

9. Experimenten

In een quantum computer gebruiken we verschijnselen als *superpositie*, *interferentie*, *verstrengeling* en *coherentie*. Dit zijn verschijnselen afkomstig uit de quantumfysica. Deze eigenschappen zijn essentieel voor de werking van een quantumcomputer. In dit hoofdstuk verkennen we deze begrippen. We maken gebruik van natuurkundige principes ondersteund met enkele eenvoudige experimenten. We gebruiken hiervoor de eigenschappen van licht.

hoofdstuk is los gecompileerd, hstk nummer is 1

9.1 Natuurkundige principes

9.1.1 Golf of deeltje

Licht heeft eigenschappen van zowel golven als deeltjes. Twee eigenschappen die elkaar lijken uit te sluiten. Newton zag dat licht terugkaatste van een spiegel, en dat licht door een gaatje rechtdoor ging zoals een kogel dat doet. Huygens zag dat licht zich juist in alle richtingen kon voortplanten, zoals je een steen in de vijver gooit, een golfeigenschap. In het begin van de negentiende eeuw leek Thomas Young (1802) het pleit te beslechten door de inwerking van lichtbronnen op elkaar onderzoeken. Zij vertonen interferentie, een golfeigenschap. Op zijn experimenten gaan we dieper in. In de negentiende eeuw liet Maxwell zien dat licht een elektromagnetisch golfverschijnsel was. Deze golven zijn te polariseren, een eigenschap die licht ook vertoont. In 1905 toonde Einstein aan dat licht uit losse een energiepakketjes bestond, later fotonen genoemd. In de quantummechanica gebruiken we deeltjes- en golfeigenschappen al naar gelang.

Golven

Anders dan deeltjes kunnen golven elkaar kruisen zonder te botsen. Denk maar eens wat er gebeurt als je twee waterstralen kruist of

regen¹

aan de kringen die regenrupsels in een plas maken of als je twee lichtbundels kruist.

In onze experimenten gebruiken we geluid en licht als golfverschijnsel. Er is wel een wezenlijk verschil tussen de manier waarop licht en geluid zich voortplanten.

transversaal

Als je een steen in de vijver gooit plant zich een rimpeling voort over het oppervlak van het water. De watermolekulen zelf bewegen niet in de voortplantingsrichting. Ze bewegen alleen op en neer op hun plaats. Dit is te zien als de golf een eendje passeert. Het eendje gaat alleen op en neer. Het beweegt loodrecht op de voortplantingsrichting.

Bij een *transversale* golf staat de uitwijking loodrecht op de voortplantingsrichting van de golf.

longitudinaal

Geluid is ook een golfverschijnsel maar de voortplanting van geluid vindt plaats door het botsen van luchtmoleculen in de richting van de voortplanting van de golf. We noemen dit *longitudinaal*.

Bij een *longitudinale* golf is de uitwijking van de trilling in de voortplantingsrichting van de golf.

Is een wave in een stadion een longitudinale of een transversale golf?

polarisatie

Licht is een transversale ruimtelijke golf met een uitwijking die in twee richtingen loodrecht op de voortplanting van de golf kan staan. Licht kan gedwongen worden in juist een verticale of een horizontale richting te trillen. Deze eigenschap gebruiken we voor het experiment. Geluid is niet polariseerbaar omdat het alleen in de voortplantingsrichting trilt. Een deel van de experimenten zijn daarom niet met geluid uit te voeren.

3blue1brown² geeft mooi grafisch weer hoe licht als zich elektromagnetische golf voortplant.

Interferentie

De eigenschap dat golven door elkaar heen kunnen lopen geldt zowel voor longitudinale als voor transversale golven. We kunnen zowel geluid als licht gebruiken om dit verschijnsel te laten zien.

Een golf is een herhalend patroon. Bij het eendje op de watergolf komt er afwisselend een berg en een dal voorbij. Bij geluid passeert

er afwisselend een drukverhoging en een drukverlaging (hoe vaker hoe hoger de toon).

Rowili

Rowili is politie jargon voor het lint dat gebruikt wordt om afzettingen te maken. (rood-wit lint). met rowili kun je makkelijk interferentie van golven nabootsen. De witte stukken zijn de golf-toppen, de rode de dalen. Als golven uit twee bronnen elkaar *in fase* tegen komen (op het kruispunt van twee stukken lint) versterken ze elkaar. Van beide bronnen komen dan telkens tegelijk bergen en dalen. Als ze in *tegenfase* staan doven ze elkaar juist uit. Een top (wit stuk) wordt opgeheven door een dal (rood) uit de andere kant en een halve trilling later werkt het andersom, maar dan doven zij elkaar weer uit. Voor interferentie is het nodig dat de bronnen *coherent* zijn.

Experiment

Twee geluidsbron met een toon van ongeveer 1 kHz. Doe een vinger in je oor en ga met je hoofd langzaam heen en weer. Je zult op sommige plekken extra hard geluid, en op sommige plekken nagenoeg stilte ervaren. De stille plekken noemen we knopen, de extra luide plekken heten buiken. Merk op, deze plekken bewegen niet met de golf mee, ze staan op vaste plekken in de ruimte. Dit verschijnsel noemen we interferentie. Zoek de voortplantingssnelheid van geluid op.

coherentie twee of meer bronnen met dezelfde frequentie zijn coherent. Het fase verschil is dan constant en kan nul zijn.

De *fase* van een trillingsbron is het aantal trillingen dat de bron heeft uitgevoerd. We zijn meestal alleen geïnteresseerd in de fractie van een trilling. Een fase van 0,25 betekent dat de trilling een kwart van zijn beweging heeft uitgevoerd.

Knopen en buiken

Als twee stukken lint bij elkaar komen en er komen uit beide richtingen tegelijk bergen en dalen aan, in *fase*, dan is de uitwijking op die plaatsen extra heftig: hard geluid, veel licht. We noemne zo'n plek een *buik*. Als er van een bron juist een dal komt en van uit de andere juist een berg, dan zijn de bronnen in *tegenfase*. Ze heffen elkaar op. We noemen zo'n plek een *knoop*. De golfbergen en dalen bewegen in de ruimte met de snelheid van de golf, maar de buiken en knopen staan op vaste plaatsen. We voerden de experimenten met interferentie van geluid uit met één toonhoogte. Bij andere golf lengten liggen de knopen en buiken op andere plaatsen.

Als je ze door elkaar gebruikt zoals bij muziek merk je er niets meer van.

- Je kunt geluidsgolven niet polariseren. Waarom niet?

● laser

Laserlicht heeft één kleur, één golflengte. Dit licht is dus heel goed te gebruiken als coherente lichtbron voor interferentie experimenten. Het is ook nog eens heel intens, dat is handig.

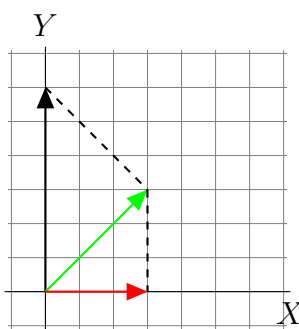
Enkelspleet

Licht dat door een smalle spleet gaat (kleiner dan de golflengte) waaiert uit als een halve cirkel. Als de spleet breder wordt (in ons experiment tot zo'n 200 golflengten) verandert dit patroon. In de richting loodrecht op de spleet zijn alle punten in fase, maar in een willekeurige scheve richting treedt er een fase verschil op. Er ontstaan donkere vlekken op het scherm.

polarisatie vonkenop-
stelling Urs

Dubbelspleet

Met twee spleten vlak naast elkaar hebben we het experiment van Young nagebouwd. Hij zag dat de golven na de dubbelspleet interfereerden. Wij trekken het experiment van Young door naar de 19e eeuw door het uit te breiden met polarisatie.



Figuur
projecties

9.1:

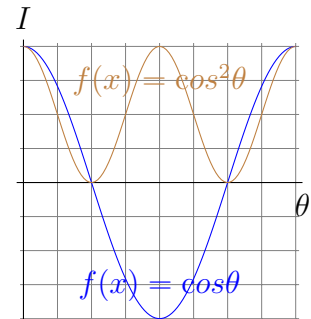
Polarisatie

Je kunt licht voorstellen als een transversale golf die zich met de lichtsnelheid voortbeweegt. De amplitude van de transversale beweging is twee dimensionaal voor te stellen als een roterende vector. De lichtvector plant zich zo als een kurkentrekker beweging voort. Lineaire polarisatiefilters projecteren deze ronddraaiende beweging op een as, daarmee wordt de beweging een trilling in één richting. Laten we die richting vertikaal noemen. Als we een tweede filter hierachter zetten, in dezelfde richting, wordt het licht nog wel iets verzwakt vanwege de plastic film. Als we het tweede filter

draaien komt er steeds minder licht door, tot het licht bij 90° volledig geblokkeerd wordt. In fig. 9.2 staat de doorgelaten intensiteit als functie van de draaiingshoek van het tweede filter getekend.

Wat gebeurt er als je een derde filter onder een hoek van 45° tussen twee loodrechte polaroids plaatst? Het licht keert weer terug! In figuur 9.1 staat het uitgetekend. Als we twee keer na elkaar een filter onder een hoek van 45° toepassen op vertikaal gepolariseerd licht eindigen we ook met horizontaal gepolariseerd licht, maar nu houden we wel licht over. Hint $\cos 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Twee keer toegepast wordt de amplitude dus gehalveerd, De energie wordt dus een vierde (niet meegenomen is verlies als gevolg van de grijswaarde van de plastic drager).

Onze ogen meten net als iedere sensor de intensiteit. De polarisatiefilters projecteren de echter de amplitude. Net als bij een gewone trilling is de energie evenredig met het kwadraat van de amplitude.



Figuur 9.2: wet van Malus

- Zoek de grootte intensiteit op. In welke SI eenheden druk je die uit?
- ◆ Iemand plaatst twee filters tussen de orthogonale polarisatoren, telkens onder een hoek van 30° ten opzichte van elkaar. Zonder rekening te houden met de absorptie van de plastic drager, hoeveel licht komt er nu doorheen? Hoeveel graden is de polarisatie gedraaid?
- ★ Iemand plaatst oneindig veel filters tussen het eerste en het laatste filter, die loodrecht op elkaar staan. Zonder rekening te houden met de absorptie van het plastic, hoeveel licht komt er door?

9.2 Het experiment

We bouwen een experiment op waarmee we superpositie aannemelijk maken. De elementen hebben we hierboven behandeld. We beginnen met de bron, de laser. Licht uit laserpennen is enigszins gepolariseerd. Schuif om de beurt de polarisatiefilters uit het raampje met twee polarisatiefilters voor de laser. Draai de laser zo, dat er door elk filter evenveel licht doorgelaten wordt. De laser staat dan op 45° en behandelt beide polarisatie-richtingen gelijk. Zet de laser vast. Leg het raampje weer even apart.

In het visitekaartje zitten drie spleetpatronen. Een dubbelspleet met bredere tussenruimte, een enkelspleet en een dubbelspleet die zeer dicht naast elkaar ligt. De laatste is alleen om op te scheppen.

- a. Schuif de visitekaart door de gleuf en beeld de enkelspleet (middelste patroon) af op de muur. Het enkelspleetpatroon is zo'n 10 cm breed op 3 m afstand. Gebruik het werkblad om een intensiteitspatroon te tekenen.
 - b. Zet de dubbelspleet (buitenste patroon) voor. Controleer of beide spleten evenveel licht doorlaten door een papiertje vlak achter de spleten te houden. De spleten moeten evenveel licht doorlaten.
- Noem een overeenkomst en een verschil tussen de spleten van experiment 1 en 2. [overeenkomst: dezelfde afmetingen van de spleet, verschil, een of twee spleten] De dubbelspleet bestaat uit twee enkelspleten vlak naast elkaar. Het zou dus raar zijn als het patroon van de dubbelspleet niet een beetje op dat van de enkelspleet lijkt.
- c. Teken het dubbelspleet patroon op het werkblad.
- Noem een overeenkomst tussen de twee patronen, en wat is het verschil? [zelfde contour, bij 2: hoger freq. patroon.]
- d. Schuif het strookje met de twee loodrechte polarisatieplaatjes vóór de dubbelspleet. Zó, dat elk van de filters één spleet afdekt. Het kaartje met de spleten blijft op zijn plaats omdat het tegengehouden wordt door het stroeve rubber.
 - e. Teken het patroon op het werkblad. Welk patroon zie je?
 - f. Neem nu het losse polaroid velletje en hou dat ergens tussen het apparaat en de afbeelding. Bij 45° zie je het dubbelspleetpatroon herstellen.
 - g. Kun je dit verklaren met de klassieke theorie (intensiteit van doorgelaten bundels)?

Dit hele experiment zou je kunnen herhalen met enkele fotonen. De intensiteitspatronen geven dan de kans weer waar het foton terecht komt.

- h. Ook het laatste experiment zou hetzelfde resultaat leveren. Kun je dit experiment ook klassiek verklaren? Waar zit m'm de kneep?

Je hebt zojuist superpositie ontdekt!

9.3 verstrengeling

Nog niet uitgewerkt.

Experiment met calciet, tegengestelde polarisatie.

Hier ook de beamsplitter, afbeelding in de ruit

9.4 docentenhandleiding

Experiment interferentie:

knopen en buiken: Er zijn tal van experimenten mogelijk. Chladni platen, flageolettes in een gitaarsnaar, proef van Kundt.

Benodigdheden twee luidsprekers toongenerator, NB één geluidsbron werkt ook. Zet 'm in de buurt van de muur, de muur spiegelt de geluidsbron en werkt als een virtuele tweede bron,

Golfbak is natuurlijk het dichtst bij Young's originele experiment, vergt meer voorbereiding

Het filmpje van 3B1B is heel goed. Het omvat het hele hoofdstuk.

internet gifje interferentie, golfbak

chladni platen, gitaarsnaar Voortplantingsnelheid van de golf door de snaar plm 800 m/s

polarisatie: ahornsiroop suikerwater

De beschrijving voor het maken van het strookje **Het strookje met twee loodrechte polaroids is het kritische onderdeel van dit experiment.** Snij een strook karton Leg een sticky note met de lijmkant boven op tafel. plak de strook erop. plak daarop de twee filters in loodrechte richting. schuif goed aan. Plakbandje over de onderdand (2 mm). Pak het geheel op en draai het om, sticky note boven. Pel de stick note eraf en verstevig de verbinding met het papier weer met plakband.

Het quantum eraser experiment is te bestellen via de website van het project **Quantum Rules!**³.

applet⁴ De originele app is van Falstad. Er zijn vele apps ook voor telefoon bijvoorbeeld phyphox.

veritasium over double slit⁵

enkelspleet dubbelspleet: geogebra

³www.quantumrules.nl

⁴<https://home.kpn.nl/H.Bruning/applets/golfbak/golfbak.htm>

⁵<https://www.youtube.com/watch?v=Iuv6hY6zsd0>

[afzetlint](#)⁶ (plm €15 rol 500 m (maart2020):

[polarisatiefilm](#)⁷ (plm €25 per vel A4, maart 2020).

check this

- ZOnder coherentie geen interferentie. Coherentie bewaken is de grootste uitdaging van een quantum computer. Een qcomputer gaat zo'n xx nanosec. mee.
- [thoughtco](#)⁸
- [Quantum universe](#)⁹

⁶<https://afzethekken.nl/product/afzetlint/>

⁷<https://webshop.hetbeeldgebouw.nl/polarisatie-filter-folie-formaat-a4>

⁸<https://www.thoughtco.com/youngs-double-slit-experiment-2699034>

⁹<https://www.quantumuniverse.nl/>