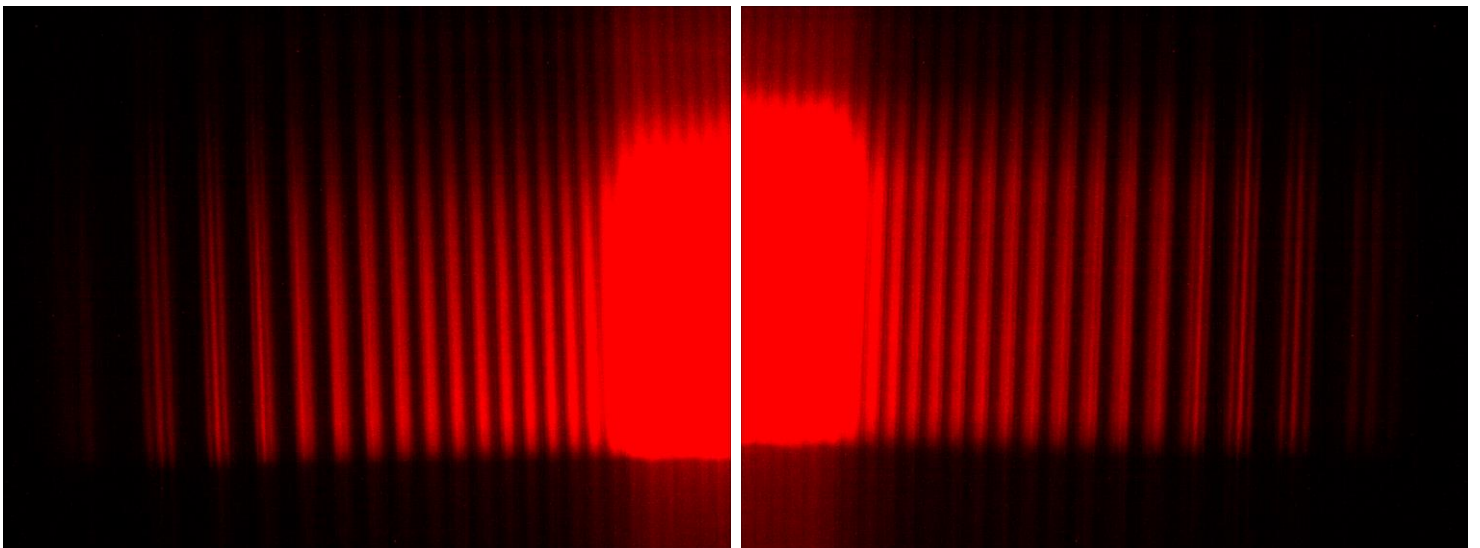


25. April 2016

F44: ZEEMANEFFEKT

kurze Auswertung von Anna Schroeder und Sandra Bogen



Abstract:

Der Zeeman-Effekt beschreibt die Verschiebung der Elektronenübergangsenergielevel, wenn sich Atome in einem Magnetfeld befinden.

Der normale Zeeman-Effekt wurde entdeckt, als eine Cd Lampe in ein Magnetfeld gestellt und mit (1) einer „Lummer-Gehrcke-Platte“ und mit (2) einem „Czerny-Turner-Spektrometer“ beobachtet wurde. Die Daten wurden benutzt, um das Bor'sche Magneton zu berechnen, die Wellenlänge der roten Linie im Cd-Spektrum zu bestimmen und um ein unbekanntes ebenfalls im gleichen Spektrum sichtbare Element zu identifizieren.

Einleitung

Theoretische Grundlagen des Zeeman-Effekts

Rotiert ein Elektron mit dem Abstand \vec{r} und der Geschwindigkeit \vec{v} um den Atomkern, dann ergibt sich ein Drehimpuls: $\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p} = r \cdot m_e v \cdot \vec{n}$

Außerdem kann das rotierende Elektron noch durch einen Strom von $I = -e \cdot \frac{v}{2\pi r}$ mit dem magnetischen Moment $\vec{\mu}_l = I \cdot \vec{A} = I \cdot \pi r^2 \vec{n} = \frac{evr}{2} \vec{n} = \frac{e}{2m_e} \vec{l}$ charakterisiert werden.

Ein externes Magnetfeld \vec{B} wechselwirkt mit dem magnetischen Moment des Atoms. Es wird eine Verschiebung der potentiellen Energie verursacht: $\Delta E_{pot} = -\vec{\mu}_l \cdot \vec{B} = \frac{e}{2m_e} \cdot \vec{l} \cdot \vec{B}$

mit den Quantisierungsbedingungen von \vec{l} und $\vec{B} \parallel \vec{l}$, sowie dem Bohr'schen Magneton $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$:

$$\Delta E_{pot} = \frac{e\hbar}{2m_e} \cdot m_l \cdot \vec{B} = \mu_B \cdot m_l \cdot \vec{B}$$

Bei Atomen, die mehrere Elektronen enthalten, können die Spins und Drehimpulse einfach addiert werden, wenn das Magnetfeld schwach ist ($\vec{L}\vec{S}$ -Kopplung). In diesem Fall ist die Energieverschiebung:

$$\Delta E_{pot} = g_J \cdot \mu_B \cdot M_J \cdot B \text{ Mit Landéfaktor } g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

Ist $S = 0$, dann handelt es sich um den „normalen“, andernfalls um den „anomalen Zeemaneffekt“.

Auswahlregeln

Der Übergang findet nur statt, wenn das Dipolmatrixelement \vec{M}_{ik} Komponenten ungleich Null hat. Das impliziert folgende Auswahlregeln: $\Delta M_J = 0, \pm 1$ (Polarisation von Licht); $\Delta L = \pm 1$; $\Delta S = 0$. Für $\Delta M_J = \pm 1$: gegensätzliche zirkuläre Polarisierungen (σ -Übergang), die longitudinal zum Magnetfeld beobachtbar sind. Für $\Delta M_J = 0$ ist die Polarisation linear (π -Übergang) und kann schräg zur Magnetfeldrichtung gemessen werden.

Lummer-Gehrcke Blättchen

Hierbei handelt es sich um ein Quarzglasblättchen mit hoher Reflektivität und parallelen Oberflächen. Dringt ein Lichtstrahl durch ein Prisma in das Blättchen unter dem richtigen Winkel ein, wird der Strahl viele Male im Blättchen reflektiert, wobei immer ein kleiner Teil des Strahls entweicht. Die entwichenen Strahlen können dann miteinander interferieren.

Unter den folgenden Abschätzungen $n_{air} = 1$ und Austrittswinkel $\alpha \sim 90^\circ$ für ein Blättchen der Dicke d und des Reflexionsindex n , ist die Phasendifferenz zwischen den zwei austretenden Lichtstrahlen

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = 2d \cdot \sqrt{n^2 - 1}$$

Für konstruktive Interferenz muss gelten: $\Delta = k \cdot \lambda$ mit k eine ganze Zahl und λ die Wellenlänge.

Der freie Spektralbereich $\Delta\lambda$ wird durch die Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ berechnet, die nötig ist, um eine Überlappung mit der nächsten Ordnung zu erhalten: $\Delta\lambda = \lambda^2 / (2d \cdot \sqrt{n^2 - 1})$

Eine Verschiebung von $\frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\delta a}{\Delta a}$ mit Δa : Abstand zwischen den interferierenden Ordnungen.

Czerny-Turner Spektrometer

Bei der Czerny-Turner Spektrometer tritt Licht in das Spektrometer ein, wo es durch einen konkaven Spiegel fokussiert wird. Dann erfährt das Licht eine wellenlängenabhängige Ablenkung an einem Beugungsgitter und wird durch einen zweiten konkaven Spiegel auf einen Schirm fokussiert.

Die Streueigenschaften eines spektroskopischen Elements kann durch $D(\lambda) = \frac{\partial\lambda}{\partial p}$ beschrieben werden, wobei p die Position auf dem Schirm beschreibt. Diese Relation ermöglicht uns, die

Wellenlänge als Funktion der Position zu bestimmen: $\lambda = \lambda_0 + \int_{p_0}^p D(\lambda) dp$

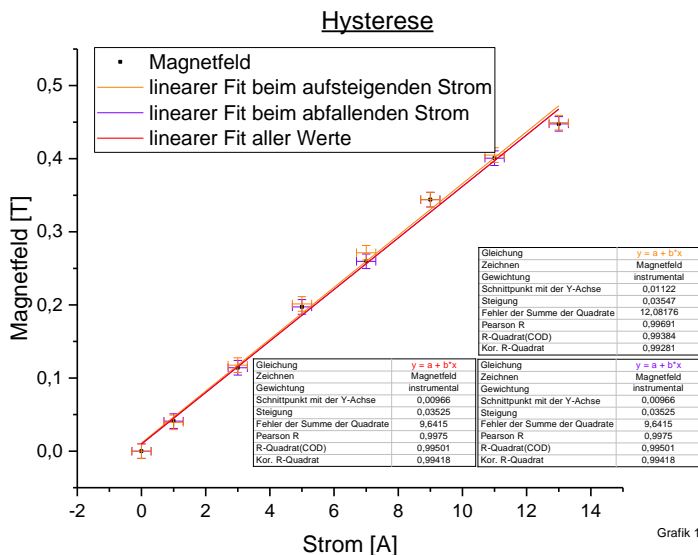
Ist die Dispersionsfunktion von λ unabhängig ist, dann gilt die Abschätzung: $\lambda(p) = \lambda_0 + D(p - p_0)$

Teil 1

Experimenteller Aufbau

Eine Cd Lampe wird in ein Magnetfeld gestellt. Durch einen Rotfilter gelangen nur die roten Spektrallinien von Cd in die optische Apparatur, die aus einem Lummer-Gehrcke Blättchen, einem Teleskop und CCD besteht. Die Bilder werden mit der Software „ScopePhoto“ gemacht, wobei nur der rote Channel aktiviert war.

Hysterese



Mit einer Hall Sonde wird das Magnetfeld bestimmt. Die Stromstärke wird langsam erhöht auf 13A und dann auf 0A reduziert, was die Hysterese-Kurve aus Grafik 1 ergibt. Für jede Stromstärke wurden 3 Messungen gemittelt, der Fehler ist der Gerätefehler, den der Stromstärke schätzen wir auf 0,3A. Die Kurve zeigt einen sehr kleinen Hystereseeffekt: der Steigungsunterschied zwischen ansteigendem und abfallendem Strom ist ca. $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ T/A}$ und somit von geringer Bedeutung. Somit kann im folgenden Versuch die Stromstärke verändert werden, ohne sich um die Hysterese

kümmern zu müssen. Zur Bestimmung des Magnetfelds in Abhängigkeit der Stromstärke wird der Fit über alle gemessenen Wertepaare verwendet: $B(I) = 35,25 \frac{\text{mT}}{\text{A}} \cdot I + 9,66 \text{ mT}$

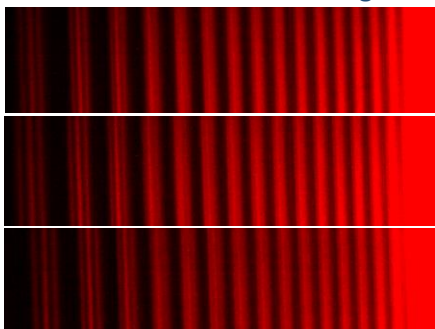
Polarisation des emittierten Lichts

Die Aufspaltungen wurden mit einem $\lambda/4$ Blättchen, einem linearen Polarisationsfilter und mit beiden betrachtet. Die optischen Elemente müssen zunächst durch rotieren vor einer Quelle linear polarisierendem Licht identifiziert werden: beim linearen Polarisationsfilter ändert sich die Intensität während der Rotation, da das linear polarisierte Licht komplett eliminiert werden kann, wenn die Achse des Polarisationsfilters senkrecht zur Polarisation der Probe ist.

Longitudinale Beobachtung

Ohne Filter können hier 2 Linien gesehen werden. Die Drehung des linearen Polarisationsfilters ergibt lediglich eine geringere Intensität aber ansonsten keine Veränderung. Somit sind diese Linien nicht linear polarisiert. Durch benutzen des $\lambda/4$ Blättchen, werden beide Linien linearisiert. Benutzt man zusätzlich den linearen Polarisationsfilter, kann durch 90°-Drehung jeweils eine der 2 Linien ausgewählt werden. Somit handelt es sich um eine σ^+ und eine σ^- Linie.

Transversale Beobachtung



Transversale Beobachtung ohne Polarisationsfilter bei 10, 12 und 13A

Ohne Polarisationsfilter werden 3 Linien beobachtet. Dabei vergrößert sich der Abstand zwischen den äußeren und den inneren Linien bei steigendem Magnetfeld bzw. Stromstärke. Hält man den Polarisationsfilter ins Licht, dann kann man durch 90° Drehung des Filters die äußeren oder die innere Linie(n) auswählen. Somit sind alle 3 Linien linear polarisiert, wobei die innere senkrecht zu den äußeren polarisiert ist. Somit entsprechen die äußeren Linien dem linearen Anteil der σ -Linien,

die schon bei der longitudinalen Beobachtung gesehen wurden, und die mittlere der π -Linie.

Peak fitting

Zur Bestimmung des Bohr'schen Magnetons, wird die Energieverschiebung durch die Wellenlängenverschiebung zwischen der σ - und π -Linie ermittelt.

Dazu werden zunächst die transversal beobachteten Bilder (Grafik 2) in eine eindimensionale Intensitätsverteilung umgewandelt, in Origin geladen und jeder 3fach Peak wird mit akkumulierten Fit von 3 Gaussians (wegen Dopplerverbreiterung durch die thermische Bewegung der emittierenden Atome) bis zur 9. Ordnung gefittet.

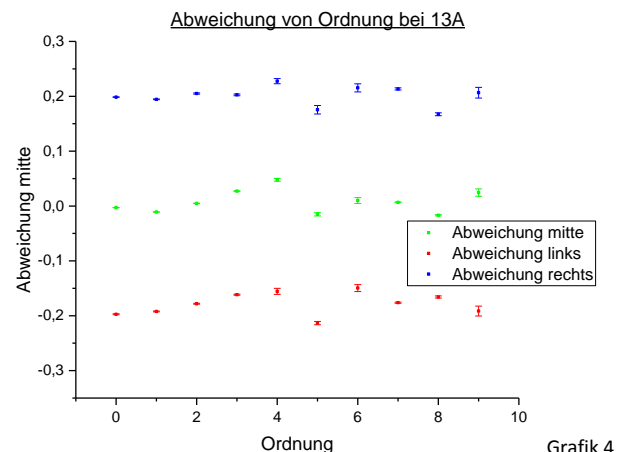
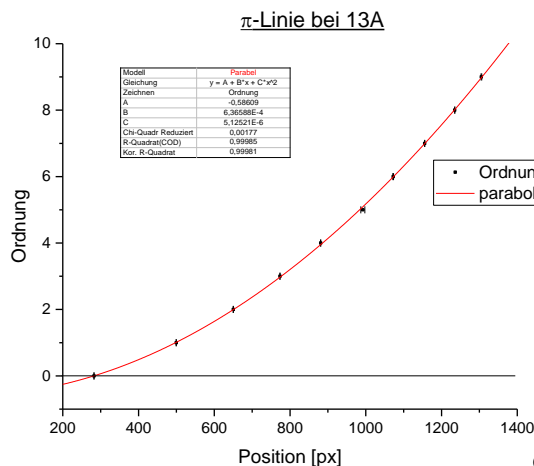
Als Fehler der Peak-Positionen, wurden die Fit-Fehler benutzt. In manchen Fällen – vor allem für hohe Ordnungen – sind die Fehler durch den Fit sehr groß; die Peak-Position kann mit einem geringeren Fehler als der von Origin angegebene, erkannt werden. Ist dies der Fall, wurde der Fehler manuell angepasst.

Spektrometerkalibration mit π -Linien

Die Positionen der π -Linien werden ihren Ordnungen k zugeordnet, um den Positionsunterschied auf dem CCD in einen Wellenlängenunterschied umzurechnen. Dieser Zusammenhang ist auf Grund der Funktion des Lummer-Gehrcke Plättchens nicht linear. Da der quadratische Fit (Grafik 3) ein angepasstes reduziertes Chi-Quadrat von 0,00177 hat, ist die Relation also durch eine Parabel gut beschrieben. Funktionen höheren Grades (z.B. Grad 4) haben für höhere Ordnungen sehr kleine Koeffizienten und sehen somit gleich wie die Parabel aus.

Im nächsten Schritt wird die Fitfunktion genutzt, um die Abweichung der σ -Linien von der jeweils dazugehörigen π -Linie zu bestimmen: $f(\pi - \text{Position}) - f(\sigma - \text{Position})$ (Grafik 4). Der Fehler wird durch die Ableitung der Fitfunktion bestimmt.

Die Grafiken 3 und 4 stellen diese Zusammenhänge für 13A dar. Die Graphen für 9A und 11A sind genauso aus (siehe Anhang).



Energieverschiebungen aus Ordnungsunterschieden bestimmen

Der freie Spektralbereich kann (wie oben bereits beschrieben) mit der Wellenlänge aus Teil 2 wie folgt bestimmt werden: $\Delta\lambda_{cd} = \frac{\lambda_{cd}^2}{(2d \cdot \sqrt{n^2 - 1})}$ mit dem Fehler: $\frac{\Delta(\Delta\lambda_{cd})}{\Delta\lambda} = 2 \frac{\Delta\lambda_{cd}}{\lambda_{cd}}$, wobei die Fehler von n und d vernachlässigt werden. Da für jede Ordnung eine Ordnungsverschiebung äquivalent zu einer Wellenlängenverschiebung von $\Delta\lambda$ ist, wird die Parabelform aus Grafik 3 unter Benutzung von $\frac{\delta a}{\Delta a} = \frac{\delta \lambda}{\Delta \lambda}$ durch eine diskretisierte Parabel beschrieben. Dies ist für kleine Verschiebungen δk eine gute Approximation. Deshalb kann durch $\delta \lambda = \delta k \cdot \Delta \lambda$ die Wellenlängenverschiebung abgeschätzt

werden. Mit $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ kann die Energieverschiebung zu $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda_{Cd}} - \frac{h \cdot c}{\lambda_{Cd} + \delta \lambda}$ bestimmt werden, mit dem Fehler $\Delta(\Delta E) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial (\delta \lambda)} \cdot \Delta(\delta \lambda)\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial \lambda_{Cd}} \cdot \Delta \lambda_{Cd}\right)^2}$.

Berechnung von μ_B

Energieverschiebungen bei „normalem Zeeman“ sind: $\Delta E = \mu_B \cdot m_l \cdot B$. Da $m_l = \pm 1$, gilt: $\mu_B = \left| \frac{\Delta E}{B} \right|$. Der relative Fehler wird durch quadratische Fehleraddition von ΔE und B bestimmt.

Der Mittelwert der Abweichung über alle Ordnungen beider σ -Linien aller 3 Stromstärken wird verwendet; in Summe werden also 6 Mittelwerte verwendet, um μ_B zu bestimmen (siehe Anhang).

Somit ergibt sich mit unseren Messwerten für das Bohr'sche Magneton:

$\mu_B = (12,74 \pm 0,57) \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$ vergleicht man dies mit dem Literaturwert $\mu_{B,Lit} = 9,27400949 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$ so wird deutlich, dass das experimentell bestimmte Ergebnis zwar in der richtigen Größenordnung liegt, sich jedoch signifikant vom Literaturwert unterscheidet.

Teil 2

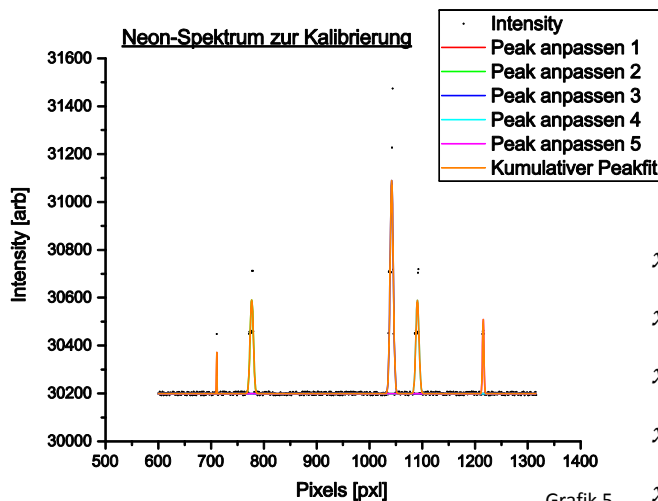
Experimenteller Aufbau

Es wird ein Czerner-Turner Spektrometer benutzt, wobei die Bilder mit einer CCD Kamera aufgenommen werden, um die Wellenlänge der roten Kadmium Linie zu bestimmen. Das Spektrometer ist mit einem 600 Linien/mm und einem 1800 Linien/mm Gitter ausgestattet.

Zunächst wurde das Spektrum der Neon-Lampe aufgenommen und mit dem gegebenen Neon-Spektrum verglichen. Wenn die 5 charakteristischen Linien um die erwartete Wellenlänge der roten Cd-Linie ($\sim 640 \text{ nm}$) gefunden sind, wird – ohne den Aufbau zu ändern – das Spektrum der Cd-Lampe aufgenommen. Dabei wird sowohl die Integrationszeit, um Sättigung der CCD Kamera zu vermeiden, als auch die Anzahl der Mittlungen, um scharfe Peaks zu erhalten, variiert. Außerdem wurde mit dem 1800 Linien/mm Gitter ein schärferes Spektrum erzeugt, was wir allerdings nur für Cd genutzt haben.

Kalibrierung

Um einer Position bzw. einem Pixel der CCD Kamera eine Wellenlänge zuordnen zu können, wird zunächst das Spektrum einer Neonlampe aufgenommen (Grafik 5). Die Literaturwerte der charakteristischen Wellenlängen des Spektrums werden <http://www.nist.gov/> entnommen, sodass durch Vergleichen die Kalibrierung vorgenommen wird.

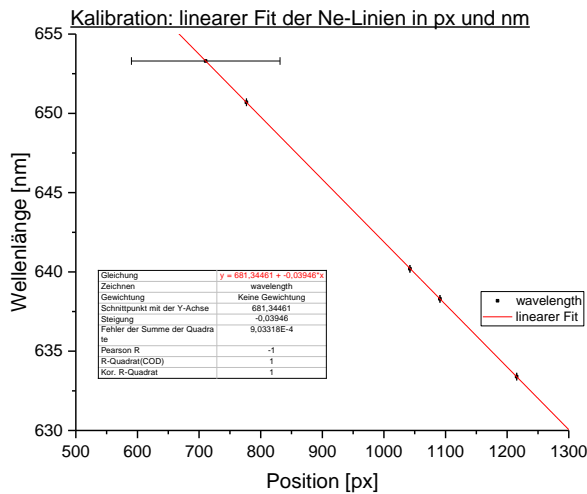


Grafik 5

Das Maximum eines jeden Peaks wird durch einen Gauß-Fit (wegen Dopplerverschiebung, siehe Teil 1) bestimmt und dann den Literaturwerten zugeordnet.

$x_1 = (711 \pm 120) \text{ px}$	$\lambda_1 = 653,28824 \text{ nm}$
$x_2 = (776,9 \pm 0,2) \text{ px}$	$\lambda_2 = 659,65277 \text{ nm}$
$x_3 = (1042,2 \pm 0,1) \text{ px}$	$\lambda_3 = 640,22480 \text{ nm}$
$x_4 = (1090,9 \pm 0,2) \text{ px}$	$\lambda_4 = 638,29914 \text{ nm}$
$x_5 = (1215,5 \pm 0,2) \text{ px}$	$\lambda_5 = 633,44276 \text{ nm}$

Nun werden die Wellenlängen der 5 Linien in Abhängigkeit der Pixel geplottet. Dabei ergibt sich folgende lineare Relation: $\lambda(p) = \lambda_0 + D(p - p_0)$, womit man jede Pixel-Position in eine Wellenlänge umrechnen kann:



Grafik 6

Mit dem Fit $y = a + b \cdot x$ erhalten wir für die Steigung $b = -(0,03946 \pm 0,00004) \frac{nm}{px}$

und für den

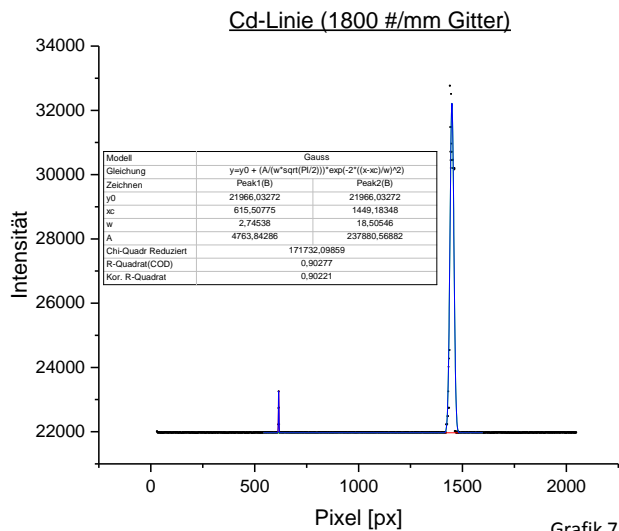
Abschnitt $a = (681,34461 \pm 0,03983)nm$.

Der Fehler der Umrechnung wird durch die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung bestimmt:

$$\Delta y = \sqrt{(\Delta a)^2 + \left[\left(\frac{\Delta b}{b} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x} \right)^2 \right] \cdot (bx)^2}$$

Kadmium Linie

Durch die Kalibrierung können wir nun die Wellenlänge der Cadmium Linie bestimmen, dargestellt in Grafik 7. Auch hier wird die Position wieder durch einen Gauß-Fit bestimmt.



Grafik 7

Das Hauptmaximum liegt bei

$x_{Cd} = (1449,18 \pm 0,13)px$, was in die Wellenläng $\lambda_{Cd} = (624,16 \pm 0,06)nm$ umgerechnet werden kann.

Cd hat in dieser Region nur eine intensive Linie, die jedoch bei $643,85nm$ liegt.

Man kann vermuten, dass diese signifikante Abweichung daher kommt, dass für die Aufnahme der Cadmium Linie ein feineres Gitter als für die Ne Aufnahme verwendet wurde. Dies verbesserte zwar das Resultat der Cd-Linien, jedoch wird

Vermutlich die Kalibrierung verfälscht.

Unbekannte Spektrallinie

Außer dem Hauptmaximum, ist im Cd-Spektrum noch eine weitere Linie zu beobachten, die keinem Kadmium Übergang zugeordnet werden kann. Um diese zu identifizieren, gehen wir wie zuvor vor:

$$x_{unbekannt} = (615,51 \pm 0,04)px \quad \Rightarrow \quad \lambda_{unbekannt} = (657,06 \pm 0,03)nm$$

Praseodym oder Samarium haben in diesem Vertrauensbereich Übergänge. Diese sind entweder radioaktiv oder hochentzündlich, also ist leider anzunehmen, dass allein der rohe Messwert nicht dem realen Element in der Leuchtstoffröhre entsprechen wird. Das ist noch ein Idiz für die Misslungene Kalibrierung.

Diskussion

Im ersten Teil des Experiments, nachdem wir zu dem Schluss gekommen sind, dass der Hysterese Effekt im Folgenden nicht berücksichtigt werden muss, haben wir zunächst eine Beziehung zwischen Magnetfeld und Stromstärke hergestellt. Dann wurde das Interferenzmuster einer Cd-Lampe unter Benutzung eines Lummer-Gehrcke-Blättchens und einer CCD-Kamera gemessen. Die Beobachtungen, die wir mit der Polarisation des Lichtes sowohl in transversaler als auch in longitudinaler Richtung gemacht haben, stimmten mit den Erwartungen aus der Theorie überein.

Anschließend wurde das Bohr'sche Magneton durch das Interferenzmuster bestimmt. Dazu wurden die π -Linien ihren Ordnungen zugeordnet und die Abweichung der jeweiligen σ -Linien wurden in Energiedifferenzen umgerechnet.

Für das Bohr'sche Magneton ergibt sich somit: $\mu_B = (12,74 \pm 0,57) \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$, was jedoch im 3σ -Intervall nicht den Literaturwert $\mu_{B,Lit} = 9,27400949 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$ enthält.

Betrachtet man Grafik 3 so fällt auf, dass das Minimum der Parabel nicht an der erwarteten Stelle für die 0. Ordnung und auch nicht auf der x-Achse liegt. Dies sollte eigentlich der Fall sein und somit handelt es sich hierbei vermutlich um eine Fehlerquelle. Somit wäre es hier sinnvoll, diese Messung mehrmals durchzuführen, um genaueres Verhältnis zwischen Pixel und Ordnung zu erhalten. Dies wird durch Betrachtung von Grafik 4 (und durch die äquivalenten Grafiken im Anhang) ebenfalls bestätigt, denn hier liegen die π -Linien nicht perfekt auf der x-Achse.

Auch stellt die Wellenlänge der roten Kadmiumlinie, die im 2. Teil des Versuchs bestimmt wurde, eine Fehlerquelle für den experimentell bestimmten Wert des Bohr'schen Magneton dar.

Im zweiten Teil wurde eben genau diese Wellenlänge zu $\lambda_{Cd} = (624,16 \pm 0,06) \text{ nm}$ bestimmt. Dies ist leider nicht mit dem Literaturwert $\lambda_{Cd,Lit} = 643,85 \text{ nm}$ kompatibel. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein – wie bereits in der Auswertung erwähnt – dass die Kalibrierung mit dem 600 Linien/mm Gitter durchgeführt, die Bestimmung des Peaks jedoch mit dem 1800 Linien/mm Gitter durchgeführt wurde. Somit hätten wir das Neon-Spektrum mit letzterem Gitter ebenfalls nochmals kalibrieren müssen.

Außerdem war noch eine weitere Linie bei $\lambda_{unbekannt} = (657,06 \pm 0,03) \text{ nm}$ im Spektrum erkennbar, die nicht mit einem Kadmiumübergang erklärbar war. Durch Vergleich mit den Daten von NIST ergab sich nur eine Übereinstimmung mit Praseodym oder Samarium. Da es sicher hierbei aber um radioaktive bzw. hochentzündliche Stoffe handelt, nehmen wir an, dass es sich bei der unbekannten Linie nicht um diese Stoffe handelt. Auch hier ist der Fehler wohl auf die Veränderung des Gitters zurückzuführen.

Alles in allem hat dieser Versuch sehr geholfen, das über die letzten Semester gelernte theoretische Wissen aus der Physik zusammenzuführen und einmal zur Anwendung zu bringen. Der Versuch war sehr interessant, nicht zuletzt durch das breite Anwendungsfeld der Zeeman-Spektroskopie (z.B. in der Medizin).

Anhang (Messwerte)

Teil 1

Hysterese

Strom [A]	Fehler Strom [A]	Mittelwert Magnetfeld [T]	Fehler Magnetfeld [T]
13,0	0,3	0,448	0,010
11,0	0,3	0,401	0,010
9,0	0,3	0,344	0,010
7,0	0,3	0,260	0,010
5,0	0,3	0,197	0,010
3,0	0,3	0,114	0,010
1,0	0,3	0,041	0,010
0,0	0,3	0,000	0,010
1,0	0,3	0,039	0,010
3,0	0,3	0,118	0,010
5,0	0,3	0,201	0,010
7,0	0,3	0,271	0,010
9,0	0,3	0,344	0,010
11,0	0,3	0,405	0,010
13,0	0,3	0,449	0,010

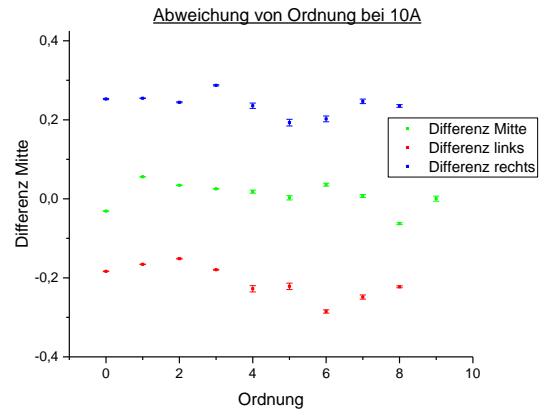
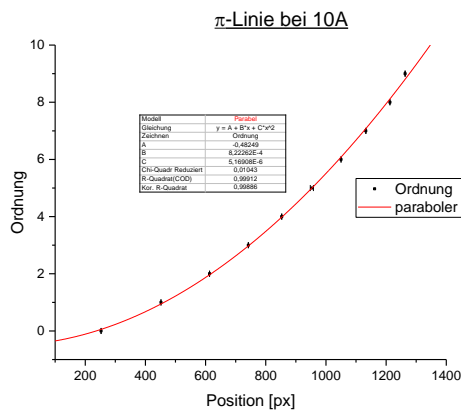
Peak Fitting

10A

Ordnung	linker Peak [px]	Fehler	mittlerer Peak [px]	Fehler	rechter Peak [px]	Fehler
0	193,89363	0,31538	245,54528	0,14914	319,40509	0,65036
1	420,72878	0,19284	451,82639	0,11937	496,30681	0,15183
2	591,75551	0,22922	613,2406	0,14569	646,54751	0,28172
3	720,73755	0,18688	742,14527	0,11098	775,29945	0,29012
4	829,27004	1,35407	853,18147	0,74809	877,30205	1,02452
5	932,21492	1,05355	953,16238	0,92534	971,06937	0,73994
6	1025,36698	0,34257	1040,05838	0,57991	1067,2527	0,99733
7	1112,65909	0,547	1125,65909	0,547	1152,18832	0,6282
8	1195,89616	0,1301	1208,67146	0,31941	1230,14951	0,36512
9			1277,19227	0,87955	1303,37295	0,80991

Ordnung	linker Peak	Fehler	mittlerer Peak	Fehler	rechter Peak	Fehler
0	-1,29E-01	0,000575415	3,11E-02	0,000311927	3,07E-01	0,00160853
1	7,78E-01	0,00057795	9,44E-01	0,000376945	1,20E+00	0,000514356
2	1,81E+00	0,000889624	1,97E+00	0,000581617	2,21E+00	0,001173172
3	2,80E+00	0,000849895	2,97E+00	0,000516997	3,26E+00	0,001401235
4	3,75E+00	0,006917707	3,98E+00	0,003914325	4,22E+00	0,005488463
5	4,78E+00	0,005943029	5,00E+00	0,005320014	5,19E+00	0,004322579
6	5,80E+00	0,002097373	5,96E+00	0,003594518	6,28E+00	0,006322052
7	6,83E+00	0,003595806	6,99E+00	0,003632563	7,33E+00	0,004257949
8	7,89E+00	0,000911213	8,06E+00	0,002258223	8,35E+00	0,002621928
9			9,00E+00	0,00652993	9,37E+00	0,006122515

Differenz links	Fehler	Differenz rechts	Fehler	Differenz Mitte	Fehler
-1,60E-01	0,0007	2,76E-01	0,002	-3,11E-02	0,00031193
-1,66E-01	0,0007	2,55E-01	6E-04	5,57E-02	0,00037695
-1,51E-01	0,0011	2,44E-01	0,001	3,43E-02	0,00058162
-1,79E-01	0,001	2,87E-01	0,001	2,52E-02	0,000517
-2,28E-01	0,0079	2,36E-01	0,007	1,83E-02	0,00391433
-2,21E-01	0,008	1,93E-01	0,007	2,54E-03	0,00532001
-1,69E-01	0,0042	3,19E-01	0,007	3,58E-02	0,00359452
-1,61E-01	0,0051	3,34E-01	0,006	7,12E-03	0,00363256
-1,69E-01	0,0024	2,88E-01	0,003	-6,28E-02	0,00225822
		3,71E-01	0,009	3,96E-04	0,00652993

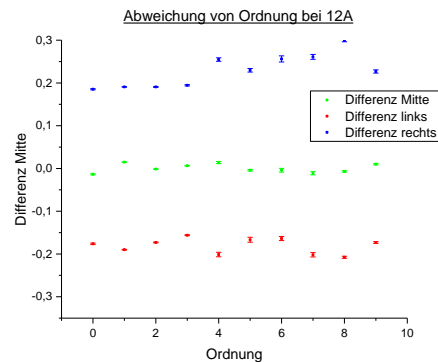
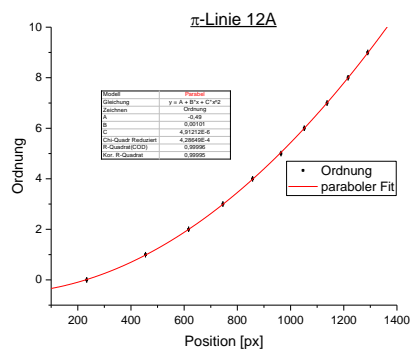


12A

Ordnung	linker Peak [px]	Fehler	mittlerer Peak [px]	Fehler	rechter Peak [px]	Fehler
0	175,08295	0,597	233,4792	0,60938	285,54421	0,1962
1	418,94865	0,17881	454,77098	0,11344	488,56873	0,14295
2	591,84184	0,1913	616,75176	0,12058	643,235	0,21045
3	726,6592	0,18424	745,58811	0,11087	768,61243	0,28715
4	835,72322	0,9011	857,30647	0,48914	883,94936	0,58618
5	937,7243	0,98337	953,90509	0,31854	985,58897	0,63428
6	1037,04823	0,32573	1051,58576	0,71729	1073,96573	0,89702
7	1120,53174	0,51483	1137,21376	0,57762	1158,44988	0,63293
8	1200,29712	0,27565	1216,41049	0,21703	1239,30556	0,37028
9	1277,48449	0,12257	1290,19895	0,23524	1306,67681	0,45641

Ordnung	linker Peak	Fehler	mittlerer Peak	Fehler	rechter Peak	Fehler
0	-1,63E-01	0,001116407	1,36E-02	0,001314358	1,99E-01	0,000473358
1	7,95E-01	0,000548576	9,85E-01	0,000367987	1,18E+00	0,000487446
2	1,83E+00	0,00074936	2,00E+00	0,00048709	2,19E+00	0,000877502
3	2,84E+00	0,000843716	2,99E+00	0,000518031	3,19E+00	0,001374161
4	3,78E+00	0,004609282	3,99E+00	0,002553894	4,24E+00	0,003137274
5	4,78E+00	0,005522817	4,94E+00	0,001814307	5,28E+00	0,003711382
6	5,84E+00	0,00198829	6,00E+00	0,004429635	6,26E+00	0,005638173
7	6,81E+00	0,003353699	7,01E+00	0,003810057	7,27E+00	0,004240913
8	7,80E+00	0,00190364	8,01E+00	0,001515988	8,31E+00	0,002628106
9	8,82E+00	0,000892942	8,99E+00	0,001728452	9,22E+00	0,003390466

Differenz links	Fehler	Differenz rechts	Fehler	Differenz Mitte	Fehler
-1,76E-01	0,0017	1,85E-01	0,001	-1,36E-02	0,00131436
-1,90E-01	0,0007	1,91E-01	6E-04	1,48E-02	0,00036799
-1,73E-01	0,0009	1,91E-01	0,001	-1,40E-03	0,00048709
-1,56E-01	0,001	1,95E-01	0,001	6,30E-03	0,00051803
-2,01E-01	0,0053	2,55E-01	0,004	1,38E-02	0,00255389
-1,67E-01	0,0058	3,34E-01	0,004	5,68E-02	0,00181431
-1,64E-01	0,0049	2,56E-01	0,007	-4,08E-03	0,00442964
-2,02E-01	0,0051	2,61E-01	0,006	-1,12E-02	0,00381006
-2,08E-01	0,0024	2,99E-01	0,003	-6,81E-03	0,00151599
-1,73E-01	0,0019	2,27E-01	0,004	1,01E-02	0,00172845



13A

Ordnung	linker Peak [px]	Fehler	mittlerer Peak [px]	Fehler	rechter Peak [px]	Fehler
0	221,24904	0,43824	282,54212	0,15848	334,77261	0,13401
1	465,11447	0,19008	499,54532	0,11016	532,36367	0,16885
2	625,4572	0,18797	650,28248	0,12123	677,83087	0,23918
3	754,42282	0,18798	773,50456	0,10544	796,83191	0,3186
4	864,71238	0,96104	880,94139	0,49644	904,19875	0,75822
5	972,21333	0,85873	985,14587	0,93304	1008,25417	0,97312
6	1059,40255	0,5283	1072,33291	0,8896	1090,70523	0,7718
7	1141,35125	0,13205	1155,55183	0,094	1172,53222	0,27029
8	1222,4453	0,22877	1234,97557	0,16179	1247,49312	0,34824
9	1291,45079	0,83327	1305,17495	0,91453	1319,83648	0,95378

Ordnung	linker Peak	Fehler	mittlerer Peak	Fehler	rechter Peak	Fehler
0	-1,94E-01	0,00077592	2,92E-03	0,000330379	2,01E-01	0,000315241
1	8,19E-01	0,000574117	1,01E+00	0,000352166	1,21E+00	0,000568191
2	1,82E+00	0,000722216	2,00E+00	0,000481213	2,20E+00	0,000983177
3	2,81E+00	0,000846505	2,97E+00	0,000485125	3,18E+00	0,001503957
4	3,80E+00	0,004870955	3,95E+00	0,002557459	4,18E+00	0,003996423
5	4,88E+00	0,004825535	5,02E+00	0,005304972	5,27E+00	0,005648088
6	5,84E+00	0,003204799	5,99E+00	0,005455489	6,21E+00	0,004805722
7	6,82E+00	0,00085651	6,99E+00	0,000616549	7,21E+00	0,001796364
8	7,85E+00	0,001578942	8,02E+00	0,001127045	8,18E+00	0,002448215
9	8,78E+00	0,006045828	8,98E+00	0,00669974	9,18E+00	0,007058952

Differenz links	Fehler	Differenz rechts	Fehler	Differenz Mitte	Fehler
-1,97E-01	0,0008	1,98E-01	5E-04	-2,92E-03	0,000330
-1,92E-01	0,0007	1,94E-01	7E-04	-1,09E-02	0,000352
-1,78E-01	0,0009	2,05E-01	0,001	4,84E-03	0,000481
-1,62E-01	0,001	2,03E-01	0,002	2,72E-02	0,000485
-1,56E-01	0,0055	2,28E-01	0,005	4,78E-02	0,002557
-1,38E-01	0,0072	2,51E-01	0,008	-1,51E-02	0,005305
-1,50E-01	0,0063	2,15E-01	0,007	9,99E-03	0,005455
-1,76E-01	0,0011	2,13E-01	0,002	6,79E-03	0,000617
-1,66E-01	0,0019	1,67E-01	0,003	-1,69E-02	0,001127
-1,91E-01	0,009	2,07E-01	0,01	2,45E-02	0,006700

Bestimmung Bohrsch'ses Magneton

Strom [A]	Fehler	Magnetfeld [mT]	Fehler	Abweichung links vom Mittelwert	Fehler	Abweichung rechts vom Mittelwert	Fehler
10,0	0,3	332,16	10	-0,178323349	0,001487385	0,270245096	0,00184519
12,0	0,3	396,66	10	-0,180959341	0,001121589	0,239321673	0,001210454
13,0	0,3	428,91	10	-0,170551174	0,001452288	0,208160757	0,001566366

Strom [A]	Fehler	$\delta\lambda_{links}$	Fehler	$\delta\lambda_{rechts}$	Fehler	ΔE_{links}	Fehler	ΔE_{rechts}	Fehler
10,0	0,3	0,008117	6,8E-05	0,012301	8,40E-05	4,139E-24	5,24E-15	6,27225E-24	6,502E-15
12,0	0,3	0,008237	5,1E-05	0,010894	5,51E-05	4,2E-24	3,95E-15	5,55454E-24	4,267E-15
13,0	0,3	0,007763	6,6E-05	0,009475	7,13E-05	3,958E-24	5,12E-15	4,83132E-24	5,519E-15

Strom [A]	Fehler	Magnetfeld [mT]	Fehler	$\mu_{B,links}$	Fehler	$\mu_{B,rechts}$	Fehler
10,0	0,3	0,33216	0,01	1,24603E-23	1,5778E-24	1,88832E-23	1,95763E-24
12,0	0,3	0,39666	0,01	1,05884E-23	9,96507E-25	1,40033E-23	1,07572E-24
13,0	0,3	0,42891	0,01	9,22905E-24	1,19305E-24	1,12642E-23	1,28686E-24

Teil 2

Kalibrierung

	xc	Fehler
Peak 1	710,76373	120,62901
Peak 2	776,92973	0,18638
Peak 3	1042,17925	0,08213
Peak 4	1090,9271	0,18673
Peak 5	1215,50773	0,15912