

# Onderzoek naar het emissiespectrum van He, een onbekende stof en naar de absorptiespectra van oplossingen

Louis Claeys, Ruben Van der Borght

6 maart 2021

## 1 Inleiding

Spectrometrie is een techniek die veel gebruikt wordt in de astronomie om de samenstelling van sterren te bepalen. [1] In dit onderzoek wordt met spectrometrie de dispersiekromme  $n(\lambda)$  van een prisma bepaald. Daarna wordt met een analoge en een digitale spectrometer een onbekende stof in een lamp geïdentificeerd. Ook wordt er nagegaan of deze stof in TL-lampen aanwezig is. Als laatste wordt het verband tussen de concentratie  $c$  en de absorptie  $A$  van enkele oplossingen bepaald.

## 2 Materialen

### 2.1 De meettoestellen

Voor de metingen wordt gebruik gemaakt van een analoge spectrometer die te zien valt op Figuur 1 en een digitale spectrometer die op Figuur 2 wordt afgebeeld. Beide toestellen worden schematisch weergegeven op Figuur 3.

Bij de analoge spectrometer wordt het invallende licht van de bron eerst door de collimator omgezet in een parallelle lichtbundel. Vervolgens wordt het gebogen door een gelijkzijdig prisma. Als laatste wordt het opgevangen in de telescoop, waardoor men het spectrum van de bron kan bekijken. De telescoop wordt met behulp van de kruisdraad gericht op het gewenste deel van het zichtbare spectrum. Het oog is de sensor van deze opstelling.

De hoek  $\theta$  waarop de telescoop zich bevindt, wordt afgelezen op de noniusschaal op de basistafel. De hoek  $\theta_0$  waarvoor de telescoop en collimator met elkaar zijn uitgelijnd, heet de nulopstelling. Als systematische fout voor  $\theta$  wordt  $\Delta_{sys} = 0.0003$  genomen. Dit is groter dan de resolutie  $\Delta = 0.00015$  van de noniusschaal omdat het midden van de spectraallijn niet perfect met de kruisdraad is uitgelijnd. Er wordt aangenomen dat de fout op de hoek  $\alpha$  tussen de zijvlakken van het prisma verwaarloosbaar is, zodat  $\alpha = \frac{\pi}{3}$ .

De digitale spectrometer meet de intensiteit  $I$  van het invallende licht voor elke golflengte  $\lambda$ . Het licht dat invalt door de optische fiber ondergaat diffractie en wordt gereflecteerd op een CCD-array. Deze array stuurt dan voor elke positie op de array de intensiteit door naar de PC en zo wordt het spectrum berekend. De sensor van de digitale spectrometer is dus de CCD-array, de conditionering en verwerking vindt in de elektronica van de spectrometer plaats en de display gebeurt op een PC via de software OceanView.

Voor de proeven met de lampen wordt de spectrometer rechtstreeks op de bron gericht, zoals op Figuur 2b. In dit geval wordt een emissiespectrum gemeten. Voor de concentratieproeven wordt een blauwe houder met lichtbron aan de spectrometer gekoppeld, zoals op Figuur 2a. De cuvettes met oplossing worden in deze houder voor de bron geplaatst, zodat de spectrometer het absorptiespectrum van de oplossing meet. De fout op de absorbantie  $A$  en  $I$  bedraagt  $\Delta_{sys} = 2\%$ . De concentratie van oplossing in de cuvettes is gegeven in Tabel 3 en er wordt aangenomen dat de fout hierop verwaarloosbaar is. [2]

### 3 Methoden en Resultaten

#### 3.1 Emissiespectra met de analoge spectrometer

De hoek  $\theta_0$  van de nulinstelling werd gemeten als  $\theta_0 = 3.7042 \pm 0.0006 \pm 0.00015$ .

Daarna werd de hoek  $\theta'$  waarvoor de deviatie het kleinst is gemeten door de telescoop handmatig te verschuiven. De spectrometer werd bedekt met een zwarte doek tijdens de metingen om de lijnen duidelijker zichtbaar te maken en de meetfout te reduceren.

In Tabel 1 staan twee metingen  $\theta'$  en  $\theta''$  van dezelfde hoek voor de spectraallijnen van de He-lamp. Enkel de lijnen die duidelijk zichtbaar waren, zodat de kruisdraad nauwkeurig kon worden uitgelijnd met de spectraallijn, werden gemeten. Met het gemiddelde  $\theta_{gem}$  van  $\theta'$  en  $\theta''$  wordt de minimum deviatiehoek  $\delta_m$  bepaald als  $\delta_m = \theta_0 - \theta_{gem}$ . De  $1\sigma$ -fout op  $\delta_m$  werd berekend als  $\sigma_{\delta_m} = \sqrt{\sigma_s^2 + \Delta_{sys}^2/12}$ , met  $\sigma_s$  de statistische fout. Het verband tussen  $\alpha$ ,  $\delta_m$  en  $n(\lambda)$  wordt gegeven door

$$n(\lambda) = \frac{\sin[(\delta_m + \alpha)/2]}{\sin(\alpha/2)} \quad (1)$$

voor elke  $\lambda$ . [4] De waarde van  $n(\lambda)$  voor elke lijn is ook in Tabel 1 te vinden.

Het verloop van  $n(\lambda)$  kan gefit worden volgens een Cauchy-profiel

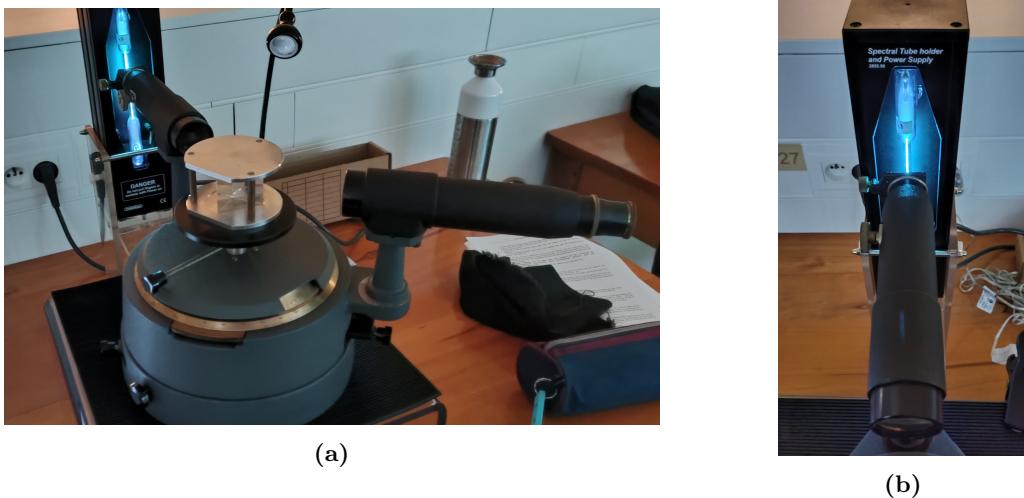
$$n(\lambda) = C + \frac{B}{\lambda^2} \quad (2)$$

met  $C, B$  de fitparameters. [4] De data uit Tabel 1 en de fit worden getoond op Figuur 4. De bekomen fitwaarden zijn

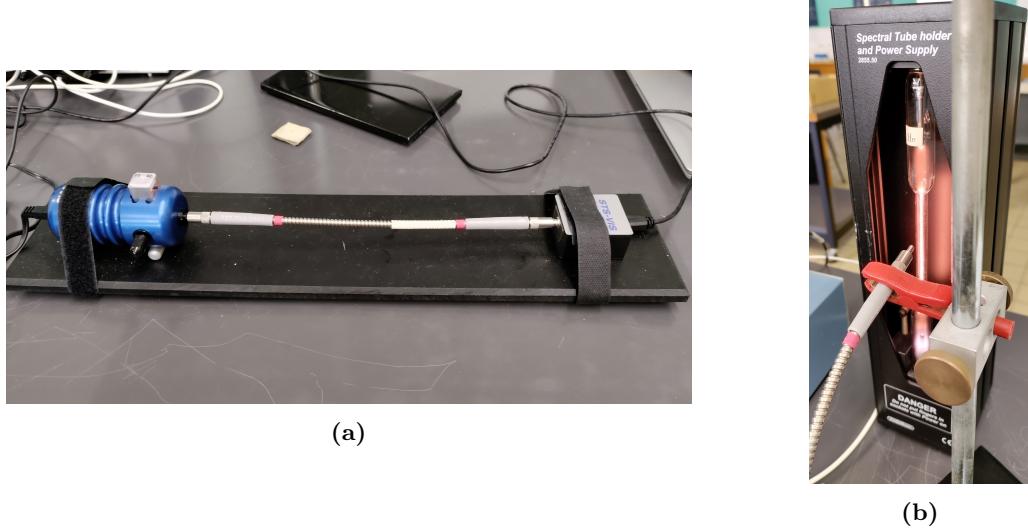
$$C = 1.5940 \pm 0.0003 \quad B = (9210 \pm 70) \text{ nm}^2 \quad (3)$$

en de fit heeft als kwaliteitswaarden  $\chi_{red}^2 = 2.07$  en  $p = 0.0662$ . Voor een analyse van deze fouten wordt verwezen naar de Bijlagen.

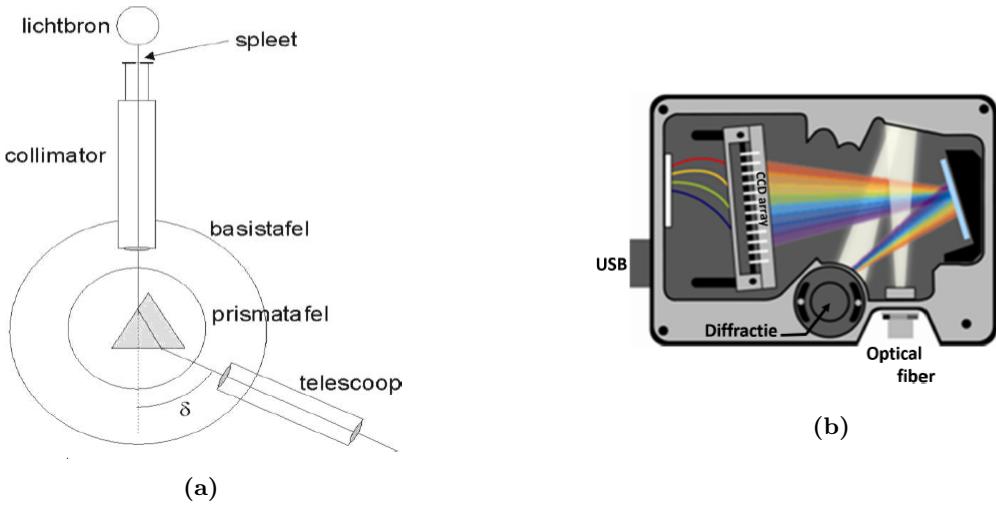
Vervolgens worden dezelfde metingen uitgevoerd voor de onbekende bron. Het spectrum van deze bron valt te zien op Figuur 5. Analoog aan de metingen voor de He-lamp worden  $\theta'$  en  $\theta''$  afgelezen en  $\delta_m$  berekend voor de duidelijk zichtbare spectraallijnen. De meetresultaten staan in Tabel 2. Voor de interpretatie hiervan wordt de golflengte  $\lambda$  uit de brekingsindex  $n$  berekend aan de hand van de bepaalde Cauchy-fit (2). De bekomen golflengtes van de spectraallijnen staan ook in Tabel 2.



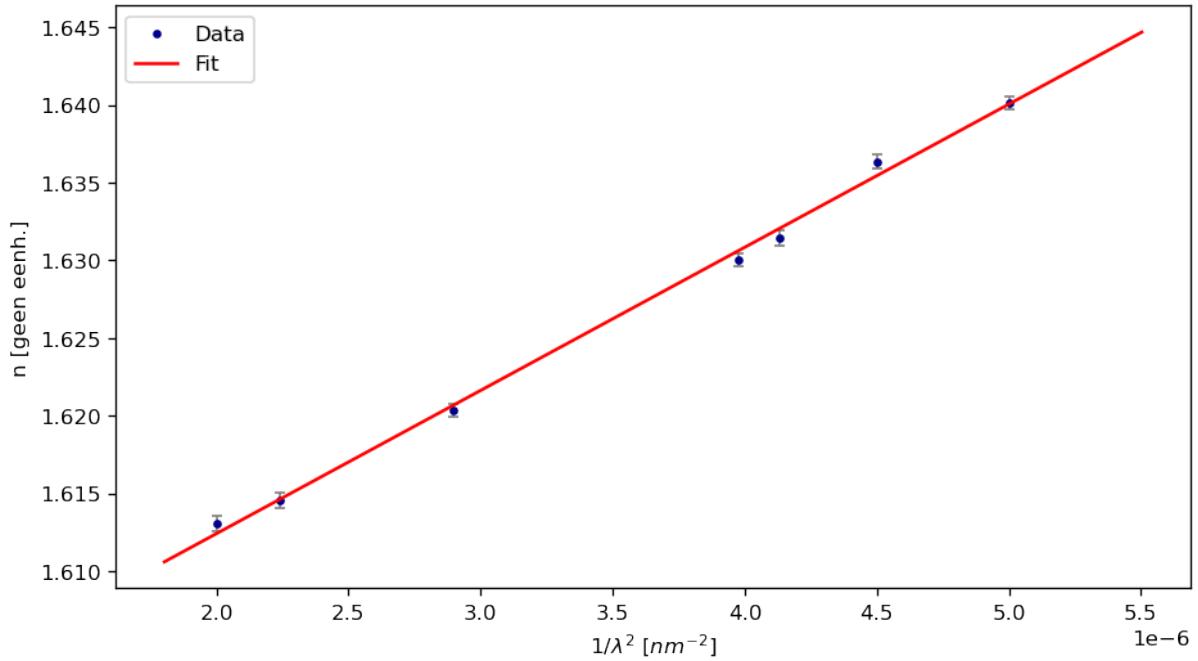
**Figuur 1:** De analoge spectrometer. Figuur 1a toont de analoge prismapectrometer met links de collimator en rechts de telescoop. Op de prismatafel staat het gelijkzijdige prisma. Op de noniusschaal op de basistafel werden de hoeken  $\theta$  afgelezen. Het lampje bovenaan werd aangezet om de kruisdraad nauwkeuriger te kunnen afstellen. Op Figuur 1b staat de onbekende bron achter de collimator.



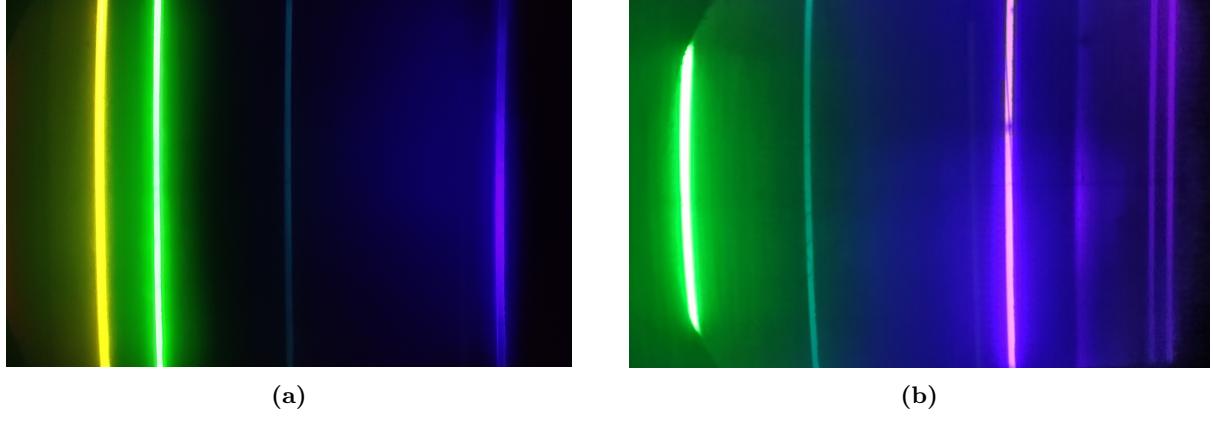
**Figuur 2:** De digitale spectrometer. Op Figuur 2a valt de spectrometer te zien wanneer hij gebruikt wordt tijdens de concentratieproef. Figuur 2b toont de spectrometer tijdens de meting van het spectrum van de heliumlamp.



**Figuur 3:** Schematische voorstellingen. Op Figuur 3a staat een schematische voorstelling van de analoge spectrometer afgebeeld. Het licht van de bron valt in door de collimator op het prisma, wordt tweemaal gebroken en wordt vervolgens door de persoon achter de telescoop waargenomen. Figuur 3b toont een schematische voorstelling van de werking van de digitale spectrometer. [3] Het licht dat invalt door de optische fiber ondergaat diffractie en wordt gereflecteerd op een CCD-array. Deze array stuurt voor elke positie op de array de intensiteit door naar de USB-poort en zo wordt het spectrum gevormd.



**Figuur 4:** De brekingsindex  $n$  in functie van  $1/\lambda^2$  met een fit volgens het Cauchy-model (2). De onzekerheid op  $1/\lambda^2$  is verwaarloosbaar en de data voor  $n$  is gegeven in Tabel 1.



**Figuur 5:** De zichtbare spectraallijnen van de onbekende bron. De beelden werden genomen door een smartphone voor de telescooplens te houden, wat de lichte kromming van de spectraallijnen verklaart. De heldere, groene spectraallijn op Figuur 5a komt overeen met die op Figuur 5b.

### 3.2 Emissiespectra met de digitale spectrometer

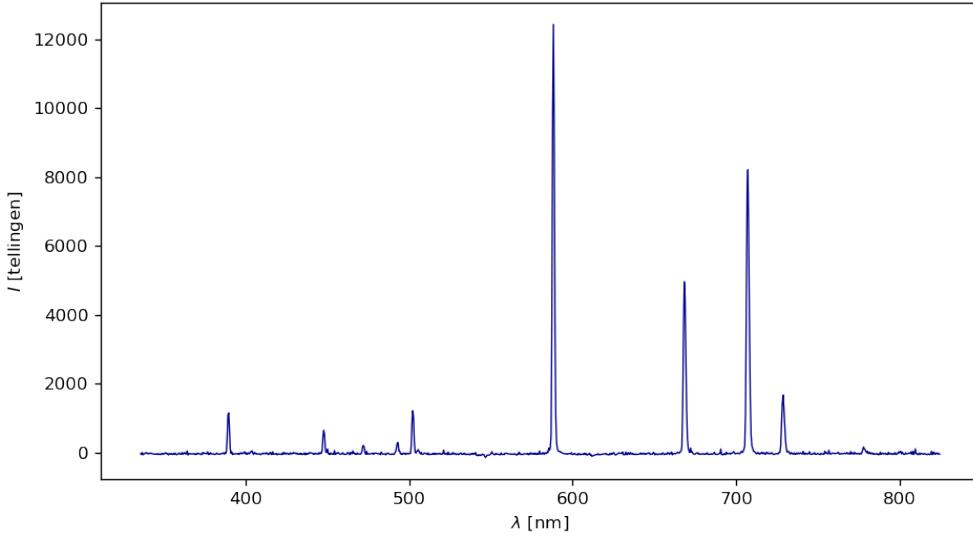
Met een digitale spectrometer werden dezelfde He-lamp en onbekende bron als die uit de vorige sectie bestudeerd door de spectrometer rechtstreeks op de bron te richten. Het spectrum van een TL-lamp werd analoog gemeten. De spectra zijn respectievelijk te zien in Figuur 6, Figuur 7 en Figuur 8. Al deze spectra worden als continu weergegeven aangezien dit visueel duidelijker is om een kwalitatieve analyse uit te voeren. De eigenlijke metingen werden uitgevoerd in 1024 equidistante punten tussen 335.983 nm en 824.362 nm.

Van de hoogste piek in het He-spectrum die zich bevindt bij  $\lambda = 588$  nm, werd een fit gemaakt volgens het Lorentz-profiel zoals op Figuur 9 te zien valt. Het Lorentz-profiel voorspelt dat de piek volgende vorm aanneemt

$$I = I_0 + \frac{A}{\pi} \frac{\gamma}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \gamma^2} \quad (4)$$

**Tabel 1:** De gemeten waarden van  $\theta'$  en  $\theta''$  en berekende waarden van  $\delta_m$  en  $n(\lambda)$  voor de zichtbare spectraallijnen van de He-lamp. Bij  $\theta'$  en  $\theta''$  zijn de systematische fout gegeven en bij  $\delta_m$  en  $n(\lambda)$  de  $1\sigma$ -fout.

Kleur	$\lambda$ [nm]	$\theta'$ [rad] $\pm 0.00015$	$\theta''$ [rad] $\pm 0.00015$	$\delta_m$ [rad]	$n(\lambda)$ [geen eenh.]
rood	706.5	2.87499	2.87456	$0.8294 \pm 0.0007$	$1.6131 \pm 0.0004$
rood	667.8	2.87194	2.87251	$0.8319 \pm 0.0007$	$1.6146 \pm 0.0004$
geel	587.5	2.86234	2.86263	$0.8417 \pm 0.0006$	$1.6203 \pm 0.0004$
groen	501.6	2.84576	2.84590	$0.8583 \pm 0.0006$	$1.6300 \pm 0.0004$
groen-blauw	492.1	2.84314	2.84372	$0.8607 \pm 0.0007$	$1.6314 \pm 0.0004$
blauw	471.3	2.83500	2.83485	$0.8693 \pm 0.0006$	$1.6364 \pm 0.0004$
violet	447.1	2.82845	2.82816	$0.8759 \pm 0.0006$	$1.6402 \pm 0.0004$



**Figuur 6:** Het emissiespectrum van de He-lamp zoals opgemeten met de digitale spectrometer. De fout op  $\lambda$  is verwaarloosbaar en de fout op  $I$  is 2%.

waarbij  $I$  de intensiteit,  $\lambda$  de golflengte en  $\lambda_0, \gamma, A$  en  $I_0$  fitparameters zijn. [5] De fit leverde volgende waarden op voor de fitparameters en hun  $1\sigma$ -fout

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= (588.29 \pm 0.06) \text{ nm} \\ \gamma &= (0.75^{+0.07}_{-0.08}) \text{ nm} \\ A &= (37000 \pm 2000) \text{ nm} \\ I_0 &= (-2100 \pm 300) \text{ tellingen.}\end{aligned}\tag{5}$$

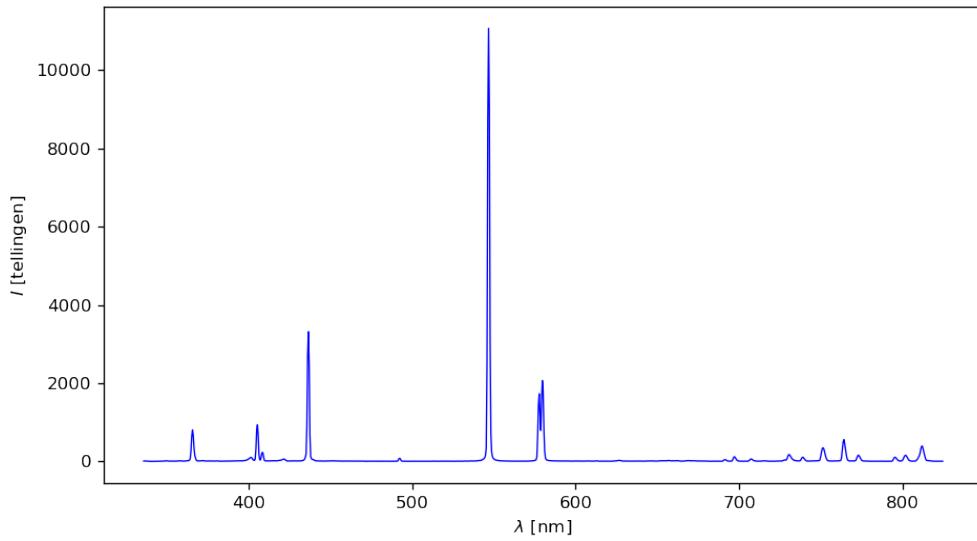
Hierbij hoort een gereduceerde  $\chi^2$ -waarde van 1.925 en een p-waarde van 0.0867. Een gedetailleerde foutenanalyse is te vinden in de Bijlagen.

### 3.3 Absorptie

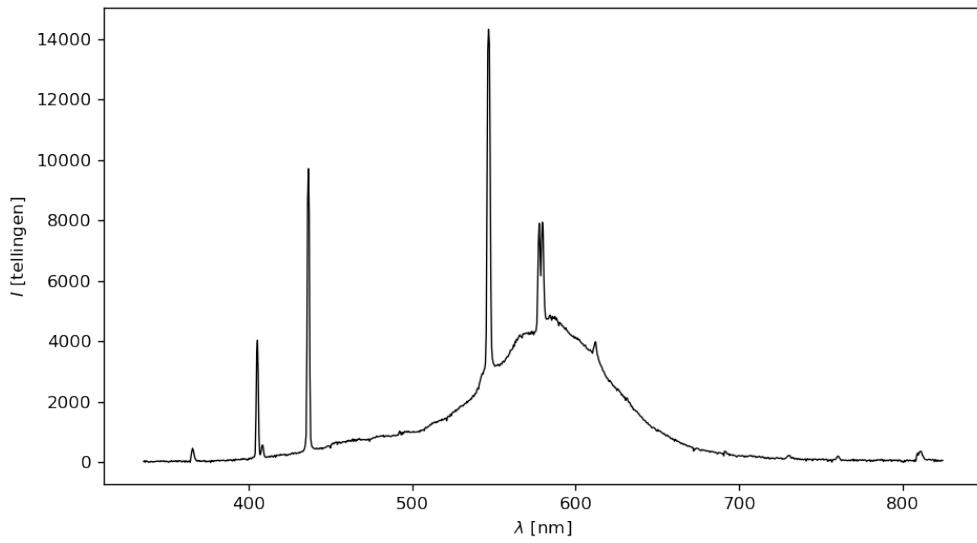
Met de digitale spectrometer werd de absorptie van een reeks calibratie-oplossingen met gekende concentratie gemeten. Daarvoor werd een blauwe houder gebruikt, zoals op Figuur 2a te zien valt.

**Tabel 2:** De gemeten waarden van  $\theta'$  en  $\theta''$  naast de berekende waarden van  $\delta_m$  en  $\lambda$  voor de spectraallijnen van de onbekende lamp. Bij  $\theta'$  en  $\theta''$  is de systematische fout gegeven en bij  $\delta_m$  en  $\lambda$  de  $1\sigma$ -fout.

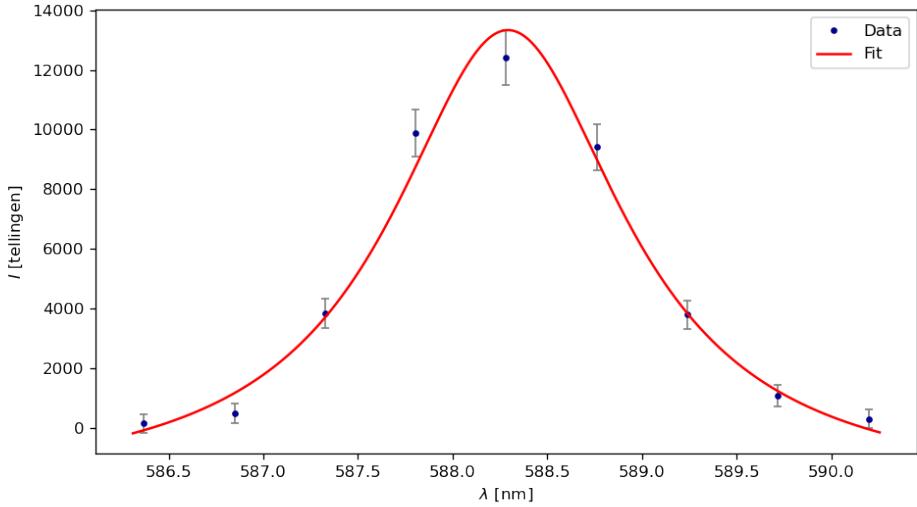
Kleur	$\theta'[\text{rad}] \pm 0.00015$	$\theta''[\text{rad}] \pm 0.00015$	$\delta_m[\text{rad}]$	$\lambda[\text{nm}]$
geel	2.86016	2.86263	$0.8441 \pm 0.0006$	$576 \pm 5$
groen	2.85492	2.85463	$0.8494 \pm 0.0006$	$546 \pm 5$
groen-blauw	2.84227	2.84198	$0.8620 \pm 0.0006$	$491 \pm 4$
violet (sterk)	2.82351	2.82409	$0.8802 \pm 0.0007$	$435 \pm 3$
violet (zwak)	2.80911	2.80925	$0.8950 \pm 0.0006$	$401 \pm 2$



**Figuur 7:** Het emissiespectrum van de onbekende lamp zoals opgemeten met de digitale spectrometer. Het spectrum wordt continu weergegeven omdat dit duidelijker is voor een kwalitatieve analyse. De fout op  $\lambda$  is verwaarloosbaar en de fout op  $I$  is 2 %.



**Figuur 8:** Het emissiespectrum van een TL-lamp gemeten met de digitale spectrometer. Het spectrum wordt continu weergegeven omdat dit duidelijker is voor een kwalitatieve analyse. De fout op  $\lambda$  is verwaarloosbaar en de fout op  $I$  is 2 %.



**Figuur 9:** De fit volgens het Lorenz-profiel (4) van de hoogste piek uit het He-emissiespectrum zoals zichtbaar in Figuur 6. De fout op  $\lambda$  is verwaarloosbaar, en deze op  $I$  wordt genomen als 2 %.

De houder bevat een lichtbron en de cuvette wordt tussen de bron en de spectrometer geplaatst, zodat het absorptiespectrum van de oplossing in de cuvette gemeten wordt. De gebruikte opgeloste stoffen hebben E-namen E133, E122 en E102. De overeenkomstige oplossingen worden vanaf nu benoemd met hun kleur, respectievelijk blauw, rood en geel. Van elke kleur werden vijf verschillende oplossingen gemeten die genummerd worden volgens dalende concentratie. De absorptiespectra zijn zichtbaar in Figuur 10, Figuur 11 en Figuur 12. Bij elke reeks metingen is een zwarte verticale lijn weergegeven. Deze geeft de golflengte weer waarbij maximale absorptie optreedt voor die reeks. Bij deze golflengte worden de absorbanties van de verschillende concentraties vergeleken.

De absorbantie  $A(c)$  wordt gegeven in Tabel 3. Deze wordt gefit volgens het model voorspeld door de wet van Lambert-Beer

$$A = Bc \quad (6)$$

waarin  $A$  de absorbantie is,  $c$  de concentratie en  $B$  een fitparameter<sup>1</sup>. [6] Een grafische weergave van de data in Tabel 3 samen met de uitgevoerde fits valt te zien op Figuur 13. De gevonden fitparameters met  $1\sigma$ -fout zijn

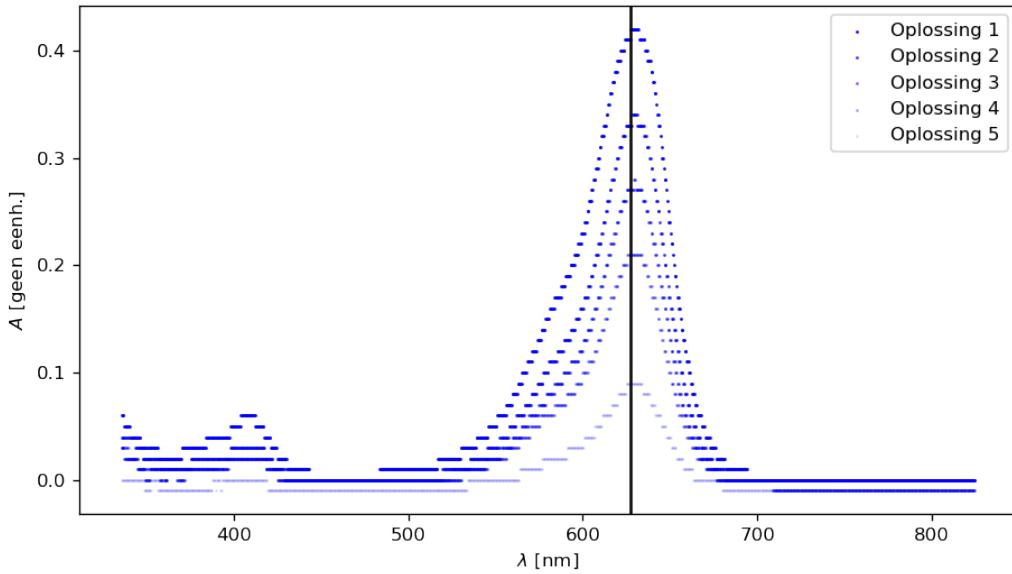
$$\begin{aligned} B_{blauw} &= (58\,700 \pm 1500) \text{ L/mol} & (\chi^2_{red} = 2.19, p = 0.0672) \\ B_{rood} &= (58\,500 \pm 1100) \text{ L/mol} & (\chi^2_{red} = 2.72, p = 0.028) \\ B_{geel} &= (60\,000 \pm 1200) \text{ L/mol} & (\chi^2_{red} = 9.17, p = 2.08 \times 10^{-7}) \end{aligned} \quad (7)$$

De Bijlagen bevat een uitgebreide foutenanalyse. Met behulp van deze waarden volgt dat

$$B = \frac{\sum_i B_i / \sigma_i^2}{\sum_i 1 / \sigma_i^2} = 59\,075 \text{ L/mol}, \quad \sigma_B = \frac{1}{\sqrt{\sum_i 1 / \sigma_i^2}} = 713 \text{ L/mol},$$

---

<sup>1</sup>In de originele wet is  $B = \ell\varepsilon$ , met  $\ell$  de dikte van de oplossing en  $\varepsilon$  de absorbantiecoëfficiënt.

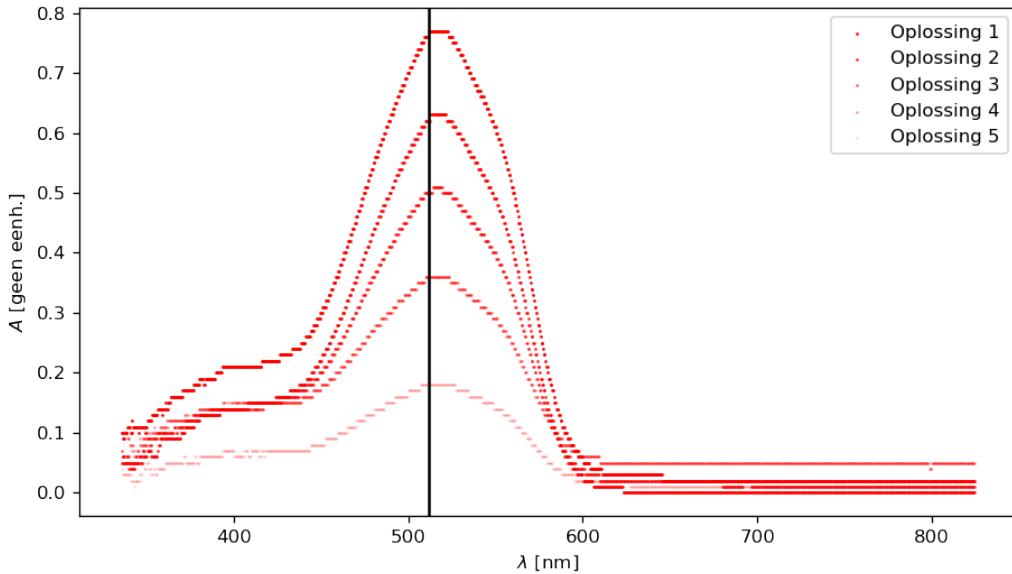


**Figuur 10:** De absorbantie  $A(\lambda)$  voor de verschillende calibratiecuvettes met blauwe oplossing (van boven naar beneden: oplossing 1 t.e.m. 5). De zwarte verticale lijn is getrokken bij de golflengte waarvoor  $A$  maximaal is. Het is de waarde van de absorbantie op dit punt,  $A(\lambda_{max})$ , die gebruikt wordt in de verdere analyse.

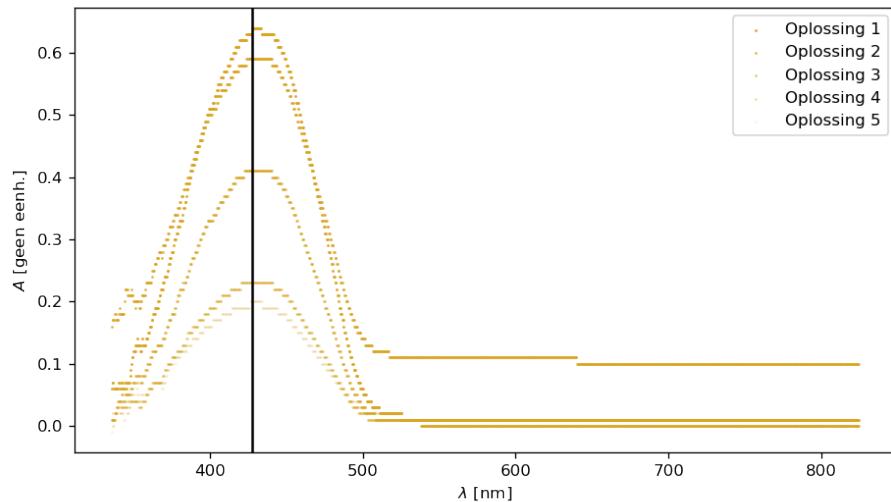
zodat het gewogen gemiddelde van  $B = (59\,100 \pm 700) \text{ L/mol}$  is. Vervolgens werd het absorptiespectrum van drie verschillende cuvettes, 'Mystery 9', 'Mystery 62' en 'Mystery 82', met onbekende concentratie gemeten. De absorptiespectra worden getoond op Figuur 14. Hun maximale absorbantie  $A(\lambda_{max})$  en de overeenkomstige concentratie die berekend werd met (6) staan in Tabel 4.

**Tabel 3:** De concentratie  $c$  en absorbantie  $A(\lambda_{max})$  bij verschillende calibratie-oplossingen met  $1\sigma$ -fout. De waarden van  $c$  komen uit [3].

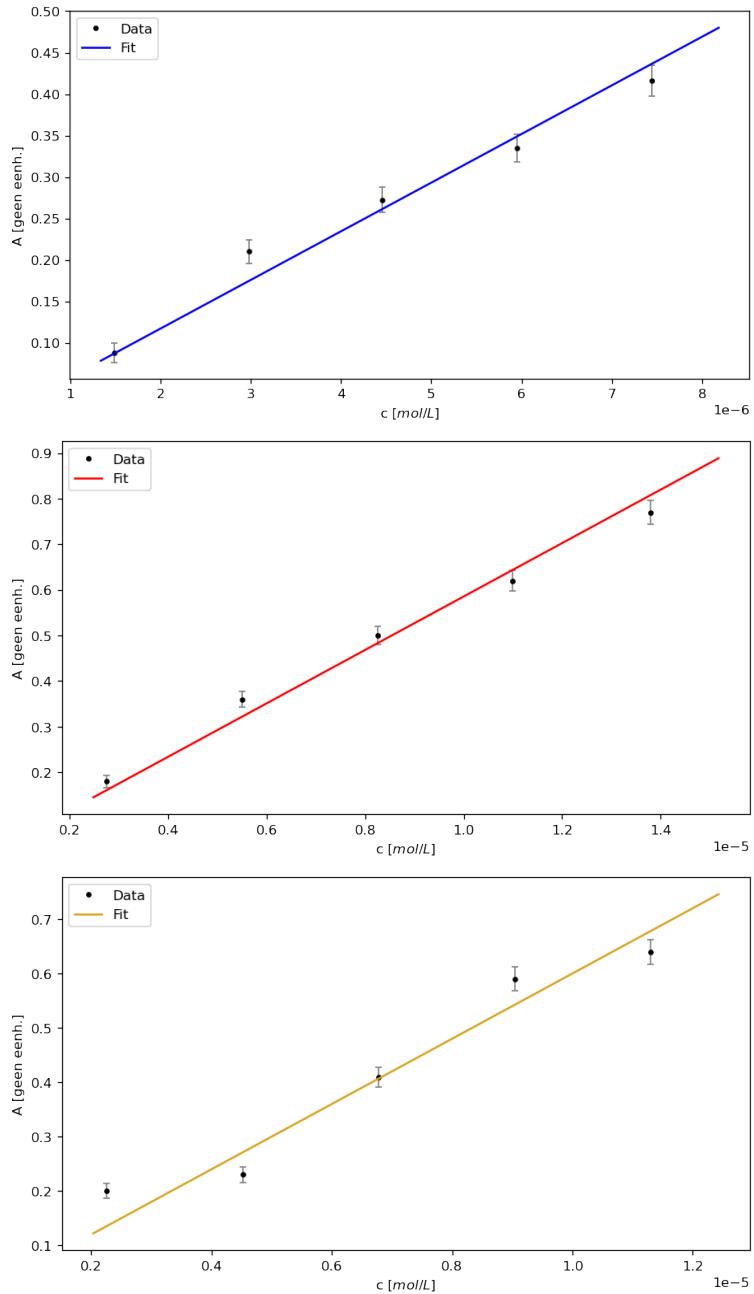
(a) Blauw		(b) Rood		(c) Geel	
$c$ [ $\mu\text{mol/L}$ ]	$A$ [geen eenh.]	$c$ [ $\mu\text{mol/L}$ ]	$A$ [geen eenh.]	$c$ [ $\mu\text{mol/L}$ ]	$A$ [geen eenh.]
7.44	$0.42 \pm 0.02$	13.8	$0.77 \pm 0.03$	11.3	$0.64 \pm 0.02$
5.95	$0.34 \pm 0.02$	11.0	$0.62 \pm 0.02$	9.04	$0.59 \pm 0.02$
4.46	$0.27 \pm 0.02$	8.26	$0.50 \pm 0.02$	6.78	$0.41 \pm 0.02$
2.98	$0.21 \pm 0.01$	5.50	$0.36 \pm 0.02$	4.52	$0.23 \pm 0.02$
1.49	$0.09 \pm 0.01$	2.75	$0.18 \pm 0.01$	2.26	$0.20 \pm 0.01$



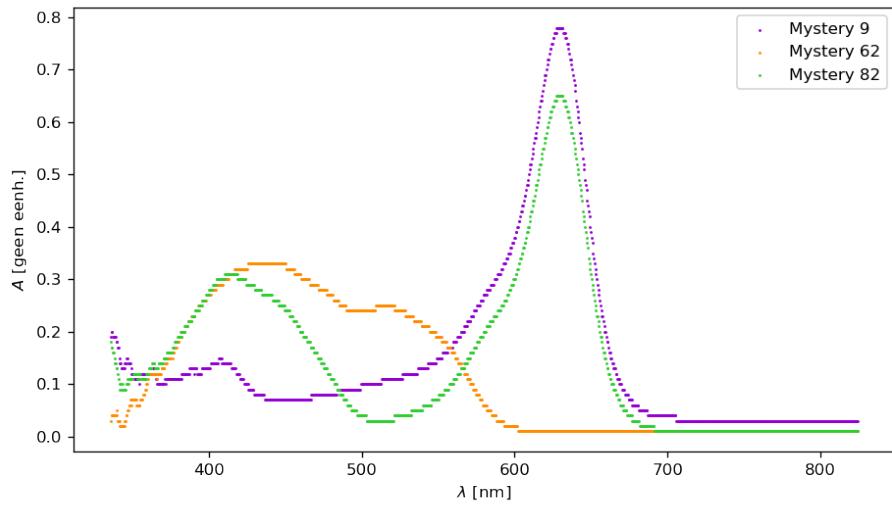
**Figuur 11:** De absorbantie  $A(\lambda)$  voor de verschillende calibratiecuvettes met rode oplossing (van boven naar beneden: oplossing 1 t.e.m. 5). De zwarte verticale lijn is getrokken bij de golflengte waarvoor  $A$  maximaal is. Het is de waarde van de absorbantie op dit punt,  $A(\lambda_{max})$ , die gebruikt wordt in de verdere analyse.



**Figuur 12:** De absorbantie  $A(\lambda)$  voor de verschillende calibratiecuvettes met gele oplossing (van boven naar beneden: oplossing 1 t.e.m. 5). De zwarte verticale lijn is getrokken bij de golflengte waarvoor  $A$  maximaal is. Het is de waarde van de absorbantie op dit punt,  $A(\lambda_{max})$ , die gebruikt wordt in de verdere analyse.



**Figuur 13:** De maximale absorbantie in functie van concentratie met bijhorende lineaire fit volgens (6) voor respectievelijk de blauwe, gele en rode oplossingen (van boven naar onder). De data met fout is weergegeven in Tabel 3.



**Figuur 14:** Het absorbantiespectrum van de verschillende cuvettes met onbekende concentratie zoals gemeten met de digitale spectrometer. De kleur op de grafiek komt overeen met de kleur die de oplossing zelf had (9 Paars, 62 Oranje en 82 Groen).

## 4 Discussie

Om te testen of de fits aanvaardbaar zijn, wordt er een  $\chi^2$ -test uitgevoerd op het niveau  $\alpha = 5\%$ .

### 4.1 Sensoren voor beide meetsystemen

De sensor van het analoge meetsysteem is het oog en die van het digitale meetsysteem de CCD-array. De waarnemingen van de analoge spectrocoop zijn subjectiever dan die van de digitale. Aangezien het spectrum rechtstreeks met het oog wordt waargenomen, kan er direct ingespeeld worden op ruis op de data en kan de opstelling worden aangepast (door bv. een zwart doek over het apparaat te leggen). Anderzijds zit er een grotere fout op de gemeten golflengte omdat verschillende waarnemers de hoek  $\theta$  anders bepalen.

Doordat bij de digitale spectrometer het hele meetproces digitaal plaatsvindt, zijn de waarnemingen objectiever. De kans op afleesfouten en interpolatiefouten verkleint en er kan meer data worden verworven.

**Tabel 4:** De gemeten maximale absorbantie  $A(\lambda_{max})$  voor de cuvettes met onbekende concentratie. De concentratie  $c$  werd berekend via de fit volgens (6) met de gevonden  $B$ . Alle fouten zijn  $1\sigma$ -fouten.

Oplossing	$A(\lambda_{max})$ [geen enh.]	$c$ [ $\mu\text{mol/L}$ ]
Mystery 9	$0.78 \pm 0.03$	$13.2 \pm 0.5$
Mystery 62	$0.33 \pm 0.02$	$5.6 \pm 0.3$
Mystery 82	$0.65 \pm 0.02$	$11.0 \pm 0.4$

## 4.2 Verschil in resolutie voor beide meetsystemen

De resolutie van de analoge spectrometer wordt o.a. bepaald door de aflezing van de noniusschaal. De ijk van deze schaal is  $\Delta = 0.00015$ . De schaal is zelfs wanneer ze wordt afgelezen met een vergrootglas zeer klein. Daarom werd een extra fout in rekening gebracht. Ook de uitlijning van de kruisdraad met de spectraallijnen is niet perfect en dit induceert een extra fout. Bij de metingen van  $\delta_0$  blijkt al dat de statistische fout  $\sigma_s = 0.0006$  en  $\sigma_{sys} = 0.00004$ , dus de statistische fout is een orde groter dan de systematische fout. Bij de berekening van de fouten op  $\delta_m$  heeft  $\Delta_{sys}$  ook geen effect want afgerond geldt  $\sigma_{\delta_m} = \sigma_s$ .

De resolutie op  $I$  is  $\Delta_I = 1$  telling en  $\Delta_\lambda = 0.5 \text{ nm}$  op  $\lambda$  voor de digitale spectrometer. Deze fout wordt voornamelijk bepaald door de afstand  $\Delta x$  die de invallende stralen afleggen tussen de CCD-array en het einde van de optische fiber. Als  $\Delta x$  groter is, zal het licht meer verstrooid zijn en zal er veel ruis op  $I$  zitten. Als echter  $\Delta x$  kleiner is, dan is de afstand tussen de verschillende golflengten op de CCD-array kleiner, zodat de resolutie van  $\lambda$  vergroot.

De fundamentele lijnbreedte  $\Delta\lambda$  is van de orde van  $1 \times 10^{-14} \text{ m}$ . [7] De digitale spectroscoop haalt deze dus niet. Als  $\Delta x$  vergroot wordt, dan kan deze limiet wel gehaald worden. De spectroscoop zou dan wel zeer gevoelig moeten zijn omdat het licht sterk verstrooid is op die afstand.

## 4.3 Gebruik van de software OceanView

Tijdens de metingen werd de functie 'Base Line Correction' van de verwerkingssoftware afgезet. Zo vallen de kleine toppen van het spectrum beter op en is het duidelijk dat elke piek een breedte heeft.

De invloed van omgevingsfactoren wordt geminimaliseerd door eerst het spectrum te meten wanneer de bron uitstaat. Via de knop 'Background' wordt dit van de volgende metingen waarbij de bron aanstaat, afgetrokken. Voor de metingen van het absorptiespectrum worden de achtergrond en een referentiemeting van een cuvette met water in rekening gebracht wanneer het absorptiespectrum wordt verwerkt. Zo worden de effecten van de achtergrond en de cuvette zelf verkleind.

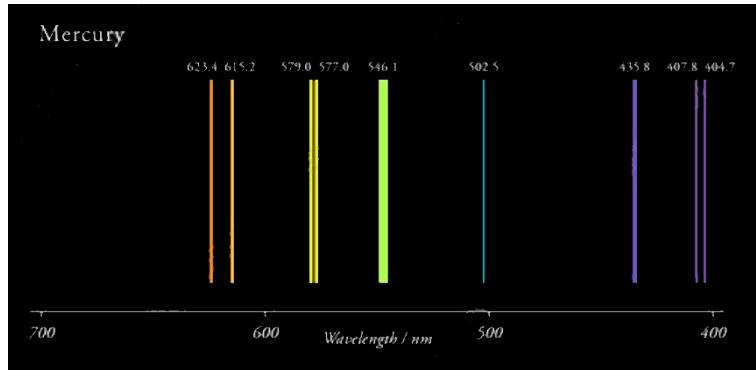
De ingebouwde functie 'Automatic' stelt het bereik van de intensiteit af zodat er noch te veel, noch te weinig fotonen op de CCD-array vallen. Verder wordt 'Scans to Average' op 10 gezet, zodat uitschieters door o.a. omgevingsfactoren uitgemiddeld worden.

## 4.4 De dispersiekromme $n(\lambda)$ en de onbekende lamp

Voor de fitparameters (3) is  $\chi^2_{red} = 2.07$  en  $p = 0.0662$ . Deze fit is een onderfit, maar wordt aanvaard op het betrouwbaarheidsniveau.

Eerst wordt het spectrum van de onbekende lamp (Figuur 5) kwalitatief met het spectrum van kwik op Figuur 15 vergeleken. De sterke groene en violette lijnen komen duidelijk met elkaar overeen. De dikke gele lijn op Figuur 5a bestaat uit twee dunngere lijnen die niet te onderscheiden zijn op de foto. Ook de zwakke groen-blauwe en dubbele violette lijn zijn aanwezig op zowel Figuur 5b als Figuur 15 aanwezig.

Voor de kwantitatieve metingen wordt Tabel 5 in de Bijlagen gebruikt. De sterke groene en violette lijn bij respectievelijk 546 nm en 435 nm zijn terug te vinden in de tabel als lijn 14 en 10 binnen het  $1\sigma$ -interval. De lijnen 16 en 17 vormen samen de dikke, gele lijn bij 576 nm. De zwakke violette lijn komt overeen met de lijn 6. De zwakke groen-blauwe lijn komt niet met een lijn uit Tabel 5.



**Figuur 15:** Het emissiespectrum van He. [8]

Figuur 15 en Figuur 7 komen ook overeen. Bij 545 nm en 570 nm zijn er op beide spectra resp. een sterke groene en dubbele gele lijn. Ook de sterke en dubbele zwakke violette lijn bij resp. 435 nm en 400 nm zijn te herkennen op beide emissiespectra. De onbekende lamp wordt dus geïdentificeerd als een Hg-lamp.

De toppen van het spectrum van de Hg-lamp van Figuur 6 vallen samen met die van de TL-lamp, die getoond worden op Figuur 8. Ook de dubbele lijn bij 570 nm is herkenbaar. De verhouding tussen de intensiteiten van verschillende toppen zijn ook gelijk voor de twee figuren en er wordt besloten dat de TL-lampen Hg bevatten. In de literatuur wordt gevonden dat er inderdaad een kleine hoeveelheid kwik in een TL-lamp zit. [9]

#### 4.5 Fit van de intensiteit

Voor de fit van de hoogste piek uit het He-spectrum van Figuur 6 werden de parameters (5) gevonden met  $\chi^2_{red} = 1.956$  en  $p = 0.0867$ . De fit is dus een onderfit, maar wordt aanvaard. Het Lorentzprofiel kan dus gebruikt worden om spectraallijnen te fitten. Zoals berekend in de voorbereiding heeft ook dit model een fundamentele breedte in de orde van  $1 \times 10^{-14}$  m omwille van het onzekerheidsprincipe. Door de excitatietijd van de elektronen artificieel te verkorten, kan men de fundamentele breedte verkleinen. Dit wordt echter begrensd aangezien de excitatietijd slechts beperkt verkort kan worden. [10]

#### 4.6 Fit van de absorbantie van de cuvettes

Bij de absorbantiespectra wordt er een minimum verwacht bij de kleur die niet wordt geabsorbeerd, ofwel bij de kleur die zichtbaar is. Op Figuur 10 is inderdaad een minimum te zien bij blauw rond 475 nm, bij Figuur 11 rond 650 nm en bij Figuur 12 rond 550 nm.

Het maximum  $A(\lambda_{max})$  van de absorbantiespectra van de verschillende cuvettes werd gefit volgens model (6). Van de gevonden parameters (7) wordt alleen  $B_{blauw}$  geaccepteerd. Op de waarde  $B = (9100 \pm 700)$  L/mol zal dus een grotere fout zitten dan de berekende 700 mol/L. De fout op de concentraties in Tabel 4 is bijgevolg groter dan wat in de tabel staat. Een mogelijke oorzaak van kleine p-waarden is een slechte keuze van  $\lambda_{max}$ . Verder onderzoek van de data kan waarden voor  $B_{rood}$  en  $B_{geel}$  geven met een kleinere fout.

## 5 Conclusie

De dispersiekromme  $n(\lambda)$  van het gelijkzijdige prisma werd bepaald als

$$n(\lambda) = 1.5940 + \frac{9210 \text{ nm}^2}{\lambda^2}$$

en is aanvaardbaar op  $\alpha = 5\%$ . Daarna werd de onbekende lamp geïdentificeerd als een Hg-lamp met zowel de analoge als de digitale spectrometer en werd gevonden dat Hg aanwezig is in TL-lampen. Het verband  $A(c)$  werd gefit volgens het model van Lambert-Beer en werd aanvaard voor de blauwe reeks cuvettes, maar verworpen voor de gele en rode reeks.

## Referenties

- [1] Wikipedia. Spectrometrie; 2020. Geraadpleegd op 7 maart 2022 via <https://nl.wikipedia.org/wiki/Spectroscopie>.
- [2] Calibration samples en dyes information. Experimentele basistechnieken in de natuurkunde G0P32A. KU Leuven; 2022.
- [3] Digitale spectrometer. Experimentele basistechnieken in de natuurkunde G0P32A. KU Leuven; 2022.
- [4] Analoge Prismaspectrometer: Dispersiekromme van een prisma. Experimentele basistechnieken in de natuurkunde G0P32A. KU Leuven; 2022.
- [5] Fitopgave. Experimentele basistechnieken in de natuurkunde G0P32A. KU Leuven; 2021.
- [6] Stringfixer. Wet van Beer-Lambert; 2022. Geraadpleegd op 5 maart 2022 via [https://stringfixer.com/nl/Beer-Lambert\\_Law](https://stringfixer.com/nl/Beer-Lambert_Law).
- [7] Claeys L, Van der Borght R. Voorbereiding proef Analoge spectrometrie. Experimentele basistechnieken in de natuurkunde G0P32A. KU Leuven; 2022.
- [8] Science Photo Library. H-He-Hg emission spectra; 2022. Geraadpleegd op 6 maart 2022 via <https://www.sciencephoto.com/media/540572/view/h-he-hg-emission-spectra>.
- [9] Intellisol. Wat moet je doen als een tl-lamp breekt?; 2018. Geraadpleegd op 6 maart 2022 via <https://intellisol.be/wat-moet-je-doen-als-een-tl-lamp-breekt/>.
- [10] Wikipedia. Spectral line; 2022. Geraadpleegd op 6 maart 2022 via [https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral\\_line#Natural\\_broadening](https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_line#Natural_broadening).
- [11] National Institute for Standards and Technology. Strong Lines of Mercury (Hg); 2021. Geraadpleegd op 6 maart 2022 via <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm>.

## 6 Bijlagen

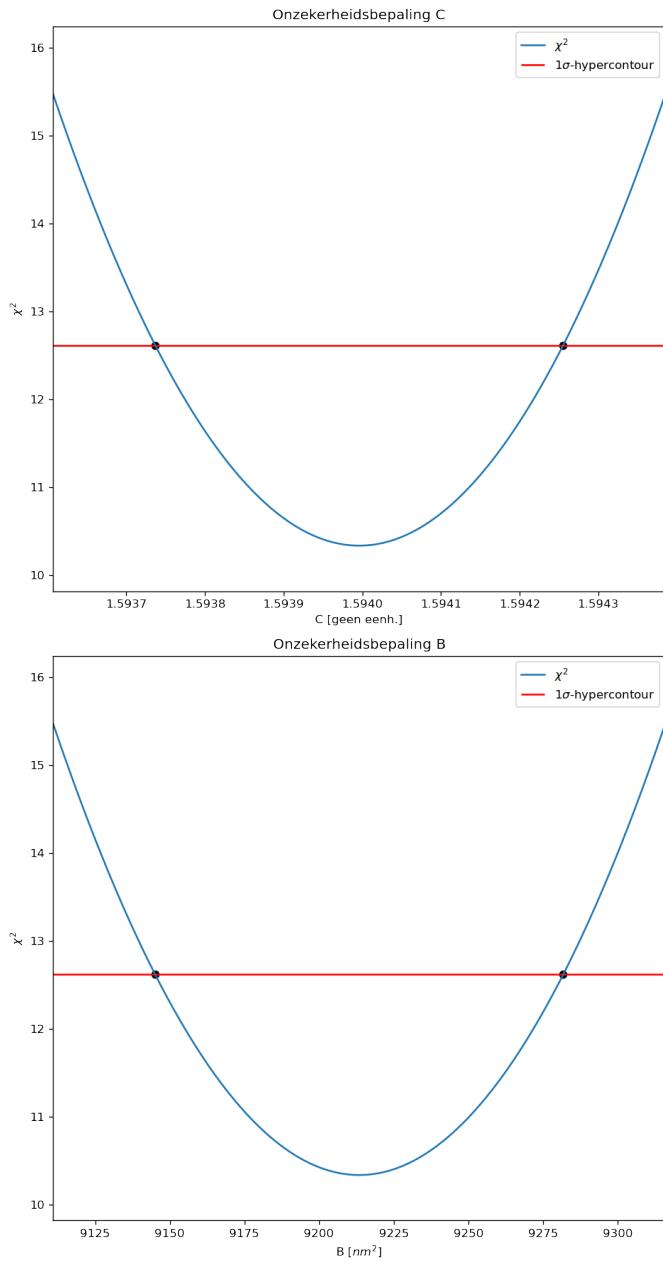
### 6.1 Spectraallijnen Hg

**Tabel 5:** De intensiteit  $I$  en golflengten  $\lambda$  van de spectraallijnen van Hg I en Hg II voor de zichtbare golflengten. De fouten verschillen voor elke meting en zijn te vinden op [11].

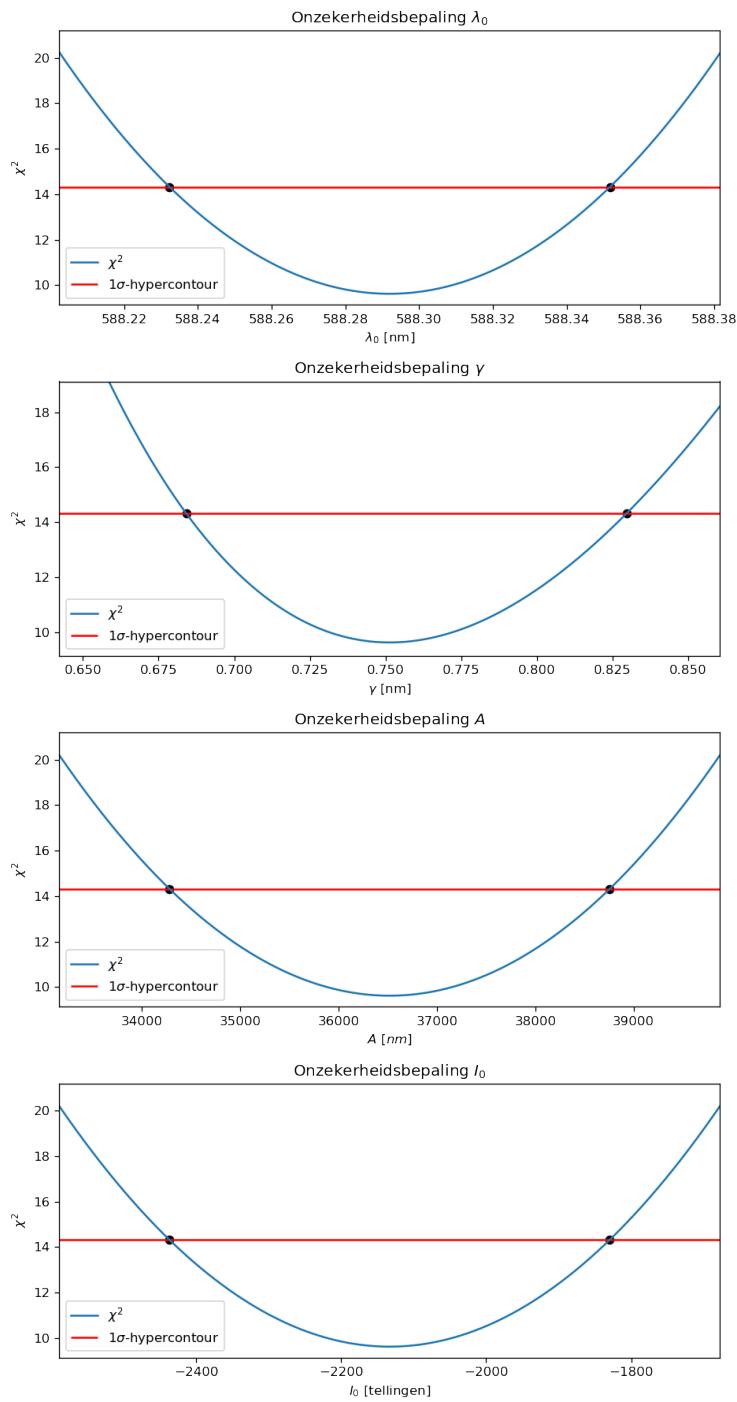
Nummer	$I$ [tellingen]	$\lambda$ [\AA]	Isotoop
1	10	3532.594	Hg II
2	10	3605.762	Hg II
3	600	3650.153	Hg I
4	70	3654.836	Hg I
5	50	3663.279	Hg I
6	1000	3983.931	Hg II
7	400	4046.563	Hg I
8	60	4339.223	Hg I
9	100	4347.494	Hg I
10	1000	4358.328	Hg I
11	12	5128.442	Hg II
12	15	5204.768	Hg II
13	80	5425.253	Hg II
14	500	5460.735	Hg I
15	200	5677.105	Hg II
16	50	5769.598	Hg I
17	60	5790.663	Hg I
18	12	5871.279	Hg II
19	20	5888.939	Hg II
20	15	6146.435	Hg II
21	250	6149.475	Hg II
22	25	7081.900	Hg I
23	6	7346.508	Hg II

### 6.2 Foutenanalyse

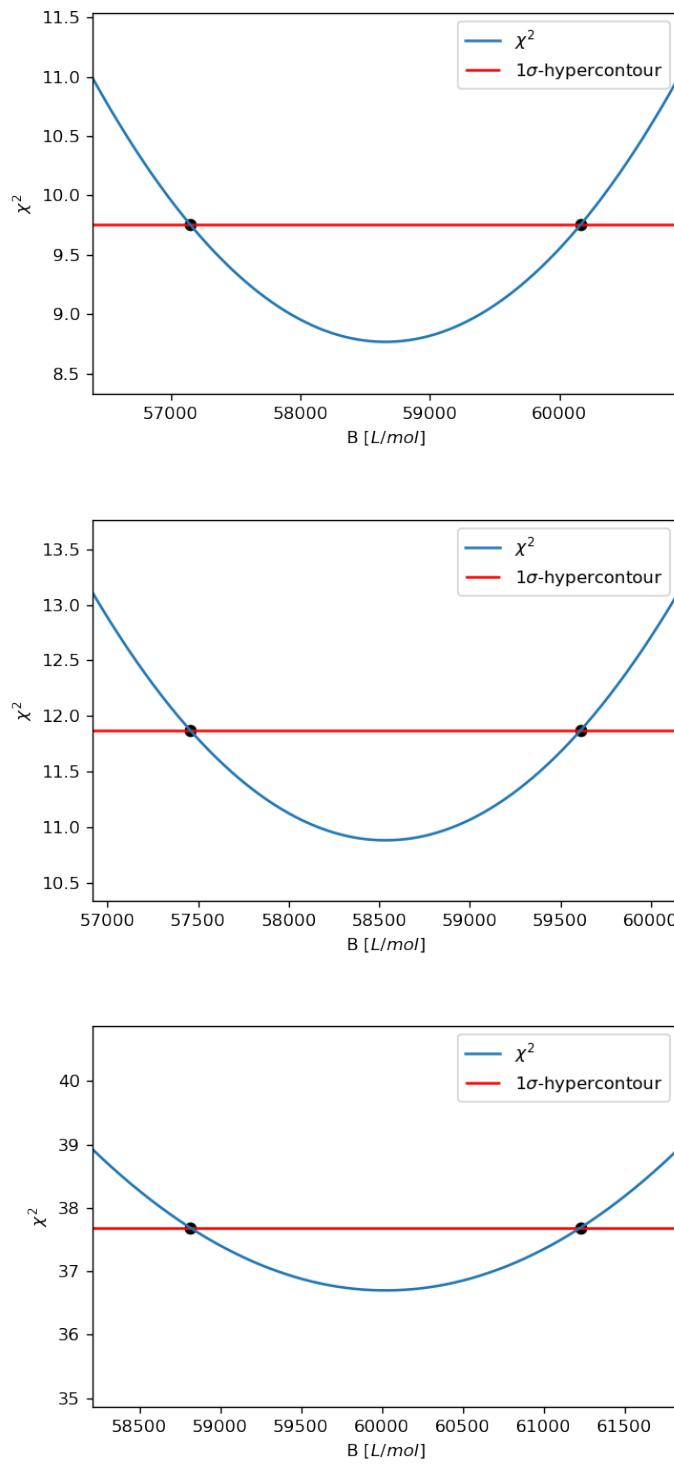
Onderstaande grafieken geven de bepaling van de  $1\sigma$ -fout op de fitparameters van de verschillende fits weer, met behulp van de  $1\sigma$ -hypercontour van de  $\chi^2$ -verdeling.



**Figuur 16:** De foutenanalyse van de parameters voor de Cauchy-fit van  $\lambda$  en  $n$  voor de analoge spectrometer. (Figuur 4)



**Figuur 17:** De foutenanalyse van de parameters voor de Lorenz-fit van een emissie-piek. (Figuur 9)



**Figuur 18:** De foutenanalyse van de parameters voor de absorbantiefit (Figuur 13). Dezelfde volgorde wordt gehanteerd als in heel het verslag, van boven naar beneden gaat het respectievelijk over de blauwe, rode en gele concentratie.