

Spectraalonderzoek met behulp van een Fiberspectrograaf

S.R. Hardeman en G.P. Kardolus

13 juli 2004

Samenvatting

Het sterlicht in het brandpunt van een telescoop wordt met een speciale glasfiber naar een traliespectrograaf geleid. Het spectrum van de heldere ster Sirius wordt met een CCD camera vastgelegd. Uit de analyse van het verkregen spectrum kan het spectraaltype van de ster worden bepaald.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Theorie	4
2.1	Ontstaan van het spectrum	4
2.2	De reflectietralie	4
3	Uitvoering	6
3.1	Opstelling	6
3.2	Methode	6
3.3	Dataverwerking	8
4	Resultaten	10
5	Conclusie	12
6	Foutenbespreking	13
A	Materialen	14
B	Berekeningen	15

1 Inleiding

De heldere ster Sirius (~ 8.6 lichtjaar) is waargenomen met behulp van een fiberspectrograaf. Er wordt een glasvezel (fiber) gekoppeld aan een telescoop. Vanaf deze fiber gaat het sterlicht naar een tralie, die op zijn beurt het licht weerkaatst op een CCD camera. De opstelling is zo geconfigureerd dat het golflengtegebied 4000 \AA tot ongeveer 6000 \AA kan worden waargenomen.

In dit verslag zullen we eerst uitleggen hoe een sterspectrum ontstaat. Daarna volgt nog een theoretische beschrijving van de tralie. Dit stelt ons in staat de opstelling te beschrijven, en de daarmee samenhangende meetmethode. Een belangrijk onderdeel was de dataverwerking, waaraan we ook aandacht zullen besteden. Dit mondde uit in een absorbtiespectrum.

In het verkregen spectrum zijn de absorbtielijnen $H\beta$ en $H\gamma$ duidelijk te zien. Echter, na de dataanalyse is het resultaat toch minder mooi dan gehoopt. Over de oorzaken hiervan staat een discussie in de foutenanalyse.

2 Theorie

Sterlicht is niet even helder over het hele golflengtegebied. Spectrografie is een methode om deze helderheidsverschillen te onderzoeken. Dit kan veel vertellen over de eigenschappen en fysica van de ster. In dit hoofdstuk zullen we eerst kort bespreken hoe deze helderheidsverschillen ontstaan. Daarna zal een stukje volgen over de natuurkunde van traliespectrografie, de vorm van spectrografie die wij gebruikt hebben.

2.1 Ontstaan van het spectrum

Sterren zijn optisch dikke bollen gas. Dit betekent dat een foton gemiddeld een kortere vrije weglengte heeft dan de straal van de ster. Het blijkt dat optisch dikke gasbollen zwate stralers zijn (zie bijvoorbeeld syllabus sterrenkunde 1b of Griffiths: an introduction to quantum mechanics).

De frequentie waarbij het meeste licht wordt uitgezonden, is afhankelijk van de temperatuur. Hete sterren produceren veel meer licht van korte golflengten dan koude sterren. Met spectrografie kan deze golflengte bepaald worden, en daarmee de temperatuur van de ster.

Veel interessanter zijn echter de absorptielijnen. De lijnen ontstaan doordat atomen fotonen absorberen, waarbij het atoom in een aangeslagen toestand raakt. Als het atoom terugvalt naar de grondtoestand zal het foton weliswaar weer worden uitgezonden, maar door de koppeling met het gas gaat wat energie van het foton in thermische energie zitten. Omdat atomen slechts fotonen van hele specifieke golflengten kunnen absorberen, ontstaat een absorptielijn: een sterk verminderde flux bij een bepaalde frequentie. Deze lijnen vertellen je welke atomen er in een ster zitten, de diepte van de lijn zegt wat over de fractie gas die uit dat specifieke atoom bestaat.

Uit de absorptielijnen is veel informatie te halen. Ten eerste kan je bepalen welke samenstelling een ster heeft. Dit vertelt je wat over de ontstaansgeschiedenis en de levensloop van de ster. Ook kan je de temperatuur van de ster bepalen aan de hand van absorptielijnen, door te kijken naar het voorkomen van geoniseerde materie. De verhoudingen tussen de verschillende ionen vertelt je wat over de temperatuur. Ook blijkt de diepte en breedte van lijnen afhankelijk van de temperatuur. Als gas heet is, is de thermische snelheid hoog. Dit zorgt voor een random dopplerverschuiving over dit gebied, die de lijn verbreedt. Resultaat is dan dat de lijn breder, maar minder diep wordt.

Het blijkt dat sterren in spectraaltypen voorkomen. Sterren van hetzelfde spectraaltype hebben dezelfde temperatuur en evolutiefase, en als gevolg daarvan dezelfde straal en dus dezelfde lichtkracht. Het spectraaltype kan je verkrijgen door de ster met een aantal ijspectra van bekende sterren te vergelijken. Tot slot kan je de snelheid van een ster bepalen, door te kijken hoeveel het volledige spectrum Dopplerverschoven is. Dit is met name in de kosmologie een belangrijk onderzoeksmiddel.

2.2 De reflectietralie

Een reflectietralie wordt gekenmerkt door een regelmatige lijnenstructuur, opgenomen in een spiegel, die zorgt voor de breking van licht. Deze lijnen zijn eigenlijk een soort dakpanstructuur, die in de spiegel is aangebracht (zie figuur 2). Door

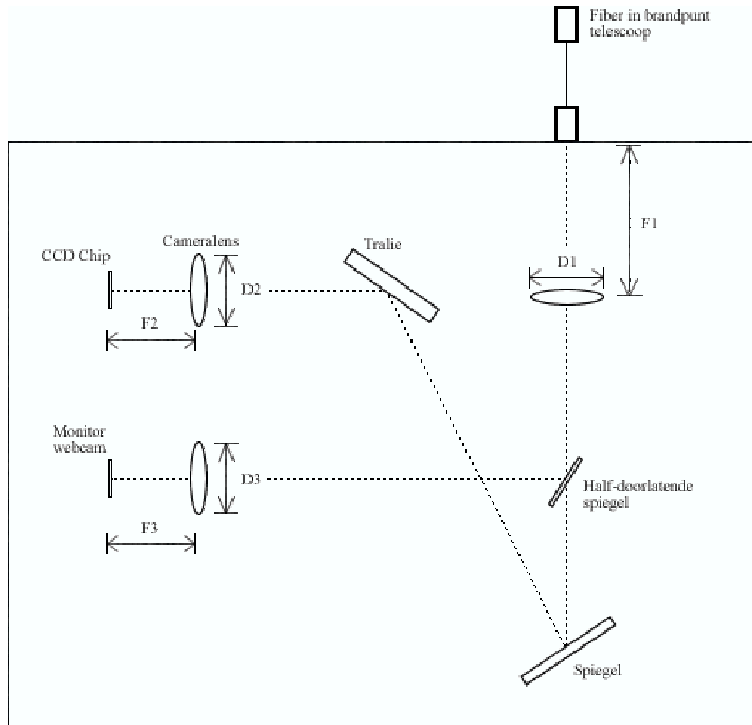
deze structuur wordt de lichtgolf verstrooid in verschillende richtingen. Echter, alleen als positieve interferentie optreedt met andere delen van de spiegel kan er intensiteit ontstaan.

Of er interferentie optreedt hangt af van de grootte van de structuur en de golflengte van het licht. De afstand tussen verschillende groeven naar een derde punt (waarop je bijvoorbeeld projecteert) moet een geheel aantal golflengtes verschillend zijn. Het resultaat is dat licht gebroken wordt naar een eerste, tweede, derde etc orde, die verschillend is voor elke golflengte. Alleen de nulde orde is gelijk.

Een goede uitleg van golfbreking aan een regelmatige structuur staat in "Feynman lectures of physics II". Wij gebruiken een reflectietralie, die als bijzonderheid heeft dat er meer licht in n van de eerste ordes gereflecteerd wordt. Om het maximaal efficiënt te maken moet de hoek van de eerste orde gelijk zijn aan de hoek van uitval. De berekening voor onze spectrograaf staat, met uitleg, in bijlage B.

3 Uitvoering

3.1 Opstelling

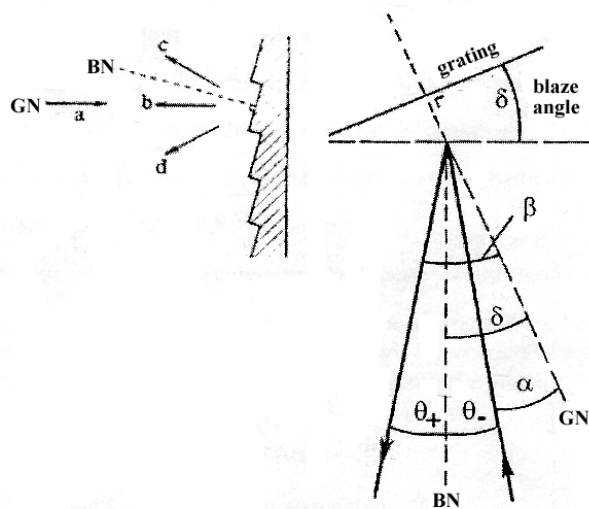


Figuur 1: Meetopstelling. De variabelen zijn als volgt gekozen: $d_1 = 50$ mm, $f_1 = 283$ mm, $d_2 = 16$ mm, $f_2 = 85$ mm, $d_3 = 50$ mm en $f_3 = 100$ mm.

3.2 Methode

Het licht van een ster wordt met een telescoop (Meade LX200 GPS) opgevangen en via de fiber naar de opstelling geleid (figuur 1). Met behulp van lenzen en spiegels wordt het licht afgebeeld op een reflectietralie. Van de eerste orde van deze tralie wordt met een CCD een afbeelding gemaakt. Een webcam wordt gebruikt om te controleren of de lichtbron wel goed in de fiber staat. De halfdoorlatende spiegel voorziet de webcam van licht.

De reflectietralie is in feite een verzameling kleine langwerpige spiegels, dakpansgewijs naast elkaar geplaatst (figuur 2). Deze constructie zorgt ervoor dat er verhoudingsgewijs veel licht in de eerste orde terecht komt. De hoek die de dakpanstructuur (blaze normal) maakt ten opzichte van de tralie (ground normal) heet blaze angle (δ). Samen met de dichtheid van de structuur (aantal "dakpannen" per mm) zijn dit de kenmerkende eigenschappen van de tralie. Verder is de hoek van inval (α) van belang alsmede de hoek van eerste orde uitval (β). Ten opzichte van de blaze normal noemen we deze hoeken θ_- (inval) en θ_+ (uitval). De intensiteit in de eerste orde is maximaal als $\theta_- = -\theta_+$. In de bijlagen staat de berekening wanneer dit het geval is voor de bij deze proef gebruikte tralie.



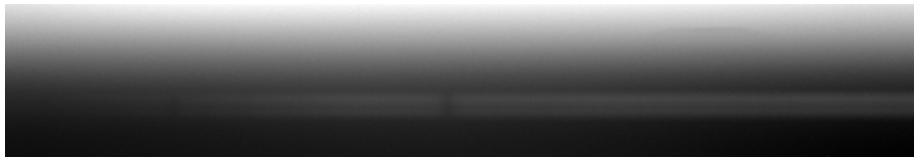
Figuur 2: Links: De reflectietralie is in feite een verzameling kleine langwerpige spiegels, dakpansgewijs naast elkaar geplaatst. Rechts: Schematisch overzicht van de genoemde hoeken. Wij hebben gekozen voor een invallende hoek (α) van 70 graden en een uitvallende hoek (β) van -52 graden.

De lenzen voor de proef zijn zo gekozen dat de spleetbreedte (de breedte van de fiber) op twee pixels in de CCD wordt afgebeeld. Dit moet de optimale resolutie opleveren. Verder is van belang dat het spectrum zo wordt afgebeeld dat lijnen zichtbaar zijn. Als het golflengtegebied te groot wordt, wordt het aantal pixels per golflengtegebied (resolutie) te klein en zul je geen lijnen waarnemen. In ons geval kunnen wij ongeveer 280 nm op de CCD afbeelden. Omdat de CCD 1600 pixels breed is betekent dit dat er één nanometer op 5.7 pixels wordt afgebeeld. Dit moet genoeg zijn om lijnen te kunnen onderscheiden. Deze gegevens zijn bepaald voor het golflengtegebied rond $H\beta$ (4861 Å). Voor de relevante formules verwijzen wij naar de bijlagen. Ook staan daar de specificaties van de gebruikte instrumenten.

De telescoop staat gericht op het zuid-zuidwesten. Dit betekent dat er sterren rond Orion waargenomen kunnen worden. Van Sirius wordt het golflengtegebied rond $H\beta$ bepaald, omdat in dat gebied de camera de hoogste gevoeligheid heeft. De keuze is op Sirius gevallen omdat deze ster de hoogste helderheid heeft. Voordat er is begonnen met waarnemen zijn er eerst een aantal ijspectra gemaakt. Van zowel de kwiklamp als de zinklamp is het spectrum opgenomen. Dit wordt gebruikt om aan een pixelnummer een bepaalde golflengte toe te kennen. Hiermee kan vervolgens het sterspectrum worden geïjkt. Na het maken van de ijspectra wordt de telescoop op Sirius gericht. De belichtingstijd is 10 minuten. Om licht uit de omgeving te blokkeren wordt de opstelling afgedekt. De informatie die de computer van de CCD ontvangt wordt verwerkt door het programma SBIG. Nadat het bestand als FITS is opgeslagen kan de dataverwerking in IRAF beginnen.

3.3 Dataverwerking

Een CCD chip heeft duizende individuele collectoren die de hoeveelheid licht meten. Deze collectoren noemt men pixels. Wanneer je een afbeelding download, download je de waarde van iedere pixel. Daarna worden ze in de juiste volgorde samengevoegd en ontstaat er een afbeelding op het computerscherm. Een pixel met een lage waarde is donkerder dan een pixel met een hoge waarde. In ons geval is het plaatje verticaal gecomprimeerd. We hebben vier pixels verticaal opgeteld, deze staan als enkele pixels weergegeven.



Figuur 3: De originele opname van Sirius.

Het probleem is echter dat niet iedere pixel met dezelfde waarde begint. Dit betekent dat twee dicht bij elkaar gelegen pixels die evenveel licht ontvangen toch een verschillende waarde kunnen hebben. Om hiervoor te corrigeren wordt een *bias* gemaakt. Dit is een opname met een gesloten shutter. De belichtingstijd is zo kort mogelijk.



Figuur 4: De bias.

De originele opname bevat een bepaalde hoeveelheid ruis. Deze ruis is niet random. Om hiervoor te corrigeren wordt een *dark* gemaakt. Door de telescoop af te dekken en met dezelfde belichtingstijd te meten als bij de sterafbeelding wordt er een dark verkregen. Met een bias en een dark wordt er gecorrigeerd voor ongewilde ruis.



Figuur 5: Onze dark, de grote hoeveelheid licht bespreken we in de foutenanalyse.

Met een *flatfield* wordt gecorrigeerd voor onder andere stof of vuil op de camera, interne reflecties en het feit dat de camera niet overal even gevoelig

is. Een flatfield wordt genomen door de CCD camera gelijkmatig te belichten. De belichtingstijd is zo kort mogelijk. Wat nog opgemerkt moet worden is dat zowel bias, dark als flatfield op dezelfde temperatuur worden genomen als de opname van de ster.



Figuur 6: Een flatfield.

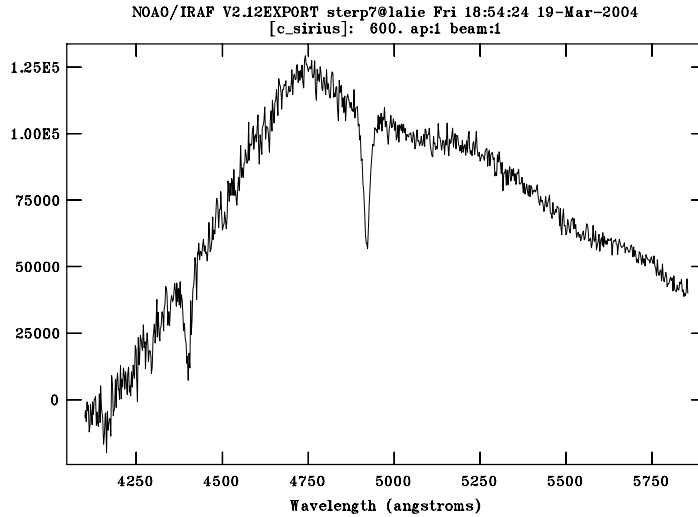
Nu we een dark, bias en flatfield hebben kunnen we de steropname gaan corrigeren. Eerst worden dark en bias van zowel de flatfield als de steropname afgetrokken. Vervolgens wordt de gecorrigeerde steropname gedeeld door de gecorrigeerde flatfield. Van de overgebleven afbeelding kan er een plot worden gemaakt. De intensiteit (het aantal counts per pixel) wordt uitgezet tegen het pixelnummer. Vervolgens wordt er geijkt met behulp van het kwikspectra waarvan de golflengtes bekend zijn. Nu kan de intensiteit worden uitgezet tegen de golflengte.



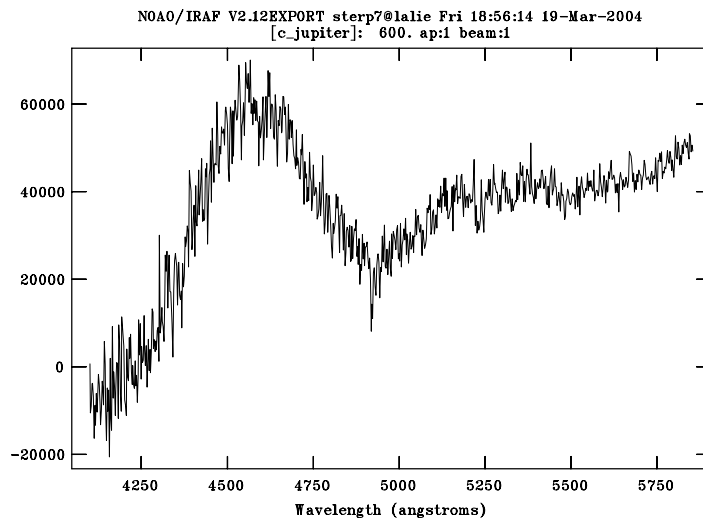
Figuur 7: IJkspectrum van kwik.

4 Resultaten

Na alle data-analyse hebben we dan de gecorrigeerde spectra van Sirius en van Jupiter. Het spectrum van Jupiter is uiteraard feitelijk een zonnenspectrum. Sirius heeft spectraaltype A0, de zon G2. Van het volledige spectrum hebben we het stuk tussen ongeveer 4000 Å en 6000 Å opgenomen.



Figuur 8: Spectrum van Sirius.



Figuur 9: Spectrum van Jupiter.

Wat opvalt is de diepe lijn die zowel bij Jupiter als bij Sirius zit. Deze lijn is $H\beta$, alhoewel hij niet op 4861 Å zit, maar eerder op 4900 Å. Kennelijk is er bij

het meten iets fout gegaan. Bij Sirius zijn ook de $H\gamma$ en zelfs $H\delta$ te zien, deze vertonen een zelfde afwijking. $H\alpha$ zit ruim buiten ons golflengtebereik, zoals tabel 10 toont.

Lijn	Golflengte (\AA)
$H\alpha$	6563
$H\beta$	4861
$H\gamma$	4342
$H\delta$	4101

Figuur 10: De eerste vier Balmer-overgangen met bijbehorende golflengte
Verder valt op dat er bij sommige golflengten een negatief aantal counts geteld is. Dit is een artefact van de data-analyse, meer hierover in de foutenbespreking.

5 Conclusie

Het verkregen spectrum van Sirius laat de absorptielijnen $H\beta$ en $H\gamma$ duidelijk zien, terwijl ook $H\delta$ zichtbaar lijkt. De golflengtekalibratie is duidelijk verkeerd, verder hebben we veel problemen met ruis in onze spectra. Meer hierover in de foutenbespreking.

6 Foutenbespreking

De golflengtekalibratie klopt niet. Omdat voor de drie waterstoflijnen de afwijking hetzelfde is, lijkt het erop dat tussen het nemen van het ijspectrum en de daadwerkelijke opnamen de opstelling per ongeluk verschoven is. Punt voor volgende keer is het stevig verankeren van de opstelling, en om in ieder geval de tralie en CCD op dezelfde slede te monteren.

Onze grootste zorg was echter de hoeveelheid strooilicht die onze camera binnenviel, zoals opvalt in het darkframe (afbeelding 5) en het de opname van Sirius (afbeelding 3). Deze opname is gemaakt door de telescoop af te dekken, wat aangeeft dat de bron binnen onze opstelling moet liggen. Achteraf denken we dat de rode led achterop de webcam de bron van dit licht was. Belangrijk is dus goed alle leds af te plakken met zwart tape.

We hebben geprobeerd om onze opnamen te corrigeren voor dit strooilicht door gebruik te maken van een dark waarin dit strooilicht verwerkt zat. Probleem was dat onze dark uiteindelijk meer counts bevatte dan onze wetenschappelijke frames. De oplossing was door handmatig het aantal counts van de dark te verlagen, zodat deze overeenstemde met de wetenschappelijke frames. Deze methode levert echter negatieve counts op bij bepaalde golflengten. Dit valt vooral op bij het plaatje van Jupiter (afbeelding 9).

In de flatfield (afbeelding 6) is goed te zien dat de camera een verschillende gevoeligheid heeft voor verschillende golflengten. Hiervoor is met een flatfield goed te corrigeren, hoewel wel de ruis toeneemt als de gevoeligheid afneemt (minder counts betekent meer ruis).

De ijking is ook niet optimaal doordat we op de avond van de meting zijn vergeten de opname van een CS lamp op te slaan. Deze lamp was gunstiger om mee te ijken omdat er veel meer emissielijnen inzitten.

Tot slot bleek achteraf dat we Sirius waarschijnlijk niet helemaal goed hebben scherpgesteld. Gelukkig was de opstelling zeer lichtefficiënt, zodat we toch mooie opnamen hebben. Bij het scherpstellen is het belangrijk erop te letten dat in de spleet slechts een fiber tegelijk oplicht. Je ziet dan op de webcam een helder stipje over de lijn bewegen.

Met deze opmerkingen tot verbetering denken we dat de fiberspectrograaf heel goed in staat is een gedetailleerd spectrum op te nemen.

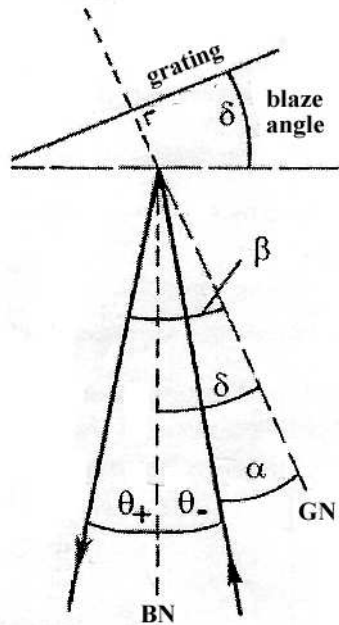
A Materialen

Hier vind u een aantal relevante specificaties van gebruikte materialen.

- Fiber: De ingang van de fiber is een cirkel met een diameter van 0.375 mm. De uitgang is een lijn: $50 \mu\text{m} \times 1.6 \text{ mm}$.
- Telescoop: Meade LX200 GPS
- CCD camera: SBIG ST-7E, met 78 mm lens.
- Lenzen: $1 \times 3.3 \text{ dpt}$, $1 \times 10 \text{ dpt}$.
- Halfdoorlatende spiegel.
- Reflectietralie: 300 lijnen/mm, blaze angle $8^\circ 38'$
- Webcam (Philipscamera)

B Berekeningen

In de volgende berekeningen maken we gebruik van een aantal hoeken. Daarom nogmaals een afbeelding van de gebruikte hoeken.



Hier volgt een berekening voor het bepalen van de invallende (α) en uittrekkende (β) hoek van de lichtbundel ten opzichte van de tralie.

$$\text{Grating vergelijking : } \theta = \arccos\left(\frac{kn\lambda \cdot 10^{-6}}{2 \sin \delta}\right)$$

Het beste resultaat gaf: $n = 300$; $\delta = 0.15$ rad ($8^\circ 38'$). Dit zijn eigenschappen van de tralie. Uit de beschikbare tralies geeft de tralie met deze kenmerken een gunstige waarde voor zowel golflengtebereik als resolutie. Voor λ wordt de golflengte van H β ingevuld (486.1 nm). Verder geldt: $k = 1$. Invullen geeft de optimale hoek θ :

$$\theta_{\text{opt}} = 1.064 \text{ rad}$$

Nu kunnen α en β worden berekend.

$$\alpha = \delta + \theta_{\text{opt}} \rightarrow \alpha = 69 \text{ graden}$$

$$\beta = \delta - \theta_{\text{opt}} \rightarrow \beta = -52 \text{ graden}$$

Om resolutie en golflengtebereik te berekenen moet eerst de dispersie voor het centrale deel van de detector ($x = 0$; $\lambda \approx 500$ nm) worden bepaald.

$$F = \frac{10^6 85 \cos \beta}{kn(85^2 + x^2)} \rightarrow F = 23.98$$

Nu kunnen golflengtebereik en resolutie worden berekend.

$$\text{Golflengtebereik} = \text{Chipgrootte}(6.9) \times F \rightarrow \text{Golflengtebereik} = 165.5 \text{ nm}$$

$$\text{Resolutie} = \frac{\text{Aantal pixels}(765)}{\text{Golflengtebereik}} \rightarrow \text{Resolutie} = 4.62 \text{ pix nm}^{-1}$$