

Hoe beïnvloedt een prisma of een diffractierooster het licht in een spectrometer om het lichtspectrum zichtbaar te maken?

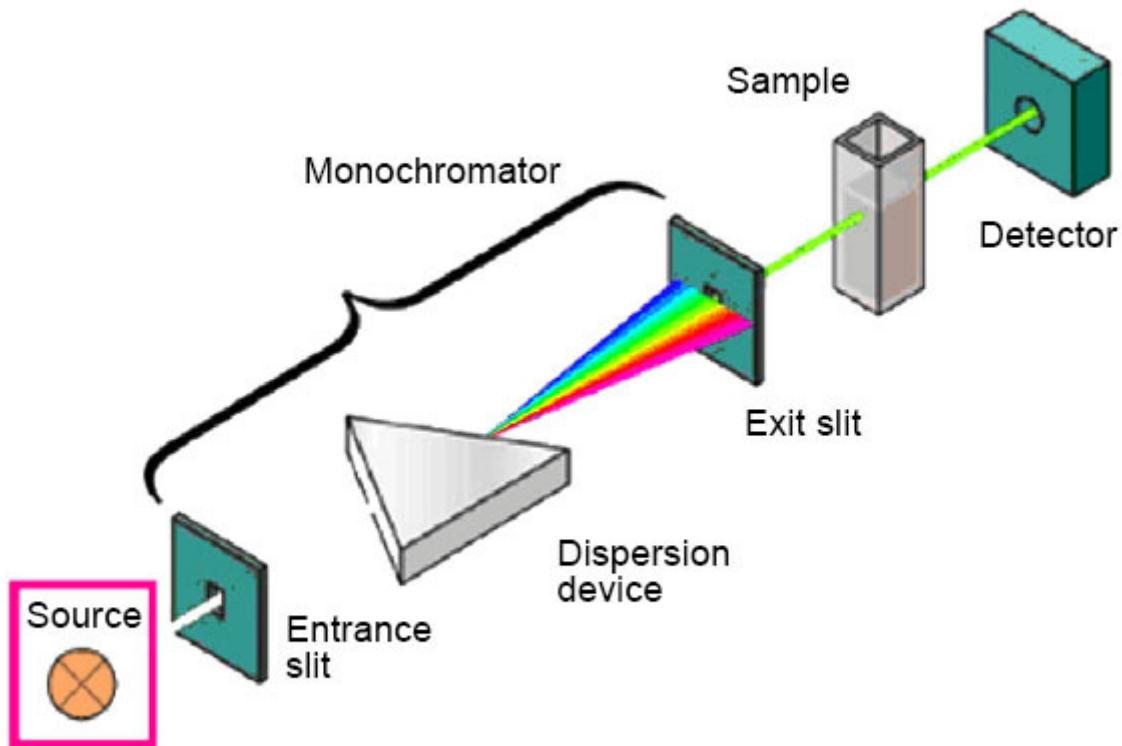
Inhoudsopgave

- Hoe beïnvloedt een prisma of een diffractierooster het licht in een spectrometer om het lichtspectrum zichtbaar te maken?
 - Inhoudsopgave
 - Inleiding
 - Hoofdvraag
 - Deelvragen
 - Analyse
 - Wat is licht?
 - Elektromagnetische golven
 - Foton
 - Refractie
 - Dispersie
 - Licht zien
 - Uitvindingen en experimenten
 - Wat is een prisma/ diffractierooster?
 - Categorieën roosters
 - Soorten prisma's
 - Vormen prisma's
 - Hoe kan een spectrometer licht analyseren?
 - Lichtbreking
 - Grating Equation
 - Wat zijn de voor- en nadelen van een prisma of diffractierooster in een spectrometer?
 - Prisma en diffractierooster voor- en nadelen
 - Soorten diffractie roosters en specifieke voor- en nadelen daarvan
 - Hoe kan licht gesplitst worden?
 - UV-Vis spectroscopie
 - Infraroodspectroscopie
 - Raman-spectroscopie
 - Fluorescentiespectroscopie
 - Conclusie
 - Aanbevelingen
 - Bronvermelding

Inleiding

Het doel van het onderzoek is om meer te leren over hoe prisma's en diffractieroosters in een spectrometer werken. Door dit te onderzoeken wordt geleerd over waar de dispersieve elementen uit bestaan, welke vormen en maten er zijn, uit welke materialen ze gemaakt kunnen werken en op welke manieren ze gemaakt

kunnen worden. Ook is het interessant om meer te leren over hoe licht werkt, hoe het kan breken en waarom het kan breken. Het is nodig om dit te onderzoeken voor het spectrometer project waarbij licht gebogen moet worden en gemeten moet worden zoals in figuur 1 te zien is. Zo is het makkelijker te begrijpen hoe en waarom het werkt en kan de spectrometer met meer begrip gemaakt worden. Het nut van dit project is om kennis en passie te verspreiden voor ruimte onderzoek zodat meer studenten interesse krijgen voor spectrometers en licht.



Figuur 1. Voorbeeld van een spectrometer. (What Is A Spectrometer? - GoPhotonics.com, z.d.)

Hoofdvraag

De hoofdvraag dat bij de onderzoek onderzocht gaat worden is: Hoe beïnvloedt een prisma of een diffractierooster het licht in een spectrometer om het lichtspectrum zichtbaar te maken? Met deze hoofdvraag wordt het doel van het onderzoek behaald omdat het onderzoeken van deze onderwerpen ervoor zorgt dat hier veel van geleerd wordt. Deze hoofdvraag gaat helpen om te leren over prisma's, diffractieroosters en spectrometers. Voor de hoofdvraag wordt van prisma's en diffractieroosters onderzocht waar ze uit kunnen bestaan en welke vormen en toepassingen deze kunnen hebben. Door hierna te onderzoeken naar voor en nadelen van de dispersieve elementen wordt het doel van de hoofdvraag bereikt.

Deelvragen

Voordat licht gemeten kan worden om te bepalen welke stoffen het licht doorheen is geweest, moet eerst het licht gesplitst worden zodat de aparte kleuren worden gemeten door de sensor. Dan kan deze data digitaal gevisualiseerd worden in een kleuren diagram of een regenboog. Er zijn verschillende objecten die licht kunnen splitsen, de voornaamste opties zijn een prisma, diffractierooster of filter (Whyte, 2025, par. 5). Deze licht splitsende objecten worden ook wel dispersieve elementen genoemd. In dit onderzoek zal niet gekeken

worden naar een filter, omdat voor het onderzoek is bepaald dat alleen een prisma of diffractierooster interessant is. Om te onderzoeken hoe deze dispersieve elementen werken, moeten eerst een aantal deelvragen beantwoord worden om het antwoord beter te begrijpen. Voor het beantwoorden van de hoofdvraag worden de volgende deelvragen onderzocht:

- Wat is licht en het gedrag ervan?
- Wat is een prisma/ diffractierooster en hoe werken ze?
- Hoe gebruikt een spectrometer een prisma/ diffractierooster om licht te analyseren?
- Wat zijn de voor- en nadelen van een prisma/ diffractierooster in een spectrometer?
- Op welke manieren kan licht gesplitst worden?

Analyse

Voor het analyse onderdeel van het onderzoek wordt onderzocht naar antwoorden op elke deelvraag en worden ze onder de kopjes opgeschreven.

Wat is licht?

Elektromagnetische golven

Licht is één van de vormen van elektromagnetische golven. Alle elektromagnetische golven hebben:

- oscillerende elektrische en magnetische velden die loodrecht op elkaar staan.
- een golflengte, dit is de afstand tussen opeenvolgende pieken.
- een frequentie, dit is de trillingsfrequentie van de golf. De golflengtes van de elektromagnetische golf bepaalt de kleur van het zichtbaar licht. De golflengtes die buiten zichtbaar licht vallen zijn niet zichtbaar door mensen maar het bestaat wel en kan ook gedetecteerd worden (Las Cumbres Observatory, z.d.-b, par. 2). Hier een tabel dat laat zien welke soorten elektromagnetische golven er zijn en uit welke golflengten ze bestaan.

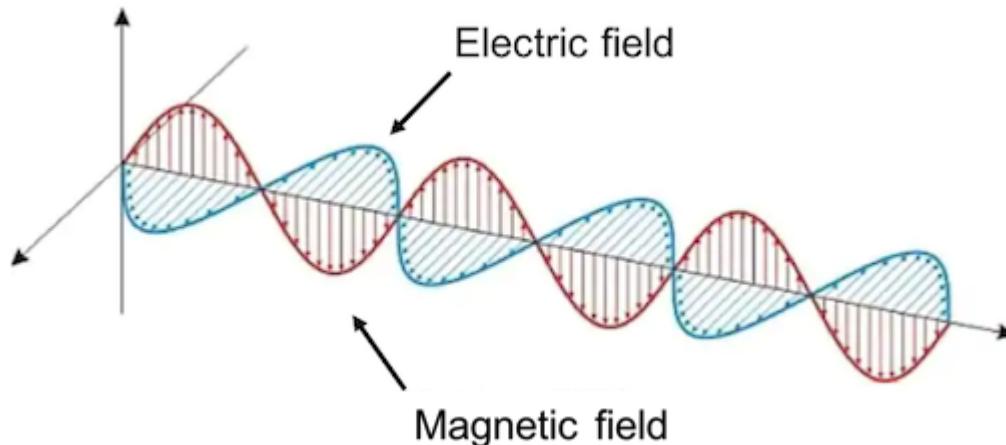
Naam	Golflengte
Radio	10m - 1cm
Microgolven	1cm - 100µm
Infrarood	100µm - 1µm
Zichtbaar Licht	700nm - 400nm
Ultraviolet	400nm - 10nm
Röntgenstraling	10nm - 100pm
Gamma straling	100pm - 1pm

(Electronic Spectroscopy Of Molecules, z.d., par. 1)

Foton

Licht wordt gemaakt als een elektron in een atoom naar een lager niveau valt, dit laat energie los als een foton. Kwantumfyysica zegt dat elektronen vaste niveaus energie hebben, dus als een elektron een niveau

omlaag valt dan komt een voorspelbare hoeveelheid energie vrij. Hoe verder de elektron valt, hoe meer energie de foton heeft (Clegg, 2024, par. 10). Waar een foton uit bestaat is in figuur 2 te zien.



Figuur 2. Foto van hoe een elektromagnetische golf eruit ziet, waar een foton uit bestaat. (Photons - EWT, 2020)

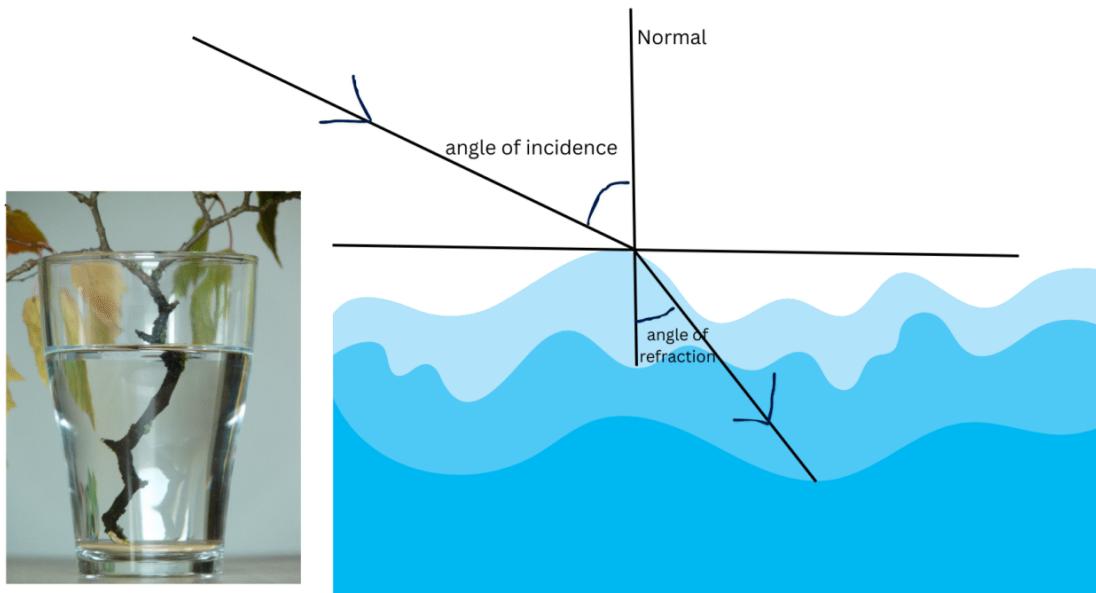
Als licht tegen een object aan komt dan absorbeert dat object het licht, maar straalt direct een deel ervan weer uit, dit is reflectie. Reflectie en absorptie gebeuren tegelijk bij aanraking van licht met het oppervlak. Als een golflengte wordt gereflecteerd dan kan het niet zo zijn dat het ook geabsorbeerd wordt en precies hetzelfde andersom. De energie van een foton in het gereflecteerde licht bepaalt de kleur van het object. Een object dat een bepaalde kleur heeft reflecteert dan fotonen met de bijbehorende hoeveelheid energie. De structuur van de atomen waar het object uit bestaat bepaalt hoe ver elektronen kunnen vallen en dus ook de kleuren die er dan ontstaan. Kleuren kunnen ook gesplitst worden door refractie, hierbij gaan fotonen met verschillende hoeveelheden energie andere kanten op. Door dit concept kunnen prisma's werken en regenbogen ontstaan (Clegg, 2024, par. 12).

Refractie

Om het concept van refractie beter te kunnen begrijpen wordt het hier nog iets dieper uitgelegd. Breking van licht is het veranderen van de richting van een lichtstraal wanneer deze overgaat van één transparant medium met een bepaalde dichtheid naar een ander met een andere dichtheid. Het licht buigt door de variatie van de snelheid van licht als het een ander medium binnengaat. Wanneer het licht buigt, vormt het een hoek met de normaal, dit is de hoek waaronder het licht vanuit het eerste medium binnenvalt. (Kadariya, 2025, par. 1).

Figuur 3 illustreert hoe de hoek van het licht in het lucht medium breekt in het water medium. Het illustreert dus de refractie dat dan plaatsvindt. De invalshoek is veel groter dan de brekingshoek, omdat de brekingshoek dichter bij de normaal is.

Refraction of Light



Figuur 3. Voorbeeld van refractie met water. (Kadariya, 2025)

De Wet van Snell is de wiskundige beschrijving van de relatie tussen de hoeken die worden gevormd wanneer licht buigt bij het bewegen van het ene medium naar het andere. Deze wet wordt gegeven als: $n_1 \times \sin(\theta_1) = n_2 \times \sin(\theta_2)$. Waarbij: n_1 en n_2 de brekingsindices zijn van het eerste en tweede medium. θ_1 is de invalshoek ten opzichte van de normaal in het eerste medium en θ_2 is de brekingshoek, oftewel de hoek dat het licht in het tweede medium heeft. De brekingsindex van een medium is de meting van de snelheid van licht in een bepaald medium vergeleken met de snelheid in een vacuüm. Het wordt gegeven door de formule: $n = c / v$. c is de lichtsnelheid in een vacuüm en v de lichtsnelheid in het medium. (Kadariya, 2025, par. 4)

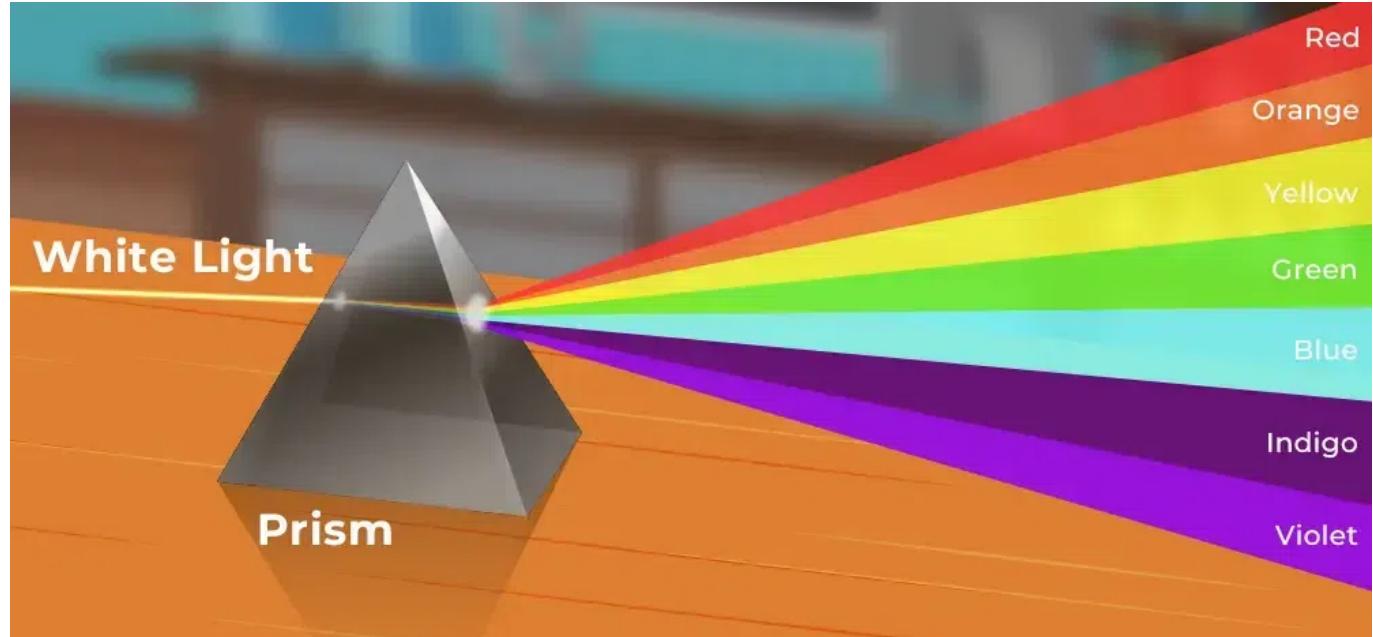
c is een constante en als v kleiner wordt dan wordt het resultaat van c delen door v groter waardoor de brekingsindex groter wordt. Uit de tweede formule kan dus gezegd worden dat de brekingsindex n en de snelheid van licht v in een medium omgekeerd evenredig zijn. Als de brekingsindex hoog is, beweegt licht langzamer en wordt het sterker afgebogen. Als dan met deze informatie gekeken wordt naar de eerste vergelijking, dan is het logisch dat n_2 , oftewel de brekingsindex van water groter wordt. Om dan nog aan beide kanten van de vergelijking gelijke waarden te hebben, moet de $\sin(\theta_2)$ kleiner worden, dit betekent dat de brekingshoek θ_2 kleiner wordt. Een hogere brekingsindex betekent dat licht trager beweegt in dat medium. Daardoor wordt de richting van de lichtstraal dichter bij de normaal getrokken. (Kadariya, 2025, par. 6)

De kleur van licht is de golflengte en deze heeft een vaste frequentie waar het omgekeerd evenredig mee is. Dus de kleur correspondeert met een frequentie $f = c / \lambda$. In het elektrische veld van de lichtgolf gaan elektronen in het medium oscilleren. Deze elektronen hebben een natuurlijke oscillatiefrequentie die niet overeenkomt met de frequentie van het licht. Dit betekent dat het een aangedreven harmonische oscillator is en in deze oscillator zijn de fasen van de elektronoscillaties anders dan de fase van de lichtgolf. Dit faseverschil is verantwoordelijk voor de brekingsindex (Rennie, 2013, par. 4).

Dispersie

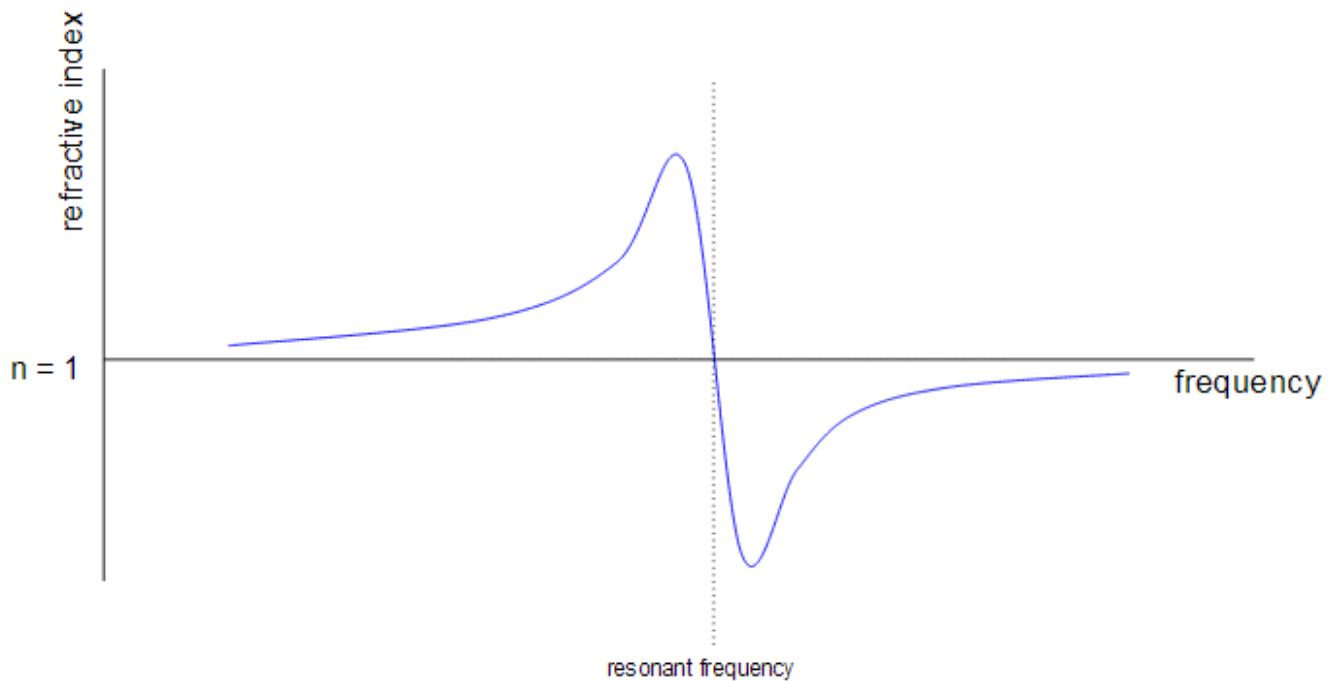
Nu wordt gekeken naar de reden waarom de golflengtes van richting veranderen. De golfvergelijking formule gaat als volgt: $v = f \times \lambda$. v staat voor snelheid van de golf, λ voor de golflengte en f voor de frequentie (Physics Tutorial: The Wave Equation, z.d., par. 4). Wanneer de golflengte groter wordt dan verandert de snelheid van

het licht in het medium. Volgens de formule $n = c / v$ betekent dit dat de brekingsindex n kleiner wordt. Uit de wet van Snell volgt vervolgens dat n_2 kleiner wordt terwijl n_1 en de invalshoek gelijk blijven. De brekingshoek θ_2 moet groter worden zodat de vergelijking in balans blijft. Licht met een grotere golflengte heeft een grotere brekingshoek dan licht met een kleinere golflengte. Doordat elke golflengte een andere brekingshoek heeft splitst wit licht uit tot zijn kleuren bij breking, dit wordt dispersie genoemd en wordt geïllustreerd in figuur 4.



Figuur 4. Voorbeeld van dispersie met een prisma. (GeeksforGeeks, 2025)

De oscillerende elektronen zenden licht dat uit fase is met het oorspronkelijke licht en daardoor interfereert het met elkaar. Hierdoor vertraagt het licht en wordt de brekingsindex groter dan één. Maar bij resonantiefrequenties kan de brekingsindex de andere kant op veranderen en minder dan één zijn (Rennie, 2013, par. 4), waardoor het lijkt alsof licht in dat medium sneller gaat. De brekingsindex van een materiaal hangt af van de kleur van het licht, omdat de elektronen in het materiaal verschillend reageren afhankelijk van hoe dicht de lichtfrequentie bij hun natuurlijke trillingsfrequentie ligt. Hoe dichter de lichtfrequentie van de natuurlijke frequentie van het materiaal ligt, hoe sterker de brekingsindex verandert. Typisch is te verwachten dat de brekingsindex dichtbij een resonantie van elektronen er zo uitziet als in figuur 5 te zien is (Rennie, 2013, par. 4).



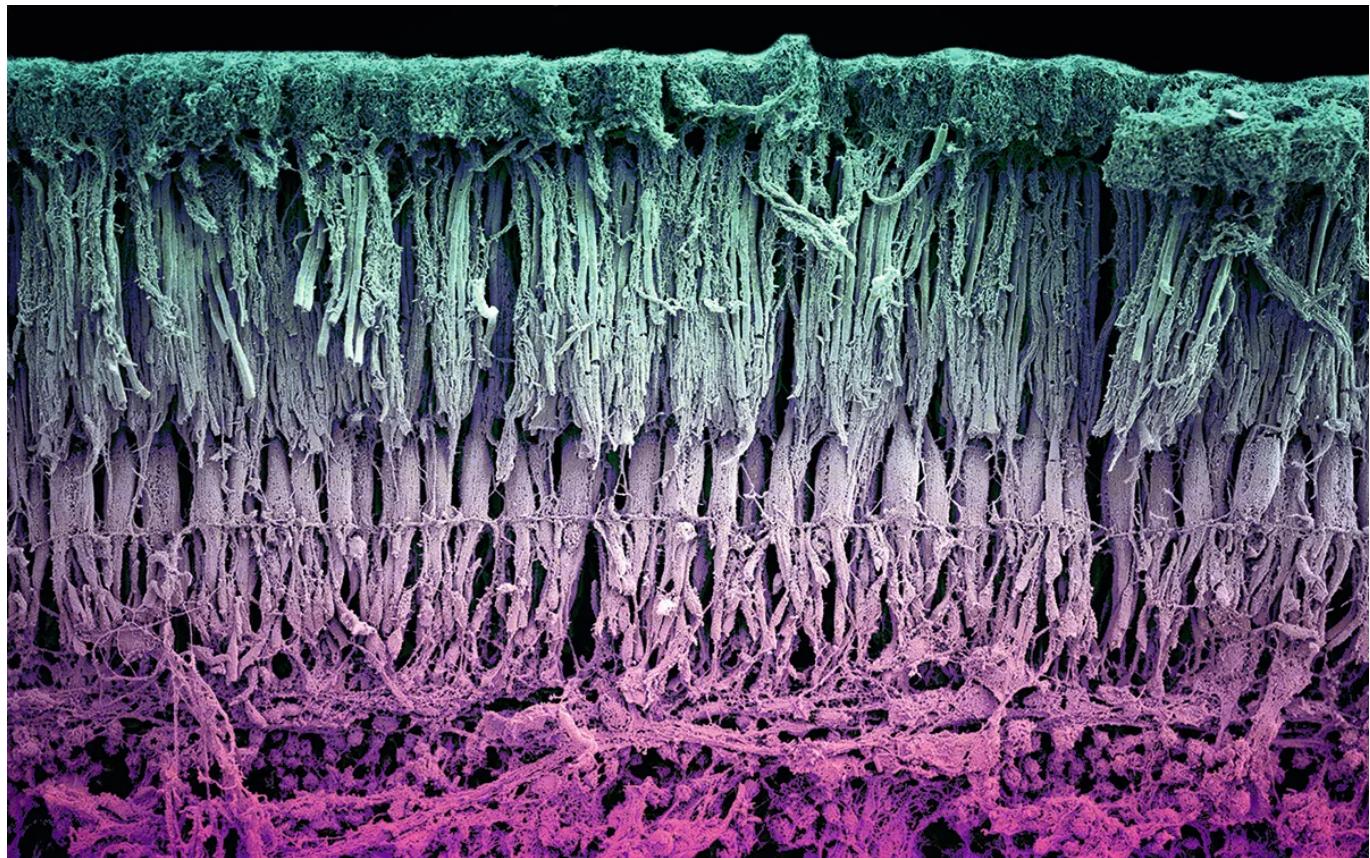
Figuur 5. Hoe de brekingsindex nabij een resonantie van elektronen eruit ziet. (Rennie, 2013)

Licht zien

Mensen kunnen niet al het licht zien, want het zichtbaar licht is een klein deel van het elektromagnetisch spectrum. Er is geen manier van het detecteren van licht dat uit zichzelf het hele spectrum kan meten. Het is mogelijk om bepaalde golflengtes op te pakken met een instrument dat voor kleinere of grotere golflengtes is bedoeld door gekleurde lensen voor de sensor te gebruiken. Er zijn sommige dieren die ook fotonen kunnen zien met energieën die buiten het zichtbaar licht vallen, deze kunnen bijvoorbeeld ook een beetje infrarood of ultraviolet zien. Het zien van dit soort licht kan handig zijn voor bestuivende insecten omdat veel bloemen ultraviolet reflecteren. Ook zijn er roofdieren die prooidieren van ver weg kunnen zien door ultraviolet te kunnen zien (Clegg, 2024, par. 14). Er zijn ratelslangen en boa's die gespecialiseerde organen hebben genaamd kuiltjesorganen die infrarode straling kunnen detecteren. Deze organen zijn eigenlijk warmtesensoren, waardoor deze slangen de warmte van hun warmbloedige prooien kunnen zien, zelfs in volledige duisternis (Team, 2025, par. 7).

De kleuren die mensen kunnen zien komt door licht sensitieve cellen die kegels heten. Mensen hebben drie typen kegels namelijk:

- Roodgevoelig
- blauwgevoelig
- groengevoelig



Figuur 6. Een scan van het netvlies, dit is lichtgevoelig weefsel dat staaf- en kegelcellen bevat die licht en kleur detecteren. (Clegg, 2024)

Sommige roofdieren hebben een vierde kegel type voor ultraviolet of infrarood zicht. Veel zoogdieren hebben maar twee kegels, omdat hun ogen veel meer staafjes in plaats van kegels hebben voor nachtzicht. Dit komt omdat zoogdieren oorspronkelijk nachtdieren waren. Het lijkt dat primaatsoorten zoals mensen een extra kegel ongeveer 35 miljoen jaar geleden erbij kreeg waardoor ze goed rode en groene kleuren konden onderscheiden. Het beter onderscheiden van kleuren was heel handig om fruit te vinden. Dus het evolueren van een derde kegel hielp veel om te overleven (Clegg, 2024, par. 16). Figuur 6 illustreert hoe het netvlies weefsel eruit ziet.

Uitvindingen en experimenten

Isaac Newton en Galileo hebben allebei licht gestudeerd en hebben andere ontdekkingen gedaan. Newton heeft een prisma gebruikt om zichtbaar licht in zijn kleuren te splitsen, terwijl het Galileo niet lukte om de snelheid van licht te meten. Galileo had wel ontdekt dat licht rechte lijnen volgt (Greivenkamp, 2019, 1-3), Dat het via lenzen geconcentreerd en gecontroleerd kon worden met de telescoop van Galileo zoals te zien in figuur 7 (VAVILOV, 1965, pp. 596-615) en het kan details van objecten onthullen (Cermak, 2024, par. 4).



Galileo Galilei

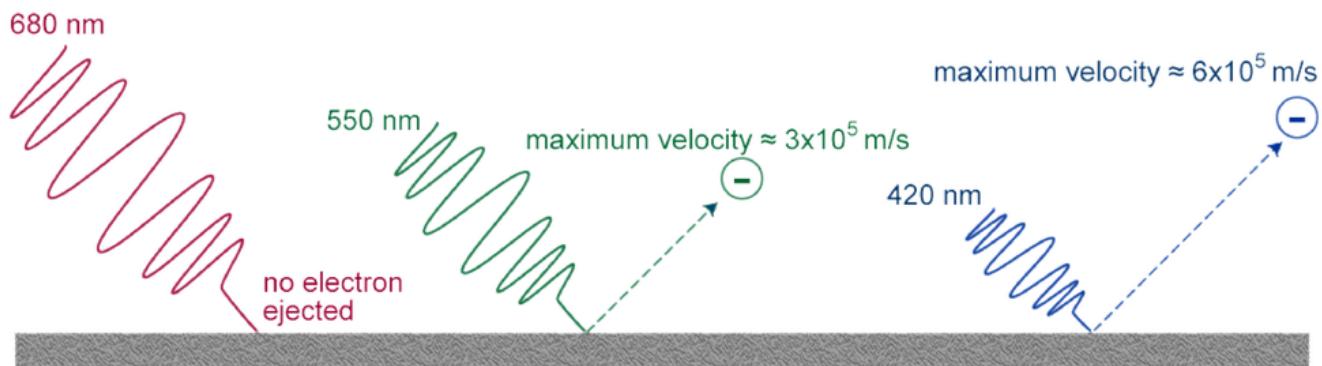


Figuur 7. De telescoop die Galileo zelf heeft gemaakt in 1609. (Wink, 2025)

Door uitvindingen van mensen als Thomas Young en Albert Einstein zijn er twee manieren dat het gedrag van licht uitgelegd kan worden. Meestal werkt licht als een golf met eigenschappen als golflengte en frequentie en kan er diffraactie en interferentie bij licht voorkomen, hier was Thomas Young achter gekomen met het double slit experiment. Maar soms kan het gedrag van licht ook gezien worden als een deeltje dat een foton genoemd wordt, hier was Albert Einstein achter gekomen met het laten zien van het foto-elektrisch effect zoals te zien in figuur 8 (Las Cumbres Observatory, z.d.-a, par. 2).

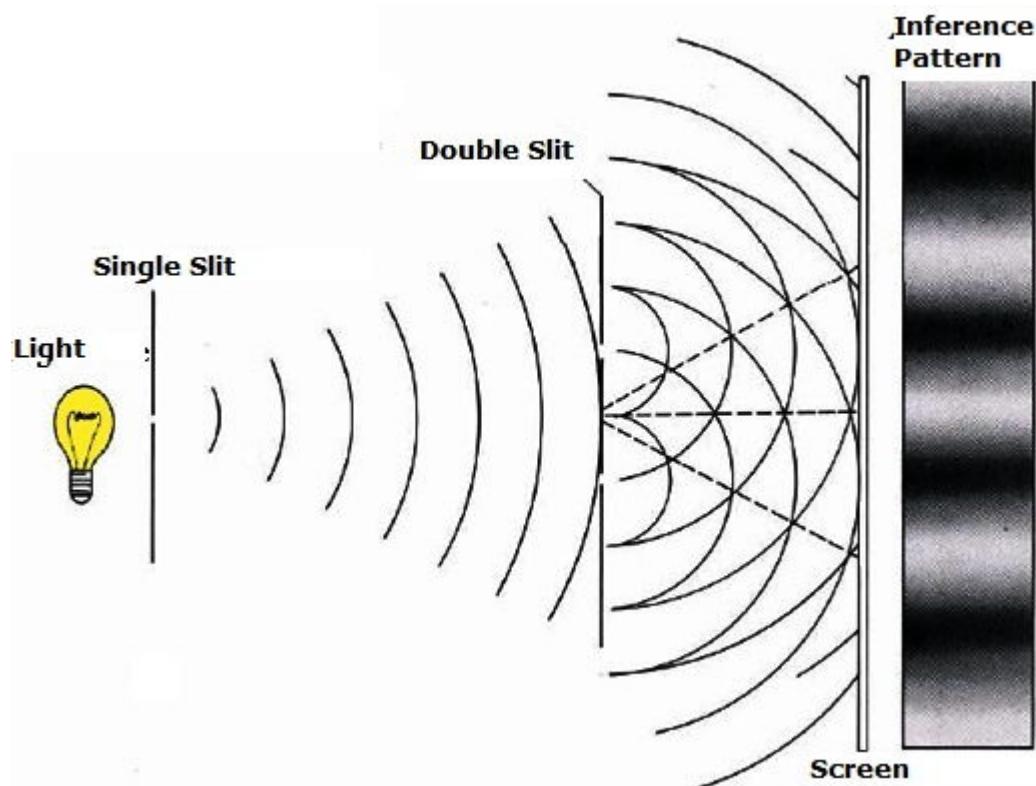
The Photoelectric Effect

Potassium ejects electrons when struck by photons with at least 2.3 eV of energy. This corresponds to a wavelength of about 540 nm, which is visible green light.



Figuur 8. Het foto-elektrisch effect ontdekt door Albert Einstein. (Albert Einstein Photoelectric Effect, z.d.)

Thomas Young had licht door twee dunne parallelle spleten gestuurd en bedacht dat als licht deeltjes zijn zoals Newton zei, dat er dan twee lichte plekken op het scherm zou zijn na de spleten. Uiteindelijk waren er felle en donkere plekken, dit bewees dat de spleten ervoor zorgden dat licht golven met elkaar interfereerden. Als de interferentie constructief is dan komt daar een fel stuk op het scherm. Aan de andere kant als de interferentie destructief is dan cancelen de lichtgolven elkaar en komt daar een donkere plek op het scherm zoals te zien in figuur 9 (Las Cumbres Observatory, z.d.-b, par. 1).



Figuur 9. Het Double Slit Experiment van Thomas Young. (Young's Double Slit Experiment Introduction Worksheet For 6th Form AS Physics | Teaching Resources, z.d.)

Licht gedraagt zich normaal als een golf, maar kan ook worden beschouwd als kleine pakketjes energie die fotonen heten. Een foton heeft geen gewicht maar heeft een kleine vaste hoeveelheid energie afhankelijk van de golflengte. De energie van een foton ligt aan de golflengte, bij een langere golflengte hebben ze minder energie en bij kortere golflengtes hebben fotonen meer energie (Las Cumbres Observatory, z.d.-c, par. 1).

Max Planck en anderen waren het foto-elektrisch effect aan het studeren en ontdekten dat bepaalde typen metaal en andere materialen elektronen uitstoten als er licht op schijnt. Hij en anderen ontdekten daarna dat de golflengte van het licht invloed had op hoeveel elektronen uitgestoten zouden worden. Als rood licht op kalium komt dan wordt geen elektron uitgestoten, maar als groen of blauw licht dat een hogere frequentie heeft op het kalium komt dan worden wel elektronen uitgestoten. Dit is het foto-elektrisch effect en dit bewijst dat licht zich soms ook als pakketjes energie, oftewel fotonen gedraagt (Las Cumbres Observatory, z.d.-c, par. 2).

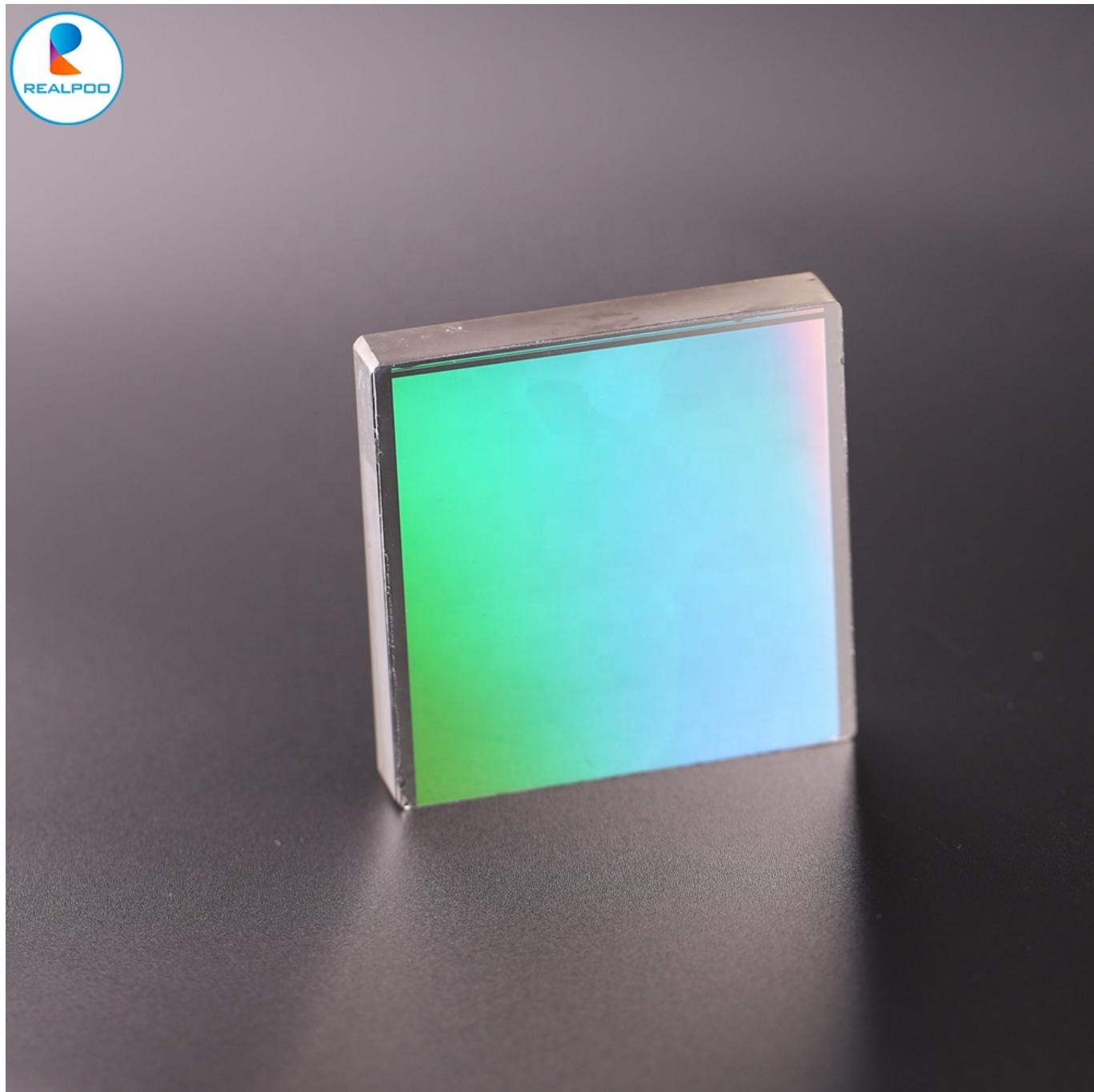
Golflengtes die meer energie hebben zoals blauw en ultraviolet veroorzaakte meer uitgestoten elektronen dan rood of infrarode golflengtes. Ook hebben ze gevonden dat het vergroten van de intensiteit van licht ervoor zorgt dat meer elektronen uitgestoten worden, maar niet de snelheid ervan. Planck realiseerde dat de energie van de elektromagnetische straling evenredig was met de frequentie ervan, maar hij wist niet waarom dit zo was. Einstein was de eerste die had kunnen uitleggen waarom dit zo is. Hij theorieerde dat elektromagnetisch energie in pakketjes of fotonen voorkomt. Dus licht kan zich gedragen als een golf en als een deeltje, dit hangt af van de situatie en het effect dat geobserveerd wordt. Nu is het bekend als golf-deeltje dualiteit omdat licht zich als beide kan gedragen (Las Cumbres Observatory, z.d.-c, par. 3).

Wat is een prisma/ diffractierooster?

Om te begrijpen hoe een prisma en een diffractierooster licht beïnvloeden, is het belangrijk om te weten waar deze dispersieve elementen uit bestaan en welke vorm ze hebben. Een diffractierooster is een dun object gemaakt van glas of metaal waarop regelmatig geplaatste parallelle spleten, richels of lijnen zitten. De richels en lijnen vormen groeven op het oppervlak van het diffractierooster. Bij diffractieroosters die alleen gebruikt worden voor infrarood licht, is de ruimte tussen de groeven op het oppervlak van het diffractierooster groter. Aan de andere kant, diffractieroosters die gebruikt worden voor ultraviolet en zichtbare kleuren hebben veel minder ruimte tussen de groeven. Imperfecties op het oppervlak van diffractierooster beperkt de kwaliteit. De resolutie wordt beter als er meer groeven zijn. Als de afstand tussen de groeven vermindert wordt, dan zal het licht meer verspreid worden en de resolutie verhogen (Whyte, 2025, par. 10).

Categorieën roosters

Er zijn twee categorieën van diffractieroosters, reflectieroosters en transmissie roosters. Reflectieroosters zijn gemaakt met een spiegel oppervlak met groeven. Transmissie roosters zijn transparant en laat licht door een doorzichtbaar materiaal gaan, dat geëtst is met groeven. Van deze twee categorieën kunnen geribbeld zijn zoals te zien in figuur 10, waarbij ze gemaakt worden met diamandgereedschap, waardoor ze scherpe driehoekige groeven hebben. Of ze kunnen worden gemaakt met een fotosensitief materiaal dat met interferentie patronen van licht gemaakt wordt, dit maakt het rooster glad met een groeven vorm van een sinusoïde en minder stray light oftewel wild licht (Optics, 2025, par. 12).



Figuur 10. Een voorbeeld van een geribbelde reflectierooster. (70mm Plano Ruled Reflective Diffraction Grating For Spectrometer - LaserSE, 2022)

Dan is er een echelle rooster, die meer ruimte tussen de groeven heeft en bij een hogere diffractie order werkt. Er zijn ook platte roosters die recht zijn en concave roosters die gebogen zijn en daardoor ook licht kan focussen. Als laatste zijn er de blazed of verbrande holografische roosters (Optics, 2025, par. 17). De groeven op een verbrand holografisch rooster zijn gemaakt door een speciaal proces dat laser stralen gebruikt zoals bij een holografisch rooster en ook een ion-beam ets techniek gebruikt dat een ontwerp veroorzaakt zoals bij geribbelde roosters (Carvalho, 2024, par. 11).

Soorten prisma's

Een prisma is een stuk glas of een ander transparant materiaal dat is gesneden met precisie met de juiste hoeken en platte kanten om een driehoekig prisma te vormen. Meestal wordt de vorm van een driehoekig prisma gebruikt voor het breken van licht in een spectrometer (Encyclopaedia Britannica, 1998, par. 1). Het is

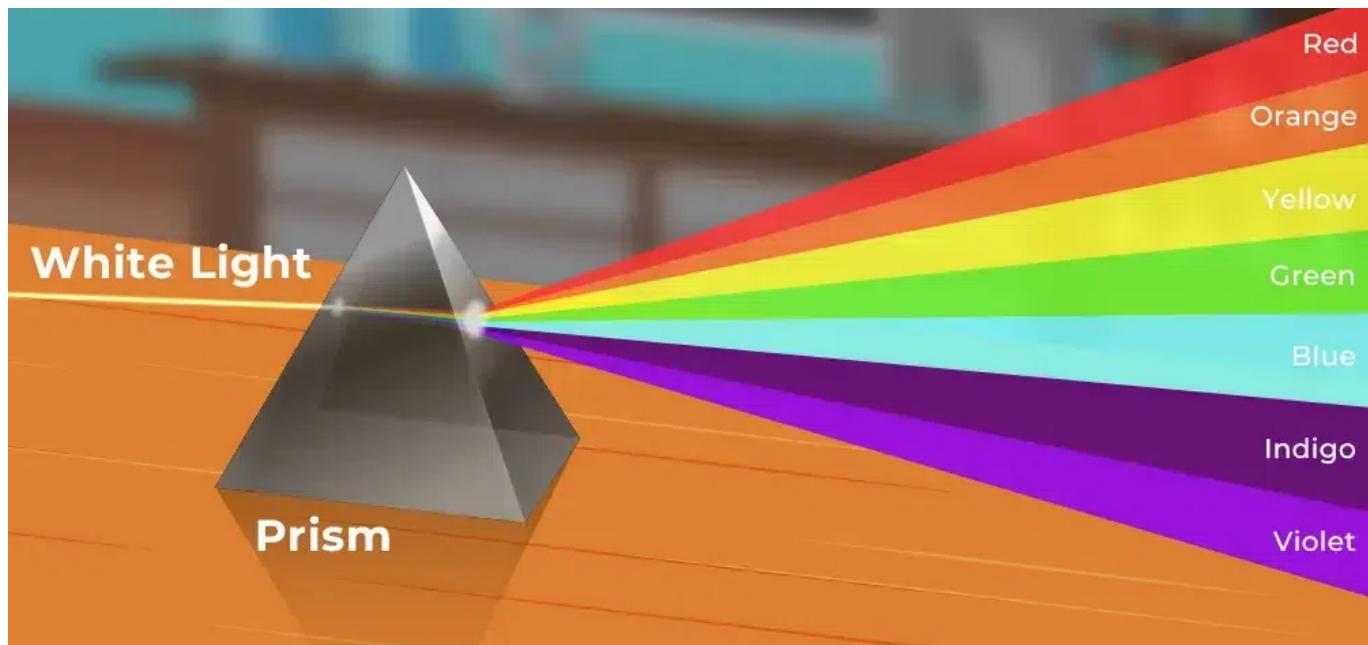
niet nodig dat het prisma driehoekig is, maar het is de simpelste vorm met de minste oppervlakken dat breking veroorzaakt (Wolfe, 2009).

Prisma's zijn dus glazen objecten die worden geslepen en gepolijst tot geometrische en optische vormen. De hoek, positie en het aantal oppervlakken bepalen het type prisma en de functie ervan.

Er zijn vier basis typen van prisma's:

- Dispersie: spreiding van licht
- Reflectie: verandert de richting door reflectie
- Rotatie: draait een afbeelding
- Verplaatsing: verandert de positie van de straal zonder richting te wijzigen

Een dispersie prisma, die zorgt voor spreiding van het licht, wordt beïnvloed door de geometrie van de prisma en door zijn indexdispersiekromme. Deze index is gebaseerd op de golflengte en de index van refractie waar het prisma van gemaakt is (Introduction To Optical Prisms, z.d., par. 1).



Figuur 11. Voorbeeld van licht dispersie door een dispersieprisma. (GeeksforGeeks, 2025)

Een reflectie prisma zorgt ervoor dat het pad van het licht gaat afwijken, het plaatje omdraaien of het verplaatsen van het plaatje naar een andere locatie. Deze prisma's worden vooral bij hoeken van 45, 60, 90, en 180 graden gebruikt. Rotatie prisma's worden gebruikt om een plaatje om te draaien nadat het is omgekeerd. Verplaatsing prisma's veranderen niet de richting waarin het licht reist, maar wel hoe de straal ligt ten opzichte van de oppervlakken van het prisma. Dus dit soort prisma beïnvloed het licht door het te verplaatsen naar een andere plek, maar verder niet te beïnvloeden (Introduction To Optical Prisms, z.d., par. 18).

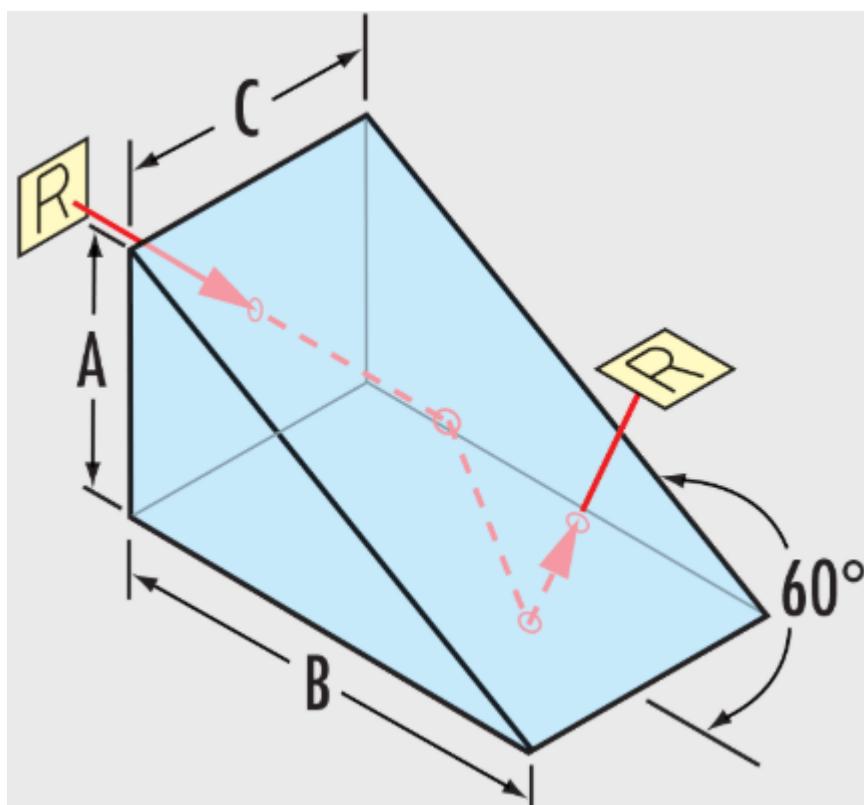
Vormen prisma's

Er zijn heel veel vormen van prisma's en toepassingen. Deze worden eerst kort beschreven namelijk:

- Gelijkzijdig: wit licht breken in zijn componentkleuren
- Littrow: licht met 60° van richting veranderen
- Rechte hoek/ penta/ Amici roof: licht met 90° van richting veranderen
- Half penta/ Schmidt: 45° afwijking

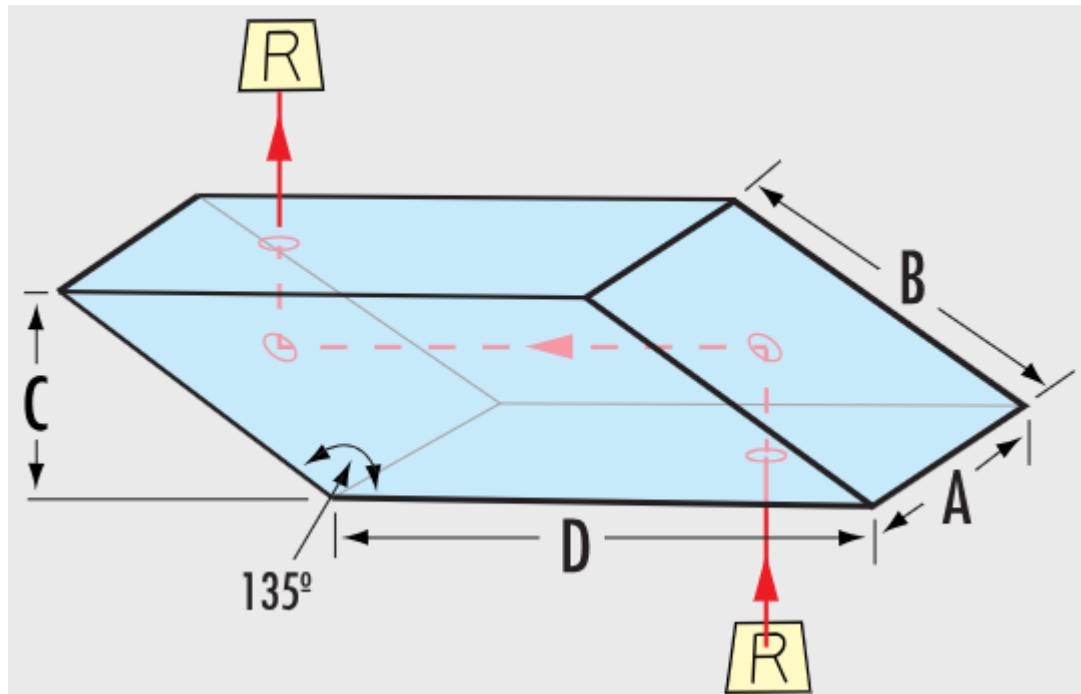
- Retroreflectors/trihedral: 180° afwijking
- Wedge: buigt laserstraal
- Rhomboïde: verplaatst optische as
- Dove: draait afbeelding 2x om
- Anamorfe prisma paren: vergroting van straal in één dimensie
- Light pipe / Tapered rods: homogeniseren lichtbron

Naast de benoemde soorten prisma's worden al deze vormen even benoemd. Elke van de volgende vormen prisma's hebben andere specifieke functies en applicaties waar ze in gebruikt kunnen worden, ook als ze licht met dezelfde hoeveelheid graden beïnvloeden. Gelijkzijdig dat wit licht breekt in zijn componentkleuren. Littrow dat licht met 60 graden van richting verandert zoals te zien in figuur 12. Rechte, Penta en Amici roof hoek dat licht met 90 graden van richting verandert. Half penta en Schmidt dat licht met 45 graden van richting verandert. Retroreflectors of trihedral prisma dat licht met 180 graden van richting verandert (Introduction To Optical Prisms, z.d., par. 21).



Figuur 12. Voorbeeld van licht dat door een Littrow prisma van hoek veranderd wordt. (Introduction To Optical Prisms, z.d.)

Wedge prisma dat individueel gebruikt wordt om een laserstraal een bepaalde hoek af te buigen. Rhomboïde dat de optische as verplaatst zonder de richting te veranderen zoals te zien in figuur 13. Dove prisma dat de afbeelding twee keer omdraait waardoor hij aan de andere kant op zijn kop er uit komt. Anamorfe prisma paren vergroot de diameter van de straal in één dimensie. Light pipe homogenizing rods dat niet-uniforme lichtbronnen homogeniseert. Het homogeniseren van licht betekent om de deeltjesgrootte meer gelijk te maken. Tapered light pipe homogenizing rods homogeniseert niet-uniforme lichtbronnen terwijl de uitgangs-numerieke aperture (NA) wordt verminderd. De uitgangs-numerieke aperture oftewel NA is de brekingsindex van het medium tussen object en objectief maal de sinus van de halve openingshoek. Dus dit soort prisma vermindert het brekingsindex, waardoor het licht net anders gebroken wordt (Introduction To Optical Prisms, z.d., par. 21).



Figuur 13. Voorbeeld van licht dat door een Rhomboïde prisma van optische as verplaatst wordt zonder de richting te veranderen. (Introduction To Optical Prisms, z.d.)

Hoe kan een spectrometer licht analyseren?

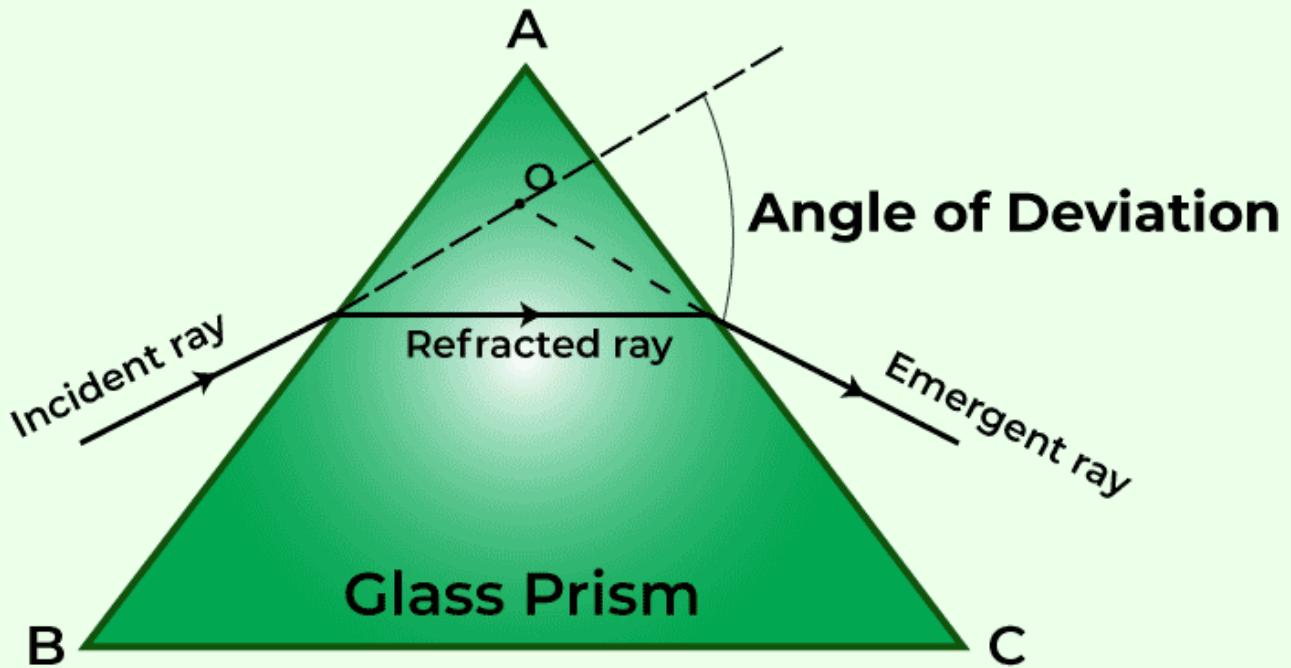
Een spectrometer meet de kleuren dat na een monster overblijven. Het doel is om het gedetecteerd kleuren spectrum te vergelijken met het hele spectra om te zien welke stoffen in het monster zaten. Om de kleuren te meten moeten ze gesplitst worden. Er zijn verschillende manier om kleuren te splitsen, maar voor deze vraag wordt gekeken naar een prisma en een algemene diffractierooster.

Lichtbreking

Prisma's en diffractieroosters breken allebei licht af in zijn golflengtes, maar ze doen dit op een andere manier. Een prisma splitst licht door refractie zoals geïllustreerd in figuur 14. De breking door refractie hangt af van het brekingsindex van het materiaal, de brekingsindex verandert ook bij verschillende golflengtes (Optics, 2025, par. 21).

Als licht van het ene medium naar een ander gaan, verandert de snelheid van voortplanting van licht. Dit zorgt ervoor dat het licht breekt. Als licht door een prisma gaat wordt het gebroken, deze breking van licht zorgt ervoor dat licht in verschillende kleuren splitst. De kleuren hebben allemaal een andere golflengte. De snelheid van breking hangt af aan de golflengte, daarom wordt elke kleur meer of minder gebroken. Dit zorgt er uiteindelijk voor dat het wit licht dat uit het prisma gaat opbreekt tot het spectrum van zichtbaar licht (GeeksforGeeks, 2025, par. 3). Een prisma kan dus wit licht splitsen tot een spectrum. Elke golflengte waar het wit licht uit bestaat wordt minder of meer gebroken waardoor kortere golflengtes richting paars het meest gebroken worden en langere golflengtes richting rood het minst gebroken worden (Encyclopaedia Britannica, 1998, par. 1).

Angle of Deviation



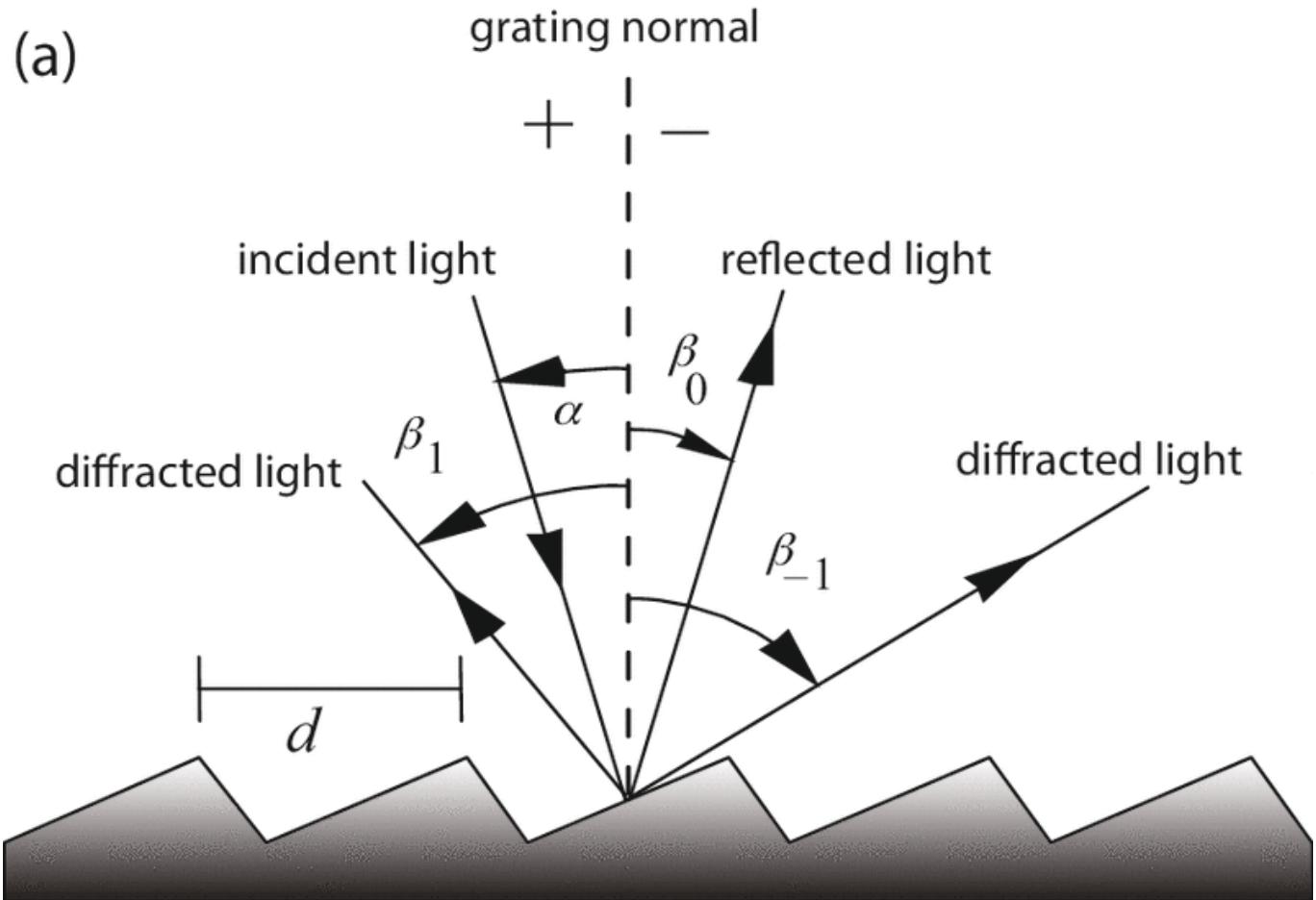
Figuur 14. Licht wordt van hoek veranderd door refractie in een prisma. (GeeksforGeeks, 2025)

Aan de andere kant werkt een diffractierooster met interferentie. Interferentie verwijst naar het resultaat van wat er gebeurt wanneer twee licht golven op een punt samenkommen. Als er twee punten in golven met de golflengte van rood samenkommen na de groeven van een diffractierooster, dan wordt de rode kleur versterkt in die richting. Hetzelfde gebeurd ook bij de andere golflengtes en dus ook de andere kleuren (Optics, 2025, par. 23).

Als licht op een diffractierooster valt dan wordt elke golflengte gediffracteerd in zijn eigen richting. Vanaf elke groef is een bron gediffracteerd licht, dit licht vormt golflakken. Als er genoeg groeven en een specifieke ruimte tussen de groeven zit dan is het gediffracteerd licht vanuit de ene groef in fase met het licht dat door alle andere groeven wordt gediffracteerd. Als dit gebeurd dat vind constructieve interferentie plaats en wordt de kleur versterkt in die richting (The Grating Equation, z.d., par. 1).

Grating Equation

Er is een vergelijking dat 'the grating equation heet' die best complex is maar wel helpt om te begrijpen waarom elke kleur een andere uitvalshoek heeft. Een uitvalshoek is de hoek dat het licht van het diffractierooster vandaan komt. De vergelijking is als volgt: $m\lambda = d(\sin(\alpha) + \sin(\beta))$. m is orde van het spectrum dus 1, 2, 3 enz. λ is de golflengte, oftewel kleur van het licht. d is de afstand tussen de groeven. α is de invalshoek van het licht en β is de uitvalshoek zoals te zien in figuur 15. In deze vergelijking is te zien dat als de golflengte λ veranderd dan moet de uitvalshoek β ook veranderen zodat de vergelijking nog gelijk is. Dus dit betekent dat verschillende kleuren verschillende uitvalshoeken hebben en dus elkaar over verschillende plaatsen versterken. Elke kleur heeft net een andere uitvalshoek waarbij interferentie plaatsvindt, waardoor wit licht in een spectrum uitgespreid wordt (The Grating Equation, z.d., par. 2).



Figuur 15. Voorbeeld van diffractie van licht door een rooster met geometrie. (The Grating Equation, z.d.)

De functie van het dispersieve element in een spectrometer is dus om de lichtstroom in zijn spectrale componenten te splitsen. De plaatsing van dit element is heel belangrijk, hij moet namelijk achter een ingangsspleet geplaatst zijn en de kleuren moeten na het element op een sensor gefocust worden zodat alle kleuren gedetecteerd worden (Maciel Filho, z.d., par. 1). De ingangsspleet beperkt het licht dat bij het dispersief element komt en de lens na het dispersief element focust alle individuele kleuren in de sensor waardoor de sensor de individuele kleuren kan meten.

Wat zijn de voor- en nadelen van een prisma of diffractierooster in een spectrometer?

Om te bepalen welk dispersief element te gebruiken in het groepsproject, wordt eerst onderzocht welke voor- en nadelen deze dispersieve elementen hebben. Zo kan op voorkeur van de groep een dispersief element geselecteerd worden.

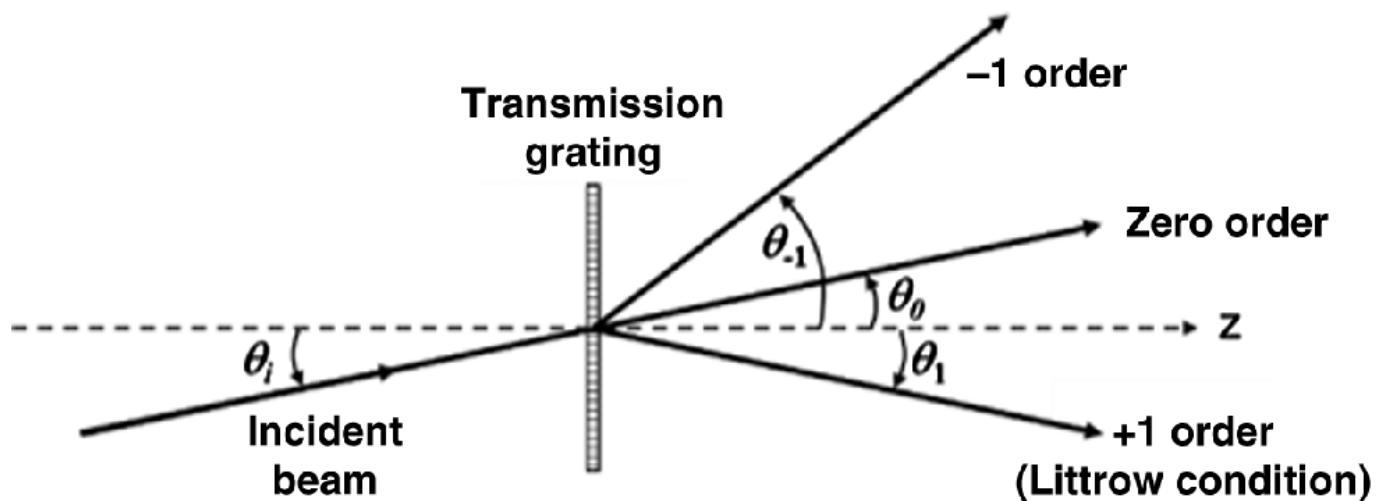
Prisma en diffractierooster voor- en nadelen

Prisma's bieden een goede scheiding van golflengten waardoor rood, groen en blauw goed uit elkaar worden gehaald, maar de verhouding tussen lichtbreking en golflengte kan mogelijk niet constant zijn waardoor de kleuren oneven verspreid worden. Daarnaast zou het kunnen dat het prisma niet met het hele elektromagnetische spectrum kan werken. Dit betekent dat het mogelijk niet geschikt is voor golflengtes buiten het zichtbaar licht. Diffractieroosters bieden een hoge resolutie, dit betekent dat hiermee zo accuraat gemeten kan worden dat het verschil tussen de meting en de werkelijkheid minimaal is. Bij een diffractierooster is het meer waarschijnlijk dat de verhouding tussen lichtbreking en golflengte lineair is dan bij een prisma en dus worden de kleuren door een diffractierooster netter verspreid (Whyte, 2025, par. 5).

Ook heeft een diffractierooster een breed bereik aan golflengtes die hij goed kan breken. In tegenstelling tot een prisma, gebruikt een diffractierooster duizenden kleine groeven om licht met veel precisie te buigen, waardoor het gemeten lichtspectrum scherper en gedetailleerder wordt (Optics, 2025, par. 3).

Soorten diffractie roosters en specifieke voor- en nadelen daarvan

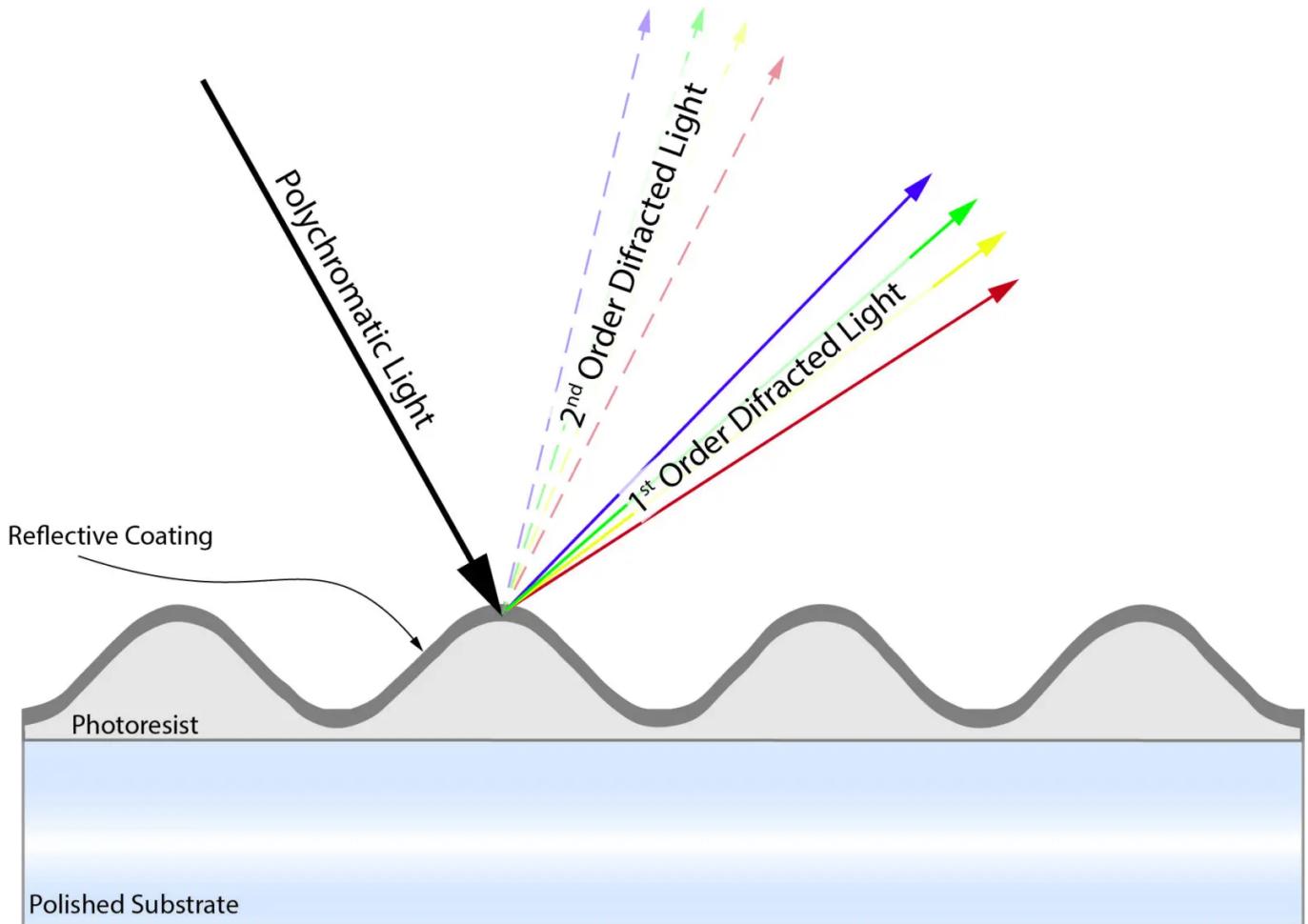
Er zijn veel verschillende soorten roosters, deze roosters worden allemaal op een andere manier gemaakt en/of met andere materialen gemaakt. Er zijn twee verschillende categorieën diffractieroosters die licht anders breken. Dit zijn reflectieroosters en transmissieroosters, reflectieroosters gebruiken een spiegel oppervlak met groeven, terwijl een transmissierooster uit een doorzichtig materiaal bestaat dat geëtst is met groeven. Tijdens dat het licht door het doorzichtig materiaal heen gaat wordt het licht opgebroken zoals geïllustreerd in figuur 16 (Optics, 2025, par. 12).



Figuur 16. Voorbeeld van diffractie van licht door een transmissierooster. (Admin, 2017)

Van deze categorieën zijn er ook geribbelde en holografische roosters. Geribbelde roosters zijn mechanisch gesneden met diamant gereedschap waardoor scherpe, driehoekige groeven ontstaan. Het nadeel van een geribbelde rooster is dat het rooster door het productie proces periodieke fouten, oppervlakkige onregelmatigheden of fouten in de afstanden tussen de ruimtes van de groeven heeft. Deze imperfecties van geribbelde roosters veroorzaken stay light of wild licht en licht dat gedetecteerd wordt dat er niet had moeten zijn (Carvalho, 2024, par. 7).

Holografische roosters worden gemaakt door met interferentiepatronen groeven te maken in een lichtgevoelig materiaal. De groeven van dit soort rooster zijn door deze manier van maken vloeiender en meer sinusvormig vergeleken met de standaard zoals te zien in figuur 17. Hierdoor wordt minder bijlicht veroorzaakt bij een meting (Optics, 2025, par. 16). De periodieke fouten, oppervlakkige onregelmatigheden en fouten in afstanden van de groeven komen veel minder voor in een holografisch rooster. Het nadeel dat holografische roosters heeft tegenover verbrande holografische roosters is dat ze minder efficiënt zijn (Carvalho, 2024, par. 10).



Figuur 17. Voorbeeld van diffractie van licht door een holografisch rooster, dit is te zien door de sinusvormige groeven op het oppervlak van dit soort rooster. (Omega Optical, 2025)

De voordelen van geribbelde en holografische roosters komen allemaal voor in het verbrande holografische rooster, oftewel de blazed holographic grating. De groeven op een verbrand holografisch rooster zijn gemaakt door een speciaal proces dat laser stralen gebruikt zoals bij een holografisch rooster en ook een ion-beam ets techniek gebruikt dat een ontwerp veroorzaakt zoals bij geribbelde roosters. Omdat de ribbels niet mechanisch gemaakt zijn, zijn er geen periodieke structuur fouten in het verbrand holografisch rooster. Dit zorgt voor minder wild- en schijnlicht. De nadelen bij dit soort rooster zijn dus zeer minimaal. Verder is dit rooster heel efficiënt. Door deze eigenschappen is dit soort rooster ideaal voor extreme efficiëntie en resolutie (Carvalho, 2024, par. 11).

Wanneer licht een diffractierooster tegenkomt, wordt het opgesplitst in verschillende kleuren die in net andere richtingen reizen, dit worden diffractie orders genoemd. Als laatste is er ook een echelle rooster, die meer ruimte tussen de groeven heeft en bij een hogere diffractie order werkt. Dit is goed voor instrumenten die een hoge resolutie nodig hebben. Dan zijn er ook verschillende vormen van roosters, namelijk vlak en concave. Vlakke roosters zijn plat en zitten veel in optische systemen, deze roosters houden de baan van het licht recht. Concave roosters zijn gebogen, die kunnen daarom licht breken en focussen (Optics, 2025, par. 17). Om licht af te breken en te focussen kan dus ook een concave rooster gebruikt worden in plaats van een vlak rooster en een lens.

Hier een bullet point samenvatting van de resultaten van deze deelvraag:

Prisma's:

- Voordeel: goede scheiding van rood, groen, blauw
- Nadeel: kleuren kunnen oneven verdeeld zijn
- Nadeel: beperkt bereik buiten zichtbaar licht

Diffractieroosters:

- Voordeel: hoge resolutie → zeer nauwkeurige metingen
- Voordeel: lineaire spreiding van kleuren
- Voordeel: groot bereik aan golflengtes
- Nadelen verschillen per type (geribbeld, holografisch, blazed)

Roostertypen:

- Reflectie: spiegel met groeven
- Transmissie: doorzichtig materiaal met groeven
- Echelle: hogere diffractie order
- Vlak/ concave: lichtrechte baan/ focus licht

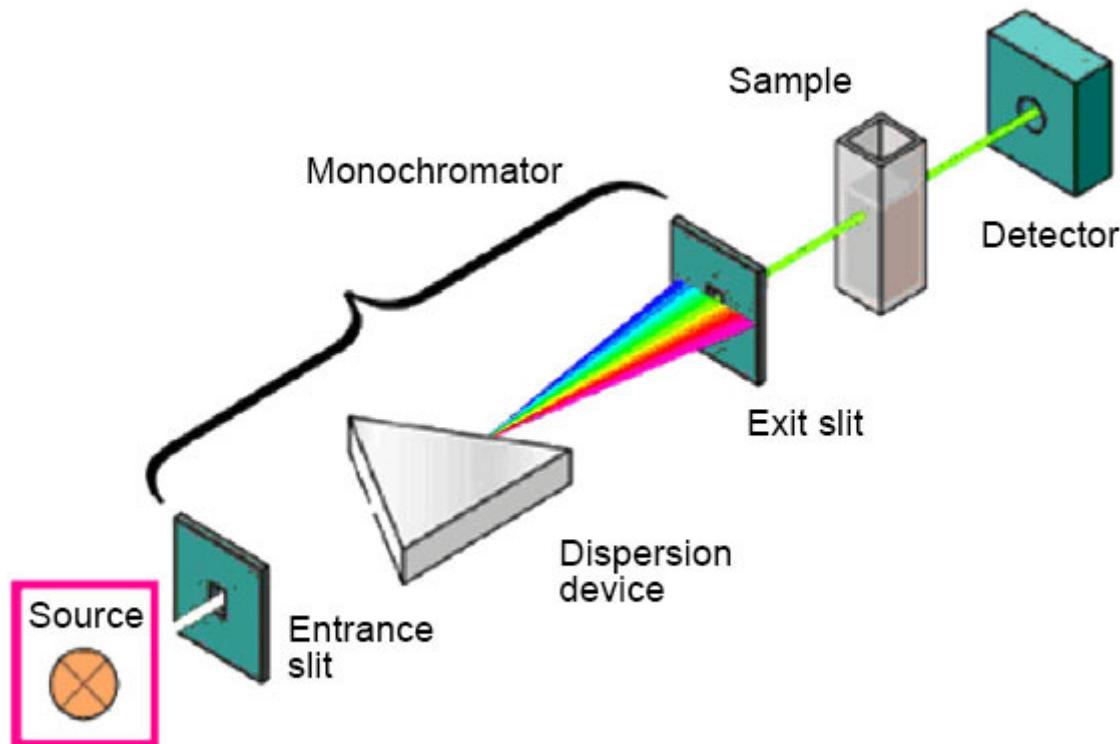
Hoe kan licht gesplitst worden?

Er zijn verschillende optische methodes voor het meten van stoffen aan de hand van lichtinteractie. Deze methodes hebben allemaal andere toepassingen waarin ze gebruikt worden. Met deze methodes wordt gemeten hoe licht van verschillende kleuren wordt beïnvloed door een stof. Hierna worden kort de methodes uitgelegd die vaak voorkomen, dit zijn namelijk:

- UV-Vis spectroscopie
- Infraroodspectroscopie
- Raman-spectroscopie
- Fluorescentiespectroscopie

UV-Vis spectroscopie

UV-Vis spectroscopie is een techniek die veranderingen in UV- en zichtbaar lichtintensiteit meet als het interacteert met materie. Deze methode onderzoekt vooral elektronenovergangen, oftewel waarbij elketronen van de ene 'ring' naar een lagere vallen. In deze opstelling passeert licht door een monster, de intensiteit van het doorgelaten licht wordt gemeten en vergeleken met de referentie-intensiteit zoals in figuur 18 te zien. De verhouding van de intensiteit van het doorgelaten licht en de referentie-intensiteit als functie van de golflengte is het resultaat van zo'n UV-Vis methode (Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV-Vis), z.d.).

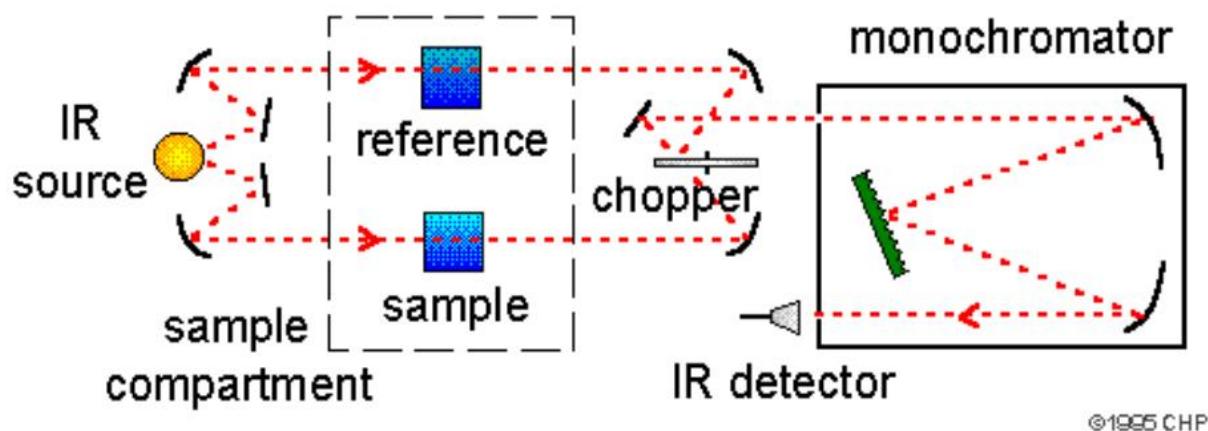


Figuur 18. Voorbeeld van een UV-Vis spectrometer setup. (What Is A Spectrometer? - GoPhotonics.com, z.d.)

Infraroodspectroscopie

Infraroodspectroscopie is een techniek waarbij infraroodstraling interacteert met materie en de absorptie, uitzending of reflectie van dat IR-licht wordt gemeten zoals in figuur 19 te zien is. Dit geeft informatie om achter de moleculaire structuur te komen waar het infraroodstraling mee interactie had. De methode gebruikt licht in het infraroodgebied met golflengten langer dan zichtbaar licht. Moleculen worden bestudeerd door hoe hun bindingen trillen wanneer IR-licht van bepaalde frequenties wordt geabsorbeerd. Het resultaat is een spectrum dat gebruikt kan worden om unieke verbindingen te onderscheiden (Pan, 2025, par. 1).

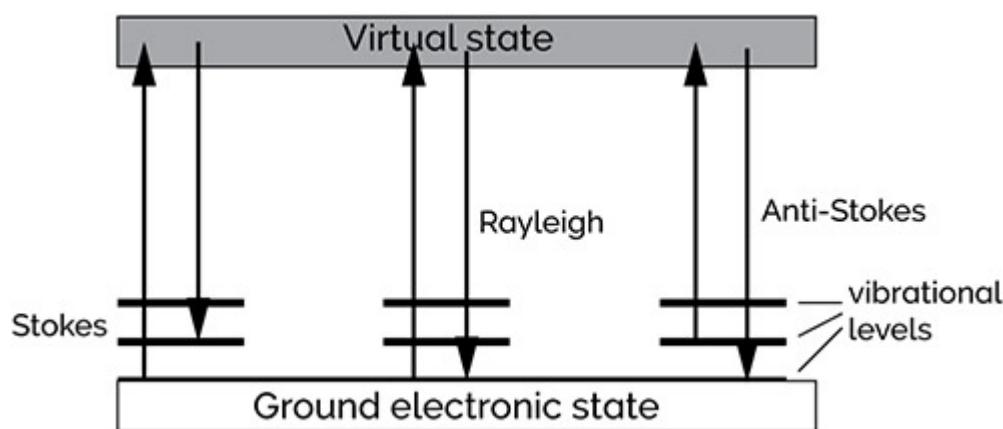
Infrared Spectroscopy Schematic



Figuur 19. Een schema van een IR spectrometer. (Elijah, 2014)

Raman-spectroscopie

Bij Raman-spectroscopie worden fotonen die in vibratieniveaus van een molecuul zijn aangeslagen, verstrooid zodat ze energie winnen of verliezen. Deze inelastische verstrooiing geeft informatie over de vibratiestaten van het molecuul. Een vereenvoudigd energiediagram dat deze concepten illustreert, wordt in figuur 20 weergegeven.



Figuur 20. Energie diagram van Raman-spectroscopie. (Introduction To Raman Spectroscopy Techniques- Oxford Instruments, z.d.)

Als er geen energieverandering optreedt, wordt dit de Rayleigh-transitie genoemd. Dit is de meest intense band in het Raman-spectrum (Introduction To Raman Spectroscopy Techniques- Oxford Instruments, z.d., par. 1).

Fluorescencespectroscopie

Fluorescencespectroscopie meet fluorescentie en dit is een proces waarbij licht snel wordt uitgezonden door een materiaal dat invallende fotonen absorbeert. Omdat fluorescentie bijna onmiddelijk plaats vindt is het ideaal voor het analyseren van optische eigenschappen van materialen. Bij fluorescencespectroscopie wordt een lichtbron met hoge energie, zoals UV-licht of een laser, gebruikt om elektronen in een hogere energietoestand te brengen. Terwijl de aangeslagen elektronen terugkeren naar de grondtoestand, wordt het uitgezonden licht gemeten. In figuur 21 is een schema van een zo'n spectrometer te zien.

Fluorescentie wordt gemeten met een spectrofluorometer. Binnen spectrofluorometers wordt een monster gestimuleerd met een specifieke golflengte en wordt de intensiteit van het uitgezonden licht over verschillende golflengten gemeten. Dit creëert een fluorescencespectrum voor een materiaal, dat emissiepiekwaarden visualiseert. In een spectrofluorometer wordt invallend licht verdeeld met behulp van een monochromator zoals in figuur 21 te zien is. Fluorescencespectroscopie kan worden gebruikt om een breed scala aan monsters te meten zoals: organische materialen, halfgeleiderapparaten, opto-elektronische materialen en biologische monsters (Fluorescence Spectroscopy: Theory, Instrumentation & Uses, z.d., par. 1).

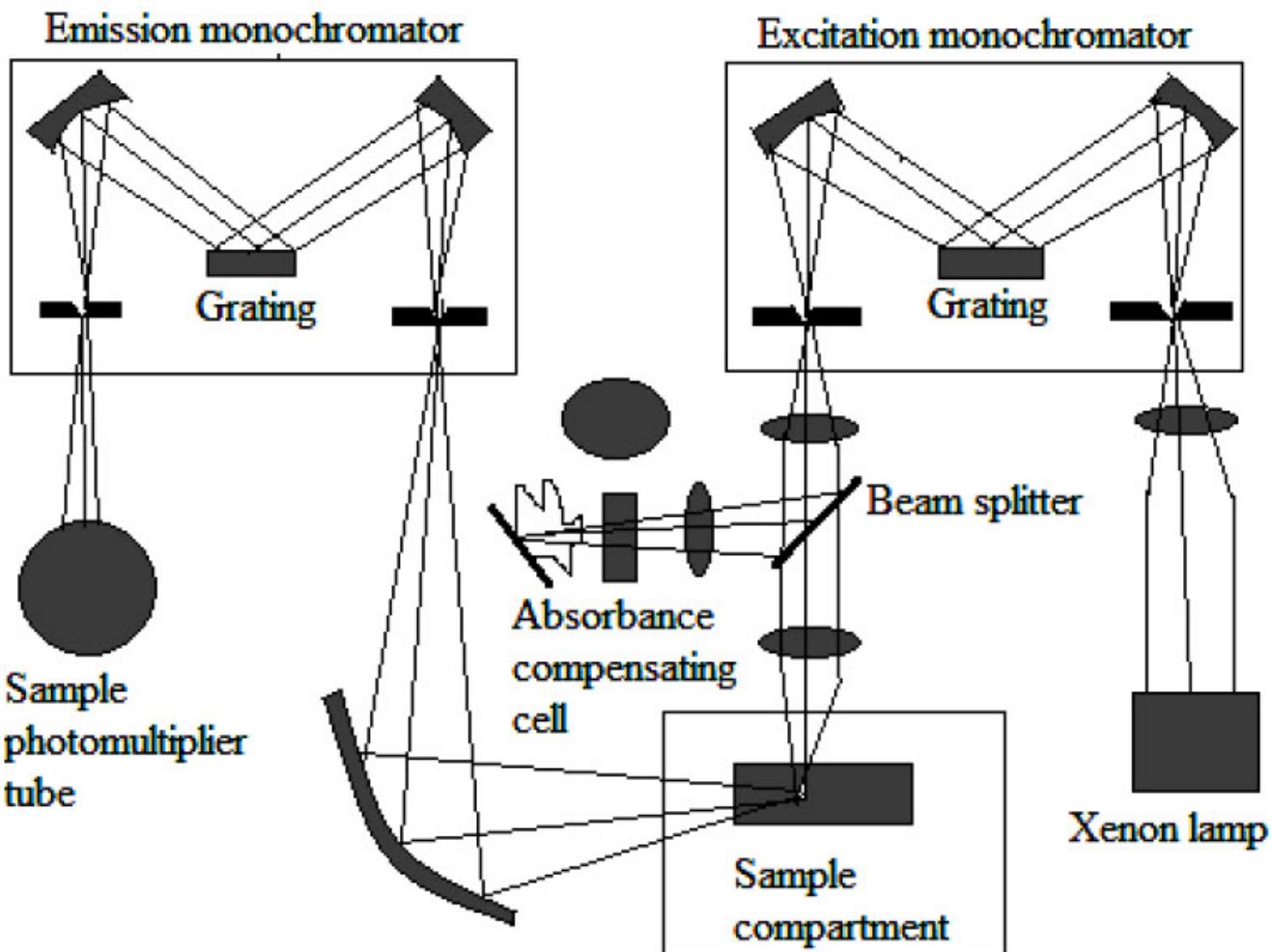


Figure 1.1 Spectrofluorometer

Figuur 21. Een uitgebreid spectrofluorometer schema. (Introduction To Raman Spectroscopy Techniques-Oxford Instruments, z.d.) (Admin, 2016)

Conclusie

De hoofdvraag van het onderzoek is: Hoe beïnvloed een prisma of een diffractierooster het licht in een spectrometer om het lichtspectrum zichtbaar te maken?. Een prisma gebruikt refractie om licht te splitsen. De richting van licht verandert als het van het ene medium naar een andere overgaat. De snelheid van licht is bij elke golflengte anders en als het een ander medium binnengaat buigt elke kleur in een andere hoek af. Uit de golfvergelijking, de brekingsindexformule en de wet van Snell kan geconcludeerd worden dat bij een grotere golflengte de brekingsindex kleiner wordt en wordt de brekingshoek groter. Hierdoor ontstaat dispersie, waarbij wit licht uiteenvalt in verschillende kleuren.

Een diffractierooster breekt licht op een andere manier. Een diffractie rooster werkt op basis van interferentie. Interferentie vind plaats als lichtgolven van dezelfde golflengte samenkommen en elkaar in specifieke richtingen versterken. Volgens de roostervergelijking $m\lambda = d (\sin \alpha + \sin \beta)$ verandert de uitvalshoek β bij elke golflengte, waardoor wit licht uitgespreid wordt tot zijn verschillende golflengtes. In een spectrometer zorgt dit dispersieve element ervoor dat het licht in verschillende kleuren wordt gesplitst en kan het worden geanalyseerd.

Aanbevelingen

Natuurkundige concepten als dispersie en refractie zouden dieper uitgelegd kunnen worden en zou kunnen onderzocht worden naar het bewijs van de formules die gebruikt zijn om de concepten uit te leggen, dit is niet nodig. Wat wel nog onderzocht zou kunnen worden is naar filters maar dat was geen prioriteit bij dit onderzoek. Er zou meer onderzoek gedaan kunnen worden naar hoe verschillende soorten diffractieroosters en prisma's in een spectrometer gebruikt zou kunnen worden, maar dit zou teveel werk zijn en het is moeilijk om te vinden. Het doel van het onderzoek is behaald dus er is niet meer onderzoek nodig om het doel te bereiken.

Bronvermelding

- 1: Whyte, B. (2025, 10 april). What is the difference between a spectrometer and a monochromator for absorbance measurements? BMG LABTECH GmbH. <https://www.bmglabtech.com/en/blog/difference-between-a-spectrometer-and-a-monochromator/#:~:text=Monochromators%20essentially%20come%20in%20one%20of%20three%20main,an%20may%20not%20cover%20a%20wide%20spectral%20range>.
- 2: Optics, I. (2025, 1 september). The Physics of Diffraction Gratings in Spectroscopy: Principles and Applications. ICO Optics. <https://www.ico-optics.org/the-physics-of-diffraction-gratings-in-spectroscopy/#:~:text=Unlike%20a%20simple%20prism%2C%20a%20diffraction%20grating%20uses,stars%20to%20how%20gases%20act%20in%20a%20lab>.
- 3: Maciel Filho, R. F. M. (z.d.). Optics and vision. Sciencedirect. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dispersing-element#featured-authors>
- 4: GeeksforGeeks. (2025, juli 23). Dispersion of Light through a Prism. GeeksforGeeks. <https://www.geeksforgeeks.org/physics/dispersion-of-light-by-prism/>
- 5: Encyclopaedia Britannica. (1998, 20 juli). Prism | Definition, Refraction, Types, & Facts. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/prism-optics>
- 6: The grating equation. (z.d.). <https://www.newport.com/n/the-grating-equation>

- 7: Carvalho, I. (2024, 22 februari). Diffraction gratings — SARSPEC. Sarspec. <https://www.sarspec.com/all-about-spectrometers/diffraction-gratings>
- 8: Wolfe, W. L. (2009). Prism Spectrometers. In SPIE eBooks. <https://doi.org/10.1117/3.263530.ch9>
- 9: Introduction to Optical Prisms. (z.d.). Edmundoptics. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-optical-prisms/>
- 10: What is Light? (z.d.-a). Las Cumbres Observatory. <https://lco.global/spacebook/light/what-is-light/>
- 11: Light as a Wave. (z.d.-b). Las Cumbres Observatory. <https://lco.global/spacebook/light/light-wave/>
- 12: Light as a Particle. (z.d.-c). Las Cumbres Observatory. <https://lco.global/spacebook/light/light-particle/>
- 13: Clegg, B. (2024, 1 juli). What is light? A guide to waves, particles, colour and more. BBC Science Focus Magazine. <https://www.sciencefocus.com/science/what-is-light>
- 14: Ultraviolet-Visible Spectroscopy (UV-Vis). (1BC). Wisconsin Centers For Nanoscale Technology. <https://wcnt.wisc.edu/ultraviolet-visible-spectroscopy-uv-vis/>
- 15: Pan, S. (2025, 19 oktober). Infrared spectroscopy (IR spectroscopy) - principle, instrumentation, application - Biology notes online. Biology Notes Online. <https://biologynotesonline.com/infrared-spectroscopy-ir-spectroscopy/#what-is-ir-spectroscopy>
- 16: Introduction to Raman Spectroscopy Techniques- Oxford Instruments. (z.d.). Oxford Instruments. <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/raman-spectroscopy>
- 17: Fluorescence Spectroscopy: Theory, Instrumentation & Uses. (z.d.). Ossila. <https://www.ossila.com/pages/fluorescence-spectroscopy>
- 18: Team, E. (2025, 31 maart). What animal sees beyond the human electromagnetic spectrum limitations? The Environmental Literacy Council. <https://enviroliteracy.org/what-animal-sees-beyond-the-human-electromagnetic-spectrum-limitations/>
- 19: VAVILOV, S. I. (1965). GALILEO IN THE HISTORY OF OPTICS. In SOVIET PHYSICS USPEKHI (Nr. 4; Vol. 7, pp. 583–615). https://ufn.ru/ufn65/ufn65_4/ufn654f.pdf
- 20: Greivenkamp, J. E. (2019). OPTI-502 Optical Design and Instrumentation I. <https://wp.optics.arizona.edu/jgreivenkamp/wp-content/uploads/sites/11/2019/08/502-01-Introduction.pdf>
- 21: Cermak, A. (2024, 6 november). Galileo's Observations of the Moon, Jupiter, Venus and the Sun - NASA Science. NASA Science. <https://science.nasa.gov/solar-system/galileos-observations-of-the-moon-jupiter-venus-and-the-sun/>
- 22: Kadariya, R. (2025, 16 augustus). Refraction of Light: Principle, Laws, Applications, vs. Reflection. Science Info. <https://scienceinfo.com/refraction-of-light/#definition-of-refraction-of-light>
- 23: Rennie, J. R. (2013, 16 juli). Why does the refractive index depend on wavelength? Physics Stack Exchange. <https://physics.stackexchange.com/questions/71126/why-does-the-refractive-index-depend-on-wavelength>
- 24: Physics tutorial: The wave equation. (z.d.). <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-2/The-Wave-Equation>

- 25: Electronic Spectroscopy of molecules. (z.d.). <https://slidetodoc.com/electronic-spectroscopy-of-molecules-regions-of-electromagnetic-spectrum/>
- 26: What is a Spectrometer? - GoPhotonics.com. (z.d.). <https://www.gophotonics.com/community/what-is-a-spectrometer>
- 27: Albert Einstein Photoelectric Effect. (z.d.). <https://www.animalia-life.club/qa/pictures/albert-einstein-photoelectric-effect>
- 28: Photons - EWT. (2020, 23 mei). EWT. <https://energywavetheory.com/photons/>
- 29: Wink. (2025, 2 november). Biografi Galileo Galilei, kisah penemu teleskop yang bertentangan dengan gereja. BiografiKu.com | Profil Dan Biografi Tokoh Terkenal. <https://www.biografiku.com/biografi-galileo-galilei/>
- 30: Young's double slit experiment introduction worksheet for 6th form AS Physics | Teaching Resources. (z.d.). <https://www.tes.com/teaching-resource/young-s-double-slit-experiment-introduction-worksheet-for-6th-form-as-physics-11474274>
- 31: 70mm plano ruled reflective diffraction grating for spectrometer - LaserSE. (2022, 22 april). LaserSE. <https://www.laserse.com/p/70mm-plano-ruled-reflective-diffraction-grating-for-spectrometer/>
- 32: Admin. (2017, 13 maart). Transmission Grating Equation - Tessshebaylo. Tessshebaylo. <https://www.tessshebaylo.com/transmission-grating-equation/>
- 33: Omega Optical. (2025, 15 juli). Diffraction Gratings - Omega Optical. <https://omega-optical.com/gratings/>
- 34: Elijah. (2014, 30 juli). Visible and IR Absorption Spectroscopy - SlideServe. SlideServe. <https://www.slideserve.com/elijah/visible-and-ir-absorption-spectroscopy>
- 35: Admin. (2016, 24 september). Draw an optical diagram of spectrofluorometer, Give its theory and pharmaceutical applications. PharmaTutor. <https://www.pharmatutor.org/pharma-analysis/draw-an-optical-diagram-of-spectrofluorometer>