

Fortgeschrittenes Physik Lab SS19

Experiment: Hanle Effekt

(Durchgeführt am:)

Erik Bode, Damian Lanzenstiel
(Group 103)

September 24, 2019

Abstract

Contents

1	Theorie	2
1.1	Semiklassische Herleitung	2
1.2	Quantenmechanische Erklärung	3
1.2.1	Breit-Formel	4
1.3	Coherence Narrowing und Dampfdruck	4
1.4	Versuchsaufbau	4
2	Versuchsdurchführung	5
3	Auswertung	6
3.1	Extrapolation zur Ausschließung des Coherence Narrowing Effektes	6
4	Tabellen	7
5	Bilder	7
6	Bibliograpy	7
	Literatur	7
7	Anhang	7

1 Theorie

1.1 Semiklassische Herleitung

Ein Hg-Atom welches ein Photon absorbiert kann als ein gedämpfter oszillierender Dipol beschrieben werden. Die Dipolachse ist dabei parallel zur Polarisation des absorbierten Photons. Zur Bestimmung der gesamt Intensität eines einzelnen angeregten Atoms muss über alle Zeiten integriert werden wodurch sich folgende Gleichung ergibt.

$$I = C \cdot \int_0^\infty \sin(\phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt \quad (1)$$

Hierbei ist zu erkennen das die Strahlungscharakteristik proportional zu $\sin(\phi)^2$ ist, wobei ϕ der Winkel zwischen Dipolachse und Beobachtungsrichtung ist. Der Faktor $e^{-\frac{t}{\tau}}$ beschreibt die Dämpfung.

Wenn nun ein Magnetfeld angelegt wird und dieses senkrecht auf der Oszillation-Achse liegt so wird ein Drehmoment auf den Dipol ausgeübt. Dieses führt zur Präzession des Dipols und des magnetischen Moments welches hier als starr zusammenhängend betrachtet wird. Für das magnetische Moment μ eines Niveaus mit Drehimpulsquantenzahl J gilt im schwachen Feld folgende Bewegungsgleichung:

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \frac{\omega_L}{B} \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (2)$$

hierbei ist ω_L die Larmorfrequenz mit:

$$\omega_L = g_J \frac{\mu_B}{\hbar} B \quad (3)$$

Grafisch wird die Bewegung in Abbildung 1 dargestellt.

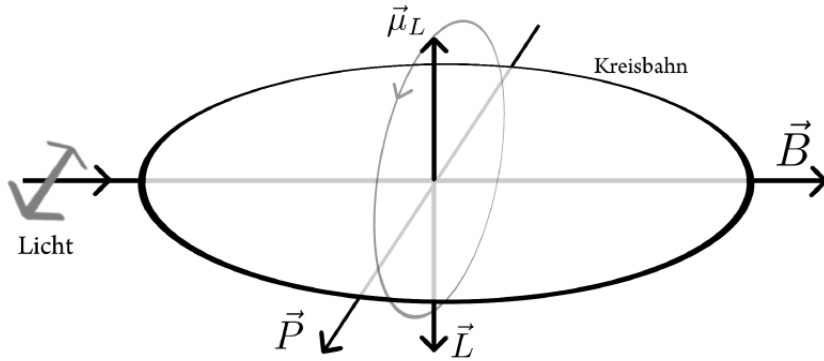


Figure 1: Darstellung der Präzessionsbewegung eines Elektrons mit Dipolmoment \vec{P} , Drehimpuls \vec{L} und magnetischem Moment μ_L bei angelegtem Magnetfeld der Flussdichte B . [1]

Sind Polarisation (und somit auch Dipolachse) zum Zeitpunkt der Absorption parallel zur Beobachtungsebene gilt $\theta(t) = \omega_L t$ mit $\theta(t=0) = 0$. Das bedeutet für die Intensität:

$$I = C \cdot \int_0^\infty \sin(\phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C\tau}{2} \left(\frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right) \quad (4)$$

Ist die Beobachtungsrichtung zum Zeitpunkt der Absorption senkrecht zur Polarisationsrichtung gilt: $\theta(t) = \omega_L t + \frac{\pi}{2}$ mit $\theta(t=0) = \frac{\pi}{2}$. Die Intensität lässt sich ähnlich wie in Gleichung 4 beschreiben:

$$I = C \cdot \int_0^\infty \cos(\phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C\tau}{2} \left(2 - \frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right) \quad (5)$$

Die Gleichung 4 entspricht einer inversen Lorenz-kurve und Gleichung 5 einer normalen. Die Lebensdauer τ dieser Kurven kann über die Breite der Funktion auf halber Höhe (eng: *Full width at half maximum (FWHM)*) bestimmt werden (siehe Abb.2). Hierfür gilt:

$$\tau = \frac{\hbar}{g_J \mu_B B_{FW}} \quad (6)$$

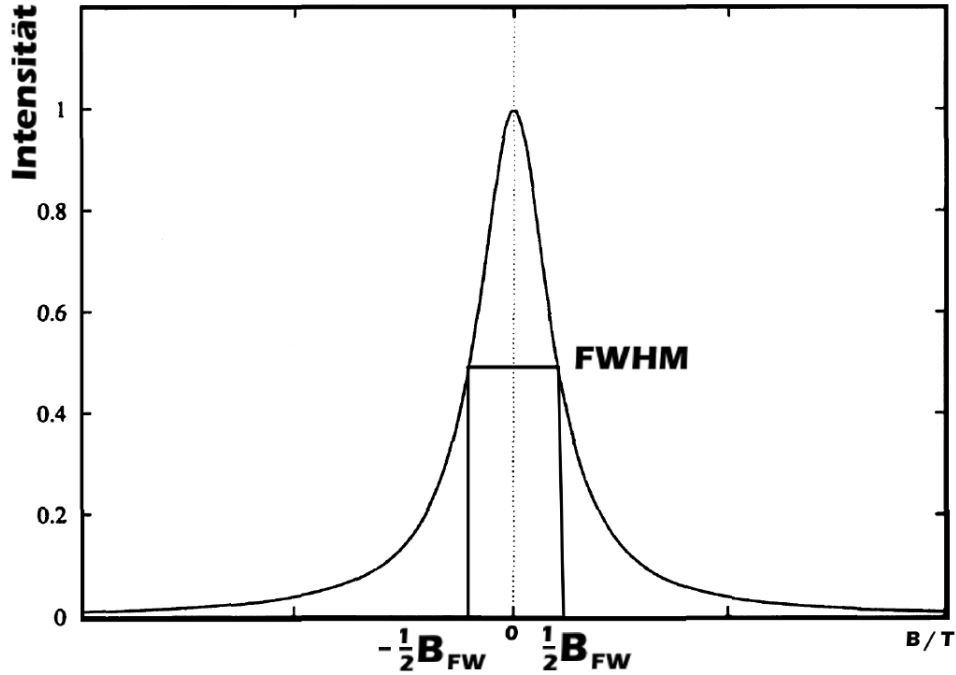


Figure 2: Lorentzkurve mit sichtbare Intensität in Beobachtungsrichtung 0° mit FWHM eingezeichnet.[1]

1.2 Quantenmechanische Erklärung

In der Quantenmechanik wird das Phänomen der Resonanzfluoreszenz durch Interferenz sich überlagernder Zustände beschrieben. Zustände unterschiedlicher magnetischer Quantenzahl m_j sind im Allgemeinen erst einmal energetisch gleich, "entartet". Die Entartung kann aber durch Anlegen eines Magnetfeldes aufgehoben werden (Zeeman-Effekt). In Spezialfällen verursacht die Kreuzung zweier Niveaus von Zuständen verschiedener Gesamtdrehimpulse, bei bestimmten Magnetfeldstärken, eine weitere Entartung. Liegt keine Energieaufspaltung vor werden die Niveaus kohärent angeregt werden und bei

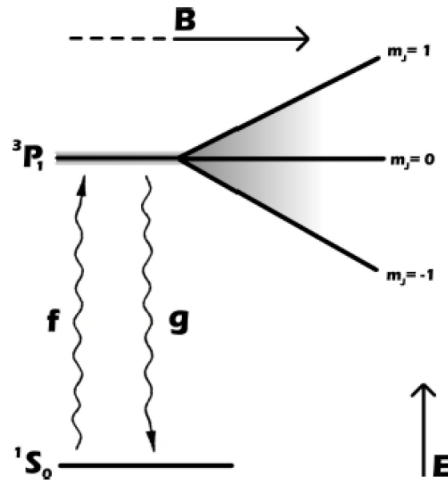


Figure 3: Aufspaltung der Energieniveaus durch m_j in einem Magnetfeld.[1]

Abregung kommt es zur Interferenz mehrerer Zustände des selben Atoms. Damit gilt:

$$I \propto (A_1 + A_2)^2 \quad (7)$$

Bei einer Aufspaltung der Niveaus können die Niveaus getrennt angeregt und abgeregt werden. Für die gesamt Intensität gilt dann:

$$I \propto A_1^2 + A_2^2 \quad (8)$$

1.2.1 Breit-Formel

Zur quantenmechanischen Auswertung wird eine allgemeine Formel zur Resonanzfluoreszenz von G.Breit und P.Franken. Die Formel beschreibt die Rate mit der Photonen einer linearen Polarisationsrichtung \vec{g} emittiert wenn die Probe mit in \vec{f} polarisiertes Licht gestrahlt wird. Die Gleichung, hier ohne Herleitung lautet:

$$R(\vec{f}, \vec{g}) = N \int_0^\infty R(\vec{f}, \vec{g}, t) dt = N \sum_{m, m'}^{\mu, \mu'} \frac{f_{m\mu} f_{\mu' m} g_{\mu m'} g_{m' \mu'}}{L_{\mu, \mu'} - i(\omega_\mu - \omega'_{\mu'})} \quad (9)$$

Eine genauere Herleitung findet sich in der Versuchsanleitung[?] oder in der 'Interference Effects in the Resonance Fluorescence of "Crossed" Excited Atomic States' by P.A.Franken.[2]

Diese Formel für das hier durchgeführte Experiment auf den Übergang von 3P_1 auf den 1S_0 Zustand angewendet. Daraus ergibt sich wie in der Versuchsanleitung [?] beschrieben die Form:

$$R = C \frac{1}{1 + (2\omega_L \tau)^2} \quad (10)$$

Diese entspricht dem Semiklassischen Ergebnis in Gleichung 4.

1.3 Coherence Narrowing und Dampfdruk

Coherence Narrowing bezieht sich auf den Effekt, dass ein von einem Atom emittiertes Photon ein weiteres Atom anregt. Dieses Atom würde nun die gleiche Präzessionsbewegung machen und wieder ein identisches Photon aussenden. Dies führt dazu, dass bei genügend großen Streuquerschnitt sich dieser Prozess mehrfach wiederholen kann. Durch die Ununterscheidbarkeit der Photonen wird die Lebenszeit künstlich erhöht. Um diesen Effekt zu eliminieren werden die Messungen bei variierendem Druck durchgeführt und die tatsächliche Lebensdauer aus der Extrapolation für den Druck $p = 0$ bestimmt. Da der Druck im System nicht messbar ist, muss er mit folgender empirisch bestimmten Formel aus der Temperatur berechnet werden:

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T}\right)(a_1 T_r + a_2 T_r^{1.89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8.5} + a_6 T_r^9) \quad (11)$$

Die Konstanten für kritischen Druck und kritische Temperatur sind:

$$p_c = 167000 \text{ Pa}$$

$$T_c = 1764 \text{ K}$$

Die Parameter a_i sind:

$$a_1 = -4,57618368, \quad a_2 = -1.40726277, \quad a_3 = 2.36263541$$

$$a_4 = -31,0889985, \quad a_5 = 58,0183959, \quad a_6 = -27,6304546$$

1.4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau sieht wie in Abbildung:4 gezeigt aus. Zu Beginn wird Licht aus einer Quecksilberdampfampe genommen und durch eine Linse fokussiert mit der Hilfe eines Interferenzfilters wird dann die gesuchte Wellenlänge von herausgefiltert. Daraufhin wird ein Polarisationsfilter genutzt um die Polarisation des Lichtes einzustellen. Hiernach wird das Licht auf die Quecksilber Probe fokussiert mit einer weiteren Linse. Senkrecht zum Strahlengang befindet sich der Photomultiplier welcher als Detektor der emittierten Photonen genutzt wird. Die Quecksilber probe wird über Wärmeleitungen (HP) mit Peltierelementen verbunden welche die Probe kühlen. Um das Magnetfeld zu kontrollieren wird eine Anordnung von Helmholtz-Spulen verwendet. Hierbei werden einmal die Felder in y, z Richtung eliminiert. Die Spule die das Feld in x Richtung verändert wird zum Durchfahren des Feldes genutzt um die Zeeman Aufspaltung zu erreichen welche letztendlich das Hanle-Signal generiert. Hierzu wird ein Rampengenerator verwendet der die Spannung die an der Helmholtz-Spule anliegt langsam verändert wodurch sich die Lorentzkurve bei Richtiger Polarisationsstellung ausbildet.

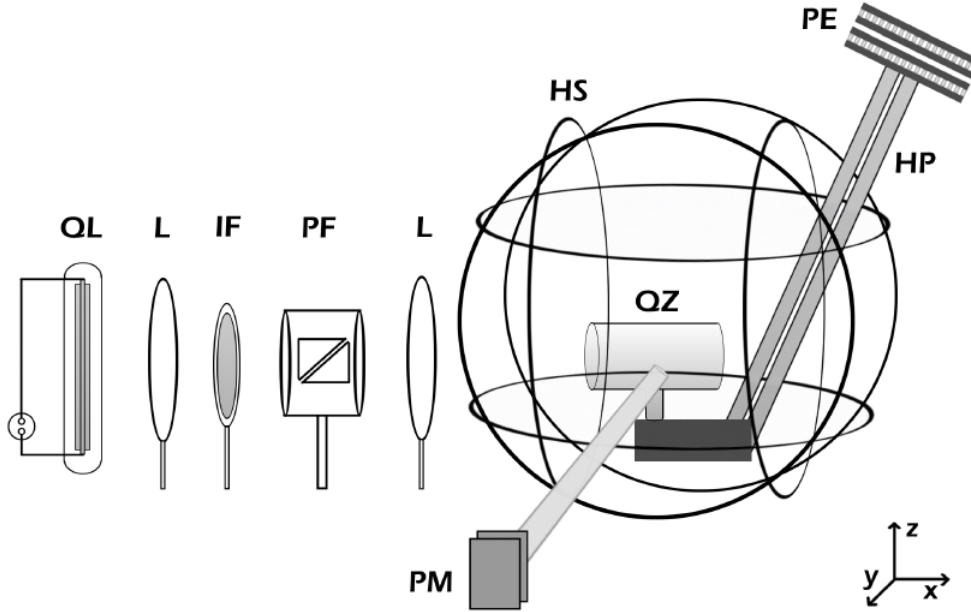


Figure 4: Versuchsaufbau des Experiments. Quecksilberdampf Lampe (QL), Linse (L), Interferenzfilter (IF), Polarisationsfilter (PF), Quecksilberdampf-Resonanzzelle (QZ), Heatpipes (HP), Peltierelemente (PE), Helmholtz-spulen (HS), Photomultiplier (PM). [1]

2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Experiments musste als erstes die Magnetfelder in y und z Richtung kalibriert werden. Dafür musste am Polarisationsfilter die 0° Einstellung gefunden werden. Durch das Durchfahren des Feldes in x Richtung erkennt man bei 0° eine Lorentzkurve. Diese muss durch Veränderung der Spannung in y und z verbessert werden. So war zu Beginn die Kurve nicht sehr symmetrisch. Dies wurde dann nochmal für 90° gemacht. Dies stellte sich an vielen Stellen als sehr schwierig und Zeitaufwendig heraus. Besonders bei 45° wurde keine besonders schöne Symmetrie erreicht.

$$I_y = (-0.0217 \pm 0.0001) \text{ A} \quad (12)$$

$$I_z = (-0.2957 \pm 0.0001) \text{ A} \quad (13)$$

Nachdem eine geeignete Einstellung gefunden wurde, wurden bei 0° 15 Messungen der Lorentzkurve gemacht. Danach wurde das System mit Hilfe der Peltierelemente stückweise abgekühlt um an diesen Stellen die Kurven für die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen gemessen. Aus Zeitgründen wurde diese erste Messung kurzgehalten und eine Messung bei steigender Temperatur gemacht. Am nächsten Tag wurde nochmal eine Kühlmessung gemacht mit mehr Messpunkten.

3 Auswertung

3.1 Extrapolation zur Ausschließung des Coherence Narrowing Effektes

Die für verschiedene Temperaturen kann nun mit der Gleichung 11 der Druck bestimmt werden. Der Fehler des Drucks σ_p wird mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt:

$$\sigma_p = \frac{\partial p}{\partial T} \sigma_T \quad (14)$$

Der Fehler für die Temperatur wurde auf 0.5 K geschätzt.

4 Tabellen

List of Tables

5 Bilder

List of Figures

1	Semiklassische Darstellung des Hanle Effekts	2
2	Lorentzkurve	3
3	Zeeman-Effekt	3
4	Versuchsaufbau	5
5	Labor Aufschrieb	8
6	Labor Aufschrieb	9
7	Labor Aufschrieb	10
8	Labor Aufschrieb	11

6 Bibliograpy

References

- [1] *Versuchsanleitung: Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1 Der Hanle-Effekt.*
- [2] P.A.Franken. Interference effects in the resoanance fluorescence of "crossed" excited atomic states. *The Harrison M.Randall Laboratory of Physics, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1960.*

7 Anhang

Hanle-Effekt	
Date Time	Description
10:36	Start testing the machines (Rampenspannung)
10:55	Photomultiplier einstellen
11:15	Testing the suppression by different $\theta \rightarrow -90^\circ$ kalibriert
13:14	$Y \ 0,1351 \quad Z \ 0,1049$ $A \ 0,0348 \quad 0,0054$ Winkel 87° nice $Y - 0,092 \ V$ $-0,0978 \ A$ 1V scale $Z - 3,560$ $-0,3959$ Für Angle 132° unsymmetrisch 177° nice
	flucts $Y - 0,1 A$ $Z = 0,3 A$
Lampe gewechselt	- Fokuspunkt bei -180
(190°)	$Y - 1,220$ $Y - 1,0217$ $Z \ 1,145$ $3,7,5$ $Z - 3,655$ $3,6(CSV)$ $-2,5(-x.csv)$ $2,5(CSV)$ $-1,20457$ $X \ 1,153$
20°	Speichern von Kurven mit emst. von $87,5 \ CSV$ oben: $236,50$ Skalenwahl: $CA/2: 1V$ $A: 5s$ $10 \cdot 10^{-9} A$ / 10^{-6} Suppr. $20V$ 30s $2,2 V$ UP LOW (J.V) (Start from)

Figure 5: Labor Aufschrieb

Messunges herabentkühlter
 PdH 14,4V | 16:25 start 20°C
 7,52A | 7,52A für ca 2 min
 Net | 1A 16:40 8°C
 3,4A 17:10 10°C
 17:17 10°C
 17:22 10°C

Lampe aufgew.

Messungen:

87,5° 90-2.CSV Range: 10^{-6} A 0,03
 36,5° 45-2.CSV rest S. etc oben 1V/1V
 -2,5° 0-2.CSV 10×10^{-9} 1V/1V
 12°C am Ende der Messung 10×10^{-9} A 2V/1V
 10×10^{-9} A 10V/1V

17:57 8°C	-2,5° 0-3.CSV	10×10^{-9} A	1V/1V
2,5A Kühlung	36,5° 45-3.CSV	"	"
18:03 6°C	87,5° 90-3.CSV	0,03 $\times 10^{-6}$	"
18:10 6°C	Temp am Ende der Messung: 6°C		

SA Kühlung 87,5° 90-4.CSV 10×10^{-9} A
 18:46 -1°C 36,5° 45-4.CSV $0,03 \times 10^{-6}$ A 0,5V/1V
 18:52 -1°C -2,5° 0-4.CSV 10×10^{-9} A
 Temp ende -2°C

7,5A Kühlung -2,5° 0-5.CSV 10×10^{-9} A
 19:05 -2°C 36,5° 45-5.CSV $0,03 \times 10^{-6}$ A
 19:43 -1°C -2,5° 0-5.CSV $0,03 \times 10^{-6}$ A
 ende: -17°C 20:17

Figure 6: Labor Aufschrieb

Abkühlungsmessers

Start: -17°C $20:17$

20! 21 -15°C 487,50 g L W. l. or 0,03 x 10⁻⁶ A
 -14°C 36,50 g L W. l. -CSV 0,03 x 10⁻⁶ A
~~-13°C -4,50 g L W. l. -CSV 0,03 x 10⁻⁶ A~~
 -12°C 10 x 10⁻⁶ A
 = -13°C W. l. -dieser W sehr schnell
 → nur noch -25° Messungen

20:36 -10°C O-W-2, CSV $10 \times 10^{-9} \text{ A}$

20:42 $\frac{-80^{\circ}\text{C}}{-70^{\circ}\text{C}}$ QW-3.CSV

20:48 -6°C O-W-4-CSV

~~20:54 - 6/3 QW_5.CSV~~
~~CDPDL~~

21:02 - 10°C 0-W-5.03V

21.11 + 10°C O-W-F. (SV)

21:23 2°C 0-W-8.CSV

21:35 4°C QW-CSV

21:44 6°C $\theta_{W-10-CSV}$

Ende der Messung

2. Tag

- Überprüfung ob Einstellungen für Kalibration noch stimmen
- 2. Abkühlungsmessung
- 1. Schritte, ~~den~~ anschließend auf abkühlung weiter
- Starttemperatur

		8750	Strom	Temp
9:20	0-1.csv	90-1.csv	0,04	18°C
9:26	$10 \times 10^{-9} A$	$10 \times 10^{-8} A$		17°C
10:00				11°C
10:10				10°C
10:24	0-2.csv	90-2.csv	2,5V	10°C
10:35	$10 \times 10^{-8} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$		7°C
10:50				4°C
10:59				5°C
11:04	0-3.csv	90-3.csv	2A	5°C
	$10 \times 10^{-9} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$		-1°C
11:16				-2°C
11:20				1°C
11:40	0-4.csv	90-4.csv	22V	10°C
11:47	$10 \times 10^{-9} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$	3A	-9°C
12:02				-7°C
12:20				-7°C
12:25	0-6.csv	90-6.csv	4A/8,9V	-7°C
	$10 \times 10^{-9} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$		-8°C
12:34		90-7.csv	7,5A	-17°C
13:02	0-7.csv		15,9V	

Figure 8: Labor Aufschrieb