker dan de sterkste geluiden die het kan verdragen! Het menselijk oor is daardoor te vergelijken met een balans

waarmee je zowel massa's tot 1000 ton kan bepalen als massa's tot 1 mg. De grootheid om de intensiteit van het geluid weer te geven noemen we het intensiteit niveau. De eenheid is de decibel (dB).

De tabel hieronder geeft het intensiteit niveau van geluiden op +/- 10 m afstand van de geluidsbron.

Geluidsbron	
Jet lijnvliegtuig	140 dB
Dancing met installatie op maximum PIJNDREMPEL	120 dB
Popconcert Viermotorig vliegtuig bij start Cirkelzaag	110 dB
Walkman op maximum Opgevoerde bromfiets Symfonieorkest (fortissimo)	100 dB
Pneumatische hamer Slecht geïsoleerde auto (binnenin)	90 dB
Drukke verkeersweg Fabriek (of pratende schoonmoeder) Bromfiets Grasmaaier met benzinemotor SCHADEDREMPEL	80 dB
Luide schreeuw Luide stofzuiger Traag rijdende auto	70 dB
Gewoon gesprek Elektrische grasmaaier	60 dB
Kalme woning (binnen!)	30 dB
Normale woonwijk overdag buiten	50 dB
Gefluister Getik van een wekker Rustig hoekje in de natuur	20 dB
Geritsel van bladeren Woestijn	10 dB
GEHOORDREMPEL	0 dB
Dode kamer	

0 dB is de gehoordrempel

Het intensiteit niveau van een dode kamer is nóg lager! Dit is een kamer waar geen enkel geluid kan binnendringen. Daarvoor zijn de wanden bekleed met perfect geluidsabsorberend materiaal. De meeste mensen ervaren die stilte als angstaanjagend.

80 dB is de schadedrempel

Deze intensiteit niveaus veroorzaken op lange termijn blijvende oorletsels. Zo lopen popconcertgangers en discotheekbezoekers een niet te onderschatten kans op vroegtijdige hardhorigheid.

120 dB is de pijndrempel

Een autoclaxon op 3 m afstand of een dancing met installatie op maximum produceren dit intensiteit niveau. Het intensiteit niveau van een startend straalvliegtuig op 50 m afstand ligt nóg hoger: tot 140 dB!

Met een intensiteit niveau schaal kan men het niveau als volgt berekenen.

Hoeveelheid lawaai	Intensiteit- Niveau	Luidheid
x 2	+ 3 dB	
x 10	+ 10 dB	X 2

Voorbeeld

Eén grasmaaier veroorzaakt een intensiteit niveau van 80 dB, twee grasmaaiers samen 83 dB, 10 grasmaaiers samen 90 dB! Nochtans ervaren we dat slechts als twee keer zo luid. Vergis je echter niet: er dringt wél degelijk tien keer meer energie door in het oor en dát is het wat de eventuele schade aanricht.

Ook de afstand speelt een rol.

- 70 dB: TV, op 1 m afstand.
- 80 dB: Handmixer of koffiemolen op 1 m afstand.
- 90 dB: Trein aan 120 km/ op 25 m afstand.
- 110 dB: Een drillboor op 1 m afstand.

Bij elke verdubbeling van de afstand vermindert het intensiteit niveau met ongeveer 6 dB.

Geluidsisolatie is dikwijls het enige doeltreffende middel om geluidshinder te verminderen. Geluid is echter een golf en kan dus om hindernissen heen buigen. Dit verschijnsel noemen we diffractie. Daarom kunnen de kleinste openingen: een brievenbus, een sleutelgat of een kier het isolerend vermogen van een wand tenietdoen.

Isolerende wanden verminderen het intensiteit niveau met een aantal decibel. We geven enkele voorbeelden.

- Bakstenen wand: - 50 dB
- Glas van 4 mm: - 25 dB
- Geluidsisolerend dubbel glas: - 30 dB
- Dubbele ramen: - 40 dB
- Geluidsschermen van 2 m hoog: - 10 dB
- Oordopjes: - 30 dB
- Oorkappen: - 40 dB

3.7 Wat meer rekenwerk

De intensiteit van het geluid wordt gegeven door I en is de verhouding van vermogen op oppervlakte. In formule

$$I = P/A \text{ en in } W/m^2$$

$$\text{Hierbij is } A = 4\pi x^2$$

Ons oor is gevoelig voor intensiteiten van $10^{-12} W/m^2$ tot $1 W/m^2$ voor $f = 1000 \text{ Hz}$.

We voeren een nieuwe schaal, nl het intensiteit niveau N

$$\text{Hieruit is } N_{dB} = 10 \text{ dB} \cdot \log(I/I_0)$$

Een voorbeeld maakt het duidelijk

In de tuin fluit een vogeltje met constant vermogen P . Met hoeveel verandert het intensiteit niveau als de afstand verdubbelt?

$$x_2 = 2 \cdot x_1$$

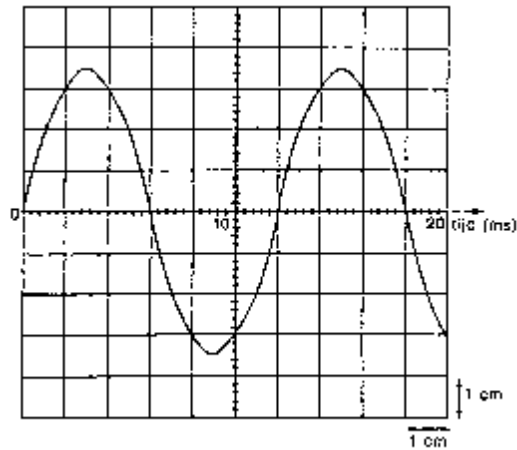
$$N_1 = 10 \text{ dB} \cdot \log(I_1/I_0)$$

$$N_2 = 10 \text{ dB} \cdot \log(I_2/I_0)$$

$$\begin{aligned} \text{Hieruit is } dN &= 10 \text{ dB} \cdot \log I_2/I_1 = 10 \text{ dB} \cdot \log x_1^2/x_2^2 \\ &= 10 \text{ dB} \cdot \log(1/4) = -6 \text{ dB} \end{aligned}$$

3.8 Vragen en opgaven

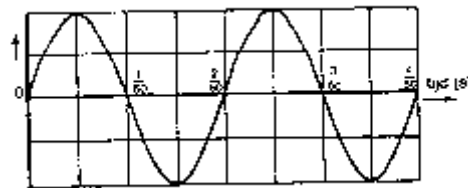
1 Het beeld op een oscilloscoop ziet uit als op de figuur. Bepaal de periode van een trilling. Bereken de frequentie van de toon.



2 Een zuivere toon kan je maken met:
 een luidspreker, een toongenerator, een oscilloscoop, een stemvork

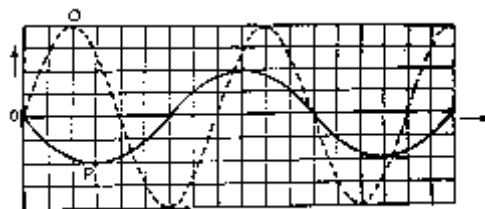
3 Geluidstrillingen kunnen we zichtbaar maken met:
 een luidspreker, een toongenerator, een oscilloscoop, een stemvork

4 In het diagram is een geluidssignaal weergegeven. Hoe groot is de frequentie?



5 Van twee luidsprekers P en Q is het geluidssignaal weergegeven in het diagram hiernaast. De frequentie van luidspreker P is 30 Hz. De frequentie van luidspreker Q is:

- 15 Hz
- 20 Hz
- 45 Hz
- 60 Hz



4 Staande golven

4.1 Ontstaan van staande golven

Proef

We maken een meterslange soepele koord (of een veer of rubberslang) aan één uiteinde vast aan de muur. Met het andere uiteinde bewegen we op en neer, in een constant langzaam ritme.

We functioneren dus in feite als trillingsbron, die een trilling met een welbepaalde frequentie door het koord sturen. Stilaan versnellen we het ritme van de trilling.

Waarneming

Eerst danst het touw op en neer.

Bij een welbepaalde frequentie voelen we echter dat het touw ook "gaat meedoen". Anders gezegd het komt in resonantie. Alle delen van de koord zwiepen nu tegelijk omhoog of omlaag.

Hierbij valt het op dat de twee uiteinden van het touw weinig of niet bewegen. Dat zijn de knopen. Het middendeel daarentegen beweegt heel sterk: dat is de buik.

Zo'n trilling patroon noemen we een staande golf.

Proef

We herhalen de proef maar voeren het trilling ritme op.

Waarneming

Bij een frequentie die tweemaal zo groot is, komt het touw opnieuw in resonantie. Er ontstaat daarbij een staande golf met drie knopen en twee buiken.

Bij een driemaal hogere frequentie ontstaat wéér een staande golf met vier knopen en drie buiken.

Besluit

Staande golven ontstaan telkens als het touw in welbepaalde frequenties aan het trillen wordt gebracht. We noemen dat de eigenfrequenties.

Verklaring

Vanuit de hand, wordt voortdurend een lopende golf door het touw gestuurd. Bij de muur weerkaatst ze en keert terug. Op die manier lopen heen - en teruggaande golven door elkaar. Bij de eigenfrequentie werken ze zó samen dat een staande golf ontstaat. Een trillend touw heeft dus verschillende eigenfrequenties. Vertrekkend van de grondfrequentie (basis eigenfrequentie) zijn ze gemakkelijk te berekenen.

bv. 15 Hz: KBK

30 Hz: KBKBK

45 Hz: KBKBKBK

Hierbij betekent K knoop en B buik.

Proef

Een metalen snaar is, via een katrol met gewicht, opgespannen over een plank.

We sluiten de twee uiteinden van de snaar aan op een wisselspanningsbron. Daarna plaatsen we de twee benen van een hoefijzermagneet over de snaar. We regelen de trekkracht op de snaar door min of meer gewicht te plaatsen op de katrol.

Waarneming

Meestal beweegt de snaar ongeordend tussen de magneetpolen. Bij een welbepaalde trekkracht gaat de snaar echter trillen volgens een gestaan golfpatroon.

Toepassing in de muziek

Proef

We tokkelen op een snaar van een gitaar (bv. de a-snaar van 110 Hz). Eerst slaan we de snaar in het midden en daarna schuiven we meer en meer naar de kam toe.

Waarneming

We horen steeds dezelfde toon, maar die klinkt systematisch hoger naarmate we de kam naderen.

Verklaring

Als we de snaar tokkelen in het midden gaat ze zó trillen dat er een staande golf ontstaat van het type KBK. De toon die we daardoor horen noemen we de grondtoon van de snaar (110 Hz).

Tegelijkertijd trilt de snaar ook volgens een staande golf van het type KBKBK en volgens KBKBKBK.

De tonen die we daardoor horen noemen we de boventonen van de snaar (220 Hz en 330 Hz). Er zijn nog veel meer boventonen! Ze klinken tegelijk; daarom kunnen we ze niet onderscheiden.

Als we de snaar in het midden tokkelen klinkt vooral de grondtoon heel hard. Naargelang we meer opschuiven naar de kam klinken de boventonen sterker (er komen er ook meer!) en de grondtoon steeds zwakker. Begrijp je nu waarom de snaar steeds hoger klinkt?

Alle instrumenten kunnen do - re - mi - enz. spelen. Toch klinkt dat telkens heel anders: elk instrument heeft zijn eigen klankkleur of timbre. Ook dat wordt veroorzaakt door boventonen: de grond- en boventonen van een bastuba liggen tussen 40 Hz en 330 Hz; deze van een klarinet tussen 260 Hz en 1570 Hz. Deze tonen zijn bovendien allemaal verschillend in sterkte. Geen wonder dat een klarinet veel hoger en héél anders klinkt dan een bastuba!

4.2 Vragen en opgaven

1 We zorgen ervoor dat er staande golven ontstaan in een rimpeltank met een lengte van 1 m. De golflengte van de gebruikte vlakke golven bedraagt 4 cm. Hoeveel knopen komen er voor in de tank?

2 Hoeveel knopen zijn er tussen de twee vaste uiteinden A en B. Bereken de golflengte bij de bovenstaande figuur van staande golven.

5 Resonantie

Proef

Twee even lange slingers hangen aan een touw. We laten één slinger bewegen in een richting dwars op de koord.

Waarneming

Na een tijd begint ook de tweede slinger over en weer te bewegen, terwijl de amplitude van de eerste slinger daalt. Als we lang genoeg waarnemen zien we de twee slingers elkaar voortdurend afwisselen.

Dit verschijnsel noemen we **resonantie**: één trilling begint 'mee te doen' met een andere. Als de lengte van de twee slingers verschillend is, treedt het verschijnsel niet op!

Proef

Twee gelijke stemvorken staan op hun klankkast, met de opening naar elkaar gekeerd. We slaan één stemvork aan en dempen hem door aanraking na enkele seconden.

Waarneming

De andere stemvork blijkt nu te trillen. Deze is dus in resonantie getreden met de eerste. De "koppeling" tussen beide gebeurde via de trillende lucht.

Als we de proef uitvoeren met 2 verschillende stemvorken, dan werkt het niet.

Resonantie treedt dus pas op als beide trillende systemen dezelfde **eigenfrequentie** hebben.

Proef

We nemen een stemvork van zijn klankkast en slaan hem aan. Dan houden we hem met zijn steel op de klankkast.

Waarneming

Vrij is de stemvork nauwelijks te horen. Van zodra hij de klankkast raakt, klinkt de trilling zeer duidelijk.

Raak met de trillende stemvork ook andere kistjes, een tafel, enz. aan: veelal is er dan ook versterking van het geluid.

Ook dit is resonantie: houten kisten en luchtkolommen kunnen meetrillen.

Toepassing in de muziek

De snaren van snaarinstrumenten (gitaar, viool, piano) moeten op houten kisten worden gespannen. Een trillende snaar op zichzelf maakt immers zeer weinig geluid!

De instrumentenbouwer moet er dan voor zorgen dat de kist meetrilt met zeer veel verschillende tonen. De kist moet dus een groot aantal eigenfrequenties hebben. Dát is een belangrijk onderdeel van de kunst van het instrumenten bouwen.

6 Dopplereffect

Proef

We beschikken over een stemvork op steel, met een frequentie van ongeveer 2000 Hz. Een leerling houdt de stemvork vast en slaat hem aan. Dan beweegt hij deze snel: eerst naar de andere leerlingen toe, daarna van hen weg.

Waarneming

Zolang de stemvork stilstaat horen de leerlingen een toon van 2000 Hz.

Als de stemvork naar hen toe beweegt horen zij een wat hogere toon.

Als de stemvork van hen weg beweegt horen zij een wat lagere toon.

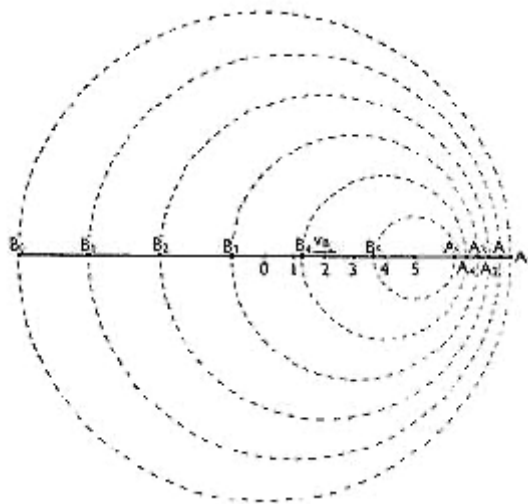
Dit verschijnsel noemen we het Dopplereffect.

Verklaring

De geluidsbron beweegt niet. Ze zendt golffronten uit die concentrische cirkels zijn rond de bron. De afstand tussen 2 golffronten is de **golflengte**.

De geluidsbron beweegt naar rechts.

De uitgezonden golffronten zijn nog steeds cirkels. Nu is elke cirkel echter, door de beweging van de geluidsbron, wat naar rechts opgeschoven.



Rechts van de bron is de afstand tussen de golffronten dus wat kleiner geworden, de golflengte wat kleiner, en dus de frequentie wat groter. ($f = v/\lambda$!)

Links van de bron is de afstand tussen de golffronten wat groter geworden, de golflengte wat groter, en dus de frequentie wat kleiner. ($f = v/\lambda$!)

En nu... cijfers over het dopplereffect

Als een auto toeterend voorbijrijdt dan stellen we vast dat de waargenomen toonhoogte stijgt als we de geluidsbron naderen om dan plots te dalen als we de bron kruisen en er ons van verwijderen. Hieruit kunnen we afleiden dat wanneer

waarnemer en trillingsbron elkaar naderen, de waarnemer een hogere frequentie waarneemt; verwijderen ze zich van elkaar, dan verlaagt de waargenomen frequentie. Het geluid heeft een bepaalde snelheid, de auto heeft een bepaalde snelheid en ook de waarnemer heeft een bepaalde snelheid. Vandaar dat we een aantal gevallen onderzoeken:

1 Bron en waarnemer in rust t.o.v. de middenstof

Als de bron per seconde f volledige golven uitzendt met lengte v dan zal de waarnemer een frequentie $f = v/\lambda$ waarnemen

2 Bron in rust en waarnemer beweegt t.o.v. middenstof

De waarnemer nadert de bron met snelheid v_w . Daar een golftrein met lengte v , f golven bevat zullen alle golven begrepen in de afstand $v + v_w$ door $f(v + v_w)/v$ gegeven worden.

De waarnemer stelt bij nadering van de bron de volgende frequentie vast:

$$f' = f \cdot \frac{v + v_W}{v}$$

en bij verwijdering

$$f' = f \cdot \frac{v - v_W}{v}$$

3 Waarnemer in rust en bron beweegt zich

De bron nadert met snelheid v_B (met $v_B < v$). De f golven zitten nu in de afstand $v - v_B$ zodat $\lambda' = (v - v_B)/f$

De waarnemer ontvangt per seconde de golftrein met lengte v waarin $f \cdot v / (v - v_B)$ golven voorkomen.

Bij nadering neemt hij de volgende frequentie waar:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = f \cdot \frac{v}{v - v_B}$$

Bij verwijdering

$$f' = f \cdot \frac{v}{v + v_B}$$

4 Waarnemer en bron bewegen beiden

De waargenomen frequentie door combinatie van beide resultaten is nu

$$f' = f \cdot \frac{v \pm v_W}{v \mp v_B}$$

v_W is met het + teken als de waarnemer zich naar de bron beweegt v_B is met het - teken als de bron zich naar de waarnemer beweegt.

Toepassing

Bij een echografie wordt een bundel ultrasone trillingen gericht op een (week) orgaan. De teruggekaatste trillingen worden in het toestel opgevangen en vormen een beeld op een monitor. Als de uitgezonden trillingen worden teruggekaast door rode bloedcellen die in bloedvaten bewegen, is de frequentie van de weerkaatste trillingen enigszins verschillend van de uitgezonden frequentie.

In een toestel voor Dopplerechografie worden ontvangen en uitgezonden frequentie met elkaar vergeleken. Zo kan men zich een beeld vormen van de doorbloeding van het orgaan.

Vragen en opgaven

1 Waarom hoort men een vlinder niet vliegen, terwijl men een mug die nochtans veel kleinere vleugels heeft, duidelijk hoort aankomen?

2 Ons oor is gevoelig voor trillingen met frequenties gelegen tussen 20 en 15000 Hz. Als de voortbeweging snelheid van het geluid in lucht 340 m/s is, zoek de golflengten die met die frequenties overeenstemmen.

3 Trein A32 en trein A56 rijden op evenwijdige sporen naar elkaar toe. De locomotief van trein A32 fluit continu. Een reiziger in trein A56 hoort een frequentie 307 Hz als hij A32 nadert, een frequentie 256 Hz als hij zich precies naast de locomotief van A32 bevindt en een frequentie 213 Hz terwijl hij zich van A32 verwijdt. Indien de geluidssnelheid 340 m/s bedraagt, wordt gevraagd de snelheid van elke trein t.o.v. de grond te zoeken.

7 De geluidsbarrière

De snelheid van vliegtuigen wordt wel eens uitgedrukt in mach. Als een vliegtuig vliegt aan "mach 2" betekent dat, dat zijn snelheid 2 maal de geluidssnelheid bedraagt.

$$\begin{aligned}2 \text{ mach} &= 2 \times 340 \text{ m/s} \\ &= 2 \times 1220 \text{ km/h} \\ &= 2440 \text{ km/h}\end{aligned}$$

Snelheden beneden de geluidssnelheid noemen we **subsonisch**, snelheden erboven **supersonisch**.

Grote verkeersvliegtuigen en militaire vliegtuigen vliegen supersonisch. In principe mag dat alleen op grote hoogte of boven de zee wegens lawaaioverlast.

Als een vliegtuig de geluidssnelheid nadert, komen de golffronten van het uitgezonden geluid steeds dichter bij elkaar. Bij de geluidssnelheid raken zij elkaar. In het raakgebied is er een sterke ophoping van trillingsenergie; wil het vliegtuig nóg sneller vliegen dan moet het eerst die "geluidsbarrière" doorbreken en daarvoor moet het voldoende stevig zijn gebouwd. Tijdens de Tweede Wereldoorlog braken soms vliegtuigen in de lucht in stukken omdat ze, zonder het te beseffen, de geluidsmuur te dicht naderden.

Bij supersonische snelheid blijven de golffronten van het geluid achter tegenover het vliegtuig. Zo'n vliegtuig vliegt letterlijk sneller dan het geluid!

Samen vormen de golffronten de zogenaamde Machkegel. In de rand van de Machkegel is er een sterke ophoping van trillingsenergie: de **schokgolf**. Daar waar de schokgolf over het aardoppervlak schuift hoort men een enorme knal.

Een vliegtuig dat op 12 km hoogte vliegt, veroorzaakt een 'sonic boom' over een afstand van 30 km.

Je kan gemakkelijk zelf de geluidsmuur doorbreken: sla kort, hard en 'droog' met een soepele zweep; de knal die je dan hoort is niets anders dan een 'sonic boom'.

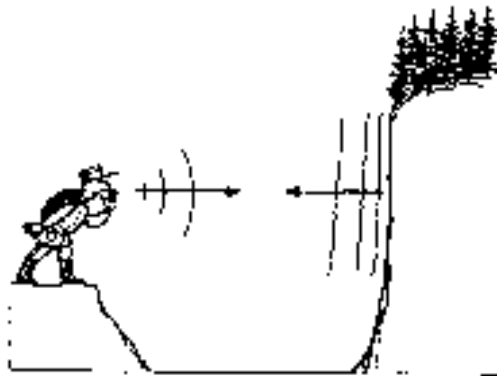
Achter zwemmende eenden zie je dikwijls een Mach-kegel! De snelheid van golven op water is niet zo hoog; eenden zwemmen al gauw sneller. Bij een speedboot zie je die Machkegel heel smal worden wegens de grote snelheid.

Zie ook simulatie op computer.

8 Terugkaatsing en absorptie van geluid

Een onweer kan aardig knallen... maar in de bergen is het écht spectaculair. Het geluid van de donder weerkaatst meervoudig en aan alle kanten op bergwanden.

Echo ontstaat ook zo: geluid van je eigen uitroep weerkaatst op een loodrechte rotswand of muur en beweegt terug naar je. Je hoort dan 2 verschillende geluiden: het **directe** en het **teruggekaatste** geluid. De afstand tussen jezelf en de wand mag niet te groot zijn: je hoort geen echo's van op 10 km afstand. Te klein mag die afstand echter óók niet zijn. We horen het verschil tussen het directe en het teruggekaatste geluid slechts als ze minstens 0,2 s uit elkaar liggen. Je moet dus op minstens 34 m van een rotswand of muur staan.



In een grote zaal kan de echo vervelende gevolgen hebben: bij elke noot muziek hoor je eerst geluid dat direct afkomstig is van het podium; daarna bereikt je het geluid van herhaalde weerkaatsingen op muren, zoldering, enz. Omdat er heel wat weerkaatsingwegen zijn sterft het geluid van één muzieknoot langzaam uit. De tijd die daarvoor nodig is noemen we de **nagalmtijd**.

In een zaal met "slechte akoestiek" klinken woorden en muziek onverstaanbaar: terwijl we één woord horen klinkt nog de nagalm van het vorige. De nagalmtijd is dus te groot. Dat is een typisch verschijnsel in sportzalen, zwembaden en smalle straten. Die zijn door de vele weerkaatsingen zeer 'lawaaierig'. Om de nagalm te beperken bedekt men de wanden van concertzalen en studio's met geluidsabsorberend materiaal: er kunnen dan niet té veel weerkaatsingen optreden.

Middeleeuwse kathedralen hebben soms een nagalmtijd van 10 s! Niet verwonderlijk dat kerkmuziek zeer traag gezongen werd: zo was er toch nog iets van te begrijpen.

Als de nagalmtijd te klein is, klinkt het geluid armzalig, koud en droog. Luidsprekers worden bij de productie getest in een zgn. dode kamer. Daarin zijn de wanden zó geluidsabsorberend dat de nagalmtijd 0 s is.

Voor een goede waarneming van spraak moet de nagalmtijd in een zaal liggen tussen zo'n 0,5 en 1,2 s; voor muziek is dat langer: 1,6 tot 2,1 s.

Het is dus een hele klus om een zaal zó te ontwerpen dat ze een goede akoestiek heeft! Vuistregel is: hoe groter het volume van de zaal, hoe meer nagalmtijd; hoe meer absorberende wanden, des te kleiner de nagalmtijd.

WISSELSTROOM

1 EFFECTIEVE WAARDEN

1 Gelijkstroom en wisselstroom

In het vijfde jaar hebben we 'elektriciteit' gezien. We hadden het daar vooral over gelijkstroom.

PROEF

We sluiten een ampèremeter aan op een batterij van 1,5 V.

Waarneming

De uitwijking van de naald blijft op dezelfde waarde staan.

Besluit

De stroom gaat dus in een zin door de stroomkring. We noemen dit gelijkstroom. Batterijen leveren gelijkstroom.

PROEF

We sluiten een ampèremeter aan op een spoel en laten een staafmagneet op en neer bewegen in die spoel.

Waarneming

De naald schommelt heen en weer.

Besluit

De zin waarin de stroom door de kring gaat, wisselt voortdurend. We spreken over wisselstroom. Het elektriciteitsnet levert wisselstroom.

2 Meer over wisselstroom

Uit de vorige proef zien we dat wisselstroom een veranderlijke stroom is, die in de keten telkens van zin verandert. Bij een wisselstroom hoort een wisselspanning. Een wisselspanning ontstaat door een spoel te laten wentelen in een magnetisch veld.

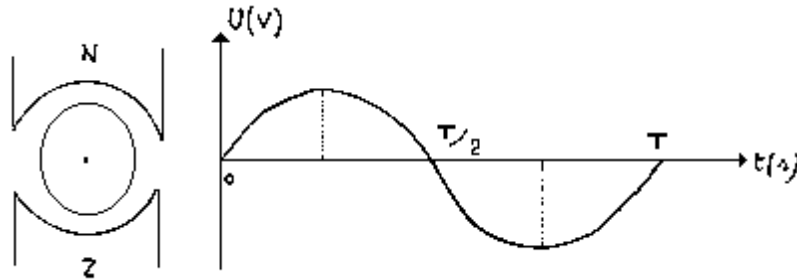
In het vijfde jaar hebben we de formule $U_{\text{ind}} = - B \times l \times v$ gezien. Daarin is B de magnetische inductie in T (tesla), l de lengte van de spoel in m en v de snelheid in m/s.

Is het veld homogeen en gebeurt de wenteling eenparig, dan is de spanning U van de vorm:

$$U = U_{\text{max}} \cdot \sin \omega t$$

met U_{\max} de amplitude, $\omega = 2\pi/T$ de pulsatie in rad/s, T de periode in s, $f = 1/T$ de frequentie in Hz en t de tijd in s.

Zetten we U uit in functie van t dan krijgen we een sinusfunctie, dus in feite een harmonische trilling.(H.T.)



In een schema stellen we een wisselspanning voor door: - ~ -

Hierbij is de frequentie van het net $f = 50$ Hz in Europa.

3 Wisselspanning over een weerstand. Effectieve waarden

Daar de spanning en de stroomsterkte steeds wisselen kunnen we ons afvragen wat we dan eigenlijk aflezen op de volt- en de ampèremeter.

- Om wisselspanning en wisselstroom te kunnen meten moet men gebruik maken van instrumenten waarvan de zin van de uitwijking onafhankelijk is van de zin van de stroom.
- Bovendien zouden we liefst hebben dat de wetten die we voor het warmte-effect bij gelijkstroom vonden dezelfde blijven bij wisselstroom.

We voeren dan ook twee fictieve waarden in nl. de effectieve spanning en effectieve stroomsterkte die de wisselstroom toestellen zullen aangeven.

Onder effectieve stroomsterkte van een wisselstroom verstaat men de stroomsterkte van een gelijkstroom die in een weerstand dezelfde warmtehoeveelheid ontwikkelt in dezelfde tijd.

Hoe kunnen we die berekenen?

Is $U = U_{\max} \times \sin \omega t$ de wisselspanning en R de weerstand, dan is de wisselstroom volgens de wet van Ohm gegeven door:

$$I = U/R = (U_{\max}/R) \times \sin \omega t = I_{\max} \times \sin \omega t \quad \text{met } I_{\max} = U_{\max}/R$$

Het ontwikkeld vermogen bij wisselstroom is dan:

$$P = U \times I = R \times I_{\max}^2 \times \sin^2 \omega t$$

$$P = R \times I_{\max}^2 \times \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{1}{2} R \times I_{\max}^2 - \frac{1}{2} R \times I_{\max}^2 \times \cos 2\omega t$$

Nu is $\langle \cos 2\omega t \rangle = 0$ over één periode,

want voor $t = T$ is $\cos 4\pi = 1$
 voor $t = 0$ is $\cos 0 = 1$

$$P_g = \frac{1}{2} \times R \times I_{\max}^2$$

Het ontwikkeld vermogen bij gelijkstroom wordt gegeven door de formule:

$$P = R \times I_e^2$$

Hieruit $I_e^2 = I_{\max}^2 / 2$ opdat beide formules zouden gelijk zijn.

$$I_e = I_{\max} / \sqrt{2} \quad \text{of} \quad I_e = 0,707 \times I_{\max}$$

met I_e de effectieve stroomsterkte van de wisselstroom

De effectieve wisselspanning $U_e = R \times I_e$ wordt dan

$$U_e = U_{\max} / \sqrt{2} \quad \text{of} \quad U_e = 0,707 \times U_{\max}$$

met $P = U_e \times I_e$

4 Uitwerkingen van wisselstroom

Van gelijkstroom konden we alleen de uitwerking zien nl. de chemische, de thermische en de magnetische uitwerking. We kijken nu wat er gebeurt als we de gelijkstroom door wisselstroom vervangen.

4.1 Chemische uitwerking

De elektroden worden beurtelings positief en negatief zodat we geen effect zullen waarnemen bij proeven over geleidbaarheid. We moeten dus gelijkstroom hebben bij proeven met chemische verschijnselen.

4.2 Thermische uitwerking

De warmteontwikkeling is evenredig met I^2 zodat $+I$ en $-I$ hetzelfde warmte-effect hebben.

4.3 Magnetische uitwerking

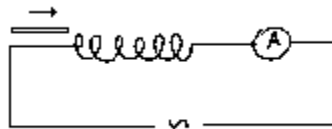
De elektromagneten (bel en relais) kunnen even goed met wisselstroom gevoed worden, want als de polen wisselen dan wisselen de in het ijzer geïnduceerde polen eveneens.

2 REACTANTIE EN IMPEDANTIE

1 Wisselspanning op een self: inductieve reactantie

PROEF

Plaatsen we een ampèremeter en een spoel in serie met een wisselspanningbron dan zal de uitwijking van de ampèremeter geleidelijk verminderen als we een ijzeren sluitstuk in de spoel schuiven.



Besluit

Een self opgenomen in een wisselstroomketen gedraagt zich als een schijnweerstand, inductieve reactantie genoemd, waarvan de waarde afhankelijk is van de middenstof van de self en toeneemt met de frequentie van de wisselstroom.

Voor gelijkstroom heeft de self slechts een kleine weerstand, nl. deze van de bedrading en die men ook wel ohmse weerstand noemt.

Verklaring

Bij het in of uitschakelen van gelijkstroom in een self ontstaat er in de self een spanning door zelfinductie.

Gaat er dus een stroom $I = I_{\max} \times \sin \omega t$ dan verandert I voortdurend zodat er ook een tegenspanning U' ontstaat.

Is L de zelfinductie in H (Henry) dan is

$$U' = -L \times \frac{dI}{dt} = -L \times I_{\max} \times \frac{d(\sin \omega t)}{dt} = -L \times \omega \times I_{\max} \times \cos \omega t$$

In ideale omstandigheden (geen ohmse weerstand) zou de inductiespanning even groot zijn als de oorspronkelijke spanning. (geen energieverlies)

zodat $U = L \times \omega \times I_{\max} \times \cos \omega t$

of $U = L \times \omega \times I_{\max} \times \sin (\omega t + \pi/2)$

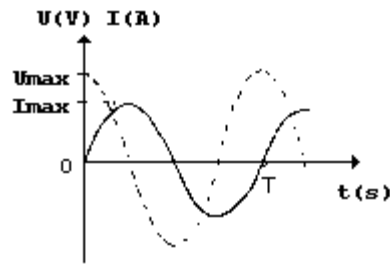
Hierin is $U_{\max} = L \times \omega \times I_{\max}$ (ook U_e en I_e)

zodat de schijnweerstand gegeven wordt door de formule:

$$X_L = U_e/I_e = L\omega$$

Vorig jaar hebben we gezien dat bij een rechte solenoïde L gegeven wordt door $L = \mu \times n^2 \times A / l$

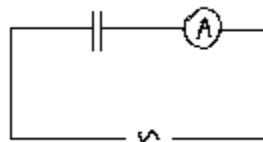
Bij de self is de wisselspanning steeds een kwart periode voor op de wisselstroom. Er is een faseverschil van $\pi/2$. Onderstaande figuur maakt dit duidelijk.



2 Wisselspanning op een condensator: capacatieve reactantie

PROEF

Plaatsen we een ampèremeter en een condensator in serie op een wisselspanningbron dan vermindert de uitwijking op de ampèremeter als we kleinere capaciteiten nemen.



Besluit

Een condensator opgenomen in een wisselstroomketen gedraagt zich als een schijngeleider waarvan de weerstand afneemt als de capaciteit of de frequentie toeneemt. Deze schijnweerstand noemt men de capacatieve reactantie. Voor gelijkstroom is een condensator een oneindig grote weerstand!

Verklaring

Bij het aanzetten van een condensator ontstaat een stroomstoot in de leiding. Bij ompolen zal de condensator ontladen en dan in tegengestelde zin geladen worden.

Is C de capaciteit en $U = U_{max} \times \sin \omega t$ de aangelegde wisselspanning dan wordt de lading

$$q = C \times U = C \times U_{max} \times \sin \omega t$$

Een verandering van lading komt overeen met een stroom in de keten.

$$I = \frac{dq}{dt} = C \times U_{max} \times \frac{d(\sin \omega t)}{dt} = C \times \omega \times U_{max} \times \cos \omega t$$

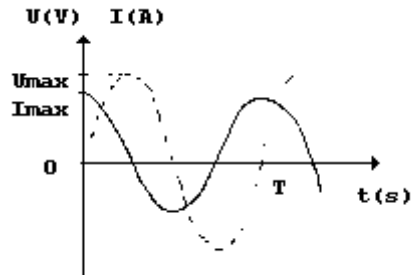
$$I = C \times \omega \times U_{max} \times \sin (\omega t + \pi/2)$$

$$\text{met } U_e = I_e / C \times \omega$$

De schijnweerstand wordt hier gegeven door:

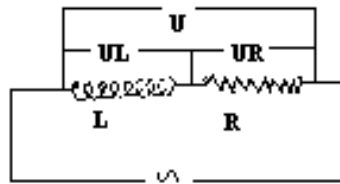
$$X_C = U_e/I_e = 1/C\omega$$

Bij de condensator is de wisselspanning een kwart periode achter op de wisselstroom. Onderstaande figuur maakt dit duidelijk.



3 Keten met R, L en C: impedantie

3.1 R en L in serie



De aangelegde spanning U wordt over R en L verdeeld zodat $U = U_R + U_L$

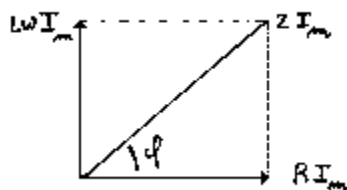
Is $I = I_{max} \times \sin \omega t$ de wisselstroom dan is

$U_R = R \times I_{max} \times \sin \omega t$ in fase met I

$U_L = L \times \omega \times I_{max} \times \cos \omega t$ 90° vóór op I

$U = R \times I_{max} \times \sin \omega t + L \times \omega \times I_{max} \times \cos \omega t$

Met de constructie van Fresnel zien we dat U een wisselspanning is met



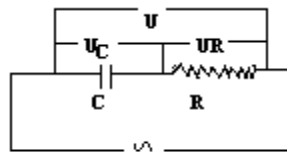
$$U_{\max} = I_{\max} [R^2 + (L\omega)^2]^{1/2}$$

$\text{tg } \varphi = L\omega/R$ met φ de fasehoek

met $Z = U_e/I_e = U_{\max} / I_{\max}$ of $Z = [R^2 + (L\omega)^2]^{1/2}$

Z noemt men de (inductieve) impedantie.

3.2 R en C in serie



De aangelegde spanning verdeelt zich over R en C zodat

$$U = U_R + U_C$$

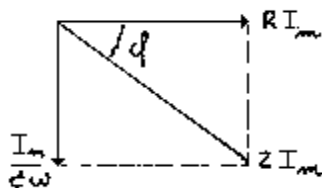
Is $I = I_{\max} \times \sin \omega t$ de wisselstroom dan is:

$$U_R = R \times I_{\max} \times \sin \omega t \quad \text{in fase}$$

$$U_C = I_{\max} / C\omega \times \cos \omega t \quad 90^\circ \text{ achter op } I$$

$$\text{of } U = R \times I_{\max} \times \sin \omega t + I_{\max} / C\omega \times \cos \omega t$$

Met de constructie van Fresnel zien we dat U een wisselspanning is.

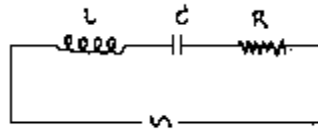


met $Z = U_e / I_e = U_{\max} / I_{\max}$

$$Z = [R^2 + (1/C\omega)^2]^{1/2}$$

$$\text{tg } \varphi = - 1 / R \times C\omega$$

3.3 R, L en C in serie



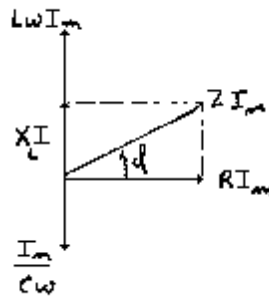
met $U = U_R + U_L + U_C$ is

$$Z = [R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2]^{1/2}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{L\omega - 1/C\omega}{R}$$

Is $\varphi > 0$ of $L\omega > 1/C\omega$ dan is de impedantie inductief (I achter op U!)

Is $\varphi < 0$ of $L\omega < 1/C\omega$ dan is de impedantie capacitief (I voor op U!)



3.4 R, L en C in parallel

Dan is $I = I_R + I_L + I_C$
 $U_R = U_L = U_C$

$$1/Z = [1/R^2 + (1/L\omega - C\omega)^2]^{1/2}$$

4 Resonantie verschijnselen bij wisselstroom

LABPROEF

Plaatsen we een lamp of een ampèremeter in een RLC - kring dan zal ze voor een bepaalde stand van R, L en C maximaal branden of de ampèremeter vertoont een maximum.

In een RLC - kring wordt de impedantie gegeven door

$$Z = [R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2]^{1/2}$$

Veranderen we L, C of ω dan verandert Z. De kleinste waarde voor Z vinden we als de reactantie.

$$X = L\omega - 1/C\omega = 0 \text{ of als } L\omega = 1/C\omega$$

$$\text{of } L \times C = 1/\omega^2$$

$$\text{dan wordt } \text{tg } \varphi = X/R = 0 \text{ of } \varphi = 0$$

$$\text{Vermits nu } \omega = 2\pi f \text{ en } \omega^2 = 1/LC$$

wordt

$f = 1/[2\pi(LC)^{1/2}]$ $T = 2\pi(LC)^{1/2}$

dit is de formule van THOMSON

Wordt in een keten met L en C in serie en een kleine R wisselspanningen van verschillende frequenties aangelegd dan wordt enkel de stroom met frequentie $f = 1/2\pi(LC)^{1/2}$ ongehinderd doorgelaten. Deze frequentie noemt men eigenfrequentie.

5 Vermogen ontwikkeld door een wisselstroom

5.1 Een keten met Ohmse weerstand

Daar is $P_m = U_e \times I_e$ met U_e en I_e de effectieve spanning en stroomsterkte.

5.2 Een keten met reactantie: self, condensator of beide

Is X de reactantie $L\omega$ of $1/C\omega$ dan is $U = U_{\max} \times \sin \omega t$

$$I = I_{\max} \times \sin (\omega t + \pi/2) = I_{\max} \times \cos \omega t$$

$$\text{of } P = \frac{1}{2} U \times I = - \frac{1}{2} (U_{\max} \times I_{\max} \times \sin 2\omega t)$$

daar $\langle \sin 2\omega t \rangle = 0$ over 1 periode is

$$P_m = 0$$

Een keten alleen bestaande uit selfs en condensatoren verbruikt geen energie!!

5.3 Een keten met impedantie: weerstand en reactantie

Is R de weerstand en X de reactantie dan is

$\text{tg } \varphi = X/R$ met φ het faseverschil

Is $U = U_{\max} \times \sin \omega t$

$$I = I_{\max} \times \sin (\omega t - \varphi)$$

of $I = I_{\max} \times \cos \varphi \times \sin \omega t - I_{\max} \times \sin \varphi \times \cos \omega t$

Hieruit zien we dat I uit twee delen bestaat

- a) het stuk $I_{\max} \times \cos \varphi$ in fase en $P_m = U_e \times I_e \times \cos \varphi$
- b) het stuk $I_{\max} \times \sin \varphi$ met faseverschil van 90° en $P_m = 0$

$$P_m = U_e \times I_e \times \cos \varphi$$

Het product $U_e \times I_e$ noemt men het schijnbaar vermogen. De factor $\cos \varphi$ noemt men de arbeidsfactor.

$U_e \times I_e$ in VA (voltampère)

$U_e \times I_e \times \cos \varphi$ in W (watt)

6 Vragen en opgaven

- 1 Wat is de effectieve waarde van een wisselstroom als haar maximale stroomsterkte 17 A is?
- 2 Construeer het diagram van Fresnel voor een stroom van 10,0 A in fase met de spanning, een stroom van 8,0 A 30° achteruit op de spanning, een stroom van 12,0 A 45° vooruit op de spanning. Bepaal uit het diagram de resulterende stroomsterkte I en de fasehoek φ
- 3 Bereken de impedantie in een keten met 10 Ω weerstand en een spoel met zelfinductie coëfficiënt van 0,05 H. (220 V, 50 Hz) Maak het diagram van Fresnel als $I_{\max} = 1,0$ A en bereken de fasehoek. Maak eveneens de constructie.
- 4 In een RLC - keten met $R = 12 \Omega$, $C = 106 \mu\text{F}$ en $L = 0,080$ H is $I_e = 0,70$ A. Bereken de impedantie. Teken het diagram van Fresnel en bereken de fasehoek uit het diagram.
- 5 Bereken het vermogen van een wisselstroom met 20 V spanning, 1,2 A stroomsterkte en een fasehoek van 25°.
- 6 In een RLC - keten is de weerstand $R = 12 \Omega$; de capaciteit $C = 150 \mu\text{F}$ en de impedantie $Z = 54 \Omega$. Bereken de inductiviteit L. Teken het Fresnel diagram. Bereken de fasehoek φ en vergelijk met de geconstrueerde waarde.

3 TRANSFORMATOREN

1 Een transformator kan de spanning opdrijven

Een transformator kan een spanning omzetten in een hogere of lagere spanning. Hij kan dus spanningen transformeren. We bestuderen eerst transformatoren die de spanning verhogen. Zo'n transformator bestaat uit twee verschillende spoelen (het aantal windingen verschilt), die rond een gemeenschappelijke weekijzer kern gewikkeld zijn. De eerste spoel bezit een kleiner aantal windingen dan de tweede spoel.



PROEF

Twee spoelen, een met 300 windingen en de andere met 1200 windingen, worden over de beide benen van een U-vormige weekijzer kern geschoven. Daarna wordt de kern gesloten met een weekijzer staaf. De eerste spoel (primaire spoel) wordt aangesloten op een wisselspanning. Een voltmeter (V_1) meet de aangelegde spanning (U_p) over de primaire spoel. Een tweede voltmeter (V_2) wordt aangesloten op de tweede spoel (secundaire spoel). Zodra er een wisselstroom door de eerste spoel gaat, duidt de tweede voltmeter een spanning U_s aan.

In een tabel noteren we de aangelegde spanning (U_p), de bekomen spanning over de secundaire spoel (U_s), de verhouding U_s/U_p en ook de verhouding van het aantal windingen in de secundaire en primaire spoel n_s/n_p .

Waarnemingen

De spanning over de secundaire spoel is veel groter dan deze over de primaire spoel. Het komt erop neer dat de primaire wisselspanning getransformeerd is in een grotere secundaire wisselspanning. De verhouding van U_s/U_p is nagenoeg dezelfde als de verhouding n_s/n_p .

Besluit

Met een transformator kan je de primaire wisselspanning transformeren in een hogere secundaire wisselspanning als het aantal secundaire windingen groter is dan het aantal primaire.

2 Een transformator kan de spanning verlagen

Speelgoed rechtstreeks aansluiten op het elektriciteitsnet is ontoelaatbaar gevaarlijk. Via een transformator kunnen we de spanning echter verlagen tot een veilige waarde.

Voorbeeld

Een speelgoedtreintje werkt op een spanning van 6 V. Met een transformator kan je de spanning van 220 V van het stopcontact omzetten in een spanning van 6 V. Je begrijpt meteen dat het aantal windingen secundaire windingen nu veel kleiner moet zijn dan het aantal primaire. We kunnen het aantal secundaire windingen gemakkelijk berekenen. Als de primaire spoel bijvoorbeeld 3000 windingen heeft dan kunnen we via de formule het aantal secundaire windingen becijferen.

Besluit

Met een transformator kan je de primaire wisselspanning transformeren in een lagere secundaire wisselspanning als het aantal secundaire windingen kleiner is dan het aantal primaire.

3 Transformatoren en de distributie van elektriciteit

In de onmiddellijke buurt van je woning hangen waarschijnlijk (zoals op veel plaatsen) hoogspanningslijnen. Ze dienen om de elektrische energie vanuit de elektriciteitscentrale tot bij de gebruiker te brengen.

Wanneer elektriciteit over grote afstanden getransporteerd moet worden, gebeurt dat altijd onder hoogspanning. In België gebeurt dat bij 70.000 V, 150.000 V of 380.000 V. De reden hiervoor is dat het elektriciteitstransport dan voordeliger verloopt. Elke geleider heeft immers een zekere weerstand. Wanneer er een elektrische stroom door zo'n weerstandsdraad vloeit wordt die warm. Een deel van de elektrische energie gaat dus verloren onder de vorm van warmte. Voor de aankomst bij de gebruiker moet de spanning dan weer omlaag gebracht worden tot een spanning van 220 V. Ook dan maakt men gebruik van een transformator.

Je hebt waarschijnlijk al gemerkt dat hoogspanningsleidingen altijd uit drie draden bestaan. Dat komt omdat grote transformatoren, die opgesteld staan in een transformatiestation, drie primaire en drie secundaire spoelen bezitten.

4 Transport van elektrische energie

Brengt men elektrische energie van de centrale naar de verbruiker dan wordt een deel van de energie in de leiding draden in warmte omgezet.

Is R de weerstand van de draden en I de stroomsterkte in de leiding dan is er een verlies aan vermogen gegeven door

$$P(\text{leiding}) = R \times I^2$$

Voorbeeld

Veronderstel dat $P = 10000$ kW (= 200 verbruikers) en $U = 220$ V op een afstand van 50 km. Dan is I :

$$I = 10^7 \text{ W} / 2 \cdot 10^2 \text{ V} = 5 \cdot 10^4 \text{ A}$$

We rekenen op 10% verlies door 1000 kW, dus ook 10% verlies op de spanning is 200V

$$\text{zodat } R = P/I^2 = 10^6 / 25 \cdot 10^8 = 4 \cdot 10^{-4} \Omega = 0,0004 \Omega$$

Dit is echter onmogelijk want bij een koperdraad met $\rho = 17 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$ en lengte $l = 50000$ m is $A = \rho l / R = 17 \cdot 10^{-9} \times 50000 / 4 \cdot 10^{-4} = 2,12 \text{ m}^2$.

Dit zou betekenen dat de draad een dikte heeft van 1,64 m.
(te berekenen uit $d = (4A/\pi)^{1/2}$)

Brengt men de energie echter over op een spanning van 100000 V, dit is 500 maal hoger, dan is I gelijk aan:

$$I = 10^7 / 1 \cdot 10^5 = 100 \text{ A}$$

Rekent men op een verlies van 5% bij het veranderen van spanning dan is $P = 500$ kW en hieruit

$$R = P/I^2 = 5 \cdot 10^5 \text{ W} / 100 \text{ A}^2 = 50 \Omega$$

$$\text{of } A = \rho \times l / R = 17 \cdot 10^{-9} \times 50000 / 50 = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 17 \text{ mm}^2$$

De draad heeft dan een diameter van 4,6 mm, wat realistisch is!

5 Werking van een transformator

5.1 De onbelaste transformator

U_1 is de wisselspanning op de primair met n_1 windingen.

De stroom I doet een wisselend magnetisch veld $B = \mu \times n_1 \times I / l$ ontstaan die op zijn beurt in de ijzeren kern een wisselende flux doet ontstaan.

$$\phi = B \times A$$

(μ is de permeabiliteit in Vs/Am; B is de magnetische inductie in T; A is de oppervlakte in m^2)

Daardoor ontstaat in de primair een inductiespanning

$$U = - n_1 \times d\phi / dt$$

Verwaarlozen we de weerstand van de primair en het vermogen verlies door het Joule-effect dan zal de inductiespanning U even groot doch tegengesteld zijn als de spanning in de primair:

$$\text{of } U_1 = - U \quad \text{of } U_1 = n_1 \times d\phi / dt$$

De veranderlijke flux induceert in de secundair met n_2 windingen een wisselspanning

$$U_2 = - n_2 \times d\phi / dt$$

Het is dezelfde flux, want het is dezelfde ijzeren kern.

U_1	n_1
$==$	$---$
U_2	n_2

met U_1 en U_2 in tegenfase

ϕ , B en I in fase; U_1 90° faseverschil met ϕ en I

De verhouding n_2/n_1 noemt men de transformatieverhouding.

5.2 De belaste transformator

Belasten we nu de secundair, dit betekent dat we een verbruikstoestel met een weerstand aansluiten, dan ontstaat een wisselstroom I_2 die een tweede veld $B_2 = \mu \times n_2 \times I_2 / l$ doet ontstaan.

Daar U_1 op de primair onveranderd blijft zijn ook U en B onveranderd. In de primair moet dus een bijkomende stroom I_1 ontstaan die een veld

$$B_1 = \mu \times n_1 \times I_1 / l$$

doet ontstaan, even groot doch tegengesteld aan het veld dat ontstaan is door I_2 .

$$B_1 = - B_2$$

$$\text{of } \mu \times n_1 \times I_1 / l = - \mu \times n_2 \times I_2 / l$$

I_1	n_2
---	---
I_2	n_1

We merken op dat in de primair eigenlijk $I + I_1$ gaat maar we nemen aan dat I verwaarloosbaar is t.o.v. I_1 .

6 Energieomvorming

Met $P = U \times I$ en de hierboven gevonden formules vinden we:

$$\frac{U_2 \times I_2 \quad n_2 \times n_1}{U_1 \times I_1 \quad n_1 \times n_2} = 1 \quad \text{of} \quad P_2 = P_1$$

Bij een belaste transformator is het vermogen dat in de secundaire kring wordt geleverd gelijk aan het vermogen dat in de primaire kring aan de bron wordt ontnomen. Er is dus geen energieverlies!

Dit is natuurlijk alleen in ideale gevallen want:

- de draden hebben ook weerstand
- er ontstaan wervelstromen in de kern
- er zijn hysteresisverliezen (draaien van Weissgebieden)

Het rendement van een industriële transformator is 95%

7 Toepassingen

- Met een transformator kan men de spanning optransformeren tot zeer hoge spanningen (orde 100000 kV), dan worden ze weer af getransformeerd.
- elektrisch lassen
- bliksemafleiders op treinen
- puntlassen
- de vonkindicator (van 6 V naar 60 kV)

8 Vragen en opgaven

1 Als de belasting van een transformator met een verbruikstoestel dat 20 A opneemt. Hoeveel is de stroom uit het primaire net als $n_p = 1000$ en $n_s = 300$?

2 Bereken de diameter van de draad bij een leiding van 100 km, als $P = 100000$ kW en de spanning $U = 2000$ kV (geen verlies!)
($\rho(\text{Cu}) = 17 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$)

4 GENERATOREN EN MOTOREN

Vorig jaar hebben we reeds generatoren en motoren gezien die werkten op gelijkstroom. Er kan natuurlijk ook met wisselstroom gewerkt worden.

1 Eenfasige wisselstroom

In een raampje dat tussen de polen van een hoefijzermagneet draait ontstaat wisselstroom. De aldus ontstane stroom moet via twee slepringen door borstels afgevoerd worden.

Draaien we de magneet en laten we het anker in rust dan spreekt men van een alternator. De draaiende elektromagneet noemt men de rotor, het stilstaand anker de stator.

De voeding van de elektromagneet gebeurt met gelijkstroom. De as van deze gelijkstroomgenerator is gewoonlijk op dezelfde as als de alternator gemonteerd. Een synchroommotor is een motor die synchroom draait met het wisselend magnetisch veld.

2 Tweefasige wisselstroom

Draaien we een magneet rond twee spoelen met ijzeren kern die loodrecht op elkaar staan dan krijgen we 2 wisselstromen die een faseverschil van 90° vertonen. Dergelijke motor noemen we een asynchroommotor omdat de rotor steeds op het veld achterloopt.

3 Driefasige wisselstroom

Draaien we een magneet rond 3 spoelen met ijzeren kern die onder een hoek van 120° staan, dan krijgen we 3 wisselspanningen die respectievelijk 120° en 240° faseverschil vertonen. De motor die hierbij ontstaat noemt men een (driefasige) draaiveldmotor. In de praktijk komt dit het meest voor. Naast de 3 fase leiders hebben we ook de nulleider, dit als de belasting op alle drie de fasen niet identiek is.

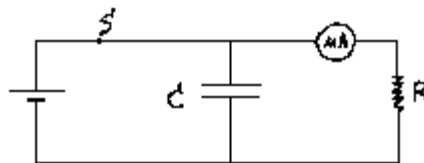
ELEKTROMAGNETISCHE GOLVEN

1 ELEKTROMAGNETISCHE TRILLINGEN

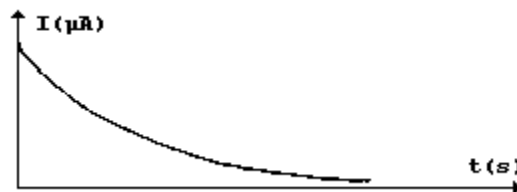
1.1 Elektromagnetische trillingskring

In het lab hebben we vorig jaar de proef over laden en ontladen van een condensator uitgevoerd. De microampèremeter wijst een ontladstroom aan die geleidelijk afneemt. We verkrijgen een stroomstoot die een duidelijk waarneembaar tijdsinterval Δt duurt, want de ontladkring heeft een grote weerstand.

Schakeling



Na uitvoeren van de proef bekwamen we onderstaande figuur.



Vervangen we in deze proef de weerstand door twee spoelen met een groot aantal windingen (orde 10000) die op een gesloten week ijzeren kern zitten dan zal de ampèremeter bij het ontladen van de condensator om zijn nulstand schommelen met een verminderde amplitude. Men spreekt van een gedempte wisselstroom. De impedantie van de wisselstroom is

$$Z = [R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2]^{1/2}$$

$$\text{met } f = \frac{1}{2\pi \times (LC)^{1/2}}$$

Dergelijke keten noemt men een oscillerende keten of trillingskring. Men kan dit oscilleren eventueel met een oscilloscoop of computer zichtbaar maken of met een luidspreker hoorbaar maken.

1.2 Verklaring van het verschijnsel

Reeds in 1847 dacht Helmholtz dat de ontlading van een condensator niet in één zin gebeurt, doch een voortdurend afnemende beweging is.

Proef

Om dit in te zien vullen we een U-vormige buis met kwik. Eén uiteinde dekken we af met de vinger als het kwik hoger staat, daarna laten we het los en we zien het kwik heen en weer bewegen.

Een elektrische trillingskring werkt volledig analoog. De storing is een elektrisch veld is dat zich samen met een magnetisch veld verplaatst. Er is hier voortdurende omzetting van elektrische velden in magnetische velden vandaar dat men spreekt over elektromagnetische trillingen.

Proef

We hangen een stuk ijzer aan een draad. Op een afstand van het ijzer plaatsen we een magneet die we horizontaal houden. Bewegen we nu de magneet verticaal op en neer, dan zal het stuk ijzer de beweging van de magneet volgen. Dit stelt het magnetisch veld voor. Op een afstand van het ijzer bewegen we een glazen staaf horizontaal. De glazen staaf stelt het elektrisch veld voor. Op die manier kunnen we ons een elektromagnetische trilling voorstellen nl. een magnetisch en elektrisch veld loodrecht op elkaar die zich zonder middenstof voortbewegen.

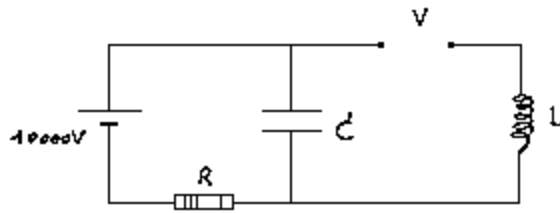
1.3 Frequentie van elektromagnetische trillingen

1.3.1 Als de frequentie van de trillingen laag is, dan spreekt men van laagfrequente trillingen. Uit de formule van Thomson in een RLC-kring kunnen we de frequentie bepalen.

$$\begin{aligned} \text{bv. } L &= 1 \text{ H} \quad C = 1 \text{ } \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F} \\ T &= 2\pi (LC)^{1/2} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\ f &= 159,1 \text{ Hz (= hoorbare toon)} \end{aligned}$$

De laagfrequente trillingen zijn voor de praktijk weinig belangrijk.

1.3.2 De hoogfrequente vanaf 10^4 Hz zijn wel belangrijk omdat Hertz in 1888 aantoonde dat ze elektromagnetische golven doen ontstaan die zich in de ruimte voortbewegen. Om hoogfrequente trillingen te krijgen kan men een Leidse fles als condensator nemen en enkele draden als self. Daar de elektrische energie gegeven wordt door $\frac{1}{2} C \times U^2$ zal, vermits C klein is U groot moeten worden. Is de spanning tussen de bekleedsels voldoende hoog dan springt in V een vonk over waardoor de lucht geleidend wordt en de condensator zich schommelend ontlad.



In de ruimte rondom de trillingskring ontstaat een wisselend magnetisch en een wisselend elektrisch veld. Volgens de theorie van Maxwell gaan die twee altijd samen. Dergelijke golven bewegen zich in de ruimte en uit zijn theorie bleek dat de snelheid waarmee ze zich voortbewegen deze van het licht is. Vorig jaar hebben we gezien dat $c = 1/(\epsilon_0 \times \mu_0)^{1/2}$. Het ontstaan van deze golven, zuiver elektrisch, is voor het eerst door Hertz uitgevoerd in 1888, vandaar de naam Hertzgolven.

1.4 Het elektromagnetisch spectrum

Alle elektromagnetische golven bewegen zich met de snelheid van het licht. Het enige onderscheid tussen de elektromagnetische golven is hun frequentie.

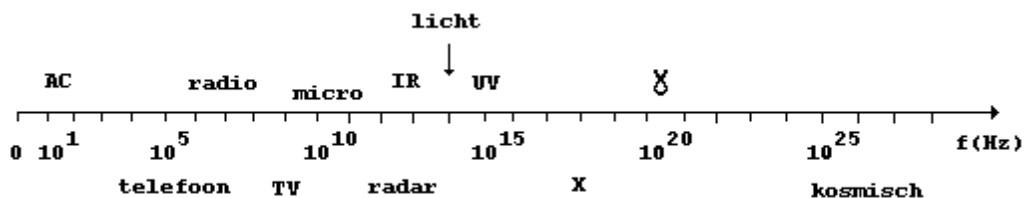
Merk op dat $f = c/\lambda$ en $\lambda = c/f$ met f in Hz en $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

De laagfrequente elektromagnetische golven bewegen zich met de lichtsnelheid in een draad verder. (wisselstroom en telefoon)

De hoogfrequente elektromagnetische golven vanaf 10000 Hz bewegen zich in de ruimte verder, dus draadloos. (radio, TV, radar, licht...)

Overzicht

- van 0 tot 10^2 Hz : wisselstroom
- van 10^2 tot 10^4 Hz : telefoon
- van 10^3 tot 10^{10} Hz : radio en TV
- van 10^8 tot 10^{13} Hz : TV en radar
- rond 10^9 Hz : microgolven
- van 10^{12} tot 10^{14} Hz : IR
- bij 10^{14} Hz : (zichtbaar) licht
- van 10^{14} tot 10^{17} Hz : UV
- van 10^{15} tot 10^{20} Hz : X-stralen
- van 10^{17} tot 10^{22} Hz : gammastralen
- van 10^{22} tot 10^{25} Hz : kosmische stralen



Merk op dat deze frequenties mekaar soms overlappen. Men kan nu ook de golflengte van al deze golven berekenen met bovenstaande formule. We behandelen nu systematisch al deze elektromagnetische golven. Het spreekt vanzelf dat alle eigenschappen die we voor golven bestudeerd hebben hier op alle elektromagnetische golven kunnen toegepast worden o.a. absorptie, terugkaatsing, breking, interferentie en diffractie.

2 LICHTGOLVEN

1 De lichttheorieën

1.1 In 3 TW hebben jullie optica gezien. Het verschijnsel licht is daar verklaard met de emissietheorie van Newton. Volgens de emissietheorie zou licht bestaan uit kleine materiedeeltjes die door lichtbronnen worden uitgezonden.

- Schaduwvorming treedt op als er geen lichtdeeltjes doorkomen. Plaatst men in de omgeving van een lichtbron een scherm met een kleine opening dan vormt zich daarachter een kegelvormige bundel die smaller wordt als de opening kleiner is. Maakt men de opening zo klein mogelijk dan zou men theoretisch 1 lichtstraal kunnen afzonderen.

- Bij terugkaatsing is de invalshoek gelijk aan de terugkaatsinghoek zodat $i = t$.

- Bij breking vinden we dat $\sin i / \sin r = n_2 / n_1 = v_2 / v_1$ met v_2 en v_1 de snelheden in beide middenstoffen. Hieruit zou de snelheid van het licht het kleinst zijn in het luchtledige wat in tegenspraak is met het experiment.

- De kleurschifting wordt verklaard door aan lichtdeeltjes verschillende massa's toe te kennen naargelang de kleur van het licht.

- Bij diffractieproeven krijgt men verschijnselen in tegenspraak met de geometrische optica.

1.2 In het vorig hoofdstuk stellen we vast dat licht uit golven bestaat, met de golftheorie van Huygens wordt licht als een golf opgevat. Denk aan de proef met de rimpeltank, maar nu met licht uitgevoerd.

- Bij terugkaatsing is eveneens $i = t$

- Bij breking is echter $\sin i / \sin r = v_1 / v_2$ wat betekent dat de lichtsnelheid wel het grootst is in het luchtledige wat een argument is om deze theorie het overwicht te geven. (want in overeenstemming met het experiment)

- Kleurschifting wordt verklaard door lichtdeeltjes verschillende snelheden te geven met $v(\text{rood}) > v(\text{violet})$.

1.3 De twee theorieën gaven aanleiding tot veel discussie. De golftheorie van Huygens bleek het meest in overeenstemming te zijn met het experiment (over de lichtsnelheid). In 1899 ontdekt de Duitser Lenard het foto - elektronisch effect, d.w.z. licht kan negatief geladen elektronen uit een metaalplaat losrukken. Einstein kon met de golftheorie dit verschijnsel niet verklaren maar moet fotonen (= materiedeeltjes of weer de emissietheorie) invoeren.

Verklaring

Golven zijn traag, dus het foto-elektronisch effect zou een vertraagd verschijnsel moeten zijn. Het is echter ogenblikkelijk zodat het 'fotonen' moeten zijn. Ook andere effecten, zoals het Comptoneffect (= botsen van fotonen met elektronen) verwijzen weer naar de emissietheorie van Newton.

Welke theorie is nu de juiste?

In 1930 zoeken Heisenberg, Schrödinger en de Broglie naar een oplossing en ze komen tot de conclusie dat deeltjes en golven niet op zichzelf kunnen bestaan.

Een snel vliegend foton gaat steeds samen met een elektromagnetische golf.

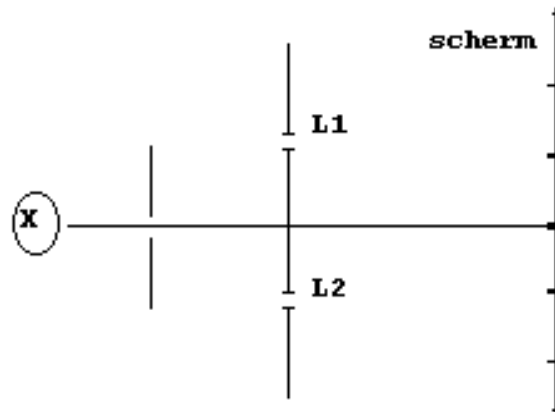
Dit betekent dat we aan licht een duaal karakter moeten toekennen. De ene keer doet licht zich voor als materiedeeltjes en de andere keer als golf. Deze opvattingen betekenden een omwenteling in de fysica en gaven aanleiding tot de hedendaagse opvattingen in de fysica. Hetzelfde principe vinden we in de formule $E = m \times c^2$ waar massa en energie in feite identieke verschijnselen zijn die zich op een andere manier manifesteren.

2 Interferentie van licht

Als licht een golfverschijnsel is moeten we interferentie kunnen verwezenlijken op dezelfde manier als bij watergolven. Bij de rimpeltank gebruikten we twee stiften die gelijktijdig watergolven van dezelfde frequentie en dezelfde amplitude voortbrachten. Wit licht is echter polychromatisch. Gebruiken we twee natriumlampen die monochromatisch (= licht van één golflengte) uitzenden dan zijn de twee lichtbronnen nog niet in fase want om de 10^{-8} s wijzigt de fase en er is 0,1 s nawerkingtijd.

Twee lichtbronnen die steeds in fase zijn noemt men coherent. Om interferentie te kunnen waarnemen met licht moeten we gebruik maken van coherent monochromatisch licht. Men zal het licht langs twee verschillende wegen op dezelfde plaats laten terechtkomen.

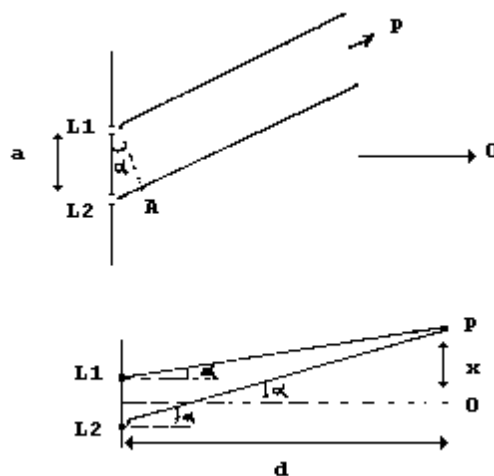
3 Interferentieproef van Young



Bij gebruik van monochromatisch licht ziet men op het scherm een centrale heldere streep en symmetrisch ervan een opeenvolging van donkere en heldere strepen. Bij gebruik van wit licht krijgt men een centrale witte streep en aan weerszijden kleurstrepen. Deze figuren noemt men interferentiefranjies.

Verklaring

De twee dunne spleten L_1 en L_2 (monochromatisch!) zullen zich (volgens Huygens) als secundaire lichtbronnen gedragen. Het licht buigt af, er treedt diffractie op. Daar de spleten hun licht van dezelfde bron L_0 ontvangen zijn ze coherent. In het overlapping gebied zal interferentie optreden. Veronderstel dat L_1 en L_2 zich op een afstand a bevinden. Het punt O is het snijpunt van de loodlijn op het scherm vanuit L_1L_2 . Daar O even ver van L_1 en L_2 ligt zullen de golven in O in fase aankomen en mekaar versterken, dus een centrale heldere streep in O . Daar d groot is t.o.v. a is verondersteld dat de rechten die in P toekomen evenwijdig zijn. De hoek α is de hoek tussen deze rechten en de middelloodlijn.



Het wegverschil zal zijn:

$$PL_2 - PL_1 = L_2A = a \times \sin \alpha$$

a) is dit gelijk aan een geheel aantal golflengten λ , dan zullen de golven mekaar versterken (dus maximale helderheid). Dit is voor $a \times \sin \alpha = n\lambda$ (n geheel)

$\sin \alpha = n\lambda/a$ BUIKEN

b) is dit wegverschil een oneven aantal halve golflengten, dan zullen de golven in tegenfase zijn (dus donker). Dit is voor $a \cdot \sin \alpha = (2n + 1) \cdot \lambda/2$ (n geheel)

$\sin \alpha = (2n+1)\lambda/2a$ KNOPEN

Merk op:

- dat we $\sin \alpha = \alpha$ mogen nemen
- dat bij verschillende kleur ook verschillende franjes zijn
- dat het bij wit licht nog complexer is.

4 Meting van λ en f van monochromatisch licht

Voeren we de interferentieproef van Young uit en noemen we d de afstand van de dubbele spleet tot het scherm en $x = PO$, dan is

$$\text{tg } \alpha = x/d$$

Metten we a, d en x dan kan λ berekend worden uit

$$\alpha = x/d \text{ en } \alpha = n \lambda/a \text{ en dan is } x = n \cdot d \cdot \lambda/a$$

$\lambda = \frac{a}{d} \cdot \frac{x}{n}$

Voorbeeld bij natriumlicht

$$a = 0,20 \text{ mm} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$d = 1,0 \text{ m}$$

$$x = 1,5 \text{ cm} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m voor } n = 5$$

$$\text{of } \lambda = 2 \cdot 10^{-4} \times 1,5 \cdot 10^{-2} / (1 \cdot 5) = 0,60 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.60 \mu\text{m}$$

$$\text{of } f = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 / 0,6 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Merk op

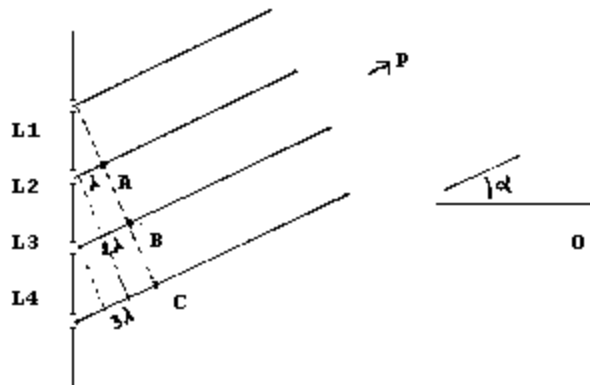
Bij een middenstof is $\lambda(\text{middenstof}) = (v/c) \cdot \lambda(\text{luchtledig})$

5 Interferentie bij een rooster of tralie

Een rooster is een glazen plaat waarin op identieke afstand een groot aantal evenwijdige groeven gekrast zijn (orde 2000 per mm). De afstand tussen twee streepjes noemt men de roosterconstante a .

LABOPROEF

Maakt men de opstelling dan krijgt men met monochromatisch licht een centrale heldere streep aan weerszijden, symmetrisch omgeven door een opeenvolging van heldere scherp begrensde strepen van elkaar gescheiden door donkere banden. Met wit licht ziet men een centrale witte streep, met langs weerszijden symmetrisch, een reeks brede kleurstrepen. (bandenspectrum)



Verklaring

De verschillende strepen van het rooster gedragen zich als coherente lichtbronnen L_1, L_2, L_3 . Een punt P ligt voldoende ver zodat al de lijnen als evenwijdig kunnen genomen worden. In de richting O loodrecht op het rooster bereiken de lichtgolven het scherm zonder faseverschil, ze versterken elkaar en deze centrale streep noemt men de nulde orde franje.

De wegverschillen L_2A, L_3B, L_4C zijn resp. $\lambda, 2\lambda$ en 3λ . Deze golven komen in fase aan in P en vormen er de eerste heldere streep: franje van de eerste orde.

Telkens als de afstand L_2A een geheel aantal golflengten is krijgen we versterking. Dit is als $L_2A = a \times \sin \alpha = n\lambda$

$$\sin \alpha = n \cdot \lambda / a$$

(Identiek met Young)

Voor alle andere richtingen heeft men volledige uitdoving. Gebruiken we wit licht dan krijgen we gekleurde strepen voor interferentie.

Vermits wit licht gaat van $\lambda = 0,4 \cdot 10^{-6}$ m (violet) tot $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-6}$ m (rood) zal voor:

$$n = 1 \quad 0,4 \mu\text{m} < a \times \sin \alpha < 0,8 \mu\text{m}$$

$$n = 2 \quad 0,8 \mu\text{m} < a \times \sin \alpha < 1,6 \mu\text{m}$$

$$n = 3 \quad 1.2 \mu\text{m} < a \times \sin \alpha < 2.4 \mu\text{m}$$

zodat de breedte van de spectra 2,3, maal zo groot wordt.

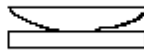
Elke band bestaat uit 'spectraal kleuren', maar vanaf de tweede orde overlappen de spectra elkaar.

Merk op dat de kleurenvolgorde tegengesteld is aan die van het prisma. De deviatie is het grootst voor rode stralen bij het rooster, dit volgt uit de proef.

Men kan nu eveneens de roosterconstante bepalen als we de golflengte kennen en omgekeerd. ($\text{tg } \alpha = x/d$ en $a = \lambda/\sin \alpha$)

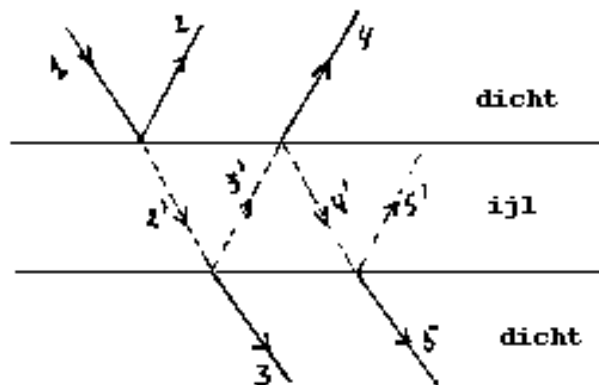
6 Interferentie bij dunne lagen

Neemt men een platbolle lens met kleine kromming tegen een gepolijste glasplaat en kijkt men doorheen de lens en de glasplaat met een Na-lamp dan ziet men een reeks concentrische gele en zwarte cirkels, ringen van Newton genoemd. Bij wit licht krijgt men gekleurde ringen.



Verklaring

Bekijken we onderstaande figuur aandachtig.



1 doorgaande golven

In het ideaal geval nemen we dat 3 en 5 evenwijdig zijn doch een faseverschil vertonen(!), het wegverschil is $2d$ ($3' + 4'$)

of als $2d = n\lambda$ maxima of buiken

$2d = (2n+1)\lambda/2$ minima of knopen

Er is geen volledige uitdoving omdat de golf 3 intenser is dan de golf 5.

2 teruggekaatste golven

Deze zullen volgens de richting 2 en 4 interfereren. Men zou dus analoge formules verwachten voor de minima en de maxima maar (!) bij overgang van optisch ij1 naar

een optisch dichtere stof is er een fasesprong π . Merk op: er is dus geen fasesprong voor 2 maar wel voor 4 (nl. van 2' naar 3').
 Voor doorgaande golven verandert dat niets, want 5 heeft tweemaal een fasesprong. Namelijk van 2' naar 3' en van 3' naar 4')

Nemen we weer $2d$ als wegverschil dan is:

$$2d = (2n + 1)\lambda/2 \quad \text{maxima}$$

$$2d = n\lambda \quad \text{minima}$$

De minima geven hier praktisch volledig uitdoving.

Toepassingen

We kunnen nu afstanden meten die van de grootteorde zijn van de golflengte van licht.

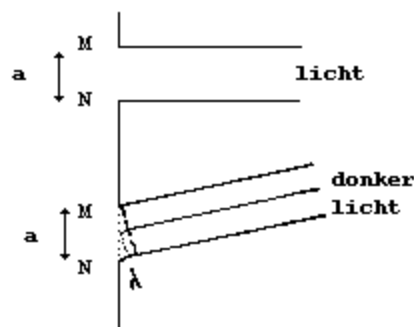
Is $d = 0$ dan is $n = 0$

Bij $2d = \lambda$ is $n = 1$, is λ gekend dan hieruit d

Men kan dit interferentieverschijnsel ook waarnemen bij zeepbellen, dunne olielagen op water, slijpen van lenzen en bij een CD.

7 Diffractie bij een spleet

Golven die door een opening moeten buigen af. Is de golflengte groot en de opening klein dan zal er sterke buiging of diffractie optreden. Bij de proef met de rimpeltank hebben we gezien dat er bij openingen diffractieverschijnselen optreden. Voor licht kan dit echter maar met zeer kleine openingen. We laten de laserstraal invallen op één dunne streep en we zien een patroon dat vrij analoog is met het interferentiepatroon. Bij een punt zien we cirkelvormige ringen ontstaan.



Bij monochromatisch licht komt op het scherm een heldere centrale streep, symmetrisch omringd door donkere en heldere strepen. Bij wit licht is er een centrale witte streep en symmetrische kleurstrepen aan beide kanten.

Deze figuren noemt men diffractiefraanjes. Is de spleetbreedte $MN = a$ dan zien we uit de figuur de verschillende richtingen ontstaan waarbij:

$$\sin \alpha = n\lambda/a \quad \text{de knopen of minima geven}$$

en $\sin \alpha = (2n+1)\lambda/2a$ de buiken of maxima geven

Merk op dat de diffractiemina door dezelfde formule als de interferentiemaxima gegeven wordt bij rooster of Young: de centrale streep is een uitzondering! Ze is helder in beide gevallen.

8 Vragen en opgaven

- 1 Welke kleur wordt het meest gedeveerd bij het vormen van een spectrum: 1)met een prisma 2)met een rooster
- 2 Waarom neemt men geen interferentie waar als licht op de voorzijde en de achterzijde van een ruit terugkaatst?
- 3 Bij de proef van Young met wit licht krijgt men een afstand van 0.32 cm tussen twee opeenvolgende donkere franjes. De afstand tussen de spleten is 0.020 cm en het scherm bevindt zich op 130 cm achter de dubbele spleet. Bereken hieruit λ van wit licht?
- 4 Bij een proef met een rooster liggen de twee spectra van de derde orde van de gele Na-lijn ($\lambda = 0,589 \mu\text{m}$) 50 cm uit elkaar. De afstand rooster scherm is 3 m. Hoeveel lijnen per cm bevat het rooster?
- 5 Men voert de proef van Young uit met een rode lichtbron ($\lambda = 0,700 \mu\text{m}$). De spleetafstand bedraagt 0.010 cm. Op welke afstand moet men het scherm plaatsen opdat de lichte franjes 1 cm van elkaar zouden liggen? Op welke afstand liggen dan de franjes met violet licht? ($\lambda = 0.400 \mu\text{m}$)
- 6 Bij een diffractieproef met golflengte $\lambda = 6500 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ is bij $n = 3$ a gegeven door $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Bereken de plaats van de buiken. (α)
- 7 Bij een proef met dunne lagen is $n = 2$ en $\lambda = 6300 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$. Bereken de maxima van de teruggekaatste golven.

9 Gepolariseerd licht

Het is duidelijk dat licht een golfverschijnsel is. Heeft men nu echter met longitudinale of transversale golven te maken?

Nemen we een rubberkoord en trillen we evenwijdig met de gleuf van een doos, dan gaan de golven ongehinderd door. Is de trilrichting loodrecht op de gleuf dan blijft de koord onbeweeglijk. Draaien we met de rubberkoord voor de gleuf dan komen er golven uit volgens de richting van de gleuf: men zegt dat de gleuf de golven polariseert. Met longitudinale golven (schroefveer) zou de stand van de gleuf geen invloed hebben.

Polariseerbaarheid is een typische eigenschap voor transversale golven. Een transversale golf is lineair gepolariseerd, als de trillingen uitsluitend in 1 vlak voorkomen. Plaatst men voor een Reuterlamp twee polaroidfilters (plastiek plaatjes die aan een richtkracht onderworpen zijn) dan krijgt men bij draaiing van de tweede filter ofwel een minimum ofwel een maximum aan intensiteit. Natuurlijk licht bestaat dus uit transversale golven loodrecht trillend op de voortbeweging richting in alle mogelijke vlakken door die voortbeweging richting gebracht. De eerste polaroid, de polarisator genoemd laat slechts lichtgolven door waarvan het trillingsvlak een bepaalde richting heeft. (bepaald door de kristalstructuur) De tweede polaroid, de analysator zal het gepolariseerd licht dat uit de polarisator komt tegenhouden indien de voorkeursrichtingen van beide polaroidfilters loodrecht op elkaar staan: gekruiste polaroiden. Draait men de analysator over een hoek van 90° dan worden de twee voorkeursrichtingen evenwijdig en de analysator laat het gepolariseerd licht nagenoeg ongehinderd door. Voor een schuine stand treedt vermindering van intensiteit op.

Voorstelling van gepolariseerd licht

Lichtbundel in vlak van figuur $-|-|-|-|-|->$

Lichtbundel loodrecht vlak figuur $-...-...-...->$

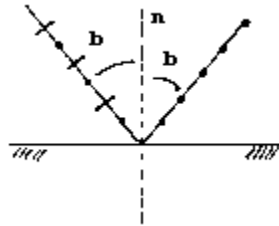
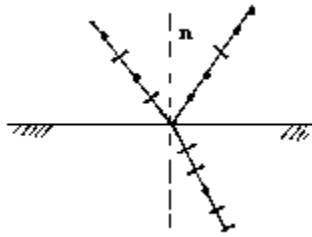
Niet gepolariseerd licht $-|-|-|-|-|-->$

Met // polaroidfilters $\begin{array}{c} || \quad || \\ ->|-|-|-|-|-|-|-|-> \\ || \quad || \end{array}$

Met gekruiste filters $\begin{array}{c} || \quad || \\ ->|-|-|-|-|-|-|| \\ || \quad || \end{array}$

10 Polarisatie bij terugkaatsing en breking

Voor een bepaalde invalshoek, hoek van Brewster genoemd is het licht dat door een doorzichtige of doorschijnende stof teruggekaatst wordt gepolariseerd. Ook de gebroken straal is gepolariseerd.



Uit proeven bleek dat $\text{tg } b = n$ met $b =$ hoek Brewster
 bv. $n = 1.51$ (glas) is $b = 56^\circ 29' 7''$

$$\sin r = \sin i/n = \sin b / \text{tg } b = \cos b = \sin(90^\circ - b)$$

$$\text{of } r = 90^\circ - b$$

$t + r = 90^\circ$

Toepassingen

In brillen en de fotografie worden polaroidfilters gebruikt. (spiegeleffect)

Vliegtuigramen en koplampen van auto's worden soms van polaroidfilters voorzien.

12 Polarizatie bij dubbelbreking

Proef

Leg een veldspaatkristal (CaCO_3) op een blad papier en je ziet alle letters dubbel. Bij breking door doorzichtige kristallijne stoffen wordt de invallende lichtstraal meestal in twee delen gesplitst. Dit verschijnsel noemt men dubbelbreking.

Soms volgt geen van beide gebroken stralen de wet van Snellius maar in de meeste gevallen volgt een deel, de gewone straal deze wet en de andere, de buitengewone straal, de wet niet. Zowel de gewone als de buitengewone straal zijn gepolariseerd, dit kan bij kristallen die twee voorkeursrichtingen hebben die loodrecht op elkaar staan. Invallend licht wordt door het kristal in twee trillingen gesplitst die beide een verschillende voortbeweging snelheid hebben en dus ook een verschillende brekingsindex. Om de stralenbundels af te zonderen en zuiver gepolariseerd licht te krijgen maakt men gebruik van een nicol. Een nicol is een veldspaatkristal zo geslepen en gezaagd, en gelijmd met canadabalsem, dat alleen de buitengewone

straal praktisch onverzwakt en in het verlengde van de invallende straal uittreedt. Sommige oplossingen van organische stoffen hebben de eigenschap het polarisatievlak van het licht te draaien over een hoek die afhankelijk is van het gebruikte licht, van de lengte van de lichtweg in de stof en van de concentratie als het een oplossing is. Deze stoffen noemt men optisch actief. Men spreekt van rechts- en linksdraaiende stoffen o.a. om het suikergehalte in stroop en in urine te bepalen!! In het lab voeren we de proef met de polarimeter uit. Daar kunnen we in oplossingen het suikergehalte bepalen.

13 Licht van een laser

13.1 Hoe werkt een laser?

Om de werking van een laser goed te begrijpen moeten we vier zaken nader verklaren nl. spontane emissie, gestimuleerde emissie, populatie inversie en versterking.

a. Spontane emissie

In het atoommodel van Bohr-Sommerfeld cirkelen de elektronen in welbepaalde banen. Ze hebben dan ook een welbepaalde energie.

Een elektron kan van een lagere naar een hogere baan 'springen' als er bv. een ander elektron tegen botst of als het elektron een foton absorbeert. In beide gevallen neemt de energie van het elektron toe en komt het in een hogere baan terecht. Men zegt dat het elektron zich in een 'aangeslagen toestand' bevindt. Deze aangeslagen toestand is echter niet stabiel: de natuur streeft naar een toestand van minimale energie. Dit betekent dat het aangeslagen elektron na extreem korte tijd weer zal terugvallen naar de oorspronkelijke lagere baan, de grondtoestand, het teveel aan energie wordt onder de vorm van fotonen uitgestraald.

Dit proces noemt men spontane emissie: spontaan omdat het elektron 'vanzelf' terugvalt en emissie omdat er een foton wordt uitgezonden.

Spontane emissie kom je bv. tegen in het inwendige van de TI-buis (cursus 5 TW). In zo'n TI-buis ontstaat een gasontlading, de aangeslagen atomen worden onder de vorm van een ultraviolet foton uitgestraald. Het poeder aan de binnenzijde van de buis doet dan zichtbaar licht uitstralen door het ingevangen UV-foton.

b Gestimuleerde emissie

We hebben nu gezien dat een elektron aangeslagen kan worden, het komt dan in een hogere baan terecht die echter niet stabiel is. Na verloop van tijd valt het elektron terug onder uitzending van een foton. Bij een laser hebben we echter niet te doen met spontane emissie, maar wel met gestimuleerde emissie. We gaan uit van een elektron dat reeds in aangeslagen toestand is. Neem aan dat dit aangeslagen elektron wordt getroffen door een foton van precies dezelfde golflengte (en ook die energie) die het zelf zou uitzenden bij terugval naar de grondtoestand. Je zou verwachten dat het elektron dan naar een nog hogere baan zou springen. Juist niet: het elektron valt terug naar de grondtoestand onder uitzending van een foton. Het foton dat voor de terugval verantwoordelijk was wordt niet geabsorbeerd, maar vervolgt zijn weg.

We hebben dus nu twee fotonen met exact dezelfde golflengte (en energie), die in fase zijn en in dezelfde richting voortbewegen (coherent) De werking van de laser berust op dit proces van gestimuleerde emissie. Maar de meeste atomen bevinden zich niet in aangeslagen toestand. In normale omstandigheden zal er dus praktisch alleen spontane emissie optreden.

c Populatie-inversie

Om een laser te verkrijgen moeten we proberen ervoor te zorgen dat de meeste atomen zich in aangeslagen toestand bevinden in plaats van in de grondtoestand. Deze tegennatuurlijke situatie noemt men populatie-inversie. Bij de ontwikkeling van de laser was dat het grootste struikelblok. Kan in een bepaald materiaal (kristal, gas of halfgeleider) populatie-inversie optreden, dan is het materiaal geschikt als toepassing in lasers.

Maiman slaagde erin een populatie-inversie van de chromatomen van zijn robijnkristal te verkrijgen door het kristal met lichtflitsen te bombarderen. Deze lichtflitsen waren afkomstig van de spiraalvormige flitsbuis om het kristal. Bij een He-Ne laser wordt de energie geleverd door een gasontlading. Algemeen noemen we dit pompen van de laser.

d Versterking

Hoe kunnen we nu de krachtige, coherente en gerichte laserstraal verkrijgen? Van alle aangeslagen atomen uit de inversietoestand zal er altijd wel eentje spontaan terugvallen naar de grondtoestand. Het foton dat hierbij wordt uitgezonden, kan bij een ander aangeslagen atoom een tweede foton vrijmaken (gestimuleerde emissie), de resulterende twee fotonen kunnen elk twee nieuwe fotonen vrijmaken (dan zijn er al vier). We hebben hier dus een sneeuwbaaleffect waarbij steeds meer fotonen vrijkomen. Het probleem is echter dat de richting waarin het spontaan geëmitteerde oorspronkelijke foton wordt uitgezonden, allerm minst vastligt. Bovendien zal er wel meer dan een foton spontaan vrijkomen zodat het licht in alle richtingen zal worden uitgezonden. Dit is zeker geen laserstraal. Dat wordt anders als we de uiteinden van het robijnkristal perfect polijsten zodat het spiegelende oppervlakken worden die exact evenwijdig staan en loodrecht op de lengteas van het kristal. Als er dan een foton vrijkomt dat niet exact evenwijdig is met de lengteas dan zal dit het kristal verlaten en doet niet meer mee. Na verloop van korte tijd zal er wel een foton zijn dat precies in de lengte richting loopt en begint het proces.

Onderweg naar een van beide spiegels zal het meer fotonen vrijmaken zodat uiteindelijk een lawine van fotonen ontstaat allemaal in dezelfde richting en allemaal in fase. Bij de spiegel kaatsen ze terug en het proces gaat door in de andere richting. De stroom fotonen wordt hierbij steeds krachtiger. Op die manier wordt het licht in de laser versterkt en krijgen we haast automatisch een coherente gerichte bundel. De laserstraal moet nu nog alleen het kristal kunnen verlaten, anders hebben we er niet veel aan. Om die reden laat een van de spiegels het licht in geringe mate door en zal de laserstraal krachtig genoeg zijn om het kristal te verlaten.

13.2 Eigenschappen van laserlicht

De extreme bundeling is het geheim van het grote effect van laserstralen. De op zichzelf opgenomen geringe energie wordt op een miniem klein plekje geconcentreerd. Bestralingssterktes van $10^6 \dots 10^{12} \text{ W/cm}^2$, dat klinkt geweldig. In werkelijkheid zijn de vermogens over een vierkante micrometer verdeeld zodat het vermogen toch vrij normaal is. Een tweede belangrijke eigenschap is het monochroom zijn van de lichtbron. Laserlicht heeft slechts een kleur en dus ook een golflengte, terwijl wit licht in feite een combinatie is van verschillende kleuren en golflengtes.

Tenslotte is laserlicht coherent, dat wil zeggen alle stralen trillen in fase. Daarvoor moeten de spiegels niet alleen exact evenwijdig zijn, maar ook zover van elkaar staan dat de heen en weer gaande stralen mekaar versterken.

13.3 Soorten lasers

1 De eerste laser was een kristallaser of vaste stof laser.

Er kunnen zo'n 200 materialen laserstralen uitzenden. Na robijn is de Nd-glas laser tegenwoordig de laser die de krachtigste stralen uitzendt (temperaturen tot 5 miljoen graden).

2 Ook gassen en gasmengsels kunnen laserstralen uitzenden. Onder de gaslasers is de He-Ne laser de bekendste. Ook de laser die wij in het lab gebruiken is van dat type. Men kan zijn hand in de rode straal houden zonder veel gevaar, echter niet de ogen.

Een andere gaslaser is de argon-laser die al moet gekoeld worden voor gebruik. Hij wordt meest gebruikt voor geneeskundige toepassingen en geeft een blauwgroen licht. De derde soort gaslaser, de CO₂-laser, kan met zijn infrarode straal zelfs diamant smelten.

3 De derde soort laser is de halfgeleiderlaser.

Dit zijn dwergen met een reikwijdte van enkele cm, die in de elektronica geweldige toepassingen heeft.

13.4 Toepassingen van lasers

Sedert 1960, het geboortjaar van de laser wordt deze onder andere gebruikt voor:

De vaste stof laser

- wetenschappelijk onderzoek
- kernfusie onderzoek
- chemie

De gaslaser

- meettechniek bv. bij bouwconstructies
- onderwijs zie lab proef
- geneeskunde
- chemische analyse (spectrografie)
- afstandsmetingen bv. afstand aarde - maan
- materiaalonderzoek
- het harden van metalen
- boren, lassen frezen
- snijden
- schrijven
- driedimensionale afbeeldingen (holografie)
- beeldende kunst

De halfgeleiderlaser (laserdiode)

- communicatietechniek
- datatransmissie (audio, video en digitaal)
- printers (witzwart en kleur)
- geneeskunde

3 RADIO- TV- EN RADARGOLVEN

1 Golflengte en frequentie van radiogolven

Draai je aan de afstemknop van de radio dan hoor je in diverse standen zendposten. Als je de radio-ontvanger afstemt op bv. 550 kHz en je hoort geluid of muziek dan betekent dit dat een radiozender golven uitzendt met golflengte 545 m.

Dit kan berekend worden uit de formule $\lambda = c/f$ met $c = 3 \cdot 10^8$ m/s de lichtsnelheid.

Hoe kunnen de golven opgevangen worden?

In elke draagbare radio zit een ferrietantenne. Deze bestaat uit een spoel die over een ferrietstaaf is geschoven. Als wisselende magnetische veldlijnen door de spoel gaan wordt hierin een wisselspanning geïnduceerd. Je ziet dat het effect maximaal is (beste ontvangst) als de lange zijde van de ferrietstaaf naar de zender "kijkt".

Hoe kun je al die zenders uiteenhouden?

Tienduizenden radio- en TV- zenders over de hele wereld zenden voortdurend hun elektromagnetische golven uit. Elke zender zendt uit met zijn eigen welbepaalde frequentie. Dit noemt men de draaggolf.

Voorbeeld: Radio Donna: 101,5 MHz

Al deze golven treffen de antenne van onze radio allemaal tegelijk. (als het signaal sterk genoeg is)

De combinatie spoel- condensator noemt men een afstemkring. Voor elke stand van de draaibare condensator is de kring gevoelig voor juist 1 frequentie. Alleen wisselstroom met die frequentie (afkomstig van de antenne) wordt doorgegeven naar de meter. Alle andere frequenties stromen weg naar de aarde. Uit het mengsel van alle elektromagnetische golven die op de antenne vallen, kiest de afstemkring er zo de juiste uit. Als de afstemkring zo eenvoudig is, komt in onze streken normaal alleen Radio 1 door: een zender die dichtbij is en een sterk signaal uitzendt.

2 Golven de wereld rond

Radiogolven bewegen, net als lichtgolven, rechtlijnig. Toch kunnen we radiozenders horen die 'ver achter de horizon' liggen horen.

Hoe komt dat?

Hoog in de atmosfeer bevinden zich luchtlagen die bestaan uit elektrisch geladen deeltjes: de ionosfeer. Deze ontstaan doordat zonlicht de elektronen 'losschiet' van de luchtmoleculen. Korte golven worden door de ionosfeer weerkaatst. Omdat ze ook door de aarde weerkaatst worden, kunnen korte golven zelfs verschillende keren rondreizen. De 'werelduitzendingen' van VRT gebeuren met korte golven; clandestiene zenders tijdens WO II gebruikten deze ook.

Op de middengolf kan je 's avonds en 's nachts meer zenders horen dan overdag. Dat komt omdat 's nachts middengolven wel weerkaatsen op de ionosfeer: overdag worden ze geabsorbeerd.

Je vangt dan niet alleen een rechtstreekse, maar ook een weerkaatste golf op. Die twee golven interfereren met elkaar maar omdat de samenstelling van de ionosfeer voortdurend verandert, verandert ook die interferentie. Daarom hoor je de signaalsterkte van veel zenders 's nachts voortdurend veranderen. Dit noemt men fading.

Signalen met golflengte kleiner dan 10 m (FM, TV) bewegen rechtlijnig. Ze worden tegengehouden door bergen en zelfs door flatgebouwen. Daarom is men eerst in Wallonië met kabeltelevisie begonnen. FM, VHF, UHF geraken dus ook niet verder dan de horizon. Daarom bestaat er zo'n uitgebreid net van hoge relaiszenders die signalen van 'horizon naar horizon' ontvangen, versterken en weer uitzenden.

Omdat zeer korte golven dwars door de ionosfeer heengaan worden ze gebruikt voor communicatie van en naar ruimtetuigen en voor satelliettelevisie.

3 Draaggolf

Elektromagnetische golven kan je pas goed uitzenden als ze een frequentie hebben van minstens 150000 Hz (= hoogfrequent HF)

bv. Radio 1 ongeveer 1 000 000 Hz op middengolf

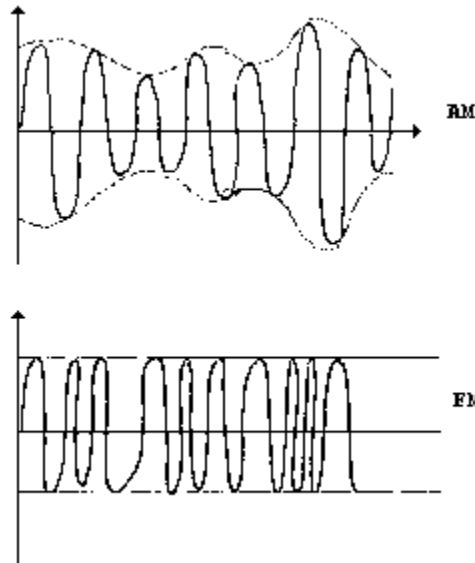
100 000 000 Hz op FM

Alleen, wat we willen uitzenden is muziek, spraak, d.w.z. signalen met frequenties tot maximaal 20000 Hz = laagfrequent LF

Omdat muziek en spraak zich niet met de lichtsnelheid bewegen zouden we veel te lang moeten wachten om muziek uit onze radio te krijgen. We passen daarom een truc toe. De truc heet modulatie.

De door de zender geproduceerde HF - trillingen worden bij muziekoverdracht als transportmiddel gebruikt. Daarom heet de HF - golf: draaggolf.

In de zender wordt de LF - trilling van de muziek toegevoegd aan de draaggolf. Dit kan op twee manieren:



Amplitudemodulatie (AM)

Men laat de amplitude (= sterkte) van de HF - draaggolf veranderen volgens de frequentie van de LF - muziek. Radio 1 op middengolf werkt volgens dit systeem, korte golf, lange golf en tv-beeld werken ook zo.

Frequentiemodulatie (FM)

Men laat de frequentie van de HF - draaggolf veranderen volgens de frequentie van de LF - muziek. Lokale radio's werken volgens dit systeem. Uit ervaring weet je waarschijnlijk dat de kwaliteit van FM veel groter is dan die van AM. Dat komt omdat het FM-systeem muziek met frequenties 0-15000 Hz kan uitzenden, bij AM is dat slechts 0-5000 Hz. Bovendien is FM veel minder gevoelig voor storingen.

4 Radargolven (radio detectie and ranging)

De frequentie is groter dan bij radiogolven, de golflengte is dus kleiner.

Toepassingen

- Hiermee kan bv. aan luchtcontrole gedaan worden.
- Een andere mogelijkheid is het opsporen van te snel rijdende auto's, je wel bekend van de rijkswacht. Deze flitsradar gebruikt het Dopplereffect bij elektromagnetische golven om de snelheid te meten.

4 MICROGOLVEN

1 Wat zijn het en eigenschappen

Microgolven situeren zich tussen TV golven en IR licht. Ze hebben een frequentie van 2450 MHz wat overeenkomt met een golflengte van 12.25 cm.

Microgolven bezitten dezelfde eigenschappen als geluidsgolven. Ze bewegen zich rechtlijnig voort, gaan door sommige stoffen door, worden door andere weerkaatst en worden door nog andere (voedsel) geabsorbeerd.

Deze eigenschappen zijn belangrijk voor het gebruik van de gepaste materialen bij de bouw van het toestel en bij het gebruik van recipiënten. Ook de structuur van het voedsel speelt een rol bij de bereidingen. Zo is het doordringend vermogen bij vlees 2 tot 3 cm en bij andere gerechten 5 tot 7 cm.

Glas, keramiek, bepaalde kunststoffen, karton en porselein laten de microgolven vrijwel ongehinderd door en ze nemen zelf ook geen warmte op. Metalen en metaalfolie reflecteren de microgolven.

2 Toepassingen

De meest bekende toepassing is natuurlijk de microgolfoven of magnetron. Een microgolfoven bestaat uit 5 belangrijke bestanddelen:

- 1 Een vermogen transformator om de magnetron met HS te voeden met energie
- 2 De magnetron om hoogfrequente elektromagnetische golven te produceren
- 3 De golfgeleider of hoogfrequent generator om de microgolven van de magnetron in de ovenruimte te geleiden
- 4 Oven met kijkvenster, metalen ruimte met kijkmogelijkheid
- 5 Ventilator met motor voor het verdelen van microgolven in de oven.

De golven die de magnetron produceert dringen in het voedsel. Vermits iedere stof bestaat uit een groot aantal deeltjes, moleculen, zullen deze hevig beginnen trillen onder invloed van de energie van de golven. De wrijving is zo groot dat er opwarming is (vergelijk met de handen warmen als men ze tegen mekaar wrijft).

5 IRGOLVEN EN UVSTRALEN

De zon is als het ware een reusachtige gloeilamp van $3,9 \cdot 10^{26}$ Watt. Die lamp zendt echter alle soorten elektromagnetische straling uit: van radiogolven tot gammastralen. Van radiogolven, infrarood en zichtbaar licht wordt aangenomen dat ze +/- onschadelijk zijn voor de mens. Vanaf de Uv-stralen over röntgenstralen tot de radioactieve gammastralen stelt men toenemend gevaar vast.

hoe kleiner de golflengte, hoe gevaarlijker de straling

Zonnestraling die de aarde bereikt bestaat hoofdzakelijk uit infrarood licht, zichtbaar licht en ultraviolet licht. Als de zonnestraling de aardoppervlakte bereikt blijft over: 9% UV, 49% zichtbaar en 42% IR

1 IR - golven

Op het einde van de 18de eeuw ontdekte de Engelse astronoom Herschel (1738-1822) door proeven met prisma's en thermometers de infraroodstraling van de zon. Infraroodstraling van de zon wordt tamelijk sterk geabsorbeerd door de atmosfeer; daardoor wordt de lucht opgewarmd. Als IR - stralen op ons lichaam terechtkomen voelen we dat als warmte.

Toepassingen

- afstandsbedieningen
- IR - lampen voor warmte
- in doka's bij het ontwikkelen van foto's
- weerfoto's in het IR.

2 UV - stralen

De Duitse natuurkundige Ritter (1776-1810) ontdekte de ultravioletstralen die op chemische stoffen inwerkt. Sommige fotografen gebruiken bij buitenwerk een UV - filter. Ultravioletstralen wordt gelukkig in grote mate tegengehouden door de ozonlaag in de stratosfeer. De Uv-straling wordt gewoonlijk ingedeeld op grond van zijn biologische effecten op huid en ogen

- UV-C (100-280 nm) verbrandt en vernietigt de huid. Het wordt door de ozonlaag praktisch volledig tegengehouden.

- UV-B (280-320 nm). Na een eerste dag zonnen heeft men 's nachts een pijnlijke huid. Dit is zonnebrand of erythema. In de pigmentcellen van de huid ontstaan bruine korrels, melanine . Dit is het bruinen van de huid. Bij voortgaande UV-B-

bestraling begint de huid dikker te worden. Beide effecten beschermen de huid bij verder zonnen. Uv-straling versnelt de veroudering van de huid en verhoogt de kans op huidkanker: carcinomen (1% overlijden) en melanomen (30 tot 50% overlijden)

- UV-A (320-400 nm) Veroorzaakt weinig zonnebrand en enkel oppervlakkig bruinen van de huid. Zonnebanken werken met UV-A

6 X-STRALEN OF RONTGENSTRALEN

1 Wat zijn X-stralen?

Eind 19de eeuw experimenteerden natuurkundigen veel met kathodestraalbuizen. Dit zijn glazen buizen die allerlei vormen kunnen hebben waarin zich twee elektroden van een metaal bevinden waartussen een spanning van enkele tot vele duizenden volt gezet kan worden. De buis is zo goed mogelijk luchtledig gemaakt. De kathode wordt met de negatieve pool, de anode met de positieve pool van de spanningsbron verbonden. Men zag het glas tegenover de kathode oplichten. Het leek alsof er straling uit de kathode vrijkwam die naar de anode toe bewoog.

Waaruit bestond die straling?

Sir William Crookes (1832-1919) ontwierp een kathodestraalbuis met een molentje. Als de spanning werd aangesloten rolde het molentje langzaam van de kathode naar de anode. Uit deze en andere proeven is men te weten gekomen dat kathodestrallen bestaan uit negatief geladen deeltjes nl. elektronen die worden uitgezonden door de kathode. Een Tv-scherm is zo'n kathodestraalbuis. De elektronen die uit de kathode loskomen hebben flink wat energie.

Wat gebeurt er met die energie als ze op het glas botsen?

In 1895 kreeg W.C. Röntgen, directeur van het natuurkundig instituut van de universiteit van Würzburg in de gaten dat een scherm bedekt met fluorescerend materiaal oplichtte als een kathodestraalbuis in de buurt werkte. Het bleek dat dit gebeurde omdat de elektronen bij het afremmen op het glas, hun energie uitstraalden als elektromagnetische golven.

Deze Röntgen of X-stralen hebben een golflengte tussen ongeveer 10 nm en 0.01 nm, dit is ongeveer de afstand tussen de atomen in de stof.

De spectaculairste ontdekking deed Röntgen natuurlijk toen hij zijn hand tussen de kathodestraalbuis en het scherm hield: hij zag de beenderen van zijn hand op het scherm verschijnen. Voor zijn ontdekking kreeg hij de eerste Nobelprijs fysica in 1901. Reeds drie maand na de ontdekking werden X-stralen toegepast in de geneeskunde. Moderne Röntgenfoto's worden gemaakt met een film die aan twee kanten bedekt is met een lichtgevoelige laag. Deze bevindt zich tussen twee stukken karton die bedekt zijn met kristallen die X-stralen opnemen en in 'ruil daarvoor' zichtbaar licht afgeven.

2 Gevaren van röntgenstralen

Kort na 1895 zag men reeds dat röntgenstralen gevaarlijk kunnen zijn: onderzoekers die zich lang aan X-stralen blootstelden liepen ongeneeslijke brandwonden op, werden ziek en stierven. Omdat röntgenstralen zo'n kleine golflengte hebben kunnen ze menselijke cellen vernietigen en of veranderen in kankercellen. Daarom wordt bij radiografie de dosis zo laag mogelijk gehouden, de radioloog gaat achter een loden scherm staan, bij zwangere vrouwen voert men, indien het kan vermeden worden geen röntgenonderzoeken uit.

Röntgenstralen kunnen dezelfde schade aanrichten als radioactieve stralen. In een kerncentrale loopt iedereen met een badge rond, dit is een soort filmpje waarop de verkleuring aangeeft hoeveel straling men heeft ontvangen. Een Tv-toestel en een monitor zenden een kleine hoeveelheid straling uit.

1 Sievert (Sv) = de eenheid van ontvangen straling rekening houdend met het biologisch effect

De wet voorziet maximaal 50 mSv/jaar voor werknemers in een kerncentrale en maximaal 500 mSv/jaar voor het publiek.

Bv. radiografie van de longen = 1 a 2 mSv

 maag = 2 a 5 mSv

 tanden = 0.2 mSv

 een jaar TV 1 uur per dag = 0.02 mSv

ELEKTRONICA

1 HALFGELEIDERS

1 Opbouw van vaste stoffen

Om elektrische leidingen te leggen gebruiken we draden die meestal uit 2 delen bestaan nl. koper, dit is een goede geleider omgeven door polyvinylchloride, dit is een goede isolator.

Waarom is de ene stof een goede geleider, de andere stof een goede isolator?
Dit komt omdat de ene stof meer vrije elektronen heeft dan de andere.

Zo bestaat koper uit atomen die zeer dicht op elkaar zitten. Elk atoom heeft zijn ene valentie elektron losgelaten. Deze vrije elektronen bewegen wanordelijk tussen de overblijvende atoomrompen (= ionen) door.

Polyvinylchloride is een kunststof (elpees, regenpijpen, doorschijnend tekenmateriaal, worden ervan gemaakt) met zeer weinig vrije elektronen. De stof is dus een isolator.

Het is duidelijk dat vaste stoffen opgebouwd zijn uit atomen. De elektrische eigenschappen van de stof worden bepaald door de binding tussen de atomen in de stof.

Zo zijn bv. diamant en grafiet twee koolstofbindingen met verschillende structuur. Ze hebben dan ook verschillende elektrische eigenschappen.

Diamant heeft praktisch geen vrije elektronen en is dus eerder een isolator. Grafiet bestaat uit atomen koolstof waarvan slechts 3 buiten elektronen voor de binding met andere atomen instaan. Het overblijvende elektron kan vrij bewegen tussen de atoomlagen door. Grafiet is dus eerder een goede geleider.

In de lessen chemie hebben jullie gezien dat er drie soorten bindingen kunnen voorkomen.

- Bij de ion binding staat een atoom een of meer valentie elektronen af en wordt een ion. De bindingskracht is de Coulombkracht.

- Bij de covalente binding zijn de elektronen gemeenschappelijk aan meerdere atomen en zorgen voor een sterke binding.

- Bij de metaalbinding kunnen de valentie elektronen gemakkelijk worden vrijgegeven. De positieve ionen vormen een rooster. De vrije elektronen zijn niet meer door een atoom gebonden en kunnen zich vrij bewegen door het ionenrooster.

2 Energiebanden

Elektronen bewegen op schillen met een bepaalde energie. Dat geldt voor een geïsoleerd atoom. Zijn er meerdere atomen die op korte afstand van elkaar zitten, dan beïnvloeden die elkaar.

In een vaste stof met N-atomen beïnvloeden de energieniveaus elkaar. Die energieniveaus noemen we energiebanden. Tussen de banden zijn er energiewaarden die niet mogelijk zijn, de energiegaps.

De energieniveaus van de valentie elektronen die in de grondconfiguratie bezet zijn noemen we de valentieband.

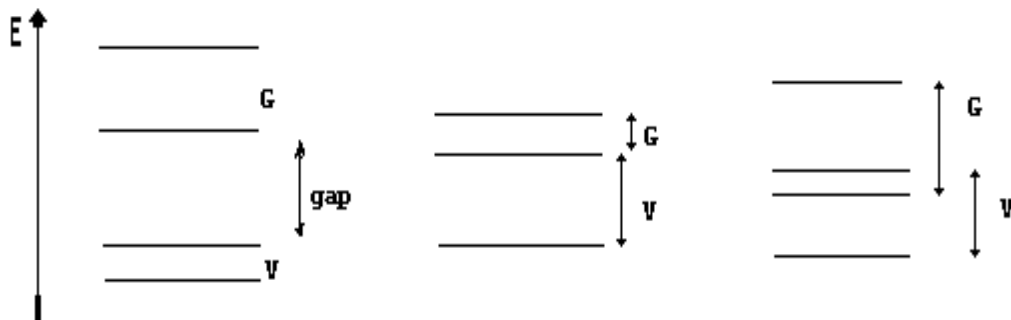
De lege energieniveaus boven de valentieband noemen we de geleidingsband.

Als een elektron uit de valentieband voldoende energie opneemt dan springt het naar de geleidingsband en wordt daar een vrij elektron dat voor geleiding zorgt.

Er zijn in feite drie mogelijkheden:

- of er is een energiegap
- of de energiegap is nul
- of er is overlapping

Een figuur maakt het duidelijk.



3 Verklaring

Dit verklaart meteen ook het verschil tussen metalen, isolatoren en zuivere halfgeleiders.

- Bij metalen zoals natrium en magnesium is de hoogst bezette energieband niet volledig gevuld of liggen de valentieband en de geleidingsband gedeeltelijk over elkaar.

- Bij isolatoren is de valentieband in de grondtoestand vol en liggen de valentieband en de geleidingsband ver uit elkaar.

- Bij zuivere halfgeleiders is de valentieband in de grondtoestand vol en is de energiegap tussen de valentieband en de geleidingsband van de orde 1 eV (dit is een energie van $1,60 \cdot 10^{-19}$ J) en dus gemakkelijk overbrugbaar.

Bij lage temperatuur zitten alle valentie elektronen in de valentieband en gedraagt de halfgeleider zich als een isolator.

Bij hogere temperatuur kunnen sommige de kleine energiegap overbruggen en komen in de geleidingsband terecht. Het elektron is dan los uit zijn covalente binding en wordt een vrij elektron. De halfgeleider wordt een geleider.

Als een valentie elektron energie opneemt komt het uit zijn covalente binding vrij, men spreekt van excitatie. Er ontstaat een positief gat. Het gat kan door een ander elektron opgevuld worden. Het gat kan zich dus verplaatsen. Het opvullen van een gat noemen we recombinatie.

In een zuivere halfgeleider wordt de geleiding veroorzaakt door vrije elektronen en gaten. Er zijn evenveel vrije elektronen als gaten. Men spreekt over intrinsieke halfgeleiding.

Zo is de driftsnelheid bij een veld van 1 N/C de snelheid van de elektronen 14 m/s en dat van de gaten 5 m/s.

4 Halfgeleiders: silicium en germanium

De hele elektronica is gebaseerd op silicium (een niet-metaal met metaalachtige glans, massadichtheid $2,3 \text{ g/cm}^3$ en smeltpunt $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) en op germanium () en op zijn burens in de groepen IIIa en Va in het periodiek systeem.

Elk siliciumatoom (germaniumatoom) heeft 4 elektronen in de buitenste schil. In zuiver silicium (germanium) zijn de atomen aan elkaar gebonden door elektronenparen: een elektron van het ene atoom, een elektron van het andere atoom. Daardoor zijn er praktisch geen vrije elektronen: zuiver silicium (germanium) is een isolator bij lage temperatuur.

Bij kamertemperatuur komen er wel wat elektronen vrij:

koper : 10^{23} vrije elektronen per cm^3

silicium : 10^{11} vrije elektronen per cm^3

diamant : 10 vrije elektronen per cm^3

Toch zijn silicium en germanium allesbehalve geleiders. Omdat de eigenschappen van silicium en germanium tussen deze van geleiders en isolatoren inzitten noemen we ze intrinsieke halfgeleiders.

Uit de wet van Pouillet weten jullie dat de resistiviteit (ρ) van een stof een grootte is die aangeeft hoe sterk die stof de neiging heeft, de doorgang van de elektrische stroom te hinderen.

Resistiviteit (ρ) = de resistantie van een weerstand, gemaakt van dat materiaal, met een lengte van 1 m en een doorsnede van 1 m^2 . Resistiviteit wordt uitgedrukt in Ωm .

Isolatoren hebben dus een hoge resistiviteit, geleiders een lage resistiviteit. Halfgeleiders liggen er tussenin.

Voorbeelden

$$\rho_{\text{koper}} = 10^{-8} \Omega\text{m}$$

$$\rho_{\text{glas}} = 10^{11} \Omega\text{m}$$

5 Silicium doperen

Om silicium te kunnen gebruiken voor diodes, transistors, integrated circuits, moet het eerst heel zuiver worden gemaakt: maximum 1 "vreemd" atoom / 10^{10} silicium atomen.

Daarna moet het opzettelijk worden 'verontreinigd' (gedopeerd): één "vreemd" atoom / 10^7 silicium atomen

Wat betekent $1/10^{10}$?

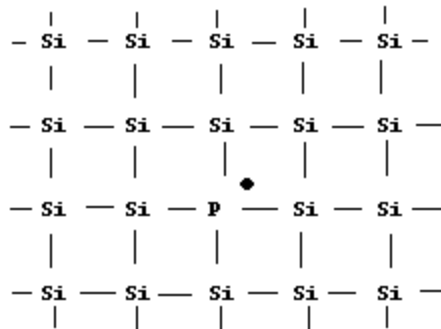
Een kubus met zijden 4,5 m x 4,5 m x 4,5 m; volledig gevuld met dit atomen patroon. Daarin bevindt zich een vreemd atoom. De werkelijke afmetingen van dit "blokje" silicium atomen zijn ongeveer: 0,2 μm x 0,2 μm x 0,2 μm .

Silicium kan worden gedopeerd met fosforatomen

Fosfor heeft 5 elektronen in zijn buitenste schil.

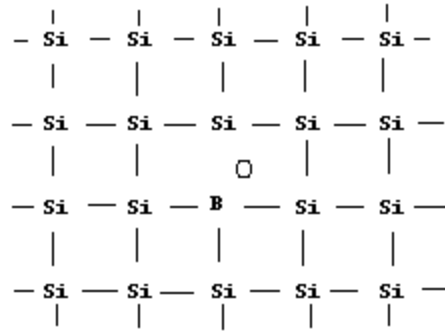
Het vijfde elektron kan niet meedoen aan de binding van de siliciumatomen en gaat als vrij elektron rondzwerven in het kristal.

Elementen uit de groep Va: P, As, Sb, Bi noemt men donoren. Silicium, gedopeerd met donormateriaal noemt men N-silicium.



Silicium kan gedopeerd worden met booratomen

Boor heeft 3 elektronen in zijn buitenste schil. Er is dus een elektron te weinig om mee te doen aan de binding met de siliciumatomen. Deze open plaats noemen we een gat. Verspringende elektronen proberen het gat "op te vullen". Daarom gedraagt zo'n gat zich als een positief deeltje dat rondzwerft doorheen het kristal. Elementen uit groep IIIa: B, Al, Ga, In noemt men acceptoren. Silicium, gedopeerd met acceptormateriaal, noemt men P-silicium



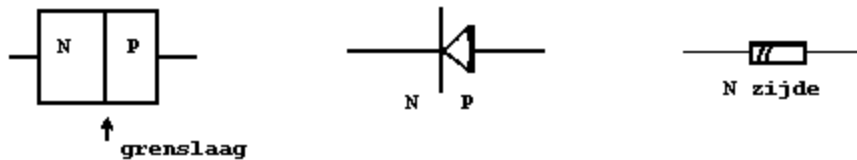
Als de geleiding via donoren of acceptoren gebeurt spreekt men van **extrinsieke halfgeleiding**. Het spreekt vanzelf dat de intrinsieke halfgeleiding ook blijft bestaan. Maar met extrinsieke halfgeleiding kan men de grootte van de geleiding zelf bepalen door meer of minder te doperen.

2 DIODEN

1 Opbouw van een diode

Een diode bestaat uit een blokje silicium waarvan de ene helft door geschikte toevoeging P-Si is geworden en de andere helft N-Si.

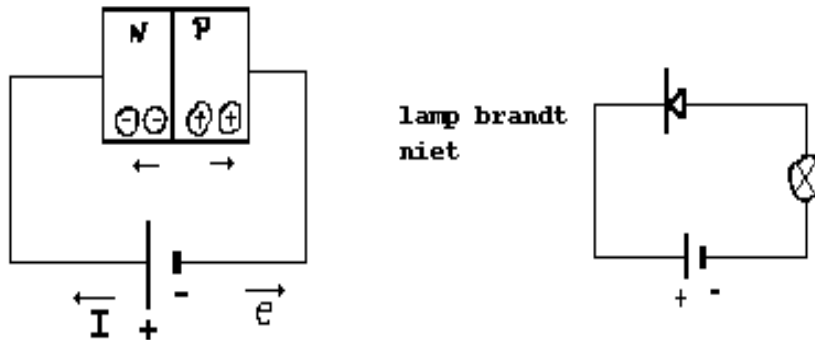
In de contactzone tussen beide zullen er geen bewegende ladingen meer zijn, men noemt deze zone die maar enkele μm breed is de depletie laag. In de depletie laag is het P-gebied negatief en het N-gebied positief. Er ontstaat dus een elektrisch veld E . Verdere diffusie van vrije elektronen en gaten wordt door dat veld tegengewerkt. Er ontstaat een dynamisch evenwicht. Onderstaande figuren tonen de voorstellingen van dioden.



2 Verklaring van de werking

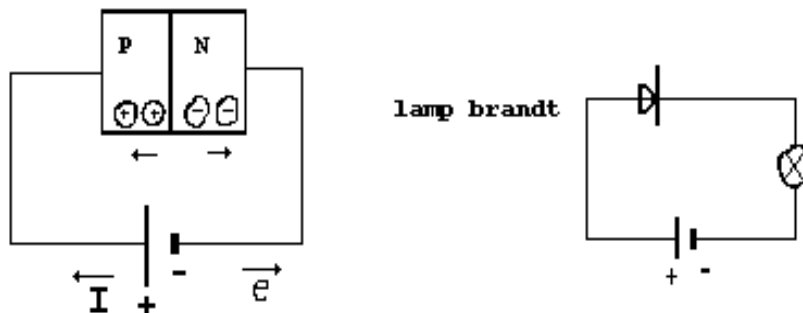
Legt men nu een uitwendig veld aan door een bron aan te sluiten, dan ontstaan er twee situaties naargelang men de bron aansluit.

2.1 De diode invers gepolariseerd



De plusgaten in het P-Si bewegen naar de minpool van de batterij. Deze stuurt minelektronen naar het P-Si. De plusgaten en minelektronen ontmoeten elkaar in het P-Si en neutraliseren elkaar. Als alle plusgaten geneutraliseerd zijn, stopt de minelektronen stroom. De minelektronen in het N-Si bewegen naar de pluspool van de batterij. Maar van zodra de minelektronen stroom vanuit de minpool stilvalt, stopt ook de toevoer naar de pluspool. Alle beweging van minelektronen of plusgaten is opgehouden: door de diode gaat geen stroom, het lampje brandt niet.

2.2 De diode voorwaarts gepolariseerd



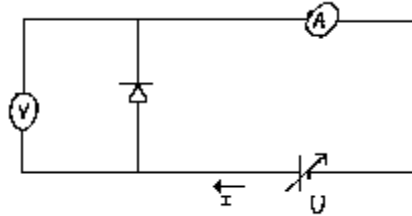
De plusgaten bewegen naar de minpool, de minelektronen naar de pluspool. Bij het grensvlak neutraliseren ze elkaar. Om de aldus verdwijnende elektronen in het N-Si aan te vullen, levert de minpool van de batterij voortdurend minelektronen. Om de verdwijnende plusgaten in het P-Si aan te vullen, stromen voortdurend elektronen weg uit het P-Si. Elk minelektron dat uit een binding verdwijnt laat immers een plusgat achter. Deze minelektronen stromen naar de pluspool van de batterij. Voortdurend bewegen dus de minelektronen en de plusgaten: door de diode loopt stroom, het lampje brandt.

3 Diodekarakteristieken

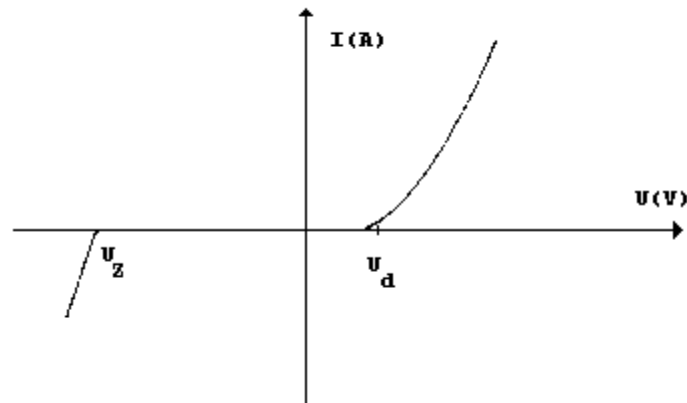
In de elektronica spreekt men van karakteristieken i.p.v. grafieken of diagrammen.

LABPROEF

Met onderstaande schakeling kunnen we het verband tussen U en I experimenteel bepalen.



De resultaten zetten we uit in de volgende $I(U)$ -grafiek. Men spreekt over de diodekarakteristiek.



Het is duidelijk dat de grafiek geen rechte is door de oorsprong, een diode is dus geen ohmse weerstand. Je ziet dat de diode pas begint te werken vanaf een bepaalde drempelspanning U_d in de doorlaatrichting. Voor germanium is de drempelspanning 0.2 V en voor silicium is de drempelspanning 0.6 V.

In de sperrichting zal bij zeer grote spanning de diode 'doorslaan'. De spanning waarbij dat gebeurt noemt men de Zenerspanning U_z .

4 Gelijkrichting

Een neonlamp bestaat uit een glazen omhulsel, gevuld met neon (gas) onder lage druk. Binnenin bevinden zich twee metalen elektroden.

Proef

Sluit de lamp aan op wisselspanning. Je ziet dan het neon gas rond beide elektroden rood gloeien. De wisselspanning aan de klemmen van het stopcontact verandert voortdurend.

Een diode kunnen we gebruiken als gelijkrichter, d.w.z. om wisselspanning om te zetten in (pulserende) gelijkspanning.

Proef

Plaats een diode tussen stopcontact en lamp. Nu zie je: het neon gas rond een van de elektroden gloeit. Door de aansluiting van de diode goed te onderzoeken zie je dat dit glimlicht rond de negatieve elektrode zit.

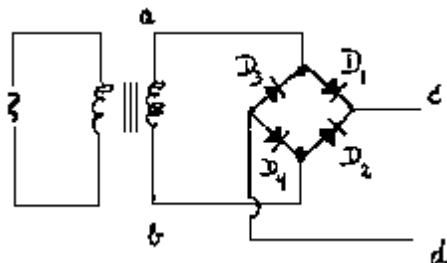
5 Voedingen

We vinden het vanzelfsprekend, een computer aan te sluiten op het stopcontact dat "220 V" levert. Toch werkt zo'n toestel helemaal niet op 220 V: de IC's hebben 5 V nodig! Daarom zit in elke computer een voeding die 220 V (wisselspanning) omzet in 5 V (gelijkspanning).

Een voeding bestaat meestal uit 3 verschillende onderdelen nl. een transformator om de spanning te wijzigen, een bruggelijkrichter en een afvlakcondensator.

De transformator zet de wisselspanning van 220 V om in 5 V. Alleen het aantal windingen bepaalt de transformatieverhouding.

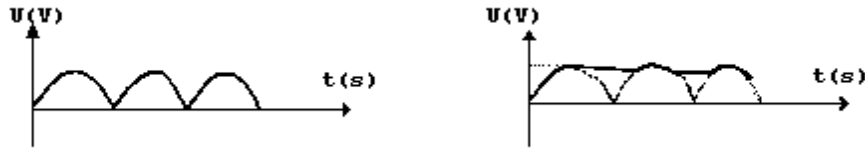
De bruggelijkrichter bestaat uit een brugschakeling met 4 dioden om wisselspanning om te zetten in (pulserende) gelijkspanning.



De bruggelijkrichter, ook wel Graetz-schakeling genoemd, is een tweezijdige gelijkrichter: niet alleen de positieve, maar ook de negatieve periode helften verschijnen aan de uitgang. Tijdens de positieve periode helften geleiden de dioden D_1 en D_4 en tijdens de negatieve de dioden D_2 en D_3 .

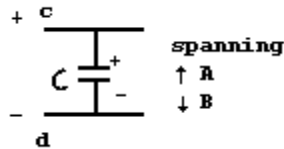
De bruggelijkrichter wordt zeer veel toegepast, aangezien maar een enkele secundaire wikkeling nodig is, terwijl toch alle periode helften benut worden.

De afvlakcondensator: maakt van de pulserende gelijkspanning een afgevlakte gelijkspanning.



A: Als de pulserende gelijkspanning stijgt, wordt de condensator opgeladen.

B: De toestellen die aan de condensator verbonden zijn, verbruiken natuurlijk elektrische stroom. Daardoor ontladde de condensator als de pulserende gelijkspanning daalt.



Hoe groter de capaciteit van de condensator, hoe minder ontlading. In de praktijk installeert men ongeveer 2200 μF per ampère uitgangsstroomsterkte.

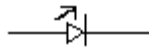
Elke netadapter is in feite een voeding. Je vindt er steeds de drie onderdelen in terug: transformator(a), bruggelijkrichter(b) en afvlakcondensator(c)

6 Soorten dioden

6.1 De LED

Als elektrische stroom door een diode loopt, staat er ook spanning over d.w.z. dat ook een diode elektrisch vermogen (energie per seconde) verbruikt. Deze elektrische energie wordt omgezet in warmte.

Een LED (light emitting diode) is een diode waarin een deel van de "verloren" elektrische energie (ong. 5 à 10 %) wordt omgezet in licht i.p.v. warmte.



Een LED bestaat uit galliumarsenide (GaAs) en galliumfosfide (GaP) - kristal, gedopeerd met stikstof (N), zink (Zn) of silicium (Si). Je ziet het kristalletje (0,4 mm x 0,4 mm) zitten op de negatieve elektrode. Het is d.m.v. een dun gouden draadje verbonden met de anode.

Proef

We verbinden een LED (rood) met een 1.5 V-batterij.

Toepassingen

LED's worden gebruikt als indicatorlampje: ze tonen aan of de versterker, radio, is ingeschakeld.

Een LED mag je zó maar niet aansluiten: om de stroom niet te hoog te laten worden moet je meestal een voorschakelweerstand gebruiken.

Voorbeeld

Spanning over de weerstand: $U = 9 - 2,2 = 6,8 \text{ V}$

Stroomsterkte door de weerstand: $I = 30 \text{ mA} = 0,03 \text{ A}$

Resistantie van de weerstand: $R = \frac{U}{I} = \frac{6,8}{0,03} = 227 \text{ } \Omega$

(Praktisch moet je dan een $220 \text{ } \Omega$ weerstand nemen)

Vermogen, opgenomen door de weerstand:

$P = U \cdot I = 6,8 \times 0,03 = 0,2 \text{ W}$

Dit vermogen wordt omgezet in warmte.

In de huidige wekkers bestaat elk cijfer van het 7-segment cijferdisplay uit 7 LED's.

6.2 Fotodiode

Licht is een vorm van energie. Als er lichtenergie op een fotodiode valt, dan ontstaat een reststroom, de grootte hiervan is afhankelijk van de hoeveelheid licht. Fotodioden worden gebruikt in lichtmeters in foto toestellen.

6.3 Zonnecel

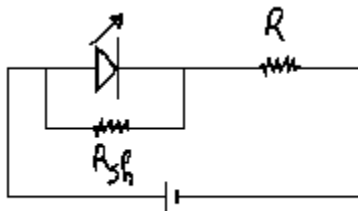
Boven de contactzone van een diode is een elektrisch veld aanwezig. Brengt men een venster aan hierboven, dan kan door lichtinval vrije elektronen ontstaan. Er loopt dus een stroom bij het verbinden van het P-gebied met het N-gebied.

6.4 Laserdiode

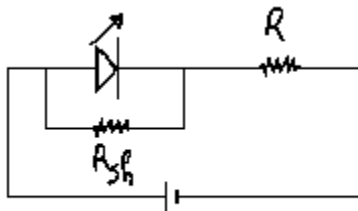
Wordt gebruikt om de streepjescode te lezen samen met een fotodiode.

7 Vragen en opgaven

1 Bereken de shuntweerstand van onderstaande schakeling als je weet dat de spanning over de diode 2,2 V bedraagt en de stroomsterkte door de diode 2 mA. De uitwendige weerstand is 50Ω en de bronspanning is 9 V.



2 Bereken de shunt als $I = 400 \text{ mA}$, de stroom door de LED 40 mA is en de weerstand van de LED 50Ω is. Zelfde figuur als in oefening 1.



3 TRANSISTOREN

1 De meest gebruikte component in de elektronica

Het meest gebruikte onderdeel in de elektronica is de transistor. Een transistor kan gebruikt worden als afzonderlijk onderdeel of met duizenden tegelijk in een IC. (geïntegreerde schakeling, integrated circuit, chip)

Je kunt het u bijna niet voorstellen, maar verschillende IC's kunnen samen op een contactlens.

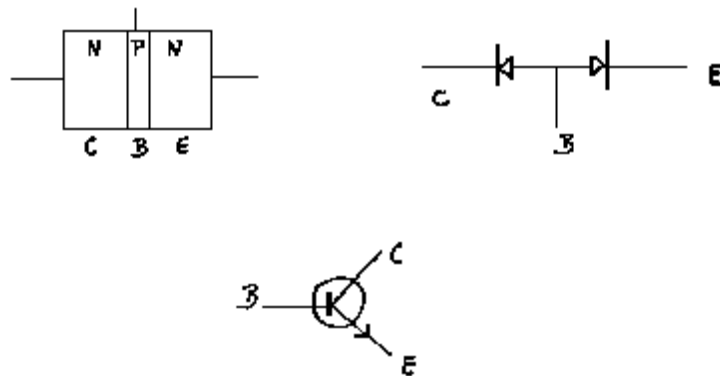
Radio, TV, video, cassetterecorder, CD, enz. ... gebruiken vooral de transistor als versterker.

Computers gebruiken vooral de transistor als schakelaar.

2 Hoe een transistor is opgebouwd

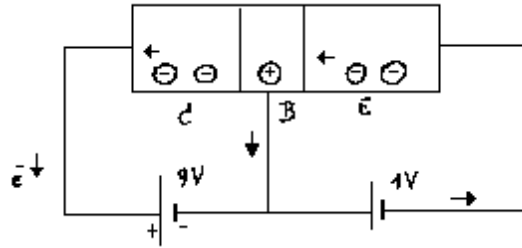
Een transistor is een zeer klein stukje siliciumkristal (max 1 mm³) en bestaat in feite uit twee aan elkaar gekoppelde dioden. Er zijn dus 3 verschillende gedopeerde gebieden. We noemen ze respectievelijk de emitter E, de basis B en de collector C. De basis moet zeer dun zijn (1 - 10 µm). Bovendien moet de basis zeer zwak gedopeerd zijn: 1000 maal minder dan de emitter en de collector.

Het is duidelijk dat er twee soorten transistoren zijn, nl. de npn en de pnp transistor. In de npn transistor zorgen de vrije elektronen voor de stroom. In de pnp transistor zorgen de gaten voor de stroom. We beperken ons tot de npn transistor.



3 Het transistoreffect

We beschouwen onderstaande schakeling.



Er zijn twee spanningsbronnen U_1 en U_2 . De spanning U_{BE} is gelijk aan U_1 . De spanning U_{CB} is gelijk aan de spanning U_2 . Het basis-emitter grensvlak is voorwaarts gepolariseerd. Het basis-collector grensvlak is inverts gepolariseerd. Er zijn drie stromen, nl. I_e , I_b en I_c resp. de emitterstroom, de basisstroom en de collectorstroom. Het is duidelijk dat, vermits er geen stroom verloren gaat dat:

$$I_e = I_b + I_c$$

Bovendien bereikt het grootste deel van de elektronen uit de emitter de collector zodat

$$I_c = \alpha \times I_e$$

(met α begrepen tussen 0,98 en 0,99)

De basisstroom I_b wordt dan gegeven door

$$I_b = (1 - \alpha) \times I_e$$

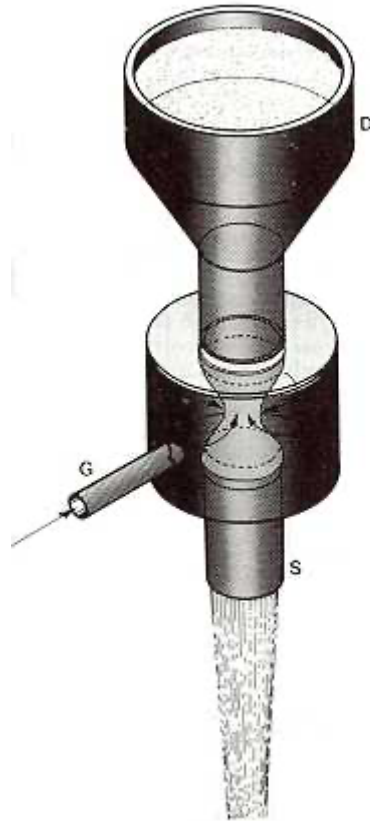
Merk op:

We verwaarlozen de kleine reststroom van de intrinsieke geleiding.

Je zou dus verwachten dat er door het BC-grensvlak geen stroom loopt. Dat blijkt juist wel het geval te zijn! De elektronen die de E binnenstromen bewegen doorheen de dunne B naar de C en zo naar de pluspool van de 9 V-batterij. Een klein deel (ongeveer 2 %) van deze elektronen vloeit af via de B naar de pluspool van de 1 V-batterij.

Het merkwaardige is nu dat, als je de elektronenstroom vanuit de basis een klein beetje wijzigt, de elektronenstroom vanuit de collector heel sterk verandert! Dit is versterking!

Zo kan je jezelf de werking van een transistor voorstellen: een kleine stroom vanuit de basis (B) controleert een grote stroom vanuit de collector (C) naar de emitter (E).

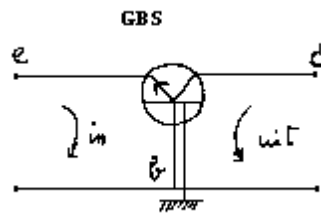


John Bardeen, William Shockley en Walter Brattain vonden de transistor uit in 1947. Dit was de start van de micro-elektronische revolutie. Voor hun werk kregen ze de Nobelprijs in 1956.

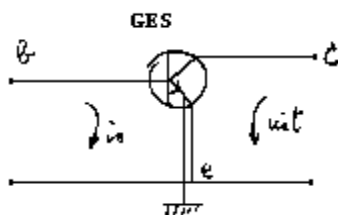
4 Fundamentele schakelingen van de transistor

Een transistor is een driepool, te weten de emitter, de basis en de collector. Om hem aan te sluiten moet je echter beschikken over vier aansluitklemmen, nl. twee voor de ingang en twee voor de uitgang. Dit betekent dat er één gemeenschappelijk zal zijn. Vermits de collector steeds tot de uitgang behoort kunnen we drie basisschakelingen bekijken.

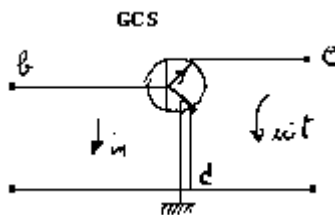
De GBS of gemeenschappelijke basisschakeling



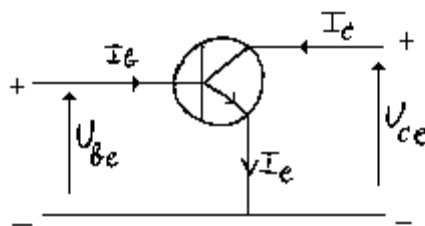
De GES of gemeenschappelijke emittorschakeling



De GCS of gemeenschappelijke collectorschakeling



In het vervolg maken we gebruik van de GES. Hernemen we nog eens deze schakeling met aanduiding van de stromen. We kunnen nu de stroomversterking bij een GES-schakeling berekenen.



We weten al dat $I_e = I_c + I_b$ en $I_c = \alpha \times I_e$

Hieruit kunnen we afleiden dat

$$I_c = \alpha \times (I_c + I_b)$$

We weten dat:

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha)$$

We stellen we vast dat:

$$I_c = \beta \times I_b$$

Voorbeeld

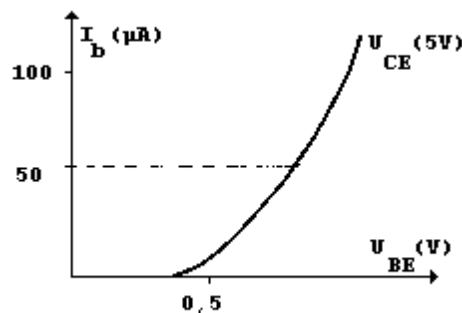
Als $I_b = 20 \mu\text{A}$ en $\alpha = 0,99$ dan berekenen we hieruit β en vervolgens I_c

5 Transistorkarakteristieken

De belangrijkste karakteristieken van de GES-schakeling bij een npn transistor zijn:

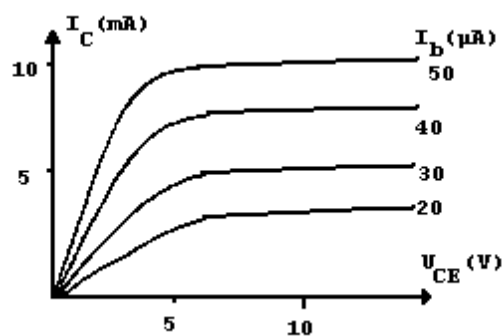
5.1 De ingangskarakteristiek

Deze geeft de basisstroom I_b ten opzichte van de basis-emitter spanning U_{be} . Dit is in feite de diodekarakteristiek.



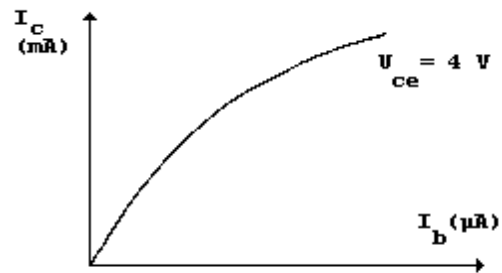
5.2 De uitgangskarakteristiek

Deze laat zien dat de collectorstroom I_c nauwelijks afhangt van de collector-emitter spanning U_{ce} , maar alleen van de ingestelde basisstroom.



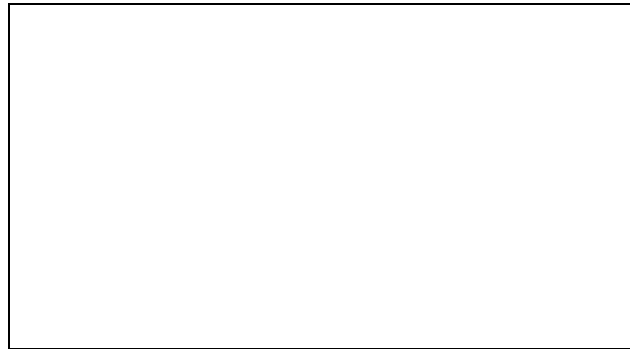
5.3 De stroomversterkingskarakteristiek

Deze geeft de collectorstroom I_c in functie van de basisstroom I_b .

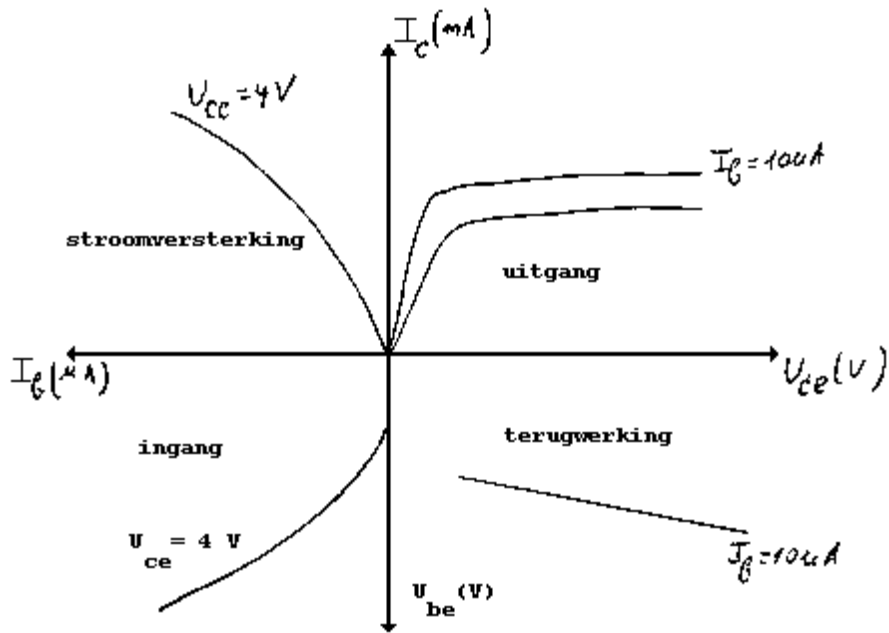


5.4 De terugwerkingskarakteristiek

Deze vergelijkt de ingang spanning met de uitgangsspanning.

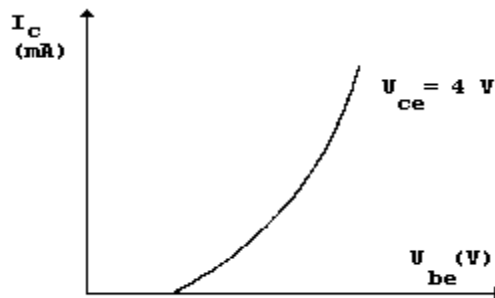


We kunnen nu deze vier karakteristieken op één en dezelfde grafiek brengen.



5.5 De transfertkarakteristiek

Dit is in feite de collectorstroom I_c in functie van de basis-emitter spanning



6 De potentiometer of potmeter

Bouw

Een potentiometer ("potmeter") bestaat uit een koolstofbaan in de vorm van een hoefijzer. Aan de uiteinden zitten twee "vaste" contacten a en b. De punt p van de looper L drukt op de koolstofbaan en is verbonden met het "verstelbare" contact c. Door de as te draaien verplaatst men de looper: de lengte van de koolstofbaan tussen a en c (ook die tussen b en c!) verandert dan.

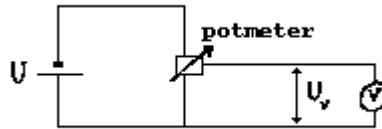
Materiaal
Batterij 9 V

Potentiometer 250 k Ω

Voltmeter tot 10 V

Proef

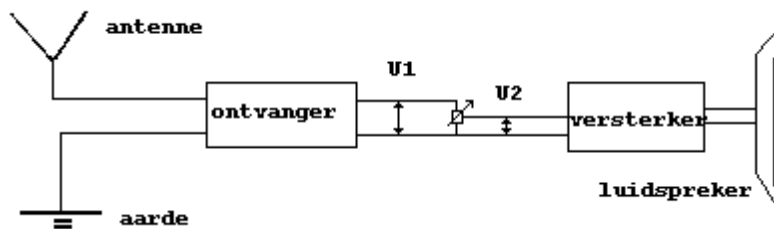
We sluiten een potmeter zo aan:



Plaats de looper in verschillende standen. Vaststelling: voor elke stand duidt de voltmeter een andere spanning aan, vanaf $U = 0$ V (potmeter 'dicht') tot $U = 9$ V (potmeter 'open').

We hebben een veranderlijke spanningsbron!

Toepassing: volumeregeling van een versterker voor radio.



De energie van de elektromagnetische golf die de antenne treft wordt door de ontvanger omgezet in een kleine spanning (U_1).

Afhankelijk van de stand van de looper wordt een deel (U_2) van de spanning U_1 toegevoerd aan de versterkingang.

7 Een transistor is een stroomversterker

Materiaal

Batterij(en) (1)

Potmeter 250 k Ω (2)

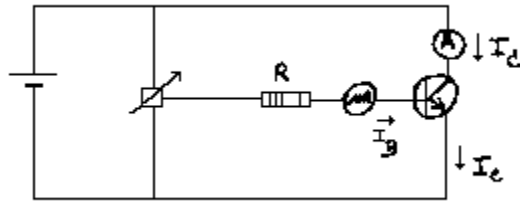
Vaste weerstand 100 k Ω ; 0,5 W (bruin-zwart-geel) (3)

Transistor BC547

A - meter 50 μ A

A - meter 30 mA

Schakeling



Behoud van stroomsterkte. Omdat elektronen in een transistor niet kunnen "verdwijnen", geldt:

$$I_e = I_c + I_b$$

Transistoreffect

Als we aan de looper van de potmeter draaien, dan:

I_b verandert

I_c verandert zeer sterk

Hieruit kunnen we afleiden dat $I_c \sim I_b$

of $I_c = \beta \times I_b$

Metingen bij een batterijspanning van 6 V geeft onderstaande resultaten:

I_b (μA mA)	I_c (mA)	I_c/I_b
5	0,005	2
10	0,010	4
15	0,015	6
20	0,020	8
25	0,025	10
30	0,030	12
35	0,035	14,5
40	0,040	16,5

Besluit

kleine basisstroom I_b ---> grote collectorstroom I_c

kleine wijziging van I_b ---> grote wijziging van I_c

dit is versterking!

Het getal I_c / I_b heet men de gelijkstroomversterking factor. Het symbool hiervoor is: β .

Bij moderne transistoren is β van de grootteorde 200... 400.

Hoe kan je β afleiden uit de karakteristieken van een transistor?

Grenswaarden

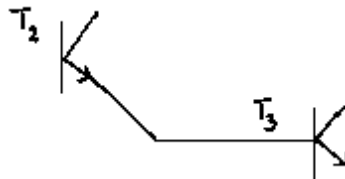
|BC546|BC547|BC548|BC549|BC550|

collector-basis-spanning UCB	80 50 30 30 50 V
collector-emitter-span. UCE	80 50 30 30 50 V
emitter-basis-span. UEB	6 6 5 5 5 V
collector-piekstroom ICM	200 200 200 200 200 mA
basis-piekstroom IBM	200 200 200 200 200 mA
emitter-piekstroom IEM	200 200 200 200 200 mA
junctie temperatuur Tj	150 150 150 150 150 °C
opslagtemperatuur Ts	-65 tot + 150 °C
totale dissipatie (25°C) Ptot	500 500 500 500 500 mW

Toepassing: de transistor als versterker

LABPROEF

Om het zwakke signaal van een koolstofmicrofoon beter te horen, gebruiken we een transistor als versterker.

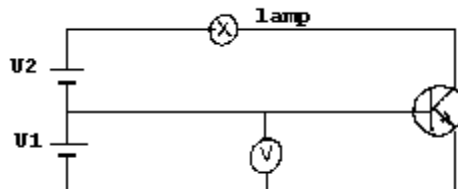


De veranderende emitterstroom van T₂ wordt nu de veranderende basisstroom van T₃. Vermits $I_c = \beta \cdot I_b$ loopt door T₃ een veranderende versterkte collectorstroom. Die veranderende stroom loopt ook door de luidspreker en doet de conus trillen.

8 De transistor als schakelaar

LABPROEF

We beschouwen onderstaande schakeling.



De regelbare bron U_1 laten we oplopen vanaf 0 V. Met de voltmeter meten we de spanning U_{BE} . Zolang deze kleiner is dan de drempelspanning brandt het lampje niet en de stroom I_c is gelijk aan nul.

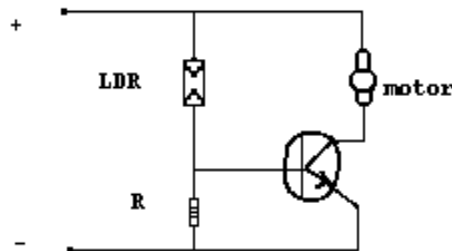
Als U_{BE} groter wordt dan U_d brandt het lampje. De transistor wordt dus een schakelaar.

Is $U_{BE} < U_d$ dan is de schakelaar open,

is $U_{BE} > U_d$ dan is de schakelaar gesloten.

Toepassing: een motor sturen d.m.v. licht

Een LDR (light dependent resistor) bestaat uit een strook CdS (cadmiumsulfide) aangesloten tussen 2 contacten.



Bij duisternis is de weerstandswaarde van de LDR groot ($1 \text{ M}\Omega$)

I_b klein $\rightarrow I_c$ klein \rightarrow motor draait niet

Bij belichting is de weerstandswaarde van de LDR klein. (200Ω)

I_b groot $\rightarrow I_c$ groot \rightarrow motor draait

Met de weerstandswaarde R kan de gevoeligheid van de schakeling worden ingesteld: hoe kleiner R , hoe groter deel van de LDR-stroom wordt afgeleid via R , hoe meer licht vereist om nog voldoende I_b over te houden.

9 Vragen en opgaven

- 1 Een transistor heeft een basisstroom van $30 \mu\text{A}$, terwijl $\alpha = 0,98$. Bereken β en de collectorstroom.
- 2 De basisstroom is $10 \mu\text{A}$ en $\beta = 400$. Bereken α , I_e en I_c .
- 3 De emitterstroom is $30,0 \text{ mA}$. De collectorstroom is $29,8 \text{ mA}$. Bereken α , β en de basisstroom.

KERNFYSICA

1 RADIOACTIVITEIT EN IONISERENDE STRALING

1.1 STRALENDE FEITEN EN PROEVEN

1.1.1 Straling

Op een donkere novemberavond in 1895 keerde Wilhelm Röntgen naar huis. Deze professor in natuurkunde (natuurlijk verstrooid!) had de hele dag gewerkt aan een gasontladingsbuis, die gevuld was met lucht onder zeer lage druk. Nog namijmerend over de experimenten van die dag, realiseerde Röntgen zich opeens dat hij vergeten was om zijn apparatuur uit te schakelen. Hij haastte zich onmiddellijk terug naar zijn laboratorium. Alles was er in volslagen duisternis gehuld op een stuk fluorescerend papier in de buurt van de ontladingsbuis na, dat fel oplichtte.

Röntgen vermoedde meteen dat dit spookachtig verschijnsel te maken had met een onzichtbare straling die uit de buis kwam en het papier deed oplichten. Hij testte dit uit door zijn hand tussen de buis en papier te houden. Stel je zijn verbazing voor toen hij zag dat de straling letterlijk door zijn hand ging en dat er op het papier een schaduwbeeld verscheen van de beenderen in zijn hand. Gefascineerd ging Röntgen aan het werk om de aard van deze onbekende, mysterieuze straling te achterhalen. Hij noemde ze toen 'X-stralen'.

Nu noemen we ze 'röntgenstralen' (ere wie ere toekomt). Ze worden vooral gebruikt in de medische sector. Bij een röntgenonderzoek van bijvoorbeeld een gebroken been, plaatst men een röntgenbuis boven het te onderzoeken lichaamsdeel en een röntgenfilm eronder. De röntgenbuis zendt straling uit, die door weke weefsels dringt maar tegengehouden wordt door de beenderen. Daardoor ontstaat een schaduw van de beenderen op de foto.

Proef

We verbinden een zonnecel met een kleine motor. We houden de zonnecel in het zonlicht of in het licht van een retroprojector.

Waarneming

De motor begint te draaien.

Besluit

Zowel de zon als de röntgenbuis zenden energie uit onder de vorm van straling. We zeggen daarom dat de zon en een röntgenapparaat stralingsbronnen zijn. De uitgestraalde energie wordt door een ontvanger opgenomen.

In het eerste voorbeeld is dat de zonnecel; in het tweede voorbeeld zijn dat de beenderen en de fotografische plaat.

1.1.2 Radioactiviteit

Proef

We plaatsen een gloeikousje van een campinggasbrander of een horloge met lichtgevende wijzers dicht bij de sonde van een Geigerteller.

Waarneming

Via de luidspreker horen we min of meer regelmatig tikken.

Besluit

Het gloeikousje en de lichtgevende wijzers van het horloge zenden energie uit onder de vorm van straling. Deze voorwerpen zijn radioactief. De uitgezonden straling noemen we ioniserende stralen.

Noot

In het dagelijks leven spreken we over 'radioactieve straling'. Dit is niet correct. De straling zelf is immers niet radioactief, maar wel de stof waardoor ze uitgezonden wordt.

Radioactiviteit werd in 1896 ontdekt door de Franse natuurkundige H. Becquerel (1852-1908). Hij was toen bezig met de studie van uraanzouten, waarvan sommige een helder licht uitstralen, nadat ze eerst een tijdje in het zonlicht gelegen hebben.

Toeval of niet?

Tijdens de voorbereiding van een experiment was het triestig donker weer. Becquerel moest noodgedwongen zijn onderzoek uitstellen en borg de uraanzouten samen met een aantal fotografische platen op in een kast. Enkele dagen later vertoonden de ontwikkelde fotografische platen, die nochtans goed ingepakt waren in dik zwart papier, donkere vlekken. Ze situeerden zich op de plaats waar de brokjes uraanerts lagen.

Becquerel kwam tot de conclusie dat uraanzouten een soort straling uitzenden, die de fotografische plaat konden zwarten. Deze stralen worden spontaan uitgezonden; het bleek dus helemaal niet nodig te zijn om ze vooraf te activeren met zonlicht. Hij ondervond ook als eerste aan den lijve dat de ioniserende stralen niet zonder gevaar zijn. Nadat hij een kleine hoeveelheid van een radioactieve stof een tijdlang in zijn jaszak had megedragen, vormde zich op die plaats van zijn lichaam een moeilijk te helen brandwonde.

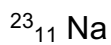
Enkele jaren later ontdekte de Poolse M. Sklodowska (1867-1934), samen met haar echtgenoot P. Curie (1859-1906) dat nog andere stoffen radioactief zijn en dus ioniserende straling uitzenden. Het waren thorium, polonium en radium.

1.2 BOUW VAN DE ATOOMKERN

1.2.1 Nucleonen

Radioactieve stoffen bestaan uit atomen, net zoals andere stoffen. Zo'n atoom is opgebouwd uit een kern en een elektronenmantel, waarin de elektronen bewegen. Ioniserende straling komt bijna altijd uit de kern. Daarom bekijken we die kern van naderbij. Hij bestaat uit kleine deeltjes die als het ware aan elkaar 'kleven'. Die deeltjes noemen we nucleonen. Er zijn twee soorten: protonen (positief geladen deeltjes) en neutronen (neutrale deeltjes).

Zo bezit de kern van een natriumatoom 23 nucleonen: 11 protonen en 12 neutronen. Rond die kern bewegen bovendien 11 elektronen. Symbolisch stellen we de Na-kern als volgt voor:



Het aantal protonen in de kern noemen we het atoomnummer Z . In het periodiek systeem staat het links boven het symbool van het element. Het aantal nucleonen in de kern noemen we het massagetal A . Dat staat onder het symbool van het element (bij benadering).

We vatten de eigenschappen van de atoomdeeltjes nog eens samen in een overzichtelijke tabel.

deeltjes	symbool	plaats	lading(relatief)	massa(relatief)
proton	p	kern	+1	1
neutron	n	kern	0	1
elektron	e	elektronenmantel	-1	1/1840

Noot

Het valt je wellicht op dat we over relatieve lading en massa spreken. Het komt er in feite op neer dat de absolute massa van een nucleon ($1,7 \cdot 10^{-27}$ kg) en de werkelijke elektrische lading ervan ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) zo klein zijn dat je daar moeilijk kunt mee rekenen. Daarom maken we gebruik van relatieve ladingen en massa's.

1.2.2 Isotopen

Een atoomsoort of element wordt gekenmerkt door een welbepaald aantal protonen. In de kern van een atoom komen er ook neutronen voor. Het aantal neutronen kan daarbij variëren, zodat ook het massagetal verandert.

Atomen of nucliden van eenzelfde element, met verschillend massagetal, noemen we isotopen of isotope nucliden.

Letterlijk betekent isotoop 'gelijke plaats' (iso = gelijk, topos = plaats). Isotopen zijn inderdaad elementen die op eenzelfde plaats in het PSE (periodiek systeem) staan, hoewel ze een verschillend massagetal hebben.

We kunnen het nog beter formuleren door te zeggen dat isotopen atomen zijn met eenzelfde aantal protonen maar met een verschillend aantal neutronen. Hierdoor varieert immers het massagetal. Omdat die elementen hetzelfde aantal protonen en elektronen bevatten, hebben ze uiteraard dezelfde eigenschappen.

Van chloor met atoomnummer 17 komen twee isotopen nucliden voor:

- de nuclide ^{35}Cl telt in de kern 17 protonen en 18 neutronen
- de nuclide ^{37}Cl heeft 17 protonen en 20 neutronen.

Van magnesium bestaan er drie isotopen:

- ^{24}Mg met 12 protonen en 12 neutronen
- ^{25}Mg met 12 protonen en 13 neutronen
- ^{26}Mg met 12 protonen en 14 neutronen.

Van de 92 in de natuur voorkomende elementen komen er ongeveer 350 nucliden voor. Daarvan zijn er 280 stabiel. Niet stabiele nucliden zijn radioactief.

De zwaarste atoomkern die men in de natuur aantreft is een isotoop van uraan nl. $^{238}_{92}\text{U}$, met 92 protonen en 146 neutronen.

Al de aangeleerde begrippen oefenen we nu nog even aan de hand van de volgende tabel.

	^1_1H	$^{20}_{10}\text{Ne}$	$^{22}_{10}\text{Ne}$	$^{238}_{92}\text{U}$
ladingsgetal Z	1	10	10	92
aantal protonen	1	10	10	92
massagetal A	1	20	22	238
aantal nucleonen	1	20	22	238
aantal neutronen	0	10	12	146
aantal elektronen	1	10	10	92

1.3 FUNDAMENTELE KRACHTEN

Wetenschappers zijn ervan overtuigd dat er slechts vier soorten krachten bestaan. Dat noemen we fundamentele krachten. Alle 'bekende krachten' zijn te herleiden tot één of tot een paar van deze vier krachten.

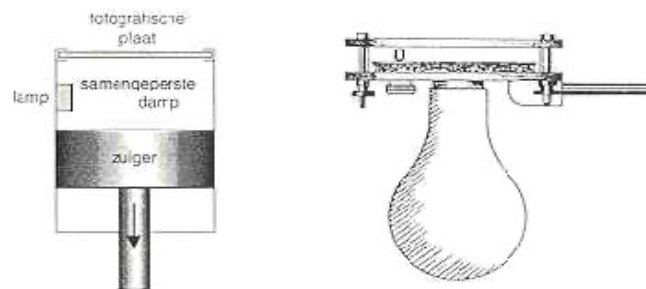
Bovendien vermoeden de wetenschappelijk onderzoekers dat ongeveer 15 miljard geleden, tijdens het ontstaan van het universum ('Big Bang') er slechts één kracht bestond. De vier fundamentele krachten zouden later ontstaan zijn uit die éne kracht.

Welke zijn de vier fundamentele krachten?

- Wanneer twee glazen staven beiden elektrisch positief geladen zijn, stoten ze elkaar af. De afstotingskracht die werkzaam is tussen de twee staven is elektrische kracht of juister: elektromagnetische kracht.
- In een atoomkern komen protonen voor. Deze positief geladen deeltjes stoten elkaar af. Toch vliegt zo'n atoom niet uit elkaar. Inderdaad: als protonen en neutronen maar dicht genoeg bij elkaar zitten, werkt er een aantrekkende kracht die veel sterker is dan de elektromagnetische afstotingskracht. Die bijzondere aantrekkingskracht noemen we sterke wisselwerking. Wanneer nucleonen niet dicht genoeg bij elkaar zitten, werkt de sterke wisselwerking niet.
- Binnen de atoomkern is er nog een andere kracht werkzaam, die bepaalde kernen wél uit elkaar doet spatten. We noemen het de zwakke wisselwerking. Deze kracht is de oorzaak van tal van radioactieve verschijnselen.
- Aarde en maan trekken elkaar aan met een kracht die we de gravitatiekracht noemen. Alle voorwerpen in de buurt van de aarde worden door diezelfde gravitatiekracht aangetrokken. We spreken daarom van 'zwaartekracht'. Protonen en neutronen hebben ook een massa: ze trekken elkaar dus ook aan. Alleen... de massa van de nucleonen is zo klein dat die gravitatiekracht verwaarloosbaar is.

1.4 STRALING BESTAAT UIT DEELTJES

1.4.1 Proef met de nevelkamer



Een eenvoudige nevelkamer bestaat uit een platte cilindervormige ruimte, bovenaan afgesloten met een doorzichtig plastic deksel en onderaan via een opening verbonden met een rubberen peer.

In die nevelkamer zit een mengsel van water en ethanol. Ethanol verdampt gemakkelijk, zodat de ruimte gevuld is met alcohol damp.

Naast de nevelkamer wordt een radioactieve stof geplaatst. Daarna wordt er met een droge doek over het deksel gewreven. Tenslotte knijpt men de peer samen en laat ze onmiddellijk weer los.

De nevelkamer wordt zijdelings belicht zodat ze nauwkeurig kan geobserveerd worden.

Waarneming

In de nevelkamer zijn witte lijnen zichtbaar. Elke lijn groeit vanuit één punt, wordt enkele mm lang en verdwijnt daarna.

Verklaring

Uit de radioactieve stof komt een straling vrij die uit elektrisch geladen deeltjes bestaat. Die deeltjes zijn afkomstig uit de kern van het atoom van de radioactieve stof. Ze vliegen met een grote snelheid door de alcohol dampen.

Op de plaatsen waar ze voorbijkomen, doen ze de ethanoldamp condenseren. Er ontstaat daardoor een spoor van kleine alcohol druppeltjes, die zichtbaar worden door de zijdelingse belichting.

Je kan deze sporen vergelijken met de condens strepen die gevormd worden achter vliegtuigen met reactiemotoren, die op grote hoogte vliegen.

Door met een wollen doek over het deksel te wrijven wordt dit elektrisch geladen. Daardoor trekt het de positief geladen deeltjes van de straling aan. Op die manier verdwijnen die uit de nevelkamer.

1.4.2 Onderzoek van fotografische platen

Op een fotografische plaat heeft men een klein korreltje van een radioactieve uraanverbinding gedurende enkele dagen laten liggen. Daarna werd de foto ontwikkeld.

Hiernaast vind je een microscopische opname van een vlekje onder de plaats waar het radioactieve korreltje gelegen heeft.

Waarneming

Waar de donkere vlek is, heeft het korreltje gelegen. Bovendien merk je dat vanuit die vlek de deeltjes van de ioniserende straling naar alle kanten wegvlogen. De spoortjes, die de ioniserende straling achterlaten, zijn nooit langer dan 0,1 mm. Dat betekent dat de deeltjes afgeremd worden door de stof waarin ze bewegen.

1.4.3 Proef met de elektroscoop

Bovenop de staaf van een elektroscoop monteren we een horizontale metalen plaat. We brengen negatieve lading op de elektroscoop door hem aan te raken met een Pvc-buis, die gewreven werd met een wollen doek. Daarna houden we een radioactief preparaat in de buurt van de plaat.

Waarneming

De elektroscoop wordt tamelijk snel ontladen.

Verklaring

De deeltjes van de ioniserende straling (uitgezonden door het radioactieve preparaat) botsen met grote energie op de stikstof- en zuurstofatomen van de lucht. Daardoor worden er één of meer elektronen weggeslagen uit hun elektronenmantel.

De stikstof- en zuurstofatomen worden daardoor geïoniseerd: er ontstaan positieve ionen. Het directe gevolg is dat er elektronen uit de metalen plaat van de elektroscoop 'weglekken' om die ionen te ontladen.

Uiteindelijk verdwijnt de negatieve lading volledig. De elektroscoop is ontladen.

Je begrijpt meteen waarom we de straling, uitgezonden door een radioactieve stof, ioniserende straling noemen.

Schematisch

- Straling wordt uitgezonden door een stralingsbron en wordt opgevangen door een ontvanger. De uitgezonden straling van radioactieve voorwerpen noemen we ioniserende stralen.
- De kern van een atoom bestaat uit nucleonen: protonen (positief geladen) en neutronen (neutraal). Atomen van eenzelfde element, met een verschillend massagetal, noemen we isotopen of isotope nucliden. Ze hebben hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen.
- Er bestaan slechts vier soorten krachten, fundamentele krachten genoemd.
 - Elektromagnetische kracht is werkzaam tussen elektrische ladingen.
 - Sterke wisselwerking zorgt ervoor dat protonen en neutronen samengehouden worden in de kern.
 - Zwakke wisselwerking is oorzaak van tal van radioactieve verschijnselen.
 - Gravitatiekracht heerst tussen alle hemellichamen.
- Met tal van proeven kunnen we aantonen dat straling bestaat uit deeltjes.

2 AFDALEN IN DE ATOOMKERN

2.1 Stabiliteit en verval van kernen

De meeste atoomkernen zijn stabiel. Zo zijn bijna alle kernen van de koolstofatomen die in onze weefsels voorkomen gedurende de miljarden jaren dat ze bestaan onveranderd gebleven. Gelukkig maar.

Heel wat atoomkernen zijn echter niet stabiel.

Ze vallen na een zekere tijd uiteen in twee of meer 'stukken'. Daarbij worden één of meer deeltjes uit de kern weggeslingerd en komt er tegelijkertijd een hoeveelheid energie vrij. Op die manier proberen de atomen om in een stabiele toestand over te gaan.

Deze kernen noemen we radioactief; we zeggen dat ze spontaan vervallen. De uitgezonden deeltjes vormen de ioniserende straling.

De stabiliteit van een atoomkern wordt bepaald door het aantal neutronen en protonen.

Een lichte kern moet bijvoorbeeld evenveel protonen als neutronen bevatten. Een zwaardere kern moet beduidend meer neutronen bezitten.

Voorbeelden

Natuurlijk koolstof is een mengsel van drie isotopen: $^{12}_6\text{C}$ (98,89 %), $^{13}_6\text{C}$ (1,11 %) en $^{14}_6\text{C}$ (minder dan 0,001 %). De eerste twee isotopen zijn stabiel, de laatste koolstofisotoop is radioactief.

Natuurlijk goud is een mengsel van wel dertig isotopen. Een ervan $^{179}_{79}\text{Au}$ is stabiel, de andere variëren van $^{175}_{79}\text{Au}$ tot $^{204}_{79}\text{Au}$ en zijn allemaal radioactief.

2.2 Drie belangrijke vervaltypen

Atoomkernen vervallen niet allemaal op dezelfde manier. De drie voornaamste vormen van verval nemen we even apart onder de loep.

2.2.1 Alfaverval

Een mengsel van zinksulfide en een radiumzout licht op in het donker. Daarom bestrijkt men er de cijfers en de wijzers van een uurwerk mee om ook in het donker te weten hoe laat het is. Die zachte gloed ontstaat doordat de radiumkernen de een na de andere vervallen. Daarbij stoten ze een alfadeeltje (α) uit. Telkens zo'n α -deeltje het zinksulfide treft, licht dit even op.

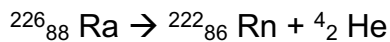
Een α -deeltje is een hecht geheel van 2 protonen en 2 neutronen. Het is ook de kern van een welbepaald element in het periodiek systeem. Zoek het eens op.

Wat gebeurt er nu als een radiumkern een α -deeltje uitstoot?

De radiumkern $^{226}_{88}\text{Ra}$ is natuurlijk niet meer dezelfde als voorheen. Het aantal protonen is immers met twee verminderd zodat het atoomnummer Z wijzigt van 88 naar 86. Bovendien is de massa met vier verlaagd; het massagetal A wordt dus 222 in plaats van 226.

Bij radioactief verval verandert 'radium' dus in 'radon'.

De eindproducten bij het verval van een radiumkern zijn een radon en een heliumkern (α -deeltje). We stellen deze omzetting als volgt voor:



Door het verval maakt het radiumatoom dus een 'sprong' in het periodiek systeem.

Vooraf isotopen met een atoomnummer groter dan 83 zullen α -deeltjes uitzenden.

2.2.2 Bètaverval

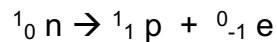
In het hart van een kernreactor ontstaan bij normale werking een hele reeks van radioactieve isotopen. Ze mogen natuurlijk niet ontsnappen.

Toen in 1986 de kernreactor van Tsjernobyl ontplofte, kwamen een wolk van radioactieve stoffen vrij die via Rusland Europa binnendreef. Ze bevatte onder ander grote hoeveelheden $^{131}_{53}\text{I}$, (jood-131), $^{90}_{38}\text{Sr}$ (strontium-90) en $^{137}_{55}\text{Cs}$ (cesium-137).

Deze drie isotopen vervallen door een elektron uit te zenden.

Dat elektron komt uit de kern doordat daar een neutron omgezet wordt in een proton.

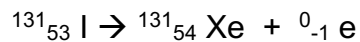
Deze omzetting schrijven we als volgt:



Het uitgezonden elektron noemen we ook een bètadeeltje (β -deeltje).

Door het uitzenden van een β -deeltje verandert het massagetal A niet; de massa van een elektron is immers verwaarloosbaar. Het atoomnummer Z stijgt echter met 1; er komt inderdaad een proton bij.

Wanneer we deze omzetting bestuderen bij jood-131, dan merken we dat het jood systematisch omgezet wordt in xenon-131. Kijk maar.



Door het verval schuift het jood atoom een plaats naar rechts in het periodiek systeem.

β -deeltjes worden vooral uitgezonden door isotopen met een atoomnummer kleiner dan 83 (bismut).

2.2.3 Gammaverval

Een atoomkern die een α - of een β -deeltje heeft afgegeven is meestal nog niet stabiel. Hij kan de overtollige energie kwijtspelen door het uitzenden van elektromagnetische straling.

Zo'n gammastraal (γ) kan je je voorstellen als een golf die uitzonden wordt door de kern. De energie in die golf is echter zo geconcentreerd dat het net is alsof de kern een 'energiepakketje' uitstuurt. Zo'n pakketje noemen we een γ -foton.

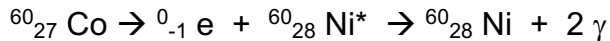
Een γ -foton heeft geen lading en geen massa. Wanneer een atoomkern een γ -foton uitzendt verandert noch zijn massagetal, noch zijn atoomnummer. Hij verliest wel zijn overtollige energie.

Nu mag je die γ -stralen niet onderschatten: het zijn net zoals α en β deeltjes geen lieverdjes. Ze kunnen immers levende cellen vernietigen of kwetsen zodat die veranderen in kankercellen.

De keerzijde van de medaille is echter dat die γ -stralen gemakkelijker kankercellen vernietigen dan gezonde cellen. Op deze eigenschap is de behandeling van kanker met radiotherapie gebaseerd.

Hiervoor gebruikt men de zogenaamde 'kobaltbom'. Die bestaat uit een kleine hoeveelheid radioactief ${}^{60}_{27}\text{Co}$, gemonteerd in een dik beschermend omhulsel, met daarin een kleine opening.

De kobaltkernen vervallen onder uitzending van β -deeltjes. Daardoor worden ze omgezet in nikkel-60. Deze nikkelkernen zijn op hun beurt instabiel en zenden twee γ -fotonen uit.



Het sterretje bij de eerste nikkelkern symboliseert de instabiliteit van deze nikkelkern. We zeggen dat hij in aangeslagen toestand voorkomt. Door uitzenden van de twee γ -fotonen wordt de kern stabiel.

Tegenwoordig wordt de kobaltbommethode vervangen door bestraling vanuit een deeltjesversneller.

2.3 Energie van de ioniserende straling

Proef

We houden een sterke magneet voor het scherm van een Tv-toestel.

Waarneming

De figuren en hun kleurpatronen op het scherm worden verstoord.

Verklaring

Achteraan in de kathodestraalbuis van een Tv-toestel zit een gloeidraad die voortdurend elektronen produceert. Deze elektronen bewegen in één bundel naar het scherm. Op de plaats waar een bundel elektronen het scherm treft, ontstaat een lichtpunt.

Wanneer we nu een sterke magneet in de buurt van het scherm houden, zal het magnetisch veld ervan doordringen tot in de kathodestraalbuis. De elektronen die naar het scherm bewegen vliegen met grote snelheid door dat veld, waardoor hun bewegingsrichting verandert. De lichtpunten op het scherm krijgen daardoor een andere plaats.

Op een analoge manier werd aan het eind van de 19^{de} eeuw de straling bestudeerd, uitgezonden door een radioactieve stof. Wanneer de straling in een magnetisch veld komt, worden de α -, β - en γ -straling van elkaar gescheiden.

De baan van de β -deeltjes wordt zwak gekromd in één richting, deze van de α -deeltjes wordt sterk gekromd in de andere richting. Dit bewijst dat α - en β -deeltjes een tegengestelde lading dragen en dat de massa van de α -deeltjes veel groter is dan die van de β -deeltjes.

De γ -straling wordt helemaal niet beïnvloed door het magnetisch veld. Dit bewijst dat γ -straling geen elektrische lading draagt.

Wil je nog meer feiten rond de drie stralingen?

De drie soorten stralingen hebben een verschillend doordringingvermogen.

α -deeltjes raken slechts enkele cm ver in de lucht; ze worden zelfs al tegengehouden door een blaadje papier.

β -deeltjes raken enkele meter ver in de lucht; ze worden echter tegengehouden door een aluminiumplaatje.

γ -straling tenslotte dringt doorheen het menselijk lichaam, door muren en metalen platen; alleen een dikke loden plaat kan de stralen afweren.

Radioactieve stoffen die veel γ -stralen uitzenden zijn dus altijd gevaarlijk voor de mens. α - en β -stralen zijn vooral gevaarlijk als ze ingeslikt worden of ingeademd. Daarom precies was de radioactieve wolk na de kernramp van Tsjernobyl zo onrustwekkend.

De α -deeltjes die uit de atoomkern gestoten worden, hebben een zeer grote snelheid, soms tot 20000 km/s. Daardoor bedraagt hun kinetische energie ongeveer 10^{-12} J. Bekeken door een atomaire bril is dit een zeer hoge energie.

Gewoonlijk drukt men de energie van subatomaire deeltjes uit in een handigere eenheid: de elektronvolt (eV), de kilo elektronvolt (keV) of de mega elektronvolt (MeV).

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

Je kan nu narekenen dat de kinetische energie van de α -deeltjes ongeveer gelijk is aan 6 MeV.

Omdat een α -deeltje zo'n grote energie heeft, kan het gemakkelijk 100 000 atomen ioniseren op zijn doortocht door de lucht.

De snelheid van de β -deeltjes is nog veel groter. Ze bedraagt niet minder dan 150 000 km/s tot bijna 300 000 km/s.

Hun massa is echter heel klein zodat hun kinetische energie toch heel wat kleiner is dan die van de α -deeltjes: ongeveer 1 MeV.

Gammastralen zijn elektromagnetische stralen, net zoals licht en röntgenstralen. Hun energie-inhoud is sterk verschillend. De fotonen van licht hebben een energie van enkele eV; de fotonen van röntgenstralen enkele keV en de fotonen van gammastralen zijn veruit de meest energierijke met een energie van 0,1 tot 10 MeV. Daardoor kunnen de fotonen van röntgen- en gammastralen lucht ioniseren.

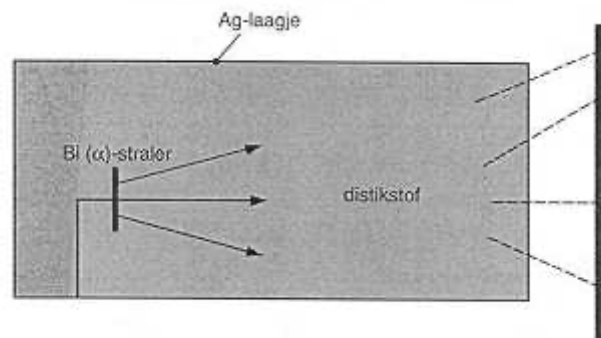
Het is die energie die maakt of een elektromagnetische straling gevaarlijk is of niet. Zo kunnen de fotonen van licht weinig of geen kwaad aanrichten in het menselijk lichaam; de veel energierijkere röntgen- en gammafotonen echter wel.

2.4 Radioactieve alchemie

Alchemisten hebben er eeuwenlang van gedroomd om onedele metalen om te zetten in goud. Zij noemen het transmutatie. Voor hen is het bij een droom gebleven; met de moderne wetenschappelijke middelen kan het echt.

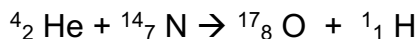
2.4.1 Hoe kunnen we een atoomkern veranderen?

Bekijk eens aandachtig de volgende figuur.



De figuur toont een nevelkamer die gevuld is met distikstof. Van links komen α -deeltjes die uitgezonden worden door een stukje bismut (Bi). In het 'vorkpunt' (figuur rechts) botst een α -deeltje op een stikstofkern.

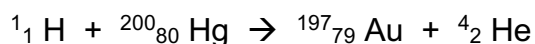
Daardoor grijpt er een kernreactie plaats waarbij een zuurstof-17-kern ontstaat (spoor rechts naar beneden) en een proton (spoor rechts naar boven).



2.4.2 En nu... goud maken!

De moderne wetenschap is erin geslaagd om de transmutatie van elementen kunstmatig te laten verlopen. Hiervoor wordt een deeltjesversneller gebruikt. Dit is een grote, cirkelvormige luchtledige buis waarin sterke magnetische en elektrische velden opgewekt worden. Wanneer protonen in zo'n buis lopen, kan men ze een zeer grote snelheid geven.

Als zo'n ultrasnel proton daarna in botsing komt met een kwikatoom, verandert dit langzaam in goud.



Bovendien is de bekomen goud-197-isotoop de enige stabiele isotoop van goud.

Als je nu denkt dat hiermee het ei van Columbus uitgevonden is, ben je verkeerd. Het proces is allesbehalve rendabel. De kostprijs om op die manier goud te maken ligt ruim boven de goudwaarde.

2.4.3 Ontstaan van de elementen

Het periodiek systeem telt 92 elementen die vrij voorkomen in de natuur. Het lichtste ervan is waterstof met atoomnummer 1, het zwaarste is uraan met 92 als atoomnummer.

Al die elementen zijn miljarden jaren geleden gevormd door kernreacties in de sterren van toen. Waarschijnlijk zijn er toen ook elementen gevormd zwaarder dan uraan. Die vinden we echter niet meer terug in de natuur omdat ze radioactief waren en dus volledig vervallen zijn.

Wanneer een grote ster 'opgebrand' is, grijpt een gigantische ontploffing plaats waarbij een groot deel van de materie in het heelal verspreid wordt. Zo'n ontploffing noemen we een supernova.

Uit al het sterrenstof ontstaan weer andere sterren, maar ook planeten zoals de aarde enz.

Sinds een halve eeuw kan de mens zelf zwaardere elementen dan uraan maken. Zo werden reeds enkele atomen van het element 112 samengesteld door lood te beschieten met zinkatomen. Het element dat hieruit ontstond bevatte 112 protonen en 165 neutronen. Het was echter zo radioactief dat het in minder dan één milliseconde verviel tot een isotoop van het reeds gekende element met atoomnummer 110.

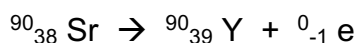
2.5 Halveringstijd

Er zijn momenteel 250 stabiele kernen bekend, naast zo'n 70 natuurlijke en 1700 kunstmatige radioactieve isotopen. We noemen het 'natuurlijke en kunstmatige radionucliden'.

Al deze radioactieve stoffen vervallen en worden omgezet in andere elementen.

Het radioactief verval is een toevalsproces. Je kan onmogelijk voorspellen wanneer een welbepaalde kern zal vervallen. Bovendien is het verval niet te beïnvloeden door bijvoorbeeld sterk te verwarmen of door het aanleggen van sterke magnetische of elektrische velden. Dit betekent echter niet dat het radioactief verval volledig willekeurig verloopt.

Veronderstel dat we 200 µg strontium isoleren uit de radioactieve wolk van Tsjernobyl. Sr zendt β-stralen uit en wordt daarbij omgezet in yttrium.



We volgen nu gedurende een tijd hoeveel strontium er nog over is en hoeveel yttrium er reeds gevormd is. Pas op: we zijn daar een heel poosje zoet mee. Kijk maar naar de volgende tabel.

Tijd	Hoeveelheid strontium overblijvend	Hoeveelheid yttrium gevormd
nu	200 µg	0 µg
na 28 j	100 µg	100 µg
na 56j	50 µg	150 µg
na 84 j	25 µg	175 µg
na 112 j	12,5 µg	187,5 µg

Je merkt dat het telkens even lang duurt om de helft van de hoeveelheid radioactief materiaal te laten vervallen. De tijd die nodig is om de helft van een groot aantal instabiele kernen te laten vervallen, noemen we de halveringstijd.

Voor ${}^{90}\text{Sr}$ bedraagt hij 28 jaar.

De halveringstijd is typerend voor elke radioactieve stof. De waarde ervan is sterk uiteenlopend.

Voorbeelden

${}^{238}\text{U}$ heeft een halveringstijd van $4,5 \cdot 10^9$ jaar.

We weten ook dat de aarde ongeveer $4,5 \cdot 10^9$ jaar geleden gevormd werd. Dit betekent dus dat ongeveer de helft van het toen aanwezige uraan vervallen is en omgezet in andere elementen. De andere helft bevindt zich nu nog in de aardkorst en kan ontgonnen worden.

Technetium ($^{90}_{43}\text{Tc}$) is een radionuclide dat heel veel gebruikt wordt in de geneeskunde voor onderzoek van beenderen en longen.

Het nuclide wordt als contraststof in de bloedbanen geïnjecteerd. Daarna maakt men een röntgenopname door de patiënt bovenop een röntgenfilm te leggen: de ioniserende straling veroorzaakt immers zwarting op de foto.

Als er op die foto plaatsen zijn waar de zwarting niet het normale patroon vertoont, wijst dat op doorbloedingsstoornissen. Meteen weet de arts dat het orgaan niet meer normaal werkt.

Technetium heeft een halveringstijd van zes uur. Deze tijd is voldoende groot om een geneeskundig onderzoek uit te voeren, maar kort genoeg om de gezondheid niet te schaden.

De tabel hieronder geeft nog een aantal voorbeelden van halveringstijden.

^8Be	$2 \cdot 10^{-16}\text{ s}$
^{214}Po	$1,6 \cdot 10^{-4}\text{ s}$
^{26}Al	7 s
^{34}Cl	33 m
^{231}Th	26 h
^{222}Rn	4 d
^{22}Na	2,6 j
^3H	12,5 j
^{14}C	$5,37 \cdot 10^3\text{ j}$
^{235}U	$0,7 \cdot 10^8\text{ j}$
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9\text{ j}$
^{40}K	$1,4 \cdot 10^9\text{ j}$
^{87}Rb	$6 \cdot 10^{10}\text{ j}$
^{115}In	$6 \cdot 10^{14}\text{ j}$
^{124}Sn	$1,7 \cdot 10^{17}\text{ j}$

Oefening

Na hoeveel halveringstijden blijft er van een radionuclide minder dan 1% van de oorspronkelijke hoeveelheid over?

2.6 Radioactieve vervalreeksen

Bij het uitzenden van een α - of een β -deeltje ontstaat er een nieuw element. Daarbij zijn er twee mogelijkheden:

- ofwel is het nieuwgevormde element stabiel en dan stopt het radioactief verval
- ofwel is het nieuwe element op zijn beurt radioactief en zendt het opnieuw ioniserende straling uit waardoor er terug een ander element ontstaat.

Het resultaat is dat er uiteindelijk een reeks van radioactieve elementen ontstaat, die eindigt bij een stabiel element. We noemen dit een radioactieve vervalreeks. De isotopen die uit een vorig element ontstaan noemen we dochternucliden.

Voorbeeld

In kernreactoren wordt uraan als brandstof gebruikt. Het uraanerts wordt in ondergrondse mijnen gewonnen. Eén ton van het erts bevat 1 tot 10 kg uraan. Als men dit erts op zijn samenstelling onderzoekt vindt men buiten $^{238}_{92}\text{U}$ (99,3 %) en $^{235}_{92}\text{U}$ (0,7 %) nog een hele reeks andere nucliden. Deze zijn ontstaan door opeenvolgend verval: $^{238}_{92}\text{U}$ -kernen vervallen tot $^{234}_{90}\text{Th}$, deze op hun beurt tot $^{234}_{91}\text{Pa}$ enz.

De uraan-238 reeks eindigt pas als het stabiele $^{206}_{82}\text{Pb}$ gevormd is.

De tabel toont je de volledige vervalreeks.

Isotoop	Halveringstijd	Straling
$^{238}_{92}\text{U}$ (uraan)	$4,5 \cdot 10^9$ j	$\alpha \gamma$
$^{234}_{90}\text{Th}$ (thorium)	24 d	$\beta \gamma$
$^{234}_{91}\text{Pa}$ (protactinium)	1,1 min	$\beta \gamma$
$^{234}_{92}\text{U}$	$2,5 \cdot 10^5$ j	$\alpha \gamma$
$^{230}_{90}\text{Th}$	$8,2 \cdot 10^4$ j	$\alpha \gamma$
$^{226}_{88}\text{Ra}$ (radium)	1620 j	$\alpha \gamma$
$^{222}_{86}\text{Rn}$ (radon)	3,8 d	α
$^{218}_{84}\text{Po}$ (polonium)	3,1 min	α
$^{214}_{82}\text{Pb}$ (lood)	27 min	$\beta \gamma$
$^{214}_{83}\text{Bi}$ (bismut)	20 min	$\beta \gamma$
$^{214}_{84}\text{Po}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$ s	α
$^{210}_{82}\text{Pb}$	19 j	$\beta \gamma$
$^{210}_{83}\text{Bi}$	5,0 d	β
$^{210}_{84}\text{Po}$	138 d	α
$^{206}_{82}\text{Pb}$	stabiel	geen

Uit de tabel zou je kunnen vermoeden dat er helemaal geen $^{210}_{82}\text{Pb}$ meer kan bestaan vermits de halveringstijd slechts 19 jaar bedraagt. Dit is helemaal niet waar. Voortdurend vervallen er $^{238}_{92}\text{U}$ kernen en wordt het hele rijtje weer afgelopen, zodat $^{210}_{82}\text{Pb}$ ook telkens komt opduiken.

Er zijn nog andere radioactieve reeksen bekend. We noteren nog enkele voorbeelden.

- Uraan-actiniumreeks. Ze begint bij U-238 en eindigt bij Pb-207.
- De thoriumreeks gaat van Th-232 tot Pb-208.
- De neptuniumreeks toont het verval van Np-237 tot Bi-209.

Schematisch

- Niet stabiele atoomkernen noemen we radioactief. Ze vervallen spontaan. De straling die daarbij ontstaat, noemen we ioniserende straling.
- Er zijn drie vormen van radioactief verval.
- Bij alfaverval wordt een α -deeltje uitgezonden. Het is een hecht geheel van twee protonen en twee neutronen. Wanneer een instabiele kern een α -deeltje uitstoot, vermindert het massagetal met vier en het atoomnummer met twee. Daardoor ontstaat een nieuw element dat twee plaatsen voor het oorspronkelijk element staat in het periodiek systeem.
- Bij bètaverval wordt een elektron (β -deeltje) uitgezonden. Hierdoor blijft de massa ongewijzigd maar neemt het atoomnummer met 1 toe. Het nieuwe element staat dus één plaats achter het oorspronkelijke element in het PS.
- Een radioactieve kern kan zijn overtollige energie ook kwijtspelen door het uitzenden van elektromagnetische straling. Zo'n γ -straal (of foton) heeft geen lading en geen massa. Het radioactieve element verandert dus niet, maar verliest wel zijn overtollige energie.
- De energie van de drie radioactieve stralen is heel verschillend.
- α -deeltjes hebben een grote massa daardoor is hun doordringingsvermogen vrij klein, maar hun kinetische energie is heel groot. Daardoor hebben ze een hoog ioniserend vermogen.
- β -deeltjes hebben een geringe massa. Hun doordringingsvermogen is groot maar hun kinetische energie eerder klein. β -deeltjes hebben een grote energie (0,1 tot 10 MeV).
- Door kernen te beschieten met ultrasnelle deeltjes kunnen die omgezet worden in andere elementen. We noemen dat transmutatie.
- De tijd die nodig is om de helft van een hoeveelheid radioactief materiaal te laten vervallen, noemen we de halveringstijd. Hij is typerend voor een radioactieve stof; de waarde ervan is sterk uiteenlopend.
- Bij het uitzenden van een α - of een β -deeltje ontstaat een nieuw element. Wanneer dit nog radioactief is, zal het opnieuw ioniserende straling uitzenden, zodat terug een ander element ontstaat. Zo ontstaat een reeks van radioactieve elementen die eindigt bij een stabiel element. We noemen dit een radioactieve vervalreeks. De isotopen die uit een vorig element ontstaan, noemen we een dochternuclide.

3 RADIOACTIVITEIT METEN EN GEBRUIKEN

3.1 Stralingsbronnen

De mens is voortdurend blootgesteld aan ioniserende stralen. Vanuit het heelal (vooral van de zon) ontvangt de aarde ioniserende straling. We noemen dit kosmische straling. Deze stralen komen in botsing met atoomkern in de lucht, water en vaste stoffen. Daardoor ontstaan radioactieve stoffen zoals H-3 (tritium), Be-7, C-14 en Na-22. Al deze stoffen kunnen in ons voedsel terechtkomen.

In de aarde komen K-40, Th-232, U-238 en hun vervalproducten voor. Ook de aarde is dus een stralingsbron; we spreken van terrestrische straling.

De moderne bouwmaterialen bevatten altijd een zekere hoeveelheid radioactieve stoffen. Op die manier is er ook binnenshuis een beetje straling aanwezig. Een bijzonder probleem hierbij vormt het radioactieve **radongas** (Rn-222). Het ontstaat in de bodem als vervalproduct van U-238, stijgt op en komt vrij in de buitenlucht, maar ook binnen in huis.

Door de industriële verwerking van ertsen en brandstoffen komen relatief kleine hoeveelheden radionucliden via de rook in de lucht terecht.

Planten en dieren halen, direct of indirect, voedsel uit de grond. In dat voedsel komen vooral K-40, H-3 en C-14 voor. Die nucliden eten wij dus ook op.

Ook in de medische wereld worden patiënten dikwijls blootgesteld aan ioniserende stralen. Denk maar aan röntgenonderzoek, onderzoek met radionucliden in gammacamera's, CT-scans en bestraling tegen kanker.

Op veel grotere schaal kunnen ioniserende stralen vrijkomen bij ongevallen met kernreactoren of bij kernbomproeven.

Zo is bij de ramp van Tsjernobyl een grote hoeveelheid I-131 (halveringstijd 8 dagen) vrijgekomen dat zich ophoopt in de schildklier.

Door de nucleaire fall-out van de kernbomproeven tussen 1945 en 1963 zijn radionucliden vrijgekomen, die zich over de gehele wereld verspreid hebben. Zo komt de langlevende Cs-137-isotoop (halveringstijd 30 jaar) nog steeds in de bodem voor.

De effecten van de ioniserende stralen kunnen op drie manieren ontstaan:

- Door **straling**: de stralingsbron bevindt zich dan buiten het lichaam.
- Wanneer de stralingsbron aan de huid kleeft, spreken we van **uitwendige besmetting**.
- Door **inwendige besmetting** als de bron ingeademd of ingeslikt werd of als het radioactief materiaal binnendrong via een wonde.

Voor γ - en röntgenstralen maakt het, vanwege het groot doordringend vermogen, weinig uit of de besmetting van binnen of van buiten komt.

Bij α -straling zit de zaak heel anders. Ze dringt slechts enkele cm in het lichaam door en wordt door de kledij grotendeels tegengehouden. α -straling is vooral gevaarlijk bij inwendige besmetting.

Voor β -straling is alleen de inwendige besmetting van belang. Uitwendige β -straling raakt immers niet door de opperhuid. Deze huidlaag bevat alleen dode cellen en straling kan hierin weinig biologische schade aanrichten.

Tijdens de Tsjernobylramp bleek het belang van al deze vormen van blootstelling duidelijk.

Brandweerlui die reactorbrokstukken opruimden werden zwaar bestraald, hoewel zij die stoffen niet rechtstreeks aanraakten. Ze waren dus onderhevig aan straling. Huizen in de omringende steden en dorpen waren uitwendig besmet door radioactief stof. Er zat niets anders op dan het stof weg te spuiten met heel veel water. Om de inwendige besmetting te vermijden moesten zelfs de rendieren in Lapland afgemaakt worden.

3.2 Grootheden en eenheden voor radioactiviteit

Het grote gevaar van straling is hun ioniserende werking. Daardoor ontstaan in de cellen ionen, die aanleiding kunnen geven tot ongewenste chemische reacties. Hierdoor kunnen de cellen beschadigd of vernietigd worden. Bovendien kan het erfelijk materiaal beschadigd geraken.

De grootte van de opgelopen schade hangt af van verschillende factoren:

- het **aantal deeltjes** per seconde
- de **hoeveelheid** geabsorbeerde straling
- de **aard** van de straling.

3.2.1 Het aantal deeltjes per seconde

Dit hangt natuurlijk af van de activiteit van de radionuclide en dus ook van de halveringstijd. De activiteit wordt uitgedrukt in becquerel (Bq). Er is een activiteit van 1 Bq als er per seconde één radioactieve kern vervalst.

Hoe groter de activiteit van een radionuclide des te gevaarlijker is de straling.

Voorbeelden

Element	Activiteit
1 g U-238	$1,2 \cdot 10^4$ Bq

1 g Pu-239	$2,3 \cdot 10^9$ Bq
1 g Ra-226	$3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
1 g Cs-137	$3,1 \cdot 10^{12}$ Bq
1 g Sr-90	$5,2 \cdot 10^{12}$ Bq
1 g I-131	$4,6 \cdot 10^{15}$ Bq

Water in de oceaan heeft een activiteit van ongeveer 12 Bq per liter.

De activiteit van het radongas in woningen is ongeveer 50 Bq per m³ lucht.

Elke mens is een stralingsbron met een activiteit van 8500 Bq.

Voedsel met een activiteit van een paar honderd Bq per kg is totaal ongevaarlijk.

3.2.2 De hoeveelheid geabsorbeerde straling

De stralingsdosis (D) is de energie die per kg bestraalde materie geabsorbeerd wordt.

$$\text{Stralingsdosis} = \frac{\text{Geabsorbeerde energie}}{\text{Massa}}$$

De eenheid van stralingsdosis is de gray: 1 Gy = 1 J/kg.

Hoe groter de geabsorbeerde dosis, hoe groter het ioniserend vermogen van de straling.

3.2.3 De aard van de straling

De stralingsdosis geeft het opgelopen risico niet exact weer. Alles hangt immers af van de aard van de straling. Zo is de schade veroorzaakt door α -straling veel groter dan die van β -straling.

Dit komt omdat α -deeltjes uit tweemaal positief geladen heliumkernen bestaan zodat hun ioniserende werking heel groot wordt. Door die ionisatie wordt de cel werking verstoord, zodat er abnormale reacties kunnen optreden, die tot kanker kunnen leiden.

Om ook het biologisch effect van een straling weer te geven, wordt de stralingsdosis vermenigvuldigd met een bepaalde factor (RBE = relatief biologisch effect), afhankelijk van de straling.

Dosisequivalent = geabsorbeerde dosis x RBE

De eenheid van dosisequivalent (H) is de sievert: 1 Sv = 1 J/kg.

Straling	RBE
β -, γ -, röntgen	1
neutronen traag	3
neutronen snel	10
α	10-20
splijtingsfragmenten	20

3.3 Schade door ioniserende straling

Uit metingen weet men dat alle Belgen gemiddeld 4,8 mSv per jaar aan stralingsbelasting ondergaan. Daarvan is 73 % van natuurlijke oorsprong (vooral uit de ondergrond), 18 % is van medische oorsprong, 8 % komt uit de voeding en 1 % uit de industrie.

Deze dosis is echter volstrekt ongevaarlijk.

Door sterke bestraling kan de mens twee types van lichamelijke schade oplopen.

3.3.1 Vroegsomatische schade

Dit is de schade die kort na de bestraling optreedt, waardoor er veel cellen aangetast worden. Na enkele dagen treden dan weefselschade (brandwonden, afbraak van bloedvormende weefsels) en stralingsziekte op (misselijkheid, overgeven, duizeligheid, hoofdpijn). Vooral de snel delende cellen (vb. maagdarmslijmvlies) zijn erg gevoelig voor straling.

De volgende verschijnselen kunnen optreden.

dosisequivalent aangerichte schade

minder dan 200 mSv	tijdelijk afname van het aantal witte bloedcellen
500 mSv	afname van het aantal rode bloedcellen
1 Sv	eerste symptomen van stralingsziekte
2 Sv	gevorderde stralingsziekte met aantasting van het beendermerg
2,5 Sv	tijdelijke steriliteit
3 Sv	ernstige brandwonden
4 Sv	50 % van de getroffen personen sterft
5 Sv	cataract (vertroebeling ooglens) stralingsziekte met ernstig darmsyndroom
10 Sv	brandwonden met blaren, de getroffen personen sterven binnen enkele dagen

3.3.2 Laat somatische schade

Hiermee bedoelen we de schade die optreedt jaren na de bestraling.

Als immers de genen beschadigd worden die de werking van de cel regelen, kan de cel 'op hol slaan' en zich ontwikkelen tot kankercel.

Als de voortplantingscellen aangetast worden, kan er schade aangericht worden in het nageslacht.

3.4 Detectie van ioniserende straling

In het eerste hoofdstuk leerden we reeds enkele toestellen kennen die de aanwezigheid van ioniserende straling kunnen aantonen. Denk maar aan de elektroscop, de Geigerteller, de nevelkamer en een fotografische plaat. In de praktijk wordt de Geigerteller veruit het meest gebruikt.

We bekijken echter nog twee andere toestellen.

3.4.1 De halfgeleiderteller

Deze bestaat uit een halfgeleiderdiode (pn-junctie) die zo verbonden is met een spanningsbron dat ze net niet geleidt.

Telkens een stralingsdeeltje door de diode gaat, geleidt ze heel even. De stroompuls wordt verwerkt in een teller. Een halfgeleiderteller heeft het voordeel dat hij veel compacter is dan een GM-teller.

3.4.2 De dosimeter

Personen die in nucleaire installaties werken, moeten voortdurend een badge dragen die de hoeveelheid straling registreert, waaraan zij worden blootgesteld. In zo'n dosimeter zitten verschillende fotografische filmpjes achter een metalen of plastic venstertje. De mate waarin de film aangetast wordt, geeft aan hoe sterk de bestraling was.

3.5 Toepassingen van radioactiviteit

3.5.1 De radioactieve klok

In de geologie

Geologen hebben in veel streken uraan houdende ertsen onderzocht waarin U-238, samen met al zijn vervalproducten (Th-234, Pa-234 ... Pb-206), volledig geïsoleerd opgesloten zitten.

De halveringstijd van U-238 is $4,5 \cdot 10^9$ jaar.

De Pb-206 atomen die in zo'n gesteente voorkomen zijn uitsluitend gevormd door het verval van U-238.

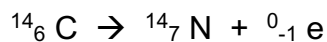
Door het gehalte aan beide isotopen in het erts te onderzoeken, hebben de geologen kunnen aantonen dat het uraan ongeveer 4 miljard jaar geleden ingesloten werd in de stollende rotsmassa. Op dat moment moet de aarde dus vast geworden zijn. Het gehalte aan de andere vervalproducten is hierbij niet bruikbaar omdat die tussenproducten een veel kleinere halveringstijd hebben, zodat ze allang vervallen zijn tot andere isotopen.

Op die manier kennen we de 'ouderdom' van de aardkorst. Ook de ouderdom van de maangesteenten is op een analoge manier gemeten. Ze blijkt ongeveer even veel lentes meegemaakt te hebben dan de aarde.

In de archeologie

De leeftijd van organisch materiaal zoals hout, beenderen, textiel, niet ouder dan enkele tienduizenden jaren, kan bepaald worden met de C-14-methode.

Van koolstof komen in de natuur twee isotopen voor: ^{12}C en ^{14}C . Deze laatste isotoop is radioactief en vervalt onder uitzending van β -straling.



De halveringstijd bedraagt 5730 jaar.

Beide isotopen zitten in alle koolstofverbindingen. Anders gezegd: CO_2 komt zowel voor met ^{12}C als met ^{14}C .

Planten nemen CO_2 op tijdens de fotosynthese en vormen en zetmeel mee. Als dieren deze planten opnemen komt het C-14-isotoop ook in hun lichaam terecht. Op die manier komt de radioactieve isotoop voor in alle levende wezens en vervalt daar geleidelijk.

Bij de dood houdt de toevoer aan ^{14}C op. Door radioactief verval zal de concentratie ervan in het dode lichaam stelselmatig afnemen.

Als een archeoloog een bijvoorbeeld een houten vondst opdelft, kan hij de leeftijd ervan als volgt achterhalen. Hij verbrandt een klein stukje van het oude hout, terwijl alle verbrandingsgassen nauwkeurig opgevangen worden. Hieruit wordt het koolstofdioxide afgezonderd en de activiteit van de C-14 isotoop wordt opgemeten. Vervolgens wordt een even groot stukje 'hedendaags' hout verbrand. Het CO_2 wordt eveneens afgezonderd en de activiteit van ^{14}C bepaald.

Als de activiteit van het oude stukje hout op de helft gekomen is, weet men dat de vondst 5730 jaar oud is.

De methode is bruikbaar voor tijdsbepalingen tussen 100 en 50000 jaar. Ze wordt bijvoorbeeld dikwijls gebruikt om de ouderdom van skeletten te bepalen.

3.5.2 Geneeskundige toepassingen

Radionucliden worden gebruikt voor diagnose (= het vaststellen van een ziekte) en voor therapie (= behandeling van de ziekte).

In de **diagnostiek** worden 'tracers' gebruikt. Dit betekent letterlijk 'speurder'. Het komt erop neer dat in bepaalde chemische stof een aantal atomen vervangen worden door radioactieve isotopen. Dat kan gerust want de chemische eigenschappen worden daardoor niet gewijzigd. Op die manier wordt als het ware een etiket gekleefd op bepaalde moleculen, die je daarna een tijd kunt volgen in hun doen en laten.

Voor de β -stralers Tc-99 (halveringstijd: 6 h), Kr-81 (13,3 s) en I-123 (13 h) worden veel gebruikt.

Om bijvoorbeeld de longen te onderzoeken spuit men een technetium houdende stof in een ader. De stof verspreidt zich met het bloed ook in de longen. Daar zenden de gemarkeerde moleculen gammastralen uit. Deze stralen worden opgevangen door een gammacamera, die de beelden doorstuurt naar een monitor. Het beeld op de monitor noemen we een scintigram. Meteen verwerft de arts tal van gegevens over de werking van de longen. Donkere plaatsen op het scintigram wijzen er bijvoorbeeld op dat die gebieden niet goed bereikt worden door het bloed. Longonderzoek kan ook gebeuren door de patiënt Kr-81 te laten inademen, waarna weer een scintigram gemaakt wordt.

Door een patiënt C-14 en P-32 te laten innemen tezamen met voedsel, kan men storingen opsporen in de voedselopname.

In de **radiotherapie** worden kankergezwellen behandeld met γ -stralen van Co-60 of Cs-137.

Gezwellen kunnen intern behandeld worden door het inbrengen van naalden of zeer dunne plastic buisjes. Ze worden tot dicht bij de tumor gebracht en bevatten een geschikt radionuclide.

Voor de behandeling van ziekten van diepliggende of gevoelige organen laat men de patiënt radioactieve preparaten innemen, die zich in het te behandelen orgaan afzetten. Zo wordt de schildklier bereikt met I-131 (8 d).

Dieperliggende gezwellen (vb. sommige hersentumoren) worden bestraald door tientallen stralen, die men tegelijk vanuit verschillende richtingen op het zieke gebied richt. De radiotherapeut zorgt ervoor dat het gezwel zich precies op het snijpunt van al die stralen bevindt. Zo wordt het omgevende weefsel zoveel mogelijk gespaard.

Schematisch

- De activiteit van een radioactieve stof wordt uitgedrukt in becquerel. Er is een activiteit van 1 Bq als er per seconde een radioactieve kern vervalst.
- De stralingsdosis is de energie die per kg bestraalde materie geabsorbeerd wordt. De eenheid is de gray: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

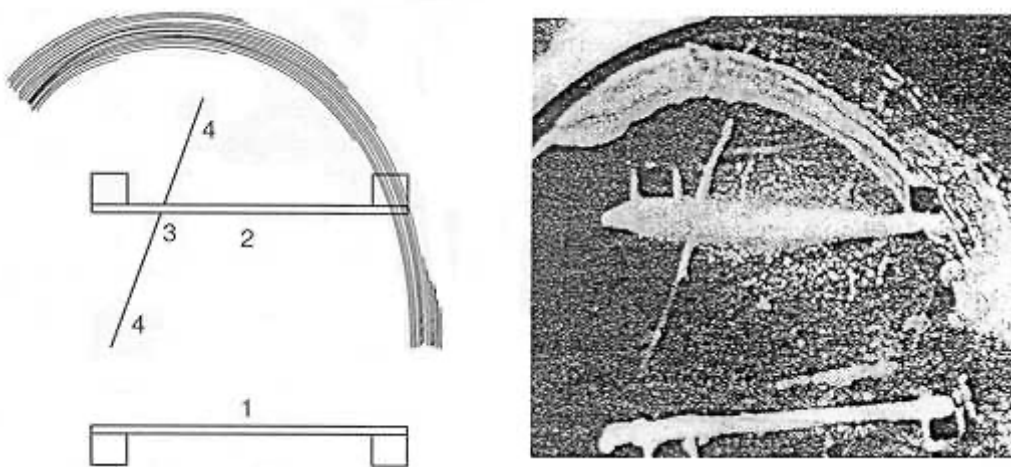
4 KERNENERGIE

De elektriciteit die we dagelijks gebruiken is voor een groot deel afkomstig uit kerncentrales waar de energie die opgesloten zit in de uraankern, omgezet wordt in elektrische energie.

Een atoom- of waterstofbom maken van diezelfde energie gebruik om enorme verwoestingen aan te richten.

4.1 Kernenergie zichtbaar in een nevelkamer

Wat toont de foto rechts? Dat kunnen we goed uitleggen aan de hand van de schematische tekening links.



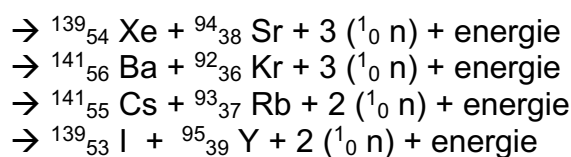
Cijfer (1) stelt een plaatje voor, bestaande uit radium en beryllium. Het zendt neutronen uit naar alle kanten. Omdat neutronen geen elektrische lading hebben, zijn ze niet zichtbaar in de nevelkamer.

Het tweede plaatje (2) bevat een hoeveelheid natuurlijk uraan. Dit bestaat voor 99,3 % uit U-238 en voor 0,7 % uit U-235. Alleen U-235 is belangrijk voor de volgende kernsplijting.

Op plaats (3) botst een neutron op een U-235 atoom. De kern vliegt in twee grote stukken uiteen, die met grote snelheid in tegengestelde richtingen (4) door de nevelkamer bewegen, daarbij komen nog drie neutronen vrij.

In de figuur zijn de 'kernbrokken' $^{139}_{54}\text{Xe}$ en $^{94}_{38}\text{Sr}$ voorgesteld.

Er zijn echter nog heel wat 'koppels' mogelijk. We noteren enkele voorbeelden.



De laatste splijtingswijze komt het meest voor.

Bij zo'n splijtingsproces komt (verhoudingsgewijs) een grote hoeveelheid energie vrij. Dat weten we omdat al die 'kernresten' met een duizelingwekkende snelheid door elkaar bewegen.

Het volgende cijfermateriaal zorgt voor aanvullend bewijs.

Als één atoom koolstof verbrand wordt komt een energie van 4 eV vrij; een α -deeltje krijgt bij zijn ontstaan een energie mee van ongeveer 5 MeV.

Bij de splijting van een uraanatoom komt er echter niet minder dan 204 MeV energie vrij. Dat betekent ook dat bij de splijting van 1 kg $^{235}_{92}\text{U}$ evenveel energie vrijkomt als bij de verbranding van 2,5 miljoen kg steenkool.

Die energie is afkomstig uit de kern van een uraanatoom. We spreken daarom van kernenergie.

4.2 De massaspectrometer

De massa van een atoom hebben we tot nu toe weergegeven door het massagetal. We hebben bovendien gezegd dat het om een relatieve massa gaat, omdat de absolute massa zo klein is, dat het niet praktische is om er mee te werken.

Om de absolute massa van een atoom te bepalen, moeten we zeer nauwkeurige metingen uitvoeren met een zogenaamde massaspectrometer.

In dit toestel laat men een bundel van de te onderzoeken atomen rechtlijnig bewegen. Vooraf werden de atomen echter geïoniseerd door botsingen met elektronen.

Die bundel geïoniseerde atomen stuurt men door een magnetisch veld waar hij, omwille van zijn lading, afgebogen wordt.

Hoe kleiner de massa van de atomen, hoe meer ze van hun rechte baan afwijken. Uit de grootte van die afwijking kan men de werkelijke massa zeer nauwkeurig berekenen.

Dergelijke massa's zijn erg klein. Daarom drukt men ze uit in een geschikte eenheid: de atomaire massa eenheid of de unit. We stellen ze voor door de letter u.

$$u = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

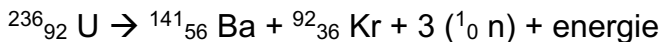
De volgende tabel geeft je enkele voorbeelden van massa's van 'deeltjes'.

Elektron	0,000549
Proton	1,007276
Neutron	1,008665
$^{12}_6\text{C}$	12
^1_1H	1,00782
^3_2He	3,016030
^4_2He	4,001506
$^{16}_8\text{O}$	15,994915
$^{235}_{92}\text{U}$	235,0439

4.3 Massadefect, de oorzaak van kernenergie

We weten al dat bij de splijting of fissie van een uraankern een grote hoeveelheid energie vrijkomt. Om te begrijpen waar die vandaan komt, moeten we een duik maken in de relativiteitstheorie (A. Einstein: 1905).

Eén van de manieren waarop $^{235}_{92}\text{U}$ kan splitsen is de volgende:



Met de massaspectrometer kan men heel nauwkeurig de massa meten van elk deeltje dat in deze reactie een rol speelt. Met die gegevens maken we een massabalans op.

Voor de fissie	Massa	Na de fissie	Massa
U- 235	235,04393 u	Ba-141	140,91434 u
1-n	1,008665 u	92-Kr	91,92625 u
		3 1-n	3,025995 u
Totaal	236,052595 u		235,866585 u

De massabalans klopt niet! De gezamenlijke massa van de deeltjes die overblijven na de fissie is kleiner dan die van de deeltjes voor de fissie.

Er is $236,052595 \text{ u} - 235,866585 \text{ u} = 0,18601 \text{ u}$ aan massa 'verdwenen'. Dit noemen we het massadefect.

Volgens de relativiteitstheorie is de 'verdwenen' massa eenvoudigweg omgezet in energie.

De hoeveelheid energie kan berekend worden met de formule.

$$E = m \times c^2$$

Hierin stelt 'm' het massadefect voor (in kg), 'c' de lichtsnelheid ($3 \cdot 10^8$ m/s) en 'E' de vrijkomende hoeveelheid energie (in J).

We berekenen nu die energie voor de Ba-Kr reactie.

Het massadefect bedraagt:

$$\begin{aligned} m &= 0,18601 \text{ u} \\ &= 0,18601 \times 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 0,308877 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

De vrijkomende energie is:

$$\begin{aligned} E &= 0,308877 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2 \\ &= 2,78 \cdot 10^{-11} \text{ J} \end{aligned}$$

Vermits 1 eV overeenstemt met $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, is die energie ook gelijk aan:

$$\begin{aligned} E &= 2,78 \cdot 10^{-11} / 1,6 \cdot 10^{-19} \\ &= 174 \cdot 10^6 \text{ eV} \\ &= 174 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Je merkt dat de vrijkomende energie zo groot is omdat de massa vermenigvuldigd wordt met het kwadraat van de lichtsnelheid, die inderdaad zeer groot is.

${}^{235}_{92}\text{U}$ kan op verschillende manieren splijten (zie p. 160). Gemiddeld komt daarbij 202 MeV vrij.

Het grootste deel van die energie (ongeveer 170 MeV) is kinetische energie van de uit elkaar vliegende kerndelen. Die kernbrokstukken botsen met grote snelheid tegen de atomen in hun omgeving. Daardoor ontstaat een grote hoeveelheid thermische energie.

Fissie is in principe mogelijk met alle zware kernen; in de praktijk wordt echter alleen U-235 en Pu-239 gebruikt.

Ook bij gewone chemische reacties is er massadefect. Het is echter zo klein dat de vrijkomende energie te verwaarlozen is.

4.4 Kettingreactie en atoombom

Een atoombom (juiste benaming kernbom) maken is helemaal niet moeilijk. Dat leggen we even uit.

Als één neutron doordringt in een bepaalde massa zuiver $^{235}_{92}\text{U}$ splijt er één kern. Daarbij komen drie neutronen vrij. Die kunnen op hun beurt drie kernen laten splijten, waarbij er negen neutronen vrijkomen.

De explosiekracht van beide bommen was ongeveer 20 miljoen kg TNT. Tot op vandaag zijn het de enige kernwapens die ooit tegen mensen gebruikt werden.

De enorme verwoestende werking van een atoombom is gebaseerd op drie verschillende effecten.

Hevige warmteontwikkeling

Er wordt brand veroorzaakt tot op 1 km van het invalspunt. Mensen kunnen zelfs nog brandwonden oplopen op 5 km afstand.

Een intense drukgolf

In Hiroshima werden de woningen in een straal van 2 km met de grond gelijk gemaakt, terwijl ook huizen op 6 km afstand zware schade opliepen.

Gevaarlijke ioniserende straling

Vooraf γ -straling en neutronenstraling, dringen door tot op verschillende km afstand. Bovendien worden grote hoeveelheden radioactieve stoffen tot in de stratosfeer geslingerd en door de wind over het aardoppervlak verspreid.

4.5 Kernreactor en kerncentrale

Het hart van elke kerncentrale is de kernreactor. Er bestaan diverse types. Wij bespreken hier de drukwaterreactor (PWR- pressurized water reactor) omdat deze in de meeste Europese kerncentrales gebruikt wordt.

4.5.1 Wat gebeurt in de reactor?

In de reactor zitten buizen, gevuld met uraanoxide. Het uraan in deze splijtstofstaven bestaat voor 97% uit U-238 en voor 3% uit U-235. Een kettingreactie, die uit de hand loopt zoals bij een atoombom, kan zich hier dus nooit voordoen.

Door de voortdurende kernsplijtingen ontstaat er echter wel veel warmte die afgegeven wordt aan het water van de primaire kringloop, dat voortdurend langs de splijtstofstaven gepompt wordt.

In de praktijk bevat een gemiddelde reactor 80 ton uraan, verdeeld over 40000 splijtstofstaven.

De kettingreactie wordt onder controle gehouden door het primaire water, de regelstaven en de aanwezige U-238 atomen. Dat gebeurt als volgt.

Het primaire water dient als moderator. De neutronen die immers bij elke splijting van een uraankern vrijkomen moeten vertraagd worden. Anders vliegen ze te gemakkelijk doorheen andere kernen zonder die te splijten. Door het primaire water worden de neutronen voldoende afgeremd. Bij elke splijting komen drie neutronen vrij. Daarvan worden er telkens twee 'weggevangen'. Dat gebeurt door U-238 kernen maar vooral door de regelstaven. Dit zijn staven uit cadmium die gemakkelijk neutronen absorberen en die voortdurend in en uit de reactor geschoven kunnen worden.

Een deel van de neutronen dringt door in de U-238 kernen en transformeren deze in plutoniumkernen ($^{239}_{94}\text{Pu}$).

Plutonium is bruikbaar als splijtstof. Het wordt vooral aangemaakt voor de productie van kernbommen. Dit gebeurt in kweekreactoren.

4.5.2 De secundaire kringloop

In de stoomgenerator wordt het primaire water doorheen een buizenstelsel gepompt. Daar geeft het zijn warmte af aan het secundaire water dat omgezet wordt in stoom, die de turbines aandrijft.

Het is immers normaal dat het primaire water dat in contact is gekomen met de splijtstofstaven, niet doorheen de turbine of de condensor mag stromen. Laat staan dat het in het koelwater of in de lucht zou terechtkomen.

4.5.3 De tertiaire kringloop

Ook het secundaire water wordt niet geloosd. In de condensor wordt het doorheen een buizenstelsel gepompt waar het zijn 'restwarmte' afgeeft aan het koelwater (tertiair water) dat uiteindelijk in bijvoorbeeld een rivier geloosd wordt.

Schematisch

- Energie afkomstig uit de kern noemen we kernenergie.
- De absolute massa van een atoom kunnen we bepalen met een massaspectrometer
- Bij een kernfissie is er een merkbaar verschil tussen de massa van de deeltjes voor de splijting en de massa van de nieuwgevormde deeltjes. Dat noemen we het massadefect.
- In een atoombom treedt een kettingreactie op als de hoeveelheid splijtbaar stof voldoende groot is; we noemen dat kritische massa. Daarvoor worden kleinere stukken U-235 in een bolvorm geplaatst. Door de explosie van een klassieke springstof worden de delen bij elkaar gebracht, waardoor de kritische massa overschreden wordt.
- De enorme verwoestende werking is terug te brengen tot drie effecten:
 - hevige warmteontwikkeling
 - een intense drukgolf
 - een gevaarlijke ioniserende straling
- In een kerncentrale wordt de kettingreactie onder controle gehouden door het primaire water, de regelstaven en U-238 atomen.

4.6 De vervalwet in formule

Bij het onderzoek van een zwakke radioactieve substantie met een tel buis valt de onregelmatigheid op waarmee de kernen desintegreren. Het blijkt dus onmogelijk te voorspellen, wanneer een bepaalde kern gaat desintegreren. Dit kan binnen een onderdeel van een seconde zijn of over enige jaren. Heeft men echter te doen met een zeer groot aantal kernen, dan kan men wel een wetmatigheid vinden. Men mag dus zeggen dat na bv. 50 s de helft van de Rn-220 kernen die op een bepaald ogenblik aanwezig zijn, gedesintegreerd zijn. Men noemt deze tijd de halveringstijd van Rn-220. De halveringstijd is dus de tijd nodig om de helft van de aanwezige kernen te zien desintegreren.

Alle kernen hebben dezelfde kans, om in een bepaald tijdsverloop te desintegreren. Is T de halveringstijd van de radioactieve stof, dan heeft elke kern 50 % kans om in het tijdsverloop T te desintegreren. Als het oorspronkelijk aantal kernen n_0 is, dan zullen

na een tijd T nog $\frac{n_0}{2}$ kernen overblijven,

na een tijd 2T nog $\frac{n_0}{4}$ kernen overblijven,

na een tijd 3T nog $\frac{n_0}{8}$ kernen overblijven,

na een tijd kT nog $n = \frac{n_0}{2^k}$ kernen overblijven,

Na eliminatie van k komt men tot:

$$n = n_0 \cdot 2^{-t/T}$$

Door deze formule af te leiden naar t bekomt men:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\ln 2}{T} \cdot n_0 \cdot 2^{-t/T} \quad \text{of} \quad \frac{dn}{dt} = -\frac{\ln 2}{T} \cdot n$$

Hieruit stel je vast dat de desintegratiesnelheid dn/dt , ook activiteit genoemd, recht evenredig is met n, het aantal nog voorhanden zijnde kernen.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0.693}{T}$$

De evenredigheidsfactor λ noemt men de desintegratieconstante van de radioactieve stof.

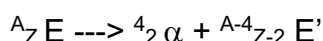
De massa (m) van de radioactieve stof is recht evenredig met het aantal kernen (n). Er geldt ook dat: $dm/dt = \lambda m$.

4.7 Meer over de eerste transmutatieregels

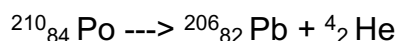
Als de kern een α deeltje uitzendt moet de kernmassa met 4 eenheden verminderen en de kernlading met 2 eenheden. Daar de kernlading karakteristiek is voor de aard van een element zal men na een α emissie een kern van een ander element hebben. Men zegt dat in dat geval, door desintegratie van een kern, een transmutatie is gebeurd in een ander element.

De eerste transmutatieregels (1903) luidt:

Bij emissie van een α deeltje vermindert het ladingsgetal van een kern met 2 eenheden en het massagetal met 4 eenheden



Zo zal Po-210 transmuteren in Pb-206 volgens:



De massa-energie balans geeft:

massa van ${}^{206}_{82} \text{Pb} = 205,9745 \text{ u}$ (-82 x massa van elektron)

massa van ${}^4_2 \text{He} = 4,0026 \text{ u}$ (- 2 x massa van elektron)

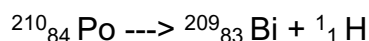
som = 209,9771 u (-84 x massa van elektron)

massa van ${}^{210}_{84} \text{Po} = 209,9828 \text{ u}$ (-84 x massa van elektron)

massaverlies = 0,0057 u

Dit komt overeen met een energiewinst van 5,3 MeV. Men spreekt van een exo-energetische kernreactie m.a.w. Po-210 desintegreert spontaan. De vrijkomende energie vindt men terug onder de vorm van kinetische energie van het α deeltje en van de kern die het deeltje uitstoot. Het kan eigenaardig lijken dat bij α desintegratie vier nucleonen tegelijk de kern verlaten, i.p.v. afzonderlijke nucleonen. Dit vindt zijn oorsprong in de uitzonderlijke grote stabiliteit van de heliumkern.

Moest Po-210 een proton uitzenden i.p.v. een α deeltje, dan zou men volgende kernreactie hebben:



De massa-energiebalans zou dan geven:

massa van ${}^{209}_{83} \text{Bi} = 208,9804 \text{ u}$ (-83 x massa van elektron)

massa van ${}^1_1 \text{H} = 1,0078 \text{ u}$ (- 1 x massa van elektron)

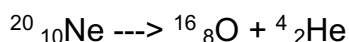
som = 209,9882 u (-84 x massa van elektron)

massa van ${}^{210}_{84} \text{Po} = 209,9828 \text{ u}$ (-84 x massa van elektron)

massawinst = 0,0054 u

Hieruit volgt dat Po-210 slechts een proton zou kunnen uitzenden mits een energietoevoer van ongeveer 5 MeV. Men zou hier een endo-energetische kernreactie hebben. Po-210 zal dus niet spontaan desintegreren met protonen emissie.

De massa-energie balans geeft ook de verklaring waarom de meeste elementen stabiel zijn. Nemen we bijv. het geval van Ne-20. Bij α desintegratie zou men als reactie moeten hebben:



massa van ${}^{16}_8\text{O} = 15,9949 \text{ u}$ (-8 x massa van elektron)

massa van ${}^4_2\text{He} = 4,0026 \text{ u}$ (-2 x massa van elektron)

som = 19,9975 u (-10 x massa van elektron)

massa van ${}^{20}_{10}\text{Ne} = 19,9924 \text{ u}$ (-10 x massa van elektron)

massawinst = 0,0051 u

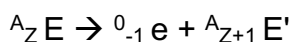
Dit betekent dat deze α radioactiviteit van Ne-20 slechts zou plaatsgrijpen mits toevoeging van ongeveer 5 MeV energie. Uit de berekeningen gedaan voor proton radioactiviteit van Ne-20 blijkt dat ook in dit geval energietoevoer noodzakelijk blijkt nl. ongeveer 13 MeV. De isotoop Ne-20 is stabiel.

4.8 Meer over de tweede transmutatieregel

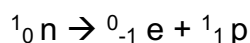
De energie die gepaard gaat met deze straling is veel groter dan deze die betrekking heeft op de elektronen van het omhulsel. De β deeltjes zijn dus zeker ook uit de kern afkomstig. Hier grijpt eveneens een natuurlijke transmutatie plaats, daar de kernlading met één eenheid vergroot, terwijl de kernmassa praktisch ongewijzigd blijft.

De tweede transmutatieregel luidt:

“Bij emissie van een β deeltje door een kern, vermeerderd het ladingsgetal met één eenheid en blijft het massagetal ongewijzigd”



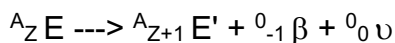
De uitzending van elektronen door de kern gaf aanleiding tot de oorspronkelijke hypothese over de kernstructuur, volgens dewelke de kern bestaat uit protonen en elektronen. Toen men deze hypothese moest verwerpen legde men de uitzending van een elektron uit, door aan te nemen dat een neutron omgezet wordt in een proton (dat in de kern blijft) en een elektron (dat de kern verlaat), dus volgens de omzetting:



We moeten hierbij onmiddellijk opmerken, dat deze veronderstelling niet insluit dat het uitgezonden elektron reeds vooraf aanwezig zou zijn in de kern. Iets analoog doet zich voor met fotonen die niet in het atoomomhulsel aanwezig zijn, maar die tevoorschijn komen als omhulsel elektronen van energietoestand (baan) veranderen. Een neutron en een proton zijn dus op te vatten als twee toestandsvormen van een nucleon. Als de toestand "neutron" in de toestand "proton" omgezet wordt, ontstaat een elektron.

Een kern is β radioactief of niet, al naargelang de kernreactie bij uitzending van een elektron exo-energetisch of endo-energetisch is. Bij een β desintegratie wordt de energie die overeenkomt met het massaverlies slechts gedeeltelijk teruggevonden in de kinetische energie van de overblijvende kern en van het uitgestoten elektron. Dat schijnt in strijd met de wet van het behoud van energie. Pauli stelde in 1931 de hypothese voorop, dat het overschot aan energie overgedragen werd op een deeltje dat tezelfdertijd uitgezonden wordt, het neutrino, ν of ${}^0_0\nu$, zonder lading en met uiterst kleine massa. Dit deeltje heeft dus weinig interactie met de materie, wat verklaart waarom neutrino's pas in 1956 experimenteel geobserveerd werden.

De hierboven vermelde kernreacties moet men dus als volgt schrijven:



Het onderzoek van de frequentie van de γ stralen heeft trouwens uitgewezen dat de nucleonen in de kern volgens bepaalde energieniveaus gerangschikt zijn.

Bij β emissie kunnen de uitgezonden elektronen een omhulsel elektron van het eigen atoom of van een ander atoom treffen. Hierdoor wordt het röntgenspectrum van deze atomen opgewekt en men spreekt van secundaire γ straling.

De primaire γ straling, die van de kern zelf afkomstig is, is zeer energierijk en heeft een sterke foto-elektronische werking, zodat elektronen van het omhulsel weggeslagen worden. Dat geeft aanleiding tot een secundaire β straling.

4.9 Vragen en opgaven

- 1 Het element Ra-226 zendt α deeltjes uit met een energie van 4.8 MeV. Bereken hun snelheid.
- 2 Bereken de kinetische energie in MeV van β straling met snelheid 200000 km/s (relativistisch!)
- 3 U-238 heeft een halveringstijd van $4,5 \cdot 10^9$ jaar. Hoeveel deeltjes worden per seconde uitgezonden door 1 g U-238?
- 4 De activiteit van een radioactief element is op 1/8 van zijn oorspronkelijke waarde herleid na 135 min. Zoek de halveringstijd van dit element?
- 5 Een rots bevat 3 mg U-234 met halveringstijd $2,48 \cdot 10^5$ jaar. Hoeveel U-234 blijft erover na 62000 jaar?

6 De halveringstijd van de reactie $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\alpha$ in 140 dagen.

Oorspronkelijk is er 1 mg Po voorhanden. Bereken:

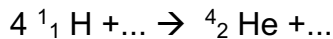
- 1 hoeveel atomen desintegreren in 1 jaar
- 2 welke massa Po is dan gedesintegreerd
- 3 welke massa He is dan ontstaan

5 KERNFUSIE

Bij het samensmelten of fuseren van lichte atoomkernen tot één zware kern, komt energie vrij. We leggen dat uit aan de hand van drie voorbeelden.

5.1 De zon en de sterren

Ze bestaan hoofdzakelijk uit waterstof. Voortdurend versmelten waterstofkernen tot heliumkernen:



Bij deze omzetting treedt massadefect op:

massa van 4 ${}^1_1\text{H}$	$4 \times 1,007825 \text{ u} = 4,031300 \text{ u}$
massa van ${}^4_2\text{He}$	$= 4,002603 \text{ u}$
massadefect	$= 0,028697 \text{ u}$

Net als bij de fissie wordt deze massa omgezet in energie, die door de zon uitgestraald wordt.

Uit de formule $E = m \times c^2$ volgt dat deze energie 26,7 MeV bedraagt.

Elke seconde worden er in de zon ongeveer 650 miljoen ton waterstofkernen omgezet in 645 miljoen ton heliumkernen. Er is dus 5 miljoen ton massadefect per seconde!

De hoeveelheid energie die de zon elke seconde uitstraalt is gelijk aan de energieproductie van een flinke kerncentrale die gedurende 1 miljard jaar ononderbroken werkt.

Deze gigantische energiestroom levert de zon nu al gedurende 5 miljard jaar. In al die tijd is de massa met slechts 0,1 % verminderd. Volgens astronomische berekeningen kan de zon nog eens 5 miljard jaar verder schijnen.

5.2 De waterstofbom

Hij bevat meestal een mengsel van deuterium (${}^2\text{H}$) en tritium (${}^3\text{H}$). Die twee kernen hebben een positieve lading en stoten elkaar dus af. Slechts als ze elkaar heel dicht naderen, krijgt de sterke-, wisselwerking de overhand op de elektromagnetische afstoting, zodat ze kunnen fuseren.

Dit wordt verwezenlijkt door binnen een deuterium-tritium mantel een atoombom te laten ontploffen. De temperatuur stijgt dan tot ver boven 100 miljoen °C. Daardoor worden de atoomkernen met zo'n kracht op elkaar geslingerd dat ze fuseren.

5.3 De kernfusiereactor

In 1991 slaagden Europese onderzoekers er voor het eerst in om een kernfusie op beheerste wijze te laten verlopen in een kernfusiereactor (de zgn. JET-tokamak in Culham Engeland).

Een tokamak is een grootmetalen reactievat in de vorm van een autoband. Binnen dit vat wordt een gasmengsel van deuterium en tritium door magnetische velden samengehouden. Door elektrische verhitting wordt de temperatuur van het mengsel opgedreven tot 300 miljoen °C waardoor de kernen beginnen te fuseren en energie leveren.

Dit is slechts éénmaal gelukt. Bij dit experiment werd minder dan een honderdduizendste gram omgezet en het duurde slechts 2 seconden. De wetenschappers waren nochtans heel gelukkig met dit resultaat, want hiermee bewezen ze dat kernfusie kan.

Tot slot noteren we nog even de voordelen van fusie ten opzichte van fissie.

- Bij kernfusie komt verhoudingsgewijs veel meer energie vrij dan bij kernfissie. Dit is normaal want het massadefect bij fusie is ongeveer 0,7% van de reagerende kernen, terwijl het voor fissie 0,1% bedraagt.
- Voor fissie moet men uraan ontginnen in mijnen; voor fusie hoopt men waterstof te gebruiken, die in overvloed aanwezig is in de oceanen.
- Fissieprocessen geven veel radioactief afval, dikwijls met halveringstijden van honderden tot duizenden jaren. Bij fusie is er nauwelijks afval; bovendien is de halveringstijd van de afvalproducten klein (vb. tritium 12 jaar).