

# Slutrapport Kvantfysik TIF091/096 -

studier av atomspektran hos olika grundämnen

Linus Brink

mail: brinkl@student.chalmers.se

Oscar Stommendal

mail: oscarsto@student.chalmers.se

2022-12-18

## Sammandrag

Spektroskopi är centralt inom vetenskapen, exempelvis för att undersöka materials struktur och egenskaper. Syftet med denna studie var att använda spektroskopi på atomär nivå för att ta reda på emissionsspektrat för grundämnena kadmium och neon, samt rita upp ett energinivådiagram för kadmium. Spektrat för de två grundämnena togs fram genom att använda en/ett spektrallampa/spektralrör med ämnet samt en spektrometer med tillhörande elektronisk utrustning, vilka styrdes genom LABVIEW. Det resulterade emissionsspektrat för kadmium stämde väl överens med tidigare genomförda mätningar och energinivådiagrammet för kadmium visade tydlig koppling till framlagd teori och kunde konstruerades genom att beräkna energin som de resulterade övergångarna gav upphov till. Emissionsspektrat för neon var som väntat betydligt mer komplext. Anledningen till detta är främst neons ädelgasstruktur i jämförelse med kadmiums få valenselektroner som, tillsammans med urvalsregler för emission, leder till många fler tillåtna övergångar. Båda spektrumen hade till viss del avvikande resultat från tidigare studier, vilka främst tros bero på användning av mindre avancerad utrustning i denna studie och eventuella främmande ämnen/smuts i ljuskällorna.

*Nyckelord: Emissionsspektrum, spektrometer, energinivådiagram, urvalsregler.*

Civilingenjörsprogrammet i Teknisk fysik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg, Sverige

# Innehåll

<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Teori</b>	<b>1</b>
2.1 Allmän kvantfysik . . . . .	1
2.2 Energinivåer och elektronövergångar . . . . .	2
2.2.1 Tillåtna och förbjudna övergångar . . . . .	3
<b>3 Metod och försöksuppställning</b>	<b>4</b>
3.1 LABVIEW-programmering . . . . .	4
3.2 Bestämning av emissionsspektrat för Cd och Ne . . . . .	4
3.3 Bestämning av energinivådiagrammet för Cd . . . . .	5
<b>4 Resultat</b>	<b>5</b>
<b>5 Diskussion</b>	<b>7</b>
5.1 Kalibrering av spektrometern . . . . .	7
5.2 Emissionsspektrum och energinivådiagram för kadmium . . . . .	8
5.3 Emissionsspektrum för neon . . . . .	9
<b>6 Slutsatser</b>	<b>10</b>
<b>Referenser</b>	<b>10</b>
<b>A Energinivåer för Cd</b>	<b>12</b>
<b>B Övrig teori/metod</b>	<b>13</b>
B.1 Tillåtna värden på kvanttalen . . . . .	13
B.2 Singlett- dublett- och triplett-tillstånd . . . . .	13
B.3 Program i LABVIEW . . . . .	13
B.4 Gittereffektivitet . . . . .	14
B.5 Kalibrering av spektrometern . . . . .	14
B.5.1 Diskussion – kalibrering av spektrometern . . . . .	14
<b>C Övriga resultat</b>	<b>15</b>
C.1 Beräknade energinivåer och motsvarande övergångar för Cd . . . . .	15
C.2 Kalibrering av spektrometern . . . . .	16
C.3 Fokuserade bilder på emissionsspektrat för Cd . . . . .	16
C.4 Fokuserade bilder på emissionsspektrat för Ne . . . . .	18
C.5 PYTHON-kod . . . . .	19
C.6 Feluppskattning av energin . . . . .	19
<b>D Spektrometern</b>	<b>20</b>
<b>E Labblogg</b>	<b>21</b>

# 1 Inledning

Att atomer och material avger ljus då energi tillförs genom till exempel värme har länge varit känt. Men det var inte förrän Niels Bohr presenterade sin atommodell 1913 som detta fenomen kunde ges en början till en förklaring. Modellen gick ut på att elektronerna rör sig i banor runt atomkärnan och att de därför endast har diskreta energitillstånd. Förklaringen fungerade dock inte för alla atomer och grundämnen. Modellen blev till viss del ersatt av Erwin Schrödinger och Werner Heisenberg, vars teori idag kallas för Kvantfysik, för att beskriva alla slags atomer, enkla molekyler och joner. Idag har detta fenomen fått namnet emission och kunskapen kring detta har till och med fått ett eget samlingsnamn; spektroskopi [1].

Då vi idag vet ännu mer än för 100 år sedan har användningsområdena för detta blivit många. Det har till exempel gett oss kunskap om vilka enskilda grundämnen som kemiska ämnen består av och hur molekyler och ämnen är uppbyggda. Även astronomer kan använda spektroskopi för att studera avlägsna galaxer. Dessutom har spektroskopin legat som grund för många idag grundläggande fysikaliska teorier, som just kvantfysiken och relativitetsteorin [1].

Syftet i denna studie är tvådelat, där det första ämnar till att bestämma emissionsspektrumet samt motsvarande energinivådiagram för Kadmium (Cd). Experimentet kommer att genomföras med hjälp av olika optiska komponenter och en digital spektrometer. I den andra delen av studien ska emissionsspektrumet för Neon studeras, vars spektrum är mer komplext än det för Kadmium. Detta görs med samma metod och utrustning som när emissionsspektrumet i den första delen studeras.

## 2 Teori

I detta avsnitt beskrivs nödvändig teori som krävs för att följa med i rapporten och som står till grund för fenomenet emission.

### 2.1 Allmän kvantfysik

Som inledningen antyder har fenomenet att atomer och molekyler kan avge strålning i form av ljus länge varit känt. Det var Niels Bohr som med hjälp av Rutherfords atommodell lade fram sin egen teori om hur elektronerna i atomens omloppsbanor endast kunde anta vissa diskreta energinivåer. Bohrs upptäckter förbättrades senare av bland annat Schrödinger och Heisenberg med flera vid födelsen av det vi idag kallar kvantfysik [2].

När man talar om kvantfysik är det viktigt att introducera kvanttalen. Dessa relaterar värdena på olika fysikaliska storheter för bland annat elementarpartiklar. Detta är den fundamentala skillnaden mellan klassisk fysik och kvantfysik, kvanttalen antar endast vissa diskreta värden och således även storheterna. Man säger att värdena i kvantfysiken är kvantiserade. För atomer, som studeras i detta experiment, brukar man ofta tala om kvanttalen  $n$ ,  $l$  och  $m_s$ . Dessa beskriver energinivån för elektronen (brukar ses som ”elektroniska” i Bohrs atommodell), det orbitala rörelsemängdsmomentet (som kan ses som en ”subnivå” till energinivån som  $n$  motsvarar) samt spinnet på elektronerna. Tillåtna värden på dessa och följande kvanttal föreligger i appendix B.1.

Med hjälp av dessa kan vi beskriva en atom och dess egenskaper kvantfysikaliskt. I denna studie är det dessutom bra att definiera det totala rörelsmängdsmomentet som har kvanttalet  $j$ . Detta är rent storhetsmässigt det orbitala rörelsemängdsmomentet adderat med spinnet, det vill säga  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$  (detta brukar kallas LS-koppling, vilket är något som i allmänhet fungerar för lätta atomer). Låt oss också definiera de totala värdena på  $\ell$ ,  $s$  och  $j - L, S$  och  $J$  som för diatomära molekyler definieras enligt

$$\begin{aligned} L &= |\ell_1 - \ell_2|, \dots, |\ell_1 + \ell_2| \\ S &= |s_1 - s_2|, \dots, |s_1 + s_2| \\ J &= |L - S|, |L - S| + 1, \dots, |L + S|. \end{aligned}$$

Detta möjliggör en simpel notation för elektroner i en atom enligt

$$n^{2S+1}L_J, \quad (1)$$

där  $n$  alltså är huvudkvanttalet eller ”skalet”,  $S$  det totala spinnkvanttalet (vilket vi kommer tillbaka till senare) och  $L$  samt  $J$  som ovan beskrivet.  $L$  brukar ofta kopplas samman med en bokstav, där de tre första värdena på  $L$  motsvarar  $S$ ,  $P$  och  $D$  för att sedan fortsätta i alfabetisk ordning [2]. Som vi också kommer se senare skriver man ibland bara  $n\ell^N$ , där  $\ell$  ges samma bokstavskoppling som  $L$  fast gemener istället för versaler och  $N$  är antalet elektroner i subskalet  $\ell$ .

## 2.2 Energinivåer och elektronövergångar

I denna studie ska som bekant emissionsspektrat för två olika grundämnen bestämmas. Emission kan kortfattat förklaras som ljuset (energin) som avges när elektroner i atomer genomför övergångar från högre till lägre tillstånd, även kallade kvanttillstånd eller energinivåer. Denna energi kan analytiskt beräknas kvantfysikaliskt genom att lösa Schrödingerekvationen. Detta är relativt simpelt för de enklaste systemen med en elektron; H, He<sup>+</sup> och Li<sup>2+</sup>, men då systemen ökar i storlek (till exempel fler elektroner) och komplexitet blir matematiken bakom detta krångligare och man får då ta till andra metoder [3].

Kadmium och neon, som undersöks i denna studie, hör till mer komplexa system. Dessa energinivåer bestäms då i allmänhet genom experiment (för kadmium finns energinivåerna bifogade i sin helhet i appendix A) och övergångarna mellan de olika nivåerna får istället beskrivas och förklaras kvantfysikaliskt, då de analytiska metoderna blir alldelvis för komplicerade [2].

På grund av de diskreta energinivåerna en atom kan anta kan energi tillföras till den så att den *exciteras* till en högre energinivå. Den har då absorberat energi. Atomen kommer sedan i allmänhet att spontant avge (emittera) energin för att återgå till ett lägre energitillstånd då detta är mer stabilt [4]. Energinivåerna är relaterade till kvanttalet  $n$  på så sätt att  $n = 1$  svarar mot grundtillståndet för atomen, det vill säga lägsta energinivån.

Den energi som avges när elektronerna rör sig mellan tillstånd är i form av fotoner, eller ljus som det mer vardagligt beskrivs. Energin i en foton ges av [5]

$$E_{foton} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

där  $h$  är Planks konstant,  $\nu = c/\lambda$  ljusets frekvens,  $\lambda$  dess våglängd och  $c$  ljusets hastighet. Om våglängderna som motsvarar en viss energiövergång plottas mot intensiteten fås det så kallade emissionsspektrat för ämnet. Sedan kan också ett energinivådiagram för ämnet skapas genom att visa energierna och övergångarna som avger dessa våglängder för ämnet.

### 2.2.1 Tillåtna och förbjudna övergångar

När atomen tillförs energi kan alltså elektronerna exciteras och gå till ett högre energitillstånd, men det är inte vilka elektroner som helst utan *valenselektronerna* som genomför övergångarna - de elektronerna som befinner sig i energinivån längst ut, det vill säga de som har högst värde på  $n$ . Varför det är så är enkelt att förstå - attraktionskraften från kärnan blir svagare desto längre ifrån den elektronerna befinner sig och det krävs därför lägst energi för dessa att exciteras.

Som beskrivet i avsnitt 2.1 kan elektroner ha ett visst spinn. Spinn är en kvantfysikalisk egenskap hos partiklar, precis som exempelvis rörelsemängdsmoment är en fysikalisk (och kvantfysikalisk) egenskap. Beroende på valenselektronernas spinn och antal kan de anta ett antal olika ”subtillstånd”, vilka bidrar till vissa begränsningar när det kommer till vilka energiövergångar som är möjliga. Kadmium och neon har 2 respektive 8 valenselektroner, vilket gör att denna laboration främst kommer att behandla de så kallade singlett- dublett- och triplett-tillstånden [2].

Singlett-tillstånd sägs vara tillstånden med totalt spinn  $S = 0$ . Analogt innehåller dubblett-tillståndet att  $S = 3/2$  och triplett-tillståndet att  $S = 1$ . Se också figur 6 i appendix B.2 för en illustration av dessa. I praktiken ger dessa tillstånd upphov till så kallade splittringar i spektrallinjerna. Detta eftersom singlett-tillstånden endast ger upphov till ett värde på  $J$ , medan dubblett- och triplett-tillstånden kan ge upp mot två respektive tre värden på detta kvanttal. Dessa olika värden på  $J$  motsvarar helt egna energinivåer (separerade endast av en mycket liten energi). I triplett-tillståndets fall kan detta liknas vid att en energinivå kan ”splittras” till tre närliggande sådana, vilket leder till en splittring även bland spektrallinjerna. Detta eftersom elektronerna helt enkelt får tre nya nivåer att gå till eller från och således bildas tre spektrallinjer inom ett litet intervall [2].

Vi kan nu presentera den första av de tre så kallade selektionsreglerna, vilka helt enkelt bestämmer vilka elektronövergångar som är mest sannolika. Den första säger att

$$\Delta S = 0, \quad (3)$$

vilket alltså innehåller att övergångar från singlett- till triplett-tillstånd och vice versa inte är tillåtna (att en övergång inte är tillåten betyder i detta fall att den är mycket osannolik, snarare än att den är omöjlig) [3]. Detta kan förstås genom att säga att det totala spinnet för atomen inte får ändras när fotoner avges. Vidare vet vi från avsnitt 2.1 att fotonens spinn är 1 (se appendix B.1) - den har alltså ett visst (totalt) rörelsemängdsmoment. Detta innehåller att om en foton ska kunna avges måste det ske en ändring i atomens totala rörelsemängdsmoment  $\mathbf{J}$ . Men eftersom den första selektionsregeln måste gälla medför detta att det måste vara det orbitala rörelsemängdsmomentet som ändras. Detta ger oss de två sista selektionsreglerna;

$$\Delta J = 0, \pm 1 \quad (0 \leftrightarrow 0 \quad \text{förbjudet}) \quad (4)$$

$$\Delta L = 0, \pm 1 \quad (0 \leftrightarrow 0 \quad \text{förbjudet}) \quad (5)$$

där  $J$  och  $L$  är definierade enligt ovan [3]. Varför övergångarna från  $J = 0$  till  $J = 0$  och analogt för  $L$  är förbjudna beror just på att fotonens spinn måste vara  $S = 1$ . Då måste det ske en ändring i  $L$  och således  $J$  för att fotonen ska få rörelsemängdsmoment. Det ser då motsägelsefullt ut att  $\Delta J$  och  $\Delta L$  kan vara 0, men det betyder nödvändigtvis inte att dessa storheter inte ändras. Eftersom vi här studerar ett system av två elektroner kan exempelvis  $\Delta L = 0$  innebära att tillståndet ändras för båda elektronerna samtidigt, men i motsatta riktningar. För en enskild atomövergång gäller det däremot rimligtvis att  $\Delta \ell \neq 0$ , det vill säga att skillnaden i det orbitala rörelsemängdsmomentet för en enskild elektron inte kan vara 0 efter en övergång. Att  $\Delta J = 0$  är möjligt är enkelt att förstå om vi studerar definitionen för  $J$  (samma som för  $j$ ). Det kan anta värdet mellan  $|L - S|$  och  $L + S$  – alltså medför inte 0 förändring i det totala rörelsemängdsmomentet  $J$  att det orbitala rörelsemängdsmomentet är oförändrat, vilket hade varit förbjudet [3].

### 3 Metod och försöksuppställning

I detta avsnitt förklaras hur emissionsspektrat för kadmium och neon framtogs, vilka metoder som användes för detta och varför de användes.

#### 3.1 LABVIEW-programmering

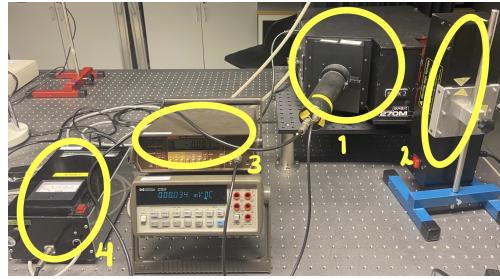
För att styra utrustningen som användes i laborationen och skapa ett diagram över hur strömmen (intensiteten) förändras över alla våglängder, och på så sätt få ut emissionsspektrat, skapades ett LABVIEW-program. Enkelt förklarat bestod detta av tre delar; en första del där programmet initierade kontakt med spektrometern och de övriga instrumenten med hjälp av några givna, inbyggda funktioner. Den andra delen är en **for-loop** som itererar över ett givet våglängdsintervall och för varje iteration mäter strömmen (även strömavläsar-funktionen var given). Den sista delen för över mätvärdena till matriser och plottar datan i en XY-graf. LABVIEW-programmet i sin helhet finns att tillgå i appendix B.3 (figur 7).

#### 3.2 Bestämning av emissionsspektrat för Cd och Ne

Innan mätningar kunde påbörjas för Cd och Ne, behövde spektrometern som användes kalibreras. Hur detta gjordes finns att läsa i appendix B.5. För att senare bestämma emissionsspektrat för de två grundämnena användes, för kadmium, en spektrallampa med ämnet, en spektrometer (modell SPEX 270M) och en pikoamperemeter (Unilab) med ansluten konstant strömförsörjning på 0,05 mA. För det mer komplicerade ämnet, neon, användes ett spektralrör istället för en spektrallampa. Spektrallampen sattes i en hållare för spektrallampor (modell Leybold 451 16) med ett anslutet spänningsaggregat för hållaren (modell Leybold 451 30).

Precis som vid kalibreringen riktades lampan/röret, beroende på mätning, mot ingången på spektrometern, se figur 1 nedan. Strömmen, som beror av intensiteten på ljuset som når spektrometers detektor, mättes med en pikoamperemeter. För att konvertera från ström till relativ intensitet utan någon given formel multiplicerades värdena på strömmen med inversen av det maximala värdet för denna. Det högsta värdet på strömmen ger alltså den relativia intensiteten 1.

Med utgång från spektrometers effektivitet (den släpper igenom ljus av vissa våglängder bättre än andra, se figur 8 i appendix C.4) gjordes kortare mätningar i regionerna med sämre effektivitet först, genom att korrigera steglängden och eller våglängdsintervallet. Detta för att undersöka om den fick utslag för spektrallinjer i dessa områden överhuvudtaget. Med detta i åtanke mättes sedan emissionsspektrat för kadmium från 300 nm till 700 nm, med steglängden 0,03 nm (kortast möjliga steglängd). För neon mättes det istället från 300 nm till 800 nm med samma steglängd. Detta eftersom det helt enkelt var i dessa intervall som spektrallinjer upptäcktes.



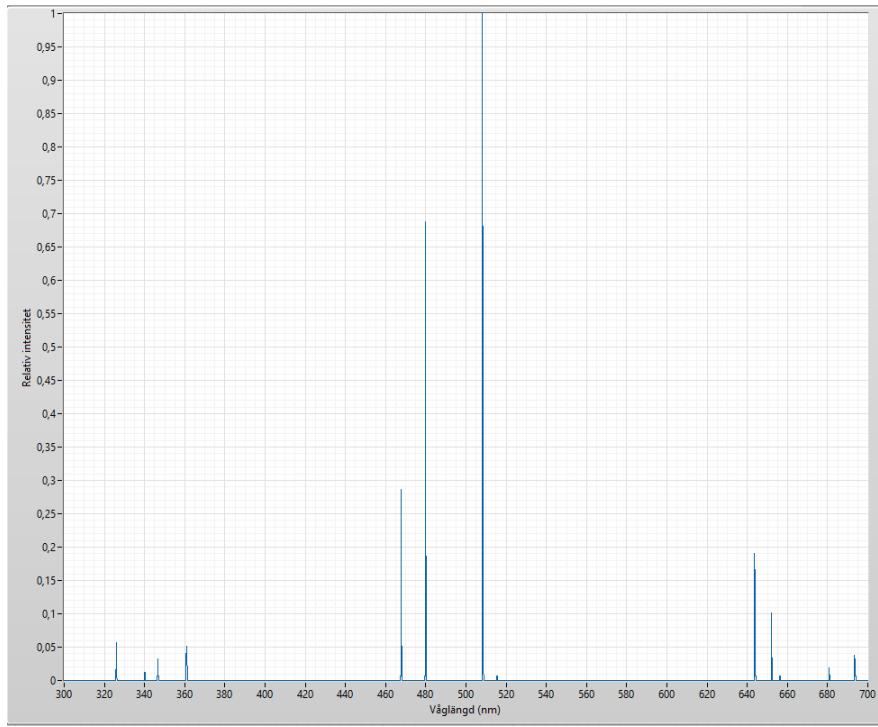
Figur 1: Uppställningen som användes för att bestämma emissionsspektrat för respektive grundämne. (1) visar spektrometern med tillhörande fotomultiplikator och (2) spektrallampan/röret som riktas mot denna. (3) visar pikoamperemetern vilken mäter strömmen som fotomultiplikatorn avger och (4) tillför ström till denna. Notera att samma upställning användes vid kalibreringen av spektrometern.

### 3.3 Bestämning av energinivådiagrammet för Cd

För att bestämma energinivådiagrammet för kadmium samlades de emitterade våglängderna i ett PYTHON-script där energin som våglängderna motsvarar beräknades med hjälp av ekvation 2. För att få ett exakt värde på våglängden (jämfört med att endast studera spektrat) implementerades en **max**-funktion i LABVIEW-programmet som plockade ut maxvärdet för intensiteten i ett givet interval och gav tillbaka motsvarande våglängd. Sedan studerades energinivåerna för kadmium i appendix A och med hjälp av de selektionsregler som presenterades i teorin togs de möjliga övergångarna fram. Sedan kopplades den övergång med energidifferens närmast den framtagna energin ihop. Detta upprepades för alla framtagna våglängder i emissionsspektrat och övergångarna presenterades sedan i ett handritat diagram där varje våglängd parades ihop med motsvarande övergång. En feluppskattning gjordes för energin som avgavs vid övergången genom att applicera felfortplantningsformeln på ekvation 2, där  $y$  motsvarar  $E$  och  $\Delta x_i$  är det uppskattade felet i mätningen för våglängden som ger upphov till energin  $E$  (se appendix C.6).

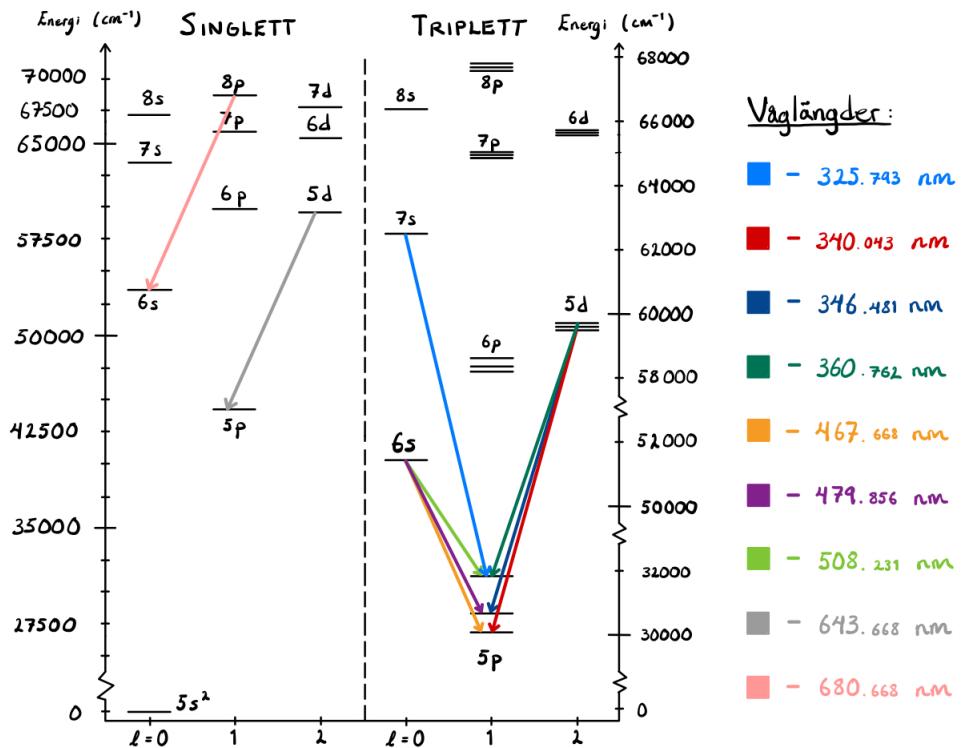
## 4 Resultat

Under kalibrering gav en spaltbredd in och spaltbredd ut på 0,02 mm samt en kalibreringsvåglängd på 1091,856 nm optimalt resultat. Dubbeltoppen hamnade då vid våglängderna 588,983 nm och 589,607 nm, vilket är en avvikelse från tidigare framtagna värden från NIST (National Institute of Standards and Technology) på  $\pm 0,013$  nm [6]. Denna felmargin användes sedan i felfortplantningsformeln (se appendix C.6) för att beräkna felet på energin från ekvation 2. I figur 2 nedan visas resultatet från mätningarna av emissionsspektrat för kadmium.



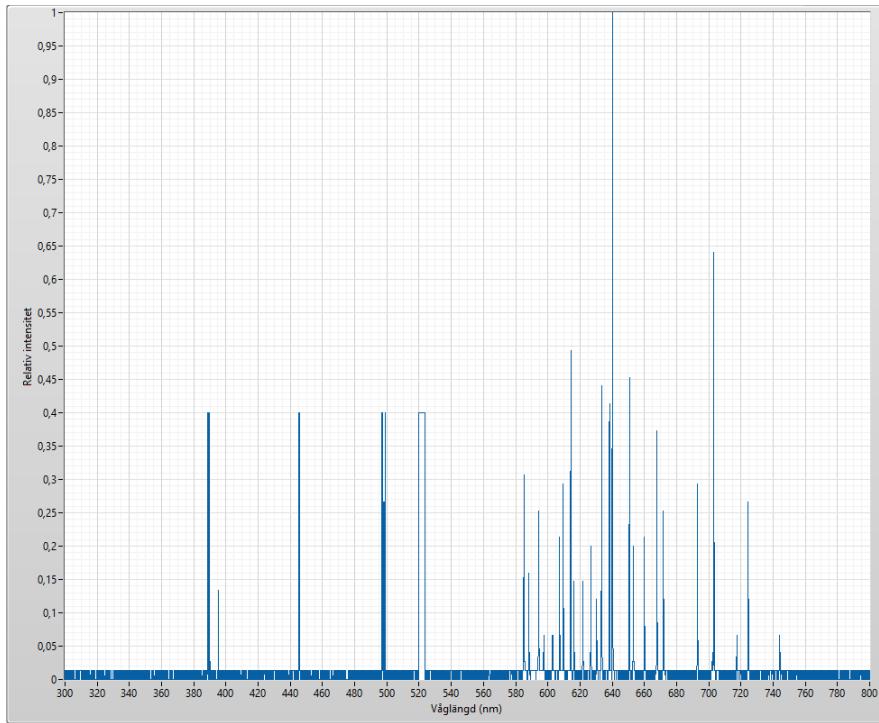
Figur 2: Emissionsspektrat som mättes upp för kadmium.

Utifrån detta spektrum skapades motsvarande energinivådiagram för Cd, se figur 3 nedan.



Figur 3: Observerade övergångar i ett energinivådiagram för kadmium.

Det resulterande emissionsspektrat över det mer komplicerade ämnet neon följer i figur 4 nedan.



Figur 4: Emissionsspektrat som mättes upp för neon.

Mer fokuserade bilder över de två emissionsspektrumen visas i appendix C.3 respektive C.4. I de figurerna som illustrerar kadmium visas även tidigare uppmätta spektrallinjer från NIST som jämförelse [7].

## 5 Diskussion

I detta avsnitt diskuteras resultaten, eventuella felkällor och övriga tankar kring de olika delarna i experimentet.

### 5.1 Kalibrering av spektrometern

Under kalibreringen av spektrometern fanns det olika parametrar att justera för att optimera resultatet. Det som gick att ändra var spaltbredd in och ut, steglängd och kalibreringsvåglängd. Genom att observera hur dubbeltoppen hos natrium ändrades kunde de olika parametrarnas inverkan på emissionsspektrat förstås, vilket kortfattat listas nedan. För en utförlig redogörelse, se appendix, avsnitt B.5.1.

- Spaltbredden in och ut påverkade resultatet på liknande sätt. En större spaltbredd släppte igenom mer ljus och ökade på så sätt intensiteten, men gjorde även att bredden för spektrallinjerna blev större och de blev svårare att frånskilja varandra.
- Kalibreringsvåglängden försköt spektrallinjerna i sidled. Denna justerades så att linjerna återgavs vid den teoretiskt sätt rätta våglängden.
- Steglängden, vilken sattes till minsta möjliga, 0,03 nm, för att få ett så exakt resultat som möjligt.

## 5.2 Emissionsspektrum och energinivådiagram för kadmium

Resultatet av emissionsspektrat för kadmium stämmer bra överens med tidigare mätningar som genomförts med mer precis och avancerad utrustning av NIST [7]. Detta kan ses i de mer fokuserade bilderna i appendix B.3, där dessa mätningars resultat finns illustrerade. Det finns dock spektrallinjer som ej dyker upp i emissionsspektrat från denna studie trots att de enligt tidigare framtagna värden bör finnas. Denna slutsats dras på grund av att dessa enligt NIST har en intensitet som är likvärdig med andra spektrallinjer som kan urskiljs och ligger bra till med hänsyn till effektiviteten hos gittret (se avsnitt 3.3).

Ett exempel på en våglängd för en sådan linje är 609,914 nm. Denna linje har med NISTS mått samma intensitet som linjen som urskiljs vid 479,856 nm och ligger dessutom bättre till med avseende på effektiviteten, men syns trots detta ej i denna mätning. Detta kan bero på att en steglängd på 0,03 nm helt enkelt är för lång och att denna spektrallinje ligger mellan två mätpunkter. Spektrallijens bredd hör samman med ett exiterat tillstånds livslängd enligt osäkerhetsprincipen för energi;

$$\sigma_E \cdot \sigma_t \geq \hbar/2 \quad (6)$$

där  $\sigma_E$  är osäkerheten i energin (spektrallijens bredd) och  $\sigma_t$  osäkerheten för tillståndets livslängd [3]. Med detta kan vi alltså dra slutsatsen att det finns livslängder  $t$  som gör att spektrallijens bredd är kortare än steglängden 0,03 nm och således inte syns i spektrat. En annan möjlig förklaring kan så klart också vara ett fel inom tekniken; mätningarna som genomfördes var relativt långa vilket kan bidragit till mätfel och en ”trötthet” hos utrustningen, men detta är samtidigt inte lika troligt.

På samma sätt som kända spektrallinjer för kadmium saknas i emissionsspektrat har denna studie också fått utslag vid våglängder som inte är kända sedan tidigare enligt NIST. Detta kan exempelvis bero på att lampen inte innehåller rent kadmium, utan mindre koncentrationer av andra ämnen. Det behöver nödvändigtvis inte vara andra grundämnen, utan till exempel sot eller annan smuts som ger utslag vid dessa våglängder. Dock avger kvicksilver (Hg) energi vid dessa våglängder, vilket också verkar vara en vanlig komponent i kadmium-lampor. Om detta finns i en liten mängd i lampen finns möjligheten att detta ger utslag i spektrat, speciellt eftersom dessa våglängder uppkommer i området där gittrets effektivitet är som störst.

En annan möjlig – om än mindre trolig, förklaring till dessa linjer är de så kallade Zeeman- och Starkeffekterna [8] [9]. Dessa fysikaliska fenomen orsakar splittringar och eller skiftnings i spektrallinjerna beroende på påverkan av ett yttre magnetiskt respektive elektriskt fält. Det som talar emot detta är dels att påverkan från dessa typer av felkällor bör vara under kontroll i ett labb där studier av kvantfysikaliska fenomen studeras, eftersom det är känt att de kan störa mätningar. Dels så bör dessa felkällor resultera i mer störning än vad som egentligen syns i emissionsspektrat.

Att de relativas intensiteterna i denna studie inte helt sammanfaller med NISTS värden på intensiteten ses som en riklinje snarare än ett facit för resultaten från denna undersökning. Detta eftersom det dels är okänt hur deras uppställning såg ut och dels på grund av att de sannolikt använder mer avancerad utrustning vid mätningarna. Den utrustning som i detta fall användes gav det resulterade emissionsspektra i figur 2, vilket var syftet med i studien i denna del.

Vad gäller energinivådiagrammet för kadmium så kan de splittringar i spektrallinjerna som triplett-tillstånden ger upphov till, vilket förklaras i teorin, tydligt urskiljs. Exempel på detta är när triplett-tillstånden med konfiguration  $6s$  ( $6^3S_1$ ) och  $5d$  ( $5^3D_{1,2,3}$ ) går till tripletten med konfiguration  $5p$  ( $5^3P_{0,1,2}$ ), vilket står i kontrast mot övergångarna för singlett-tillstånden som endast skapar enskilda linjer.

### 5.3 Emissionsspektrum för neon

Som kan ses i figur 4 är detta spektrum avsevärt mer komplicerat (innehåller fler spektrallinjer) än kadmiums dito. Varför det kan vara på detta vis diskuteras senare. Först ges dock några generella tankar om de linjer som syns och hur väl de överensstämmer med tidigare observationer, återigen med data från NIST [10].

En direkt observering är bruset i botten på spektratet som vi i denna mätning hade svårt att bli av med. Varför det var så just vid denna mätning är svårt att svara på, men av resultatet att döma verkar någon bakomliggande störning orsaka detta, då den håller i sig och har i princip samma påverkan på den relativa intensiteten under hela mätningen. En möjlig förklaring hade så klart kunnat vara, som nämntes ovan, ett tekniskt fel i utrustningen.

Den mest utstickande delen i detta emissionsspektrum hittas i intervallet 385-525 nm (se även figur 13 för en fokuserad bild av detta). Här syns vissa linjer som inte återfinns i NISTs databas, exempelvis de mellan 388-390 nm. Vad detta kan bero på går hand i hand med fallet för kadmium; där smuts eller sot i lampen är den mest troliga förklaringen. I detta intervall finns också en till synes bred spektrallinje mellan 520-525 nm. Detta är med storsta sannolikhet väldigt många linjer som ”flutit” ihop på grund av att steglängden inte är tillräckligt kort, vilket också bekräftas genom att studera NISTs data (sju uppmättta linjer mellan 520-525 nm) för Ne i detta intervall [10].

En annan intressant iakttagelse i detta (380-525 nm) intervall är att nästan alla linjer har samma värde på den relativa intensiteten, omkring 0,4. Vid första anblick skulle en förklaring vara att amperemetern skulle vara bottnad, men detta motsägs ju av resten av spektratet. Det är annars svårt att hitta någon möjlig förklaring till detta, så klart skulle det ju kunna bero på slumpen; att just dessa uppmättta linjer hade denna intensitet. Generellt kan annars sägas att detta intervall saknar många tidigare uppmättta linjer enligt NIST [10]. Anledningen till detta är troligen också precis som i fallet med kadmium, linjernas bredd och den använda steglängden, men kan också i detta fall vara gittrets effektivitet, vilken är sämre i detta intervall (den släpper igenom våglängderna sämre, vilket kan ge samma effekt som att ha för lång steglängd).

Vad gäller resten av emissionsspektratet finns många av NISTs tidigare uppmättta linjer med och dessa är speciellt tydliga i figur 14 och 15 i appendix C.4, med sitt klassiska gaussiska utseende. Däremot så saknas, precis som i fallet med kadmium, en del linjer, vilket förmodligen beror på samma orsaker – där den mest troliga då hänger ihop med osäkerhetsprincipen och spektrallinjernas bredd. Generellt kan sägas att linjer med intensitet under 1000 med NISTs mått mätt inte syns i spektratet, vilket förmodligen endast beror på att utrustningen som användes i denna laboration inte är tillräckligt känslig när linjerna blir mindre tydliga intensitetsmässigt [10].

Men varför är då detta emissionsspektrum så mycket mer komplicerat än kadmiums? Som beskrivet i teorin är det valenselektronerna som exciteras för att sedan återgå till ett lägre energitillstånd och på så sätt emittera energi. Neon är en ädelgas och har alltså åtta valenselektroner, medan kadmium endast har två stycken. Tillåtna övergångar sett till selektionsreglerna är därför betydligt fler för neon än för kadmium. Dessutom innehåller valenselektroner fler kombinationer och typer av ”subtillstål”, vilka för neon främst är dublett-tillstånd (en dublett-splittring syns tydligt vid  $\lambda \approx 702$  nm i figur 15 i appendix C.4). Detta medför bildning av fler, tätare spektrallinjer vilka är svåra att urskilja från varandra. Se till exempel återigen den, till synes, breda spektrallinjen i våglängdsintervallet 520 – 525 nm i figur 4. Utan att jämföra med tidigare mätningar som genomförts är det omöjligt att veta hur spektrallinjekonfigurationen egentligen ser ut i detta område.

## 6 Slutsatser

Denna laboration var främst uppdelad i två syften, där det första var att bestämma emissionsspektrat för kadmium och det tillhörande energinivådiagrammet. Det andra syftet var att bestämma det mer komplicerade emissionsspektrat för neon, vars utseende och egenskaper dessutom skulle förklaras. Dessa anses efter att experimenten genomförts och resultaten analyserats ha uppfyllts med övergripande gott resultat, där följande slutsatser ledde fram till denna bedömning;

1. Emissionsspektrat för kadmium stämde bra överens med tidigare mätta emissionslinjer för ämnet gjorda med mer avancerad utrustning. Genom att rita upp energinivådiagrammet kunde de splittringar som tripplett-tillstånden orsakar, vilket tillkännagavs i teorin, tydligt urskiljas.
2. Utifrån det resulterade emissionsspektrat för neon kan det tydligt ses att detta är mer komplext än det för kadmium. Antalet spektrallinjer är betydligt fler och ligger många gånger tätare och går ej att urskilja från varandra. Skillnaden mellan de två valenselektronerna för kadmium och ädelgasstrukturen hos neon, sett till möjliga övergångar på grund av selektionsreglerna, är stora. Detta i samband med att antalet splittringar till dubblett- och tripplett-tillstånd ökar resulterar i ett betydligt mer komplext emissionsspektrum.
3. För att få ett större spann av spektrallinjer, och få en mer exakt intensitetrealtion mellan dessa vid framtida undersökningar, krävs mer avancerad utrustning som bland annat kan mäta med en steglängd kortare än 0,03 nm. En annan aspekt att tänka på inför framtida mätningar, är att ett färlit linjer återges i spektrumen som ej borde göra det, trots minimering av yttre ljuspåverkan. Detta beror sannolikt på att ljuskällorna ej till hundra procent består av ämnet som undersöks utan att det förekommer spår av andra ämnen eller förureningar som påverkar resultatet.

## Referenser

- [1] ”Spectroscopy,” i *Britannica*. [Online]. Tillgänglig: <https://www.britannica.com/science/spectroscopy> (hämtad 2022-10-24)
- [2] H. Haken och H. C. Wolf, *The physics of atoms and quanta*, 7. uppl., New York, USA: Springer-Verlag, 2010.

- [3] S. Svanberg, *Atomic and molecular spectroscopy*, 4. uppl., New York, USA: Springer-Verlag, 2004.
- [4] "Atomkärna," i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/atomk%C3%A4rna#energiniv%C3%A5er-i-atomk%C3%A4rn> (hämtad 2022-10-25)
- [5] C. Nordling och J. Österman, Physics Handbook, 9e uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2020.
- [6] NIST, "*NIST Atomic Spectra Database Lines Data: Na*". [Online]. Tillgänglig: NIST/Natrium (hämtad 2022-12-11)
- [7] NIST, "*NIST Atomic Spectra Database Lines Data: Cd*". [Online]. Tillgänglig: NIST/Kadmium (hämtad 2022-12-08)
- [8] "Zeemaneffekten," i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/zeemaneffekten> (hämtad 2022-12-15)
- [9] "Starkeffekt," i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: [ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/starkeffekt](https://ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/starkeffekt) (hämtad 2022-12-15)
- [10] NIST, "*NIST Atomic Spectra Database Lines Data: Ne*". [Online]. Tillgänglig: NIST/Neon (hämtad 2022-12-08)
- [11] *270M Rapid Scanning Imaging Spectrograph/Monochromator*, USA: Spex, 1992. [Online]. Tillgänglig: [https://www.bnl.gov/atf/docs/spex\\_270m.pdf](https://www.bnl.gov/atf/docs/spex_270m.pdf) (hämtad 2022-10-30)

# A Energinivåer för Cd

Cd I					Cd I				
Config.	Desig.	J	Level	Interval	Config.	Desig.	J	Level	Interval
$4d^{10} 5s^2$	$5s^2 \ ^1S$	0	0. 0		$4d^{10} 5s(^2S)7p$	$7p \ ^1P^o$	1	65494. 2	
$4d^{10} 5s(^2S)5p$	$5p \ ^3P^o$	0	50114. 017		$4d^{10} 5s(^2S)4f$	$4f \ ^3F^o$	2, 3, 4	65581. 7	
		1	50656. 380		$4d^{10} 5s(^2S)8s$	$8s \ ^1S$	1	66680. 920	
		2	51826. 996	1170. 866	$4d^{10} 5s(^2S)8s$	$8s \ ^1S$	0	66904. 7	
$4d^{10} 5s(^2S)5p$	$5p \ ^1P^o$	1	43692. 474		$4d^{10} 5s(^2S)8p$	$8p \ ^3P^o$	0	67829. 6	
$4d^{10} 5s(^2S)6s$	$6s \ ^1S$	1	51484. 013				1	67842. 1	12. 5
$4d^{10} 5s(^2S)6s$	$6s \ ^1S$	0	53310. 16				2	67875. 2	33. 1
$4d^{10} 5s(^2S)6p$	$6p \ ^3P^o$	0	55390. 9		$4d^{10} 5s(^2S)7d$	$7d \ ^1D$	2	67837. 1	
		1	55461. 6		$4d^{10} 5s(^2S)7d$	$7d \ ^3D$	1	67990. 1	
		2	55856. 7	174. 1			2	67992. 9	2. 8
							3	67997. 5	4. 6
$4d^{10} 5s(^2S)5d$	$5d \ ^1D$	2	59219. 824		$4d^{10} 5s(^2S)8p$	$8p \ ^1P^o$	1	68055. 4	
$4d^{10} 5s(^2S)5d$	$5d \ ^3D$	1	59485. 793		$4d^{10} 5s(^2S)5f$	$5f \ ^3F^o$	2, 3, 4	68093. 7	
		2	59497. 895	12. 102	$4d^{10} 5s(^2S)9s$	$9s \ ^1S$	1	68682. 2	
		3	59516. 017	18. 122	$4d^{10} 5s(^2S)9s$	$9s \ ^1S$	0	68799. 6	
$4d^{10} 5s(^2S)6p$	$6p \ ^1P^o$	1	59905. 6		$4d^{10} 5s(^2S)8d$	$8d \ ^1D$	2	69292. 5	
$4d^{10} 5s(^2S)7s$	$7s \ ^1S$	1	62563. 461		$4d^{10} 5s(^2S)9p$	$9p \ ^3P^o$	0	69814. 5	
$4d^{10} 5s(^2S)7s$	$7s \ ^1S$	0	63086. 7				1	69321. 4	6. 9
$4d^{10} 5s(^2S)7p$	$7p \ ^1P^o$	0	64995. 9				2	69340. 2	18. 8
		1	65021. 5		$4d^{10} 5s(^2S)8d$	$8d \ ^3D$	1	69400. 5	
		2	65028. 8	25. 4			2	69402. 8	2. 3
$4d^{10} 5s(^2S)6d$	$6d \ ^1D$	2	65134. 871				3	69405. 5	2. 7
$4d^{10} 5s(^2S)6d$	$6d \ ^3D$	1	65353. 5						
		2	65359. 3	5. 8					
		3	65367. 257	8. 0					

Cd I—Continued					Cd I—Continued				
Config.	Desig.	J	Level	Interval	Config.	Desig.	J	Level	Interval
$4d^{10} 5s(^2S)9p$	$9p \ ^1P^o$	1	69435. 7		$4d^{10} 5s(^2S)16d$	$16d \ ^1D$	1, 2, 3	71972. 1	
$4d^{10} 5s(^2S)10s$	$10s \ ^1S$	1	69805. 9		$4d^{10} 5s(^2S)17d$	$17d \ ^3D$	1, 2, 3	72046. 7	
$4d^{10} 5s(^2S)10s$	$10s \ ^1S$	0	69873. 1		$4d^{10} 5s(^2S)18d$	$18d \ ^1D$	1, 2, 3	72108. 2	
$4d^{10} 5s(^2S)9d$	$9d \ ^1D$	2	70175. 9		$4d^{10} 5s(^2S)19d$	$19d \ ^1D$	1, 2, 3	72155. 7	
$4d^{10} 5s(^2S)10p$	$10p \ ^3P^o$	0, 1, 2	70207. 9		Cd II( $S_{9/2}$ )	<i>Limit</i>	-----	72538. 8	
$4d^{10} 5s(^2S)9d$	$9d \ ^3D$	1	70244. 2		$4d^{10} 5p^3$	$5p^2 \ ^3P$	0	73996. 2	
		2	70245. 5	1. 3			1	74745. 4	749. 2
		3	70247. 1	1. 6			2	75860	1115
$4d^{10} 5s(^2S)10p$	$10p \ ^1P^o$	1	70262. 6		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})5p$	$5p'' \ ^1P^o$	1	97800	
$4d^{10} 5s(^2S)11s$	$11s \ ^1S$	1	70501. 2		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})5p$	$5p'' \ ^3P^o$	1	103480	
$4d^{10} 5s(^2S)11s$	$11s \ ^1S$	0	70543. 2		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})5p$	$5p'' \ ^3D^o$	1	104351	
$4d^{10} 5s(^2S)10d$	$10d \ ^1D$	2	70741. 9		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})6p$	$6p'' \ ^1P^o$	1	127464	
$4d^{10} 5s(^2S)10d$	$10d \ ^3D$	1	70788. 3		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})6p$	$6p'' \ ^3P^o$	1	132698	
		2	70789. 0	0. 7			1	133044	
		3	70790. 1	1. 1	$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})6p$	$6p'' \ ^3D^o$	1	134196	
$4d^{10} 5s(^2S)11p$	$11p \ ^1P^o$	1	70800. 0		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})7p$	$7p'' \ ^1P^o$	1	135097	
$4d^{10} 5s(^2S)12s$	$12s \ ^1S$	1	70962. 0		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})4f?$	$4f'' \ ^3P^o?$	1	135507	
$4d^{10} 5s(^2S)12s$	$12s \ ^1S$	0	70992. 1		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})8p$	$8p'' \ ^1P^o$	1	137027	
$4d^{10} 5s(^2S)11d$	$11d \ ^1D$	2	71119. 5		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})9p$	$9p'' \ ^1P^o$	1	138524	
$4d^{10} 5s(^2S)12p$	$12p \ ^1P^o$	1	71167. 9		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})6f?$	$6f'' \ ^1P^o?$	1	138679	
$4d^{10} 5s(^2S)11d$	$11d \ ^3D$	1	71159. 6		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})10p$	$10p'' \ ^1P^o$	1	139417	
		2	71160. 6	1. 0			1	139652	
		3	71160. 6		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})7p$	$7p'' \ ^1P^o$	1	139987	
$4d^{10} 5s(^2S)13s$	$13s \ ^1S$	1	71281. 8		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})11p$	$11p'' \ ^1P^o$	1	140410	
$4d^{10} 5s(^2S)13s$	$13s \ ^1S$	0	71299. 0		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})12p$	$12p'' \ ^1P^o$	1	140655	
$4d^{10} 5s(^2S)12d$	$12d \ ^3D$	1	71424. 1		$4d^2 5s^2(^2D_{3/2})13p?$	$13p'' \ ^1P^o?$	1	140855	
		2	71425. 0	0. 9			1	142613	
		3	71425. 0		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})4f?$	$4f'' \ ^1P^o$	1	143203	
$4d^{10} 5s(^2S)14s$	$14s \ ^1S$	1	71515. 6		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})8p$	$8p'' \ ^3P^o$	1	144134	
$4d^{10} 5s(^2S)14s$	$14s \ ^1S$	0	71528. 0		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})5f?$	$5f'' \ ^1P^o?$	1	144531	
$4d^{10} 5s(^2S)13d$	$13d \ ^1D$	2	71596. 3		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})9p$	$9p'' \ ^1P^o$	1	145034	
$4d^{10} 5s(^2S)13d$	$13d \ ^3D$	1, 2, 3	71618. 5		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})6f$	$6f'' \ ^1P^o?$	1	145814	
$4d^{10} 5s(^2S)15s$	$15s \ ^1S$	1	71689. 6		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})10p$	$10p'' \ ^1P^o$	1	146603	
$4d^{10} 5s(^2S)15s$	$15s \ ^1S$	0	71692. 4		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})7f?$	$7f'' \ ^1P^o?$	1	146993	
$4d^{10} 5s(^2S)14d$	$14d \ ^1D$	2	71748. 9		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})11p$	$11p'' \ ^1P^o$	1	147621	
$4d^{10} 5s(^2S)14d$	$14d \ ^3D$	1, 2, 3	71767. 2		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})12p$	$12p'' \ ^1P^o$	1	148446	
$4d^{10} 5s(^2S)16s$	$16s \ ^1S$	1	71818. 6		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})13p$	$13p'' \ ^1P^o$	1	149446	
$4d^{10} 5s(^2S)15d$	$15d \ ^1D$	2	71869. 2		$4d^2 5s^2(^2D_{1/2})14p$	$14p'' \ ^1P^o$	1	149631	
$4d^{10} 5s(^2S)15d$	$15d \ ^3D$	1, 2, 3	71880. 7						

Figur 5: Energinivåer för kadmium.

## B Övrig teori/metod

### B.1 Tillåtna värden på kvanttalen

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

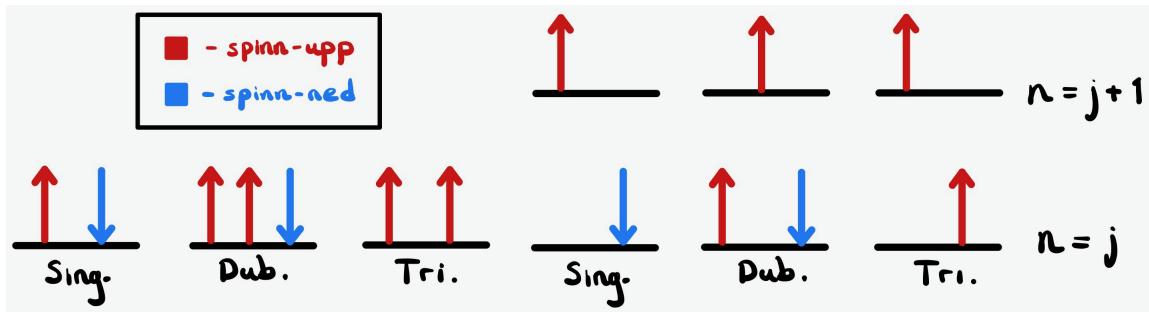
$$\ell = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

$$m_s = -s, -s + 1, \dots, s - 1, s$$

$s = 1/2$  (för elektronen)

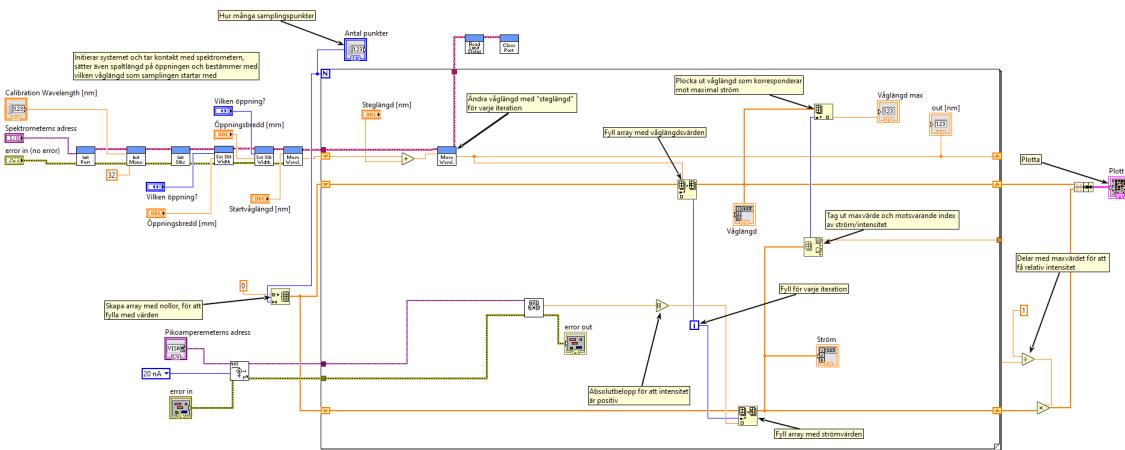
$s = 1$  (för fotonen)

### B.2 Singlett- dublett- och tripplett-tillstånd



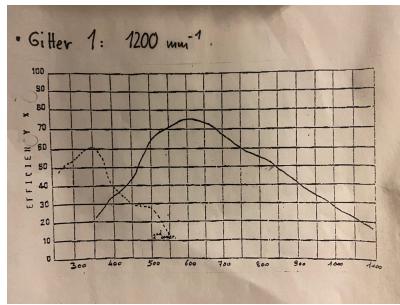
Figur 6: Till vänster illustreras singlett, dublett och tripplett-tillstånd i grundtillståndet, till höger i exciterat tillstånd.

### B.3 Program i LABVIEW



Figur 7: Programmet i LABVIEW som användes för att mäta emissionsspektran.

## B.4 Gittereffektivitet



Figur 8: Effektiviteten för gittret i spektrometern vid olika våglängder, det vill säga hur väl den släpper igenom dessa vågländer.

## B.5 Kalibrering av spektrometern

Innan ordentliga mätningar genomfördes kalibrerades spektrometen för att se till att den fungerade korrekt. Kalibreringen genomfördes med hjälp av en spektrallampa med grundämnet natrium. Natrium användes på grund av att två av de spektrallinjer som ämnet emitterar ligger nära varandra (588,995 nm respektive 589,593 nm). Varför detta är fördelaktigt beror dels på att de enkelt kan studeras samtidigt och dels på att mätningarna kan kontrolleras så att de är tillräckligt känsliga för att båda linjerna ska kunna urskiljas.

Lampan placerades vid ingången till spektrometen, vilken leder ljuset genom ett gitter och till en detektor som via en fotomultiplikator sätter elektroner i rörelse med hjälp av den fotoelektriska effekten, se figur 1 nedan för uppställning. Denna ström av elektroner mättes av en pikoamppermeter och eftersom antalet elektroner som sätts i rörelse är beroende av hur mycket ljus som når fotomultiplikatorn (intensiteten) är det rimligt att säga att intensiteten på ljuset är proportionell mot denna ström. Se vidare figur 16 i appendix D för en något djupare förklaring över hur spektromatern fungerar.

Känsligheten och avståndet samt tillförseln av ljus till detektorn styrdes genom att justera spaltbredden in och spaltbredden ut på spektromatern. För att säkerställa att spektrallinjerna ligger på korrekt plats ändrades kalibreringsvåglängden, vilken förskjuter linjerna i sidled. När spektrallinjerna för natrium kunde erhållas med bästa resultat påbörjades mätningar med kadmium och neon.

### B.5.1 Diskussion – kalibrering av spektrometern

Spaltbredden in och ut påverkade resultatet på liknande sätt. Genom att öka spaltbredden släpptes mer ljus igenom, vilket ökade intensiteten och spektrallinjerna stod ut mer. Detta kunde framförallt bidra positivt vid mätningar efter kalibreringen då hela emissionsspektrat undersöktes där spektrallinjer med förhållandevis låg intensitet mättes. Däremot bidrog också större ljusinsläpp mot gittret till ökad bredd på spektrallinjerna (den separarerar våglängderna sämre). Vid en allt för hög spaltbredd, 0,5 mm, kunde de två spektrallinjer som undersöktes för natrium under kalibreringen ej särskiljas alls utan blev istället en enda bred linje. Dessutom gav en ökad spaltöppning ett något större avstånd mellan spektrallinjetopparna. För att få ett optimalt resultat sattes båda spaltöppningarna till smalast möjliga spaltöppning, 0,02 mm.

Det låga ljusinsläppet blev inte heller ett problem under de faktiska mätningarna när kalibreringen var genomförd då både kadmiumlampan och neonröret lyste med bra intensitet. En ökad spaltöppningsbredd ansågs också kunna öka risken för att brus i form av andra ljuskällor, till exempel datorn som skulle kunna störa experimentet. Denna eventuella felkälla undveks i allra högsta mån genom att ha nedsläckt i rummet och dra för ett skynke framför dator och annan utrustning som var tvungen att vara igång.

Steglängden sattes till minsta möjliga, 0,03 nm. Detta ansågs bäst då spektrallinjerna kan vara mycket smala (detta diskuteras senare) och en större steglängd ökar risken att de hoppas över. Längre steglängd användes enstaka gånger för att genomföra snabba kontrollmätnignar, eftersom en kortare steglängd trivialt gjorde att mätningen tog längre tid. En för stor steglängd kunde också göra att närliggande spektrallinjer ”flöt” ihop, vilket blev fallet med dubbeltoppen hos natrium. Dessutom insågs att dubbeltoppen kunde förskjutas i sidled genom att ändra kalibreringsvåglängden. Det optimala resultatet för denna ansågs viktig eftersom denna gav en uppskattning om hur nära de exakta våglängderna vi kunde mäta, genom att jämföra med NISTs resultat. Den gav oss alltså en uppfattning om vilken noggrannhet mätningarna gav i den aspekten, vilket diskuteras senare.

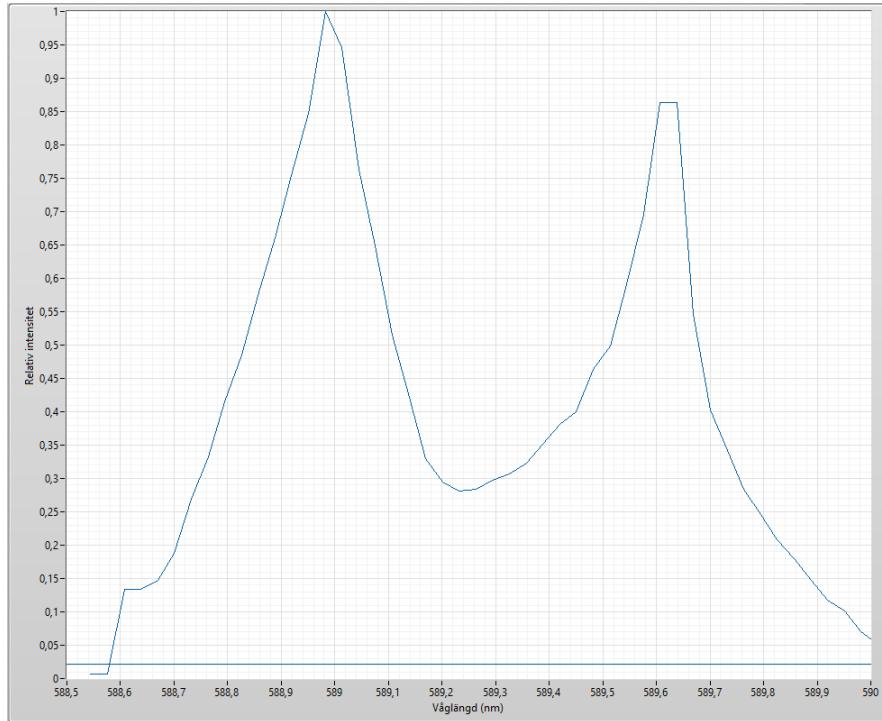
## C Övriga resultat

### C.1 Beräknade energinivåer och motsvarande övergångar för Cd

Uppmätt våglängd (nm)	Energi ( $\text{cm}^{-1}$ )	Energi från tabell ( $\text{cm}^{-1}$ )	Övergång
$325,793 \pm 0,012$	$30722 \pm 1,13$	30736,465	$7^3S_1 \rightarrow 5^3P_2$
$340,043 \pm 0,012$	$29435 \pm 1,04$	29371,776	$5^3D_1 \rightarrow 5^3P_0$
$346,481 \pm 0,012$	$28888 \pm 1,00$	28841,765	$5^3D_2 \rightarrow 5^3P_1$
$360,762 \pm 0,012$	$27744 \pm 0,923$	27689,021	$5^3D_3 \rightarrow 5^3P_2$
$467,668 \pm 0,012$	$21402 \pm 0,549$	21369,996	$6^3S_1 \rightarrow 5^3P_0$
$479,856 \pm 0,012$	$20858 \pm 0,522$	20827,883	$6^3S_1 \rightarrow 5^3P_1$
$508,231 \pm 0,012$	$19694 \pm 0,465$	19657,017	$6^3S_1 \rightarrow 5^3P_2$
$643,668 \pm 0,012$	$15550 \pm 0,290$	15527,350	$5^1D_2 \rightarrow 5^1P_1$
$652,137 \pm 0,012$	$15348 \pm 0,282$	-	-
$680,668 \pm 0,012$	$14705 \pm 0,259$	14745,240	$8^1P_1 \rightarrow 6^1S_0$
$693,262 \pm 0,012$	$14438 \pm 0,250$	-	-
$693,637 \pm 0,012$	$14430 \pm 0,250$	-	-

Tabell 1: De uppmätta våglängderna, motsvarande energi samt närmaste energiövergång från tabellen i appendix A för kadmium.

## C.2 Kalibrering av spektrometern

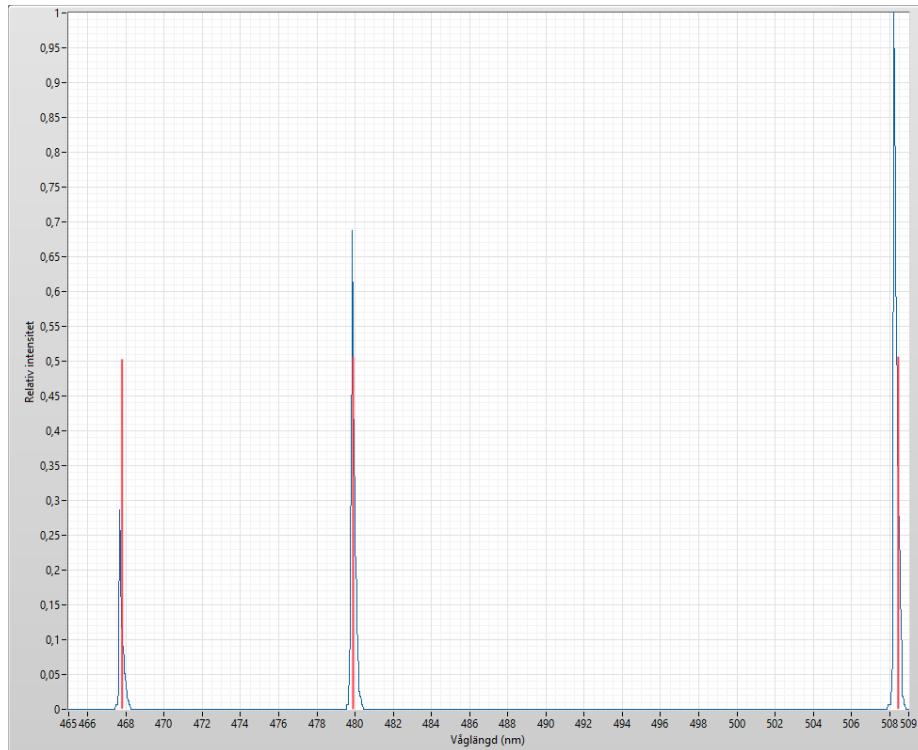


Figur 9: Det bästa resultatet som erhölls på natriums karakteristiska dubbeltopp vid kalibreringen av spektrometern.

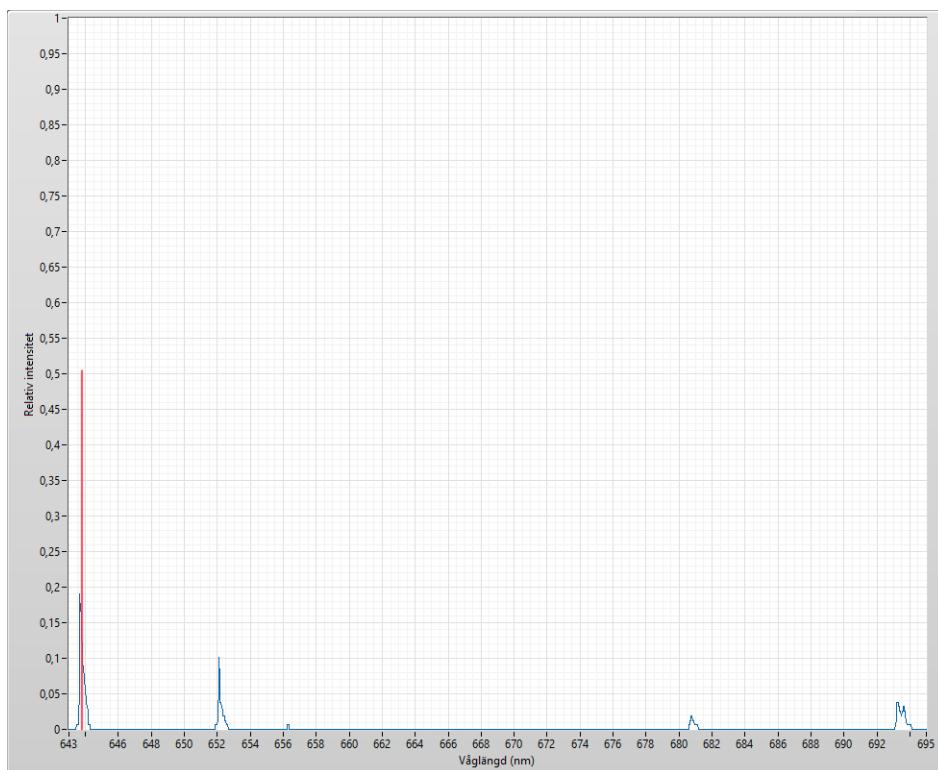
## C.3 Fokuserade bilder på emissionsspektrat för Cd



Figur 10: Mer fokuserad bild över kadmiums emissionsspektra i regionen 325 - 360 nm. Notera de röda linjerna, vilket är uppmätta våglängder enligt [7].

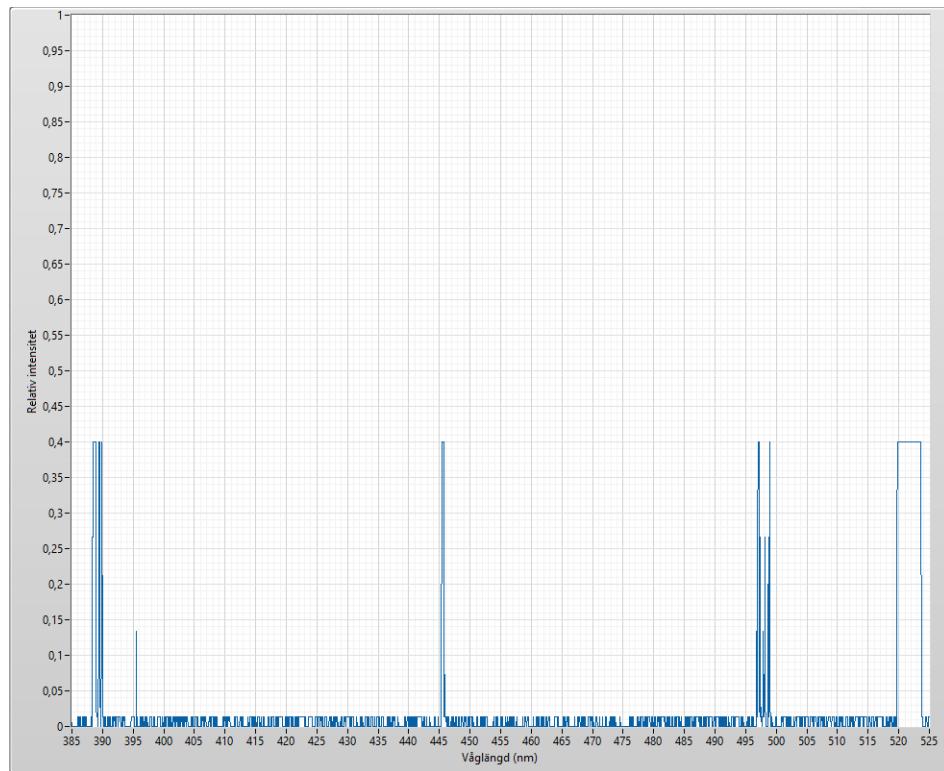


Figur 11: Mer fokuserad bild över kadmiums emissionsspektra i regionen 465 - 510 nm. Notera de röda linjerna, vilket är uppmätta våglängder enligt [7].

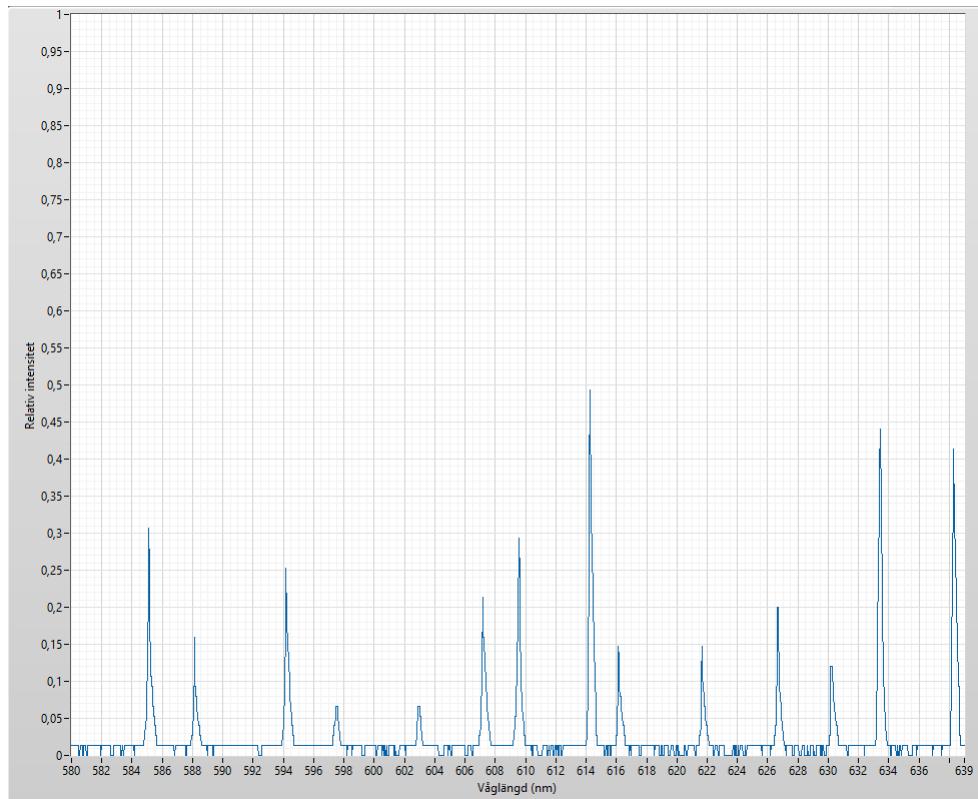


Figur 12: Mer fokuserad bild över kadmiums emissionsspektra i regionen 640 - 700 nm. Notera de röda linjerna, vilket är uppmätta våglängder enligt [7]

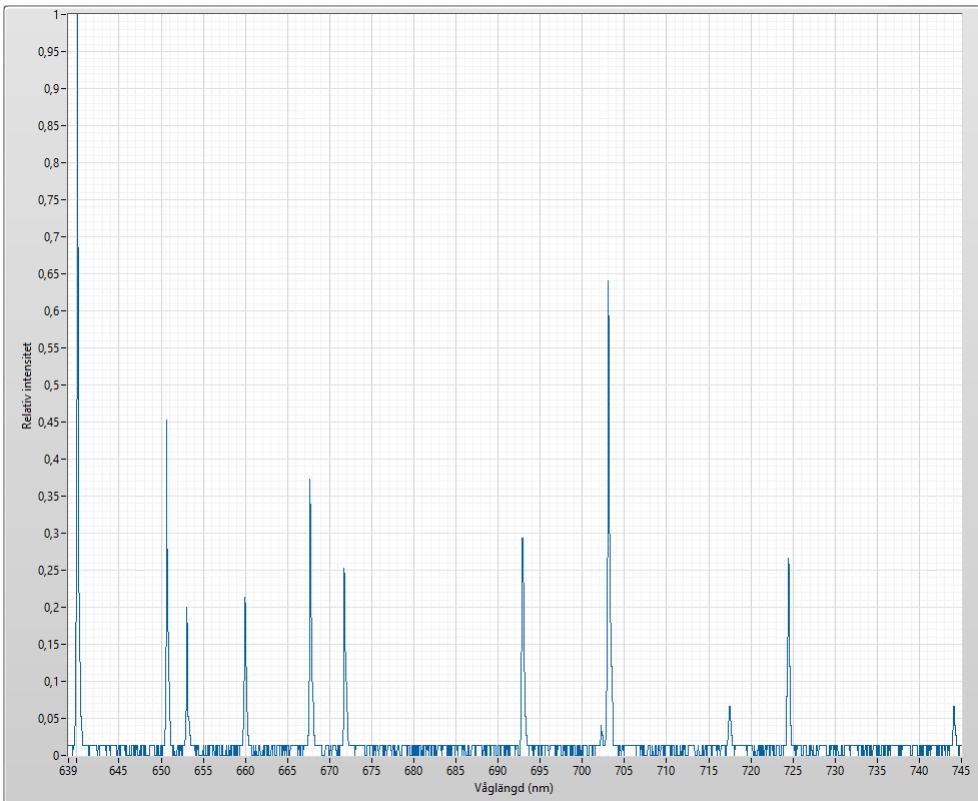
## C.4 Fokuserade bilder på emissionsspektrat för Ne



Figur 13: Mer fokuserad bild över neons emissionsspektra i regionen 380 - 530 nm.



Figur 14: Mer fokuserad bild över neons emissionsspektra i regionen 580 - 640 nm.



Figur 15: Mer fokuserad bild över neons emissionsspektra i regionen 640 - 750 nm.

## C.5 PYTHON-kod

```

1  from scipy.constants import *
2  from math import *
3  import numpy as np
4
5  vaglangder = pow(10, -9)*np.array([325.793, 340.043, 346.481, \
6      360.762, 467.668, 479.856, 508.231, 643.668, 680.668])
7  delta_vaglangd = 0.013*pow(10, -9)
8  E = []
9  delta_E = []
10
11 for i in range(1, len(vaglangder)):
12     E.append(5.034*pow(10, 22)*h*c/(vaglangder[i-1]))
13     delta_E.append(5.034*pow(10, 22)*h*c*delta_vaglangd/ \
14         (pow(vaglangder[i-1], 2)))
15
16 print(E, delta_E)

```

## C.6 Feluppskattning av energin

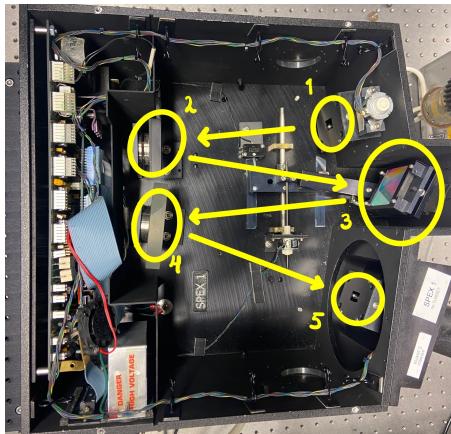
För att uppskatta felet i energin användes felfortplantningsformeln

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (7)$$

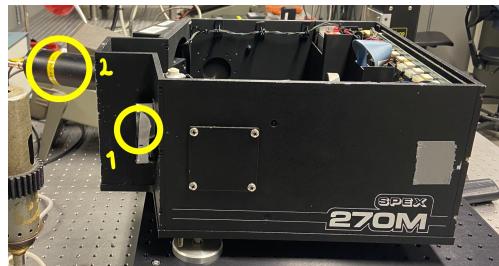
på ekvation (2), där  $y$  motsvarar energin  $E$  och  $\Delta x_i$  är felet som uppmättes vid kalibreringen av spektrometern.

## D Spektrometern

En spektrometer är ett instrument som kan användas för att analysera olika typer av strålning. Till exempel energi från ett grundämne som emitterar ljus. Enkelt beskrivet består den av en kedja av optiska komponenter (gitter och speglar i detta fall) som separerar det inkommende ljuset i olika våglängder, se figur 16 nedan. Här kommer i (a) ljuset in vid ingången (1) för att reflekteras (2) till gittret (3) som separerar våglängderna. Gittret har en motor vilken kan användas för att styra vilka våglängder som släpps igenom. Ljuset reflekteras senare igen (4) mot detektorn (5) vilken detekterar det separerade ljuset vilket bildar emissionsspektrat för ämnet [11]. De fotoner som avgas träffar senare en fotomultiplikator, vilken genom fotoelektrisk effekt skapar en ström av elektroner som kan läsas av digitalt. Således är intensiteten på ljuset proportionellt mot denna ström som kan mätas.



(a) Spektrometers insida uppifrån, pilarna tillsammans med siffrorna illustrerar ljusets väg genom instrumentet.



(b) Spektrometers utsida från sidan. Här syns öppningen (1) och fotomultiplikatorn vid utgången (2).

Figur 16

## E Labblogg

### Dag 1:

Tillverka labview program som kan styra instrumenten.

12.15 problem med hur exempelfilen fungerar, söker hjälp och lösning

12:30 Skickar fråga till labbhandledare

12.45 hittat fil som kanske kan läsa intensiteten, letar fortf hälp om det förra

13.10 Lunch.

13:30 Testar att byta användare på datorn och ansluta ny "network" och extracta. Fungerar ej.

15:15 Adressen till spektrometern "finns ej", inväntar labbhandledare

15:30 Last ditch effort, startar om datorn. DET FUNGERAR. Wow. Börjar testköra olika filer och varianter på dessa, hur fungerar kalibreringen och spektrometern egentligen?

16.30 Frågat labb-handledaren. Han förklrar att ett diagram med intensitet (ström) vs våglängd är målet. Vi börjar göra ett labview-program för detta - använder färdiga funktioner för att exempelvis mäta ström.

18.30 Skapat ett program som går från en viss våglängd till en annan och plockar ut värden för våglängd och korresponderande ström i varje punkt. Problem med att lägga in värdena i arrayer som uppdateras för varje iteration.

19.30 Går hem, problemet inte löst.

### Dag 2:

09:00 Anländer och startar igång all utrustning.

09.:30 Samma error när koden körs som igår. Startar om dator och instrument och det fungerar igen.

09:45 Problemet löst! Arrayer skapas och fylls med rätt värden. Vill nu koppla dessa till en xy-graph med våglängderna på x-axeln och strömmen på y-axeln. Därefter kan vi se om rätt värden fås.

10:00 Graph fungerar. Vi får "peakar" vid 588 och 588,6. Behöver alltså kalibrera då dessa ska ligga vid 588,9953 och 589,5923 [nm].

10:10 Lade in funktion i koden för att ändra öppningsbredden. Testade att gå från 0,2 till 1. Får nu en enda "fet" peak från 587 till 589,5 [nm]. Testar att släcka rummet och testa igen. Samma problem uppstår. Behöver alltså hålla oss till smalare öppning.

10:15 Testar 0,06 [mm]. Får samma peakar som för 0,2mm. Verkar som att öppningen endast styr bredden på peakarna.

10:20 Testar olika steglängder

10:35 Testar att istället för "Cal Wave" som ger 1090,846 nm lägger vi in en konstant på 1000nm. Gav en spik vid 675nm. Testar 1100nm, gav 600nm. Testar 1080nm, gav 575nm. Inser att förändringen sker linjärt.

11:00 Eftersom "Cal Wave" ger 1090,846 nm och det gav en våglängd fel (588 istället för 589 nm), sätter vi kalibreringsvåglängden till 1091,846nm. Detta ger rätt bra värde för ena peaken, men inser att de ligger lite långt ifrån varandra. Går det att få ihop peakarna? Testar ändra spaltöppningsavståndet igen.

11:15 Inser att spaltöppningsavståndet faktiskt ändrar avståndet mellan de två peakarna. Börjar med att få rätt avstånd mellan peakarna. Avståndet som ska haas är ungefärl 0,598. 0,06mm gav ett avstånd på 0,653. Testar 0,05mm, gav ingen signifikant skillnad. testar 0,03mm, gav avstånd på 0.625. Går åt rätt håll. Testar minsta möjliga, 0,02mm. Gav också 0,625. Testar att gå uppåt, 0,5mm. Blir inte bra. Samma problem som innan att peakarna går ihop. Väljer bästa möjliga på 0,02mm.

11:30 Vill nu få in så bra värden på peakarna som möjligt. Vi lägger till kod för att ta ut våglängden som korresponderar till maximala värdet på strömmen, vilket är första peaken. För att få bästa möjliga för de två peakarna valdes våglängden 1091,855. Detta gav första peaken på 588,98 och andra peken på 589,61, medan de "riktiga" värdena är 588,9953 och 589,5923.

12:30 Inleder mätnignar på Kadmium. Får väldigt bra värden på de flesta peakarna. Har än så länge kört 0,1 mm steglängd och kollat delar ur spektrat där vi vet att det ska finnas spektrallinjer.

13:00 Plockar den upp linjer utanför det synliga spektrat? Det verkar inte så, vi får inte upp någon spektrallinje på 230ish där det bör finnas en. Testar om vi ser den som ska finnas vid 340ish. Ger inget heller. Verkar endast vara synligt ljus.

13:30 Insåg att det finns två spaltöppningar efter frågor till handledare. Går tillbaka till att testa vad de två öppningarna gör för natrium.

14:30 Efter mätningar med olika öppningsbredder har slutsatsen dragits att minsta möjliga öppning på 0,02mm på båda är optimalt. Med en våglängd på 1091,856 ges de två topparna i 588,981 och 589,605, vilket är en skillnad från optimala värden med -0,014nm respektive +0,013nm. (Använt värdena 588,995 respektive 589,593nm).

15:30 Påbörjar en mätning med steglängd 0,1 från 420 till 680.

16:30 Återkommer till ett konstigt resultat. Testar att endast köra kring våglängder som vi vet att spektrallinje ska finnas och vi får upp den med bra noggrannhet. Testar en ny mätning från 455 till 655 med steglängd 0,1. Konstigt igen.

16:45 Inser att arrayen är satt till 400 punkter oavsett om loopen ändras. Ändrade detta så att dessa är lika. Kontrollerar specifika spektrallinjer. Ser bra ut.

17:00 Kör ett test från 455 till 715 med steglängd 0,1 och får upp 5 spektrallinjer.

Intensiteterna för de olika spektrallinjerna känns märkliga. Den vid 480ish är störst i detta fall.

17:10 Jämför strömmen för spektrallinen vid 510 med den vid 480, nu med steglängd 0,03. Förra mätningen stämmde inte, den vid 510 hade högre maxström. En steglängd på 0,1mm är alltså för stort. Använder lägsta möjliga på 0,03mm vid fortsatta mätningar.

17:15 Vid inzoomning ser vi att vissa spektrallinjer har bredden 0,1mm. Dessa kan alltså helt hoppas över vid 0,1 steglängd, vilket förkalrar fel i mätningen.

17:20 Inleder en mätning som går genom hela det synliga spektrat (400-700nm) med steglängd 0,03mm. Skriver på rapport under tiden vi väntar på att mätningen ska bli klar.

18:20 Resultatet ser lite skumt ut. Vissa linjer är rimliga, framförallt de första. Sedan blir det oklart. Alla linjer är förskjutna med drygt 0,1 nm åt vänster jämfört med googlad data för kadmium.

19:00 Labbhandledare tittade på mätningen vi fick fram och upptäckte att vi gjort fel i labview-koden. Vi hade kopierat in den färdiga strömberäknaren, men vi skulle använda block. Detta gjorde att vi ej hade låst skalningen så när strömmen blev hög bytte den skala och därav fick vi "trappsteget".

20:00 Åtgärdat. Tittad till kalibrering igen, men det såg fortsatt bra ut. Drar igång en hel mätning igen med förändrade koden.

21:00 Fick tillbaka mätning. Såg bra ut, men missade linjer i 300-400nm området.

21:20 Startar igång ny mätning från 300 till 700nm.

22:20 Fick tillbaka mätning. Ser bra ut. Tog bilder på resultat.

22:45 Gick hem

**Dag 3:**

09:00 Anländer. Börjar kolla på mätningar med mer avancerat grundämne krypton.  
Använde spektralrör.

09:30 Hittade inget. Testar att byta till spektrallampa med krypton. Fick samma error som tidigare. Startar om dator och utrustning.

09:45 Fungerar igen. Testar att mäta runt en känd spektrallinje. Blir inte helt bra.  
Lampan har dock låg intensitet.

10:00 Byter till spektralrör av Neon, lyser med betydligt högre intensitet.

10:15 Får fina linjer, men förskjutna. Inser att vi har fel kalibreringsväglängd. Rättar till detta och kör lite olika mätningar.

11:45 Testar vilka intervall vi bör köra. Jämför med tidigare data och gör små mätningar för att se minsta och högsta våglängderna med spektrallinjer. Rätt gränser för kadmium vid tidigare mätning.

12:00 Gör små mätningar runt varje spektrallinje för kadmium för att plocka ut de exakta värdena ty dessa ska användas för att göra ett energinivådiagram. 1. 325,793nm, 2. 340,043nm, 3. 346,481nm, 4. 360,762nm, 5. 467,668nm, 6. 479,856nm, 7. 508,231nm, 8. 643,668, 9. 652,137nm, 10. 680,668nm, 11. 693,262nm, 12. 693,637nm. Varför syns inte vissa spektrallinjer som har hög intensitet enligt tabell?

12:20 Kollar högsta och lägsta våglängd där det finns en spektrallinje för neon för att bestämma intervall.

12:45 Kör en lång mätning från 300 till 800 nm. Ser bra ut. Sparar resultat.

13:00 Kör lite kontrollmätningar medan resultat samlas och diskuteras.

15:00 Börjar diskutera om fler mätningar behövs, men då vi känner oss nöjda med resultaten kontaktas handledaren.

16.30 Städar, ger tillbaka nycklar till handledaren och lämnar sedan labbet.