

Versuch: Hanle - Effekt

Paul Kremser, Tobias Grussenmeyer

Versuchsdurchführung: 9. und 12. Oktober 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick	1
2	Aufgabestellung	1
3	Theoretische Grundlagen	1
3.1	Klassische Deutung	1
3.2	Quantenmechanische Deutung	2
3.3	Coherence Narrowing	3
4	Versuchsaufbau	4
5	Durchführung	5
6	Auswertung	5
7	Zusammenfassung	10
8	Anhang	10

1 Überblick

Mit dem Versuch soll die Lebensdauer angeregter Zustände des Quecksilberatoms bestimmt werden. Grob gesagt werden hierzu Quecksilberatome in einer Quarzzelle durch polarisiertes Licht angeregt. Durch ein von außen angelegtes Magnetfeld wird die Richtung in der die angeregten Atome wieder abstrahlen beeinflusst.

2 Aufgabestellung

Bestimmung der Lebensdauer des angeregten $6s6p \quad ^3P_1$ Zustands des Hg -Atoms durch Messung des Hanle-Signals in Abhängigkeit vom Dampfdruck des Quecksilbers für verschiedene Polarisationsrichtungen des einstrahlenden Lichts. Dokumentation der Änderung der effektiven Lebensdauer durch *Coherence Narrowing*.

3 Theoretische Grundlagen

Wir nutzen den Hanle-Effekt zur bestimmung der Lebensdauer angeregter Zustände im Hg -Atom. Dazu bestrahlen wir die Atome mit linear polarisiertem Licht dessen Wellenlänge dem Übergang des zu untersuchenden Zustands entspricht. Die bestrahlten Atome werden dadurch angeregt und strahlen ebenfalls Licht dieser Wellenlänge und polarisation aus (Resonanzfluoreszenz). Beobachtet man die Atome nun aus der zur polarisation parallelen Richtung so sieht man zunächst keine Strahlung. Legt man senkrecht zur Polarisationsrichtung ein äusseres Magnetfeld an so sieht man bei Variation dieses Feldes auch eine Variation der Intensität. Dies wird als Hanle Effekt bezeichnet.

3.1 Klassische Deutung

Bei klassischer Betrachtungsweise schwingt das angeregte Atom als Dipol entlang der Polarisationsachse. Es handelt sich also um einen gedämpften Oszilator, das Atom schwingt bis es durch die Strahlungsdämpfung wieder zur Ruhe kommt. Betrachtet man nun diesen Dipol parallel zur Schwingungsachse so sieht man keine Strahlung da ein Dipol nie in dieser Richtung abstrahlt. Legt man nun senkrecht zur Schwingung ein Magnetfeld an so beginnt das Elektron aufgrund der Lorentzkraft mit der Lamorfrequenz um die Feldrichtung zu präzedieren. Diese Frequenz berechnet sich zu:

$$\omega_L = \frac{g_j \mu_B H}{\hbar} \quad (1)$$

wobei g_j der Landesche Faktor und μ_B das Bohrsche Magneton ist. In einer zur Feldachse senkrechten Ebene kommt es dadurch zu einer rosettenartigen Figur der Elektronenbahn.

Die Intensitätsverteilung des Dipols ist im wesentlichen eine $\sin^2(\vartheta)$ Verteilung (ϑ ist der Winkel

zwischen Dipolachse und Beobachtungsrichtung). Setzt man nun $\vartheta = \omega_L t$ und beschreibt die Dämpfung mittels dem Term $e^{-t/\tau}$, mit τ als mittlerer Lebensdauer des angeregten Zustands so folgt die Strahlungsintensität zu:

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

Dieses Integral ergibt augewertet eine inverse Lorentzkurve, C ist eine Proportionalitätskonstante. Ist die Polarisationsrichtung um $\pi/2$ zur Beobachtungsrichtung gedreht so ergibt sich eine normal Lorentzkurve. In beiden Fällen gilt für die Halbwertsbreite $\omega_{\frac{1}{2}}$:

$$\omega_{\frac{1}{2}} = \frac{\hbar}{g_j \mu_B \tau} \quad (3)$$

Daraus folgt dann für die Lebensdauer, wenn $H_{\frac{1}{2}}$ die Feldstärke bei halber Höhe der vollen Intensität ist:

$$\tau = \frac{\hbar}{2g_j \mu_B H_{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

3.2 Quantenmechanische Deutung

Der Hanle Effekt ist ein spezialfall des sogenannten *level-crossing*. Unter level-crossing versteht man folgendes:

Liegt eine Feinstrukturaufspaltung in verschiedene Zeeman-Niveaus bereits ohne äußeres Magnetfeld vor, so können die verschiedenen Niveaus durch Anlegen eines Feldes zur Überkreuzung gebracht werden, d. h. bei einer bestimmten Feldstärke können zwei Niveaus energetisch zusammenfallen. In diesem Bereich findet man eine merkliche Änderung der Intensität der Fluoreszenzstrahlung.

Der Hanle Effekt tritt bei Feldstärke null auf, d.h. die Energien der Feinstrukturauflösung fallen bei Feldstärke null zusammen. Der Intensitätsverlauf kann quantenmechanisch hergeleitet werden, dazu kann man bei diesem Versuch die Breit-Formel verwenden, eine Ratengleichung, welche die Absorption und Reemission von Photonen (mit der Polarisation von f bzw. g) in der Resonanzzelle beschreibt. Für ein System mit Grundzustand a und zwei sich kreuzenden Zuständen b und c lässt sich die Rate aufspalten, mit $\nu(b, c)$ als Frequenzdifferenz der angeregten Zustände.

$$R(f, g) = c \left[R_0 + \frac{A}{1 - 2\pi i \tau \nu(b, c)} + \frac{A^*}{1 - 2\pi i \tau \nu(b, c)} \right] \quad (5)$$

Man erhält für ein imaginäres A einen Intensitätsverlauf in Form einer Dispersionskurve und für ein reelles A eine Lorentzkurve. Von den drei Komponenten in die sich ein 3P_1 -Term aufspaltet, nämlich

$m = 0$ und $m = \pm 1$, beobachten wir nur die Strahlung der $m = \pm 1$ -Komponenten. A ist in diesem Fall reell und die Energieaufspaltung im Magnetfeld beträgt:

$$\Delta\nu = \frac{2g_j\mu_B H}{h} \quad (6)$$

Für die Halbwertsbreite der Lorentzkurve erhält man:

$$\Delta\nu_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\pi\tau} = \frac{2g_j\mu_B 2H_{\frac{1}{2}}}{h} \quad (7)$$

und somit erhält man für die mittlere Lebensdauer wieder:

$$\tau = \frac{h}{4g_j\mu_B\pi H_{\frac{1}{2}}} = \frac{\hbar}{2g_j\mu_B H_{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

3.3 Coherence Narrowing

Hierbei handelt es sich um einen Effekt der die mittlere Lebensdauer länger erscheinen lässt. Dabei wird ein Atom in der Nähe des angeregten durch die Strahlung des ersteren selbst angeregt. Dieses Schwingt unter Beibehaltung der Präzession, Phase und Raumorientierung der Dipolschwingung des ersten Atoms. Dieser Prozess kann mehrfach auftreten, seine Wahrscheinlichkeit hängt vom Dampfdruck der beobachteten Substanz ab. Der Dampfdruck steigt mit der Temperatur, weshalb wir Messungen bei verschiedenen Temperatur durchführen um dann auf den Wert $T = 0K$ zu extrapolieren.

4 Versuchsaufbau

Abbildung 1: Versuchsaufbau des Hanle-Effekts

Als Lichtquelle dient eine HF-induzierte Gasentladung in einer Quecksilberdampflampe. Das Licht gelangt über zwei Linsen, einem Interferenzfilter und einem Polarisator in die mit Quecksilberdampf gefüllte Resonanzzelle aus Quarz. Die erste Linse macht das Licht parallel, der Interferenzfilter filtert die zur Anregung des 3P_1 -Zustands benötigte Spektrallinie, der Polarisator polarisiert das Licht in die gewünschte Richtung und die zweite Linse fokussiert das Licht in die Zelle. Die Zelle wird über ein Kühlssystem aus Peltierelement und Wasserkühlung gekühlt um die Messung bei verschiedenen Temperaturen (also verschiedenen Dampfdrücken) zu ermöglichen. Um die Zelle herum sind drei Helmholtzspulenpaare angebracht. Zwei davon sind zur Kompenstion der von externen (u.a. Erdmagnetfeld) Störfeldern, das dritte ist zum erzeugen des für den Hanle Effekt nötigen Magnetfeldes, dieses wird während des Versuchs variiert. Senkrecht zur Einfallsrichtung des Lichts wird die erzeugte Resonanzstrahlung über einen Lichtleiter zum Photomultiplier geführt. Von dort wird das Signal an ein Elektrometer weitergegeben, das über ein Oszilloskop an einen Computer angeschlossen ist, mit dem das Signal dann aufgezeichnet wird.

5 Durchführung

Zunächst stellten wir die kompensierenden Magnetfelder ein und justierten den Polarisator auf 90° . Wir erhielten ein sauberes symmetrisches Hanle Signal. Dann kühlten wir Die Resonanzzelle auf die minimal erreichbare Temperatur ab. Die Temperaturnmessung erwies sich als äußerst schwierig: Die in der Anleitung beschriebene Temperaturanzeige am Peltiernetzgerät war nicht vorhanden. Das vorhandene Digitalthermometer wurde jedoch durch die Hochfrequenz der Lampe gestört. Zudem konnte das Digitalthermometer die Temperatur nur auf 1°C anzeigen. Um eine bessere Auflösung der Temperatur zu erhalten stellten wir die Anzeige auf Fahrenheit um ($1^\circ\text{C} = 5/9^\circ\text{F}$). Da die Störung durch die Lampe während der Messung nicht zu vermeiden war überprüften wir die Temperatur jeweils vor und nach einer Messreihe bei ausgeschalteter Lampe. Zunächst erreichten wir eine minimale Temperatur von -11°C und nahmen während des Aufwärmens Messungen bis 10°C auf. Danach justierten wir den Polarisator auf $\pm 45^\circ$ und nahmen je eine Dispersionskurve auf. Zuletzt kühlten wir wieder (über 3 Stunden, laut Anleitung wird nach einer Stunde die minmale Temperatur erreicht) um die 0° -Polarisationrichtung zu vermessen. Leider erreichten wir hier nur noch eine Temperatur von -8°C .

6 Auswertung

Die genutzte Formel zum fitten der Lorentzkurve lautet:

$$y(x) = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{\omega}{4(x - x_c)^2 + \omega^2} + b_x \quad (9)$$

mit $y_0 \hat{=} \text{Y-Achsenoffset}$

$A \hat{=} \text{Fläche}$

$x_0 \hat{=} \text{X-Koordinate des Peaks}$

$\omega \hat{=} \text{Halbwertsbreite der Kurve}$

$b \hat{=} \text{Steigung des linearen Terms zur berücksichtigung der Temperatur}$

Bei den zum Fitten verwendeten Messpunkten beschränkten wir uns auf einen Bereich von $0,7A$ um den Peak der Kurve, um Unregelmässigkeiten am Rand der Messung auszufiltern. Der Parameter ω dieser Kurve liefert uns direkt die Halbwertsbreite in Ampère. Aus dieser können wir die Magnetfeldstärke $H_{\frac{1}{2}}$ in Tesla bei halber Intensität bestimmen:

$$2H_{\frac{1}{2}} = 3,363 \cdot 10^{-4} \omega \quad (10)$$

Also folgt mit Gleichung 4 oder 8 die Lebensdauer in Sekunden:

$$\tau = \frac{\hbar}{2g_j\mu_B H_{\frac{1}{2}}} = \frac{\hbar}{g_j\mu_B \cdot 3,363 \cdot 10^{-4}\omega} \quad (11)$$

mit dem Fehler:

$$s_\tau = \tau \frac{s_\omega}{\omega} \quad (12)$$

Für die Fits haben wir jeweils nur eine Beispielgrafik angeführt. Die Ergebnisse der 74 einzelnen Fits sind im Anhang in zwei Tabellen zusammengefasst.

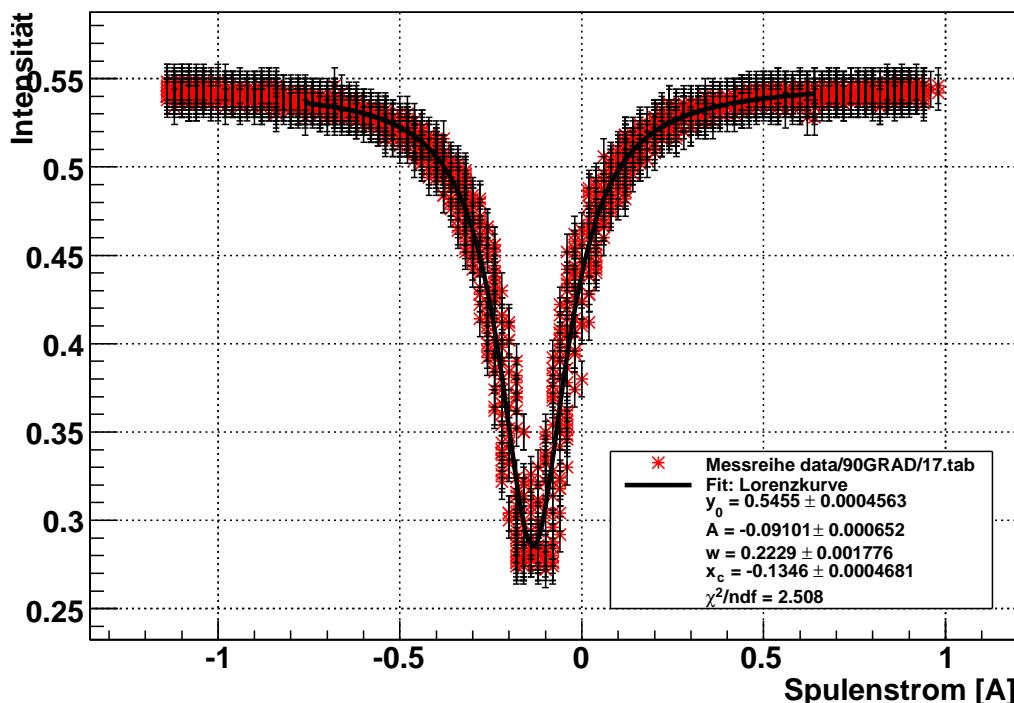


Abbildung 2: Beispiel eines Fits für die 90° Messung

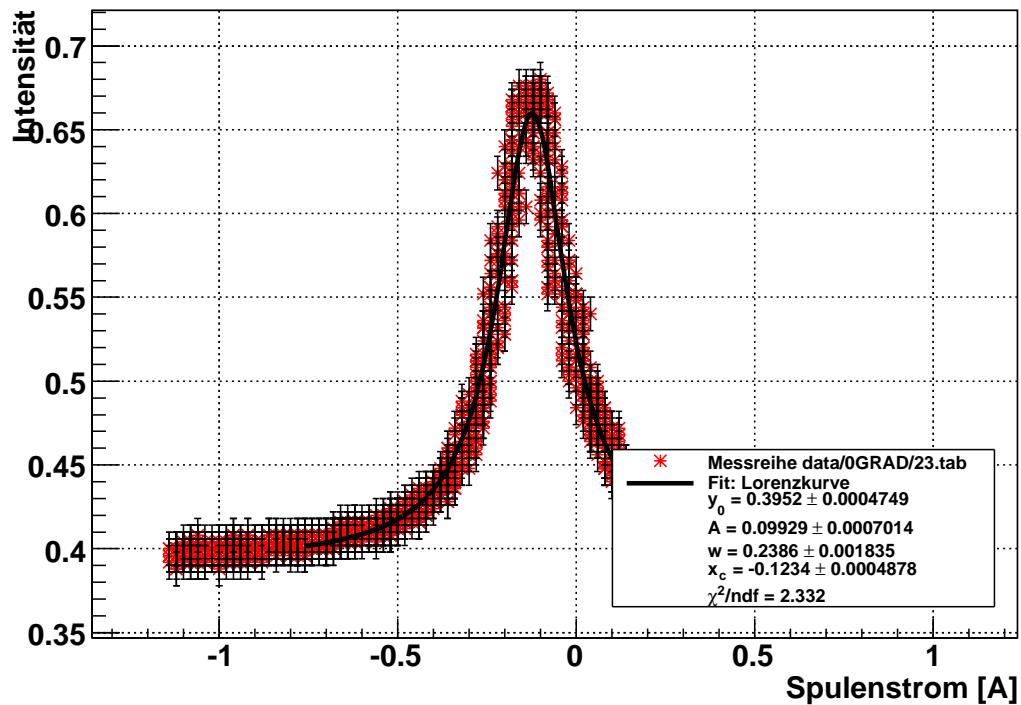
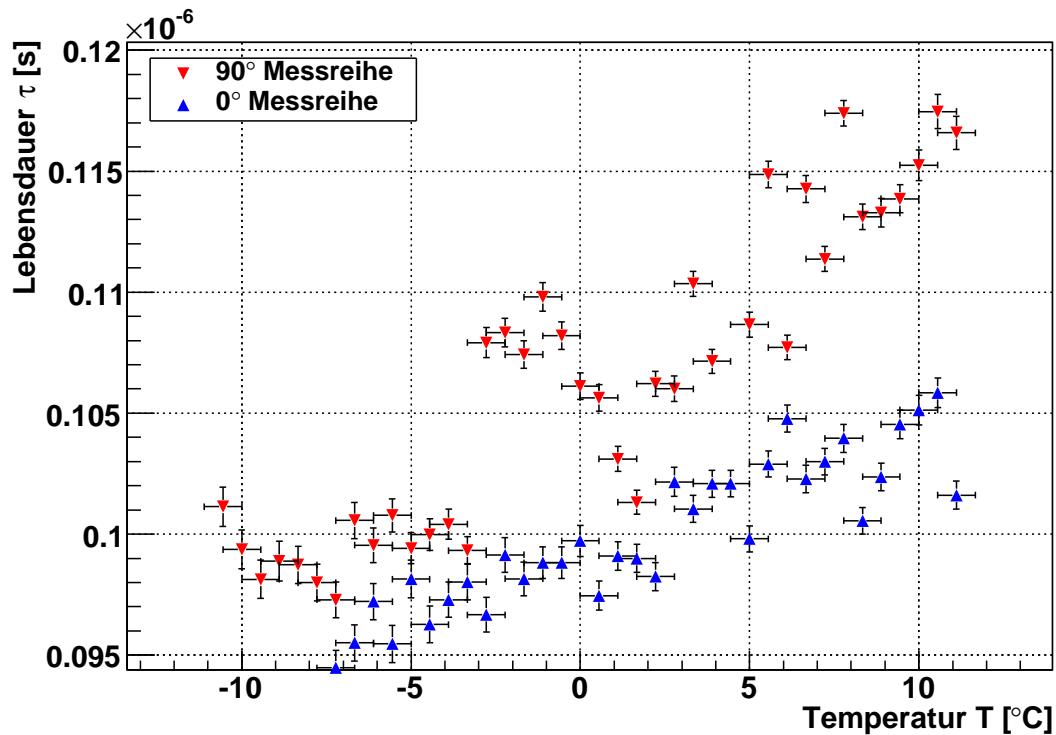
Abbildung 3: Beispiel eines Fits für die 0° Messung

Abbildung 4: Lebensdauer nach Temperatur

Die in Fahrenheit gemessenen Temperaturen haben wir zu Beginn in Celsius umgerechnet:

$$T^{\circ}C = (T^{\circ}F - 36) \cdot 5/9 \quad (13)$$

Den Fehler auf die in Fahrenheit gemessene Temperatur haben wir mit $1^{\circ}F$ angenommen. Somit ergibt sich für den Fehler auf die Temperatur in $^{\circ}C$: $s_{T^{\circ}C} = 5/9^{\circ}C$.

Nun trugen wir die errechneten Lebensdauern gegen die Temperatur auf (siehe Abb.4). In der Grafik kann man schön das *coherence narrowing* beobachten.

Um aus der Temperatur (in Kelvin) den Dampfdruck p (in Torr) zu bestimmen verwendeten wir die in der Anleitung angegebene Formel:

$$\log_{10}(p/Torr) = A + B \log_{10}(T/K) + \frac{C}{T} \quad (14)$$

Verwendete Konstanten:

Temperaturbereich	A	B	C
$T = -30^{\circ}C \dots +3^{\circ}C$	8,86	0	$-3340K$
$T = +3^{\circ}C \dots +25^{\circ}C$	10,5724	-0,847	$-3342,26K$

Für den Fehler ergibt sich : fehlt noch

Schliesslich konnten wir die Lebensdauern gegen den Dampfdruck auftragen und mit linearer Regression auf die natürliche Lebensdauer extrapolieren.

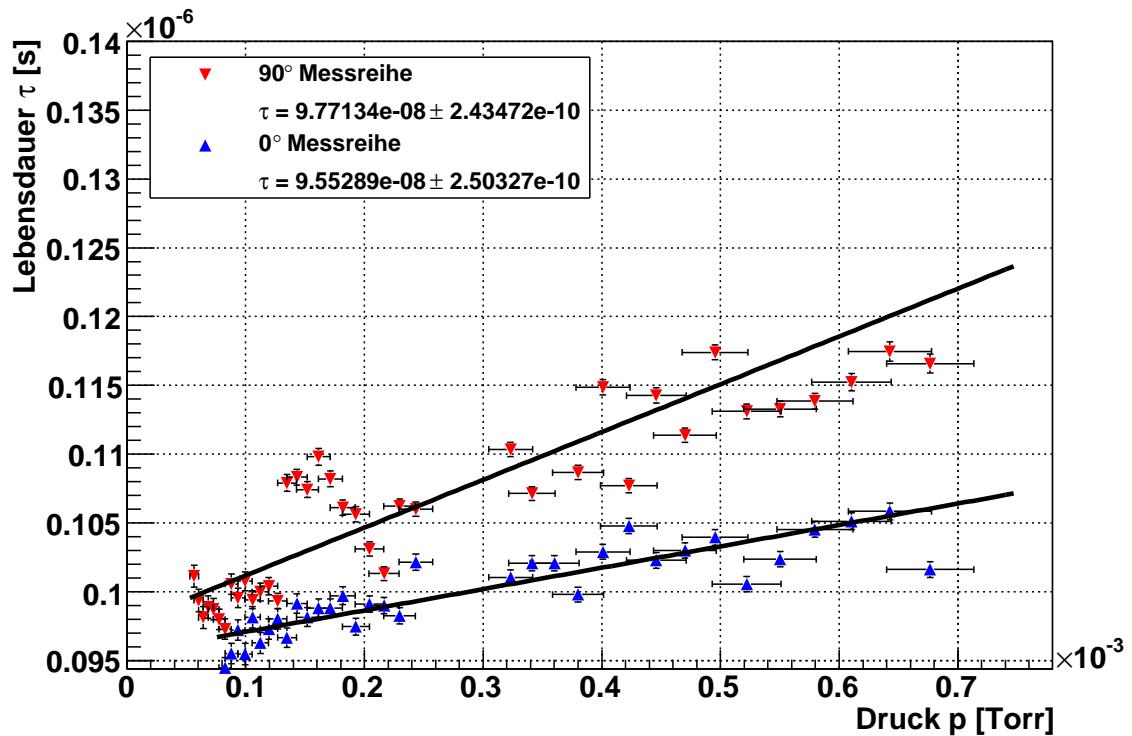


Abbildung 5: Lebensdauer nach Druck

Für die Messung bei 90° erhielten wir so:

$$\tau_{90^\circ} = (0, 9772 \pm 0, 0024) \cdot 10^{-7} \quad (15)$$

und für 0°:

$$\tau_{0^\circ} = (0, 9552 \pm 0, 0025) \cdot 10^{-7} \quad (16)$$

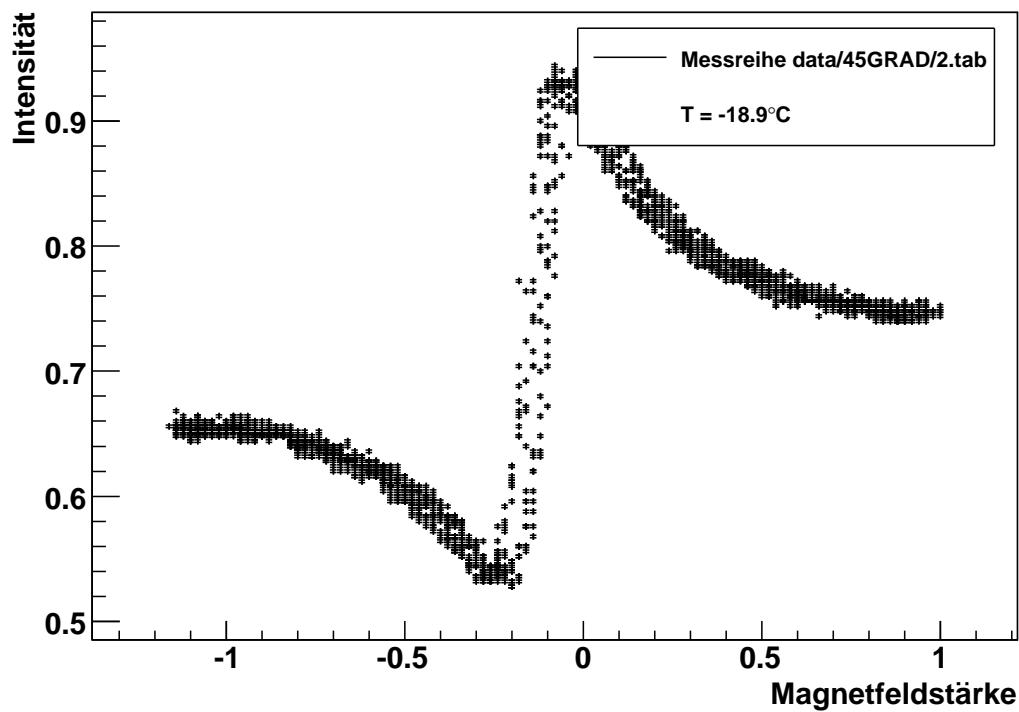


Abbildung 6: Dispersionskurve bei 45°

Die Grafik von einer der Messungen bei 45° zeigt den Typischen Verlauf einer Dispersionskurve.

7 Zusammenfassung

8 Anhang

Messung	χ^2/ndf	w/A	s_w/A	$\tau/10^{-7}s$	$s_\tau/10^{-7}s$
90°					
data/90GRAD/17.tab	2.507850	0.222890	0.001776	1.011347	0.008058
data/90GRAD/18.tab	2.451637	0.226850	0.001850	0.993692	0.008104
data/90GRAD/19.tab	2.745750	0.229705	0.001865	0.981341	0.007968
data/90GRAD/20.tab	3.041130	0.227979	0.001893	0.988771	0.008210
data/90GRAD/21.tab	3.219232	0.228320	0.001794	0.987294	0.007758
data/90GRAD/22.tab	3.079501	0.230035	0.001775	0.979934	0.007561
data/90GRAD/23.tab	3.334764	0.231712	0.001744	0.972841	0.007322
data/90GRAD/24.tab	2.953585	0.224155	0.001652	1.005639	0.007411
data/90GRAD/25.tab	2.905792	0.226445	0.001633	0.995469	0.007179
data/90GRAD/26.tab	3.130677	0.223691	0.001527	1.007725	0.006879
data/90GRAD/27.tab	3.332571	0.226733	0.001455	0.994205	0.006380
data/90GRAD/28.tab	4.293953	0.225464	0.001455	0.999801	0.006452
data/90GRAD/29.tab	3.940544	0.224500	0.001397	1.004094	0.006248
data/90GRAD/30.tab	4.100229	0.226949	0.001297	0.993259	0.005676
data/90GRAD/31.tab	4.654875	0.208899	0.001205	1.079081	0.006225
data/90GRAD/32.tab	4.695258	0.208105	0.001135	1.083199	0.005908
data/90GRAD/33.tab	4.676428	0.209844	0.001120	1.074222	0.005733
data/90GRAD/34.tab	4.451455	0.205295	0.001119	1.098025	0.005985
data/90GRAD/35.tab	5.225701	0.208334	0.001094	1.082008	0.005682
data/90GRAD/36.tab	7.222879	0.212433	0.001094	1.061130	0.005465
data/90GRAD/37.tab	8.227187	0.213393	0.001118	1.056356	0.005534
data/90GRAD/38.tab	8.705612	0.218622	0.001100	1.031090	0.005188
data/90GRAD/39.tab	9.620318	0.222494	0.001094	1.013147	0.004982
data/90GRAD/40.tab	7.344306	0.212220	0.001033	1.062195	0.005170
data/90GRAD/41.tab	9.066111	0.212641	0.001047	1.060092	0.005220
data/90GRAD/42.tab	8.575300	0.204285	0.000967	1.103454	0.005223
data/90GRAD/43.tab	8.265110	0.210398	0.000985	1.071393	0.005016
data/90GRAD/45.tab	9.911628	0.207460	0.000985	1.086566	0.005159
data/90GRAD/46.tab	7.072050	0.196257	0.000933	1.148591	0.005460
data/90GRAD/47.tab	9.363346	0.209271	0.000990	1.077163	0.005096
data/90GRAD/48.tab	9.038844	0.197274	0.000959	1.142670	0.005555
data/90GRAD/49.tab	9.363202	0.202409	0.000945	1.113681	0.005200
data/90GRAD/50.tab	7.606058	0.192016	0.000862	1.173960	0.005270
data/90GRAD/51.tab	9.061703	0.199288	0.000942	1.131122	0.005347
data/90GRAD/52.tab	7.949820	0.198991	0.001030	1.132810	0.005864
data/90GRAD/53.tab	8.651610	0.197985	0.001007	1.138566	0.005791
data/90GRAD/54.tab	7.601528	0.195596	0.001065	1.152473	0.006275
data/90GRAD/55.tab	8.304311	0.191906	0.001144	1.174633	0.007002
data/90GRAD/56.tab	7.398600	0.193353	0.001124	1.165842	0.006777

Messung	χ^2/ndf	w/A	s_w/A	$\tau/10^{-7}s$	$s_\tau/10^{-7}s$
0°					
data/0GRAD/23.tab	2.331969	0.238595	0.001835	0.944777	0.007266
data/0GRAD/24.tab	2.345162	0.236015	0.001848	0.955105	0.007478
data/0GRAD/25.tab	1.879862	0.231887	0.001767	0.972107	0.007408
data/0GRAD/26.tab	2.359967	0.236123	0.001910	0.954668	0.007722
data/0GRAD/27.tab	1.974656	0.229675	0.001827	0.981470	0.007807
data/0GRAD/28.tab	1.834705	0.234151	0.001833	0.962708	0.007536
data/0GRAD/29.tab	2.019341	0.231694	0.001733	0.972917	0.007277
data/0GRAD/30.tab	2.177183	0.229954	0.001739	0.980279	0.007413
data/0GRAD/31.tab	2.039794	0.233181	0.001716	0.966713	0.007114
data/0GRAD/32.tab	2.539990	0.227372	0.001630	0.991411	0.007107
data/0GRAD/33.tab	2.424334	0.229671	0.001618	0.981487	0.006914
data/0GRAD/34.tab	2.441647	0.228111	0.001525	0.988199	0.006606
data/0GRAD/35.tab	2.607184	0.228116	0.001514	0.988177	0.006559
data/0GRAD/36.tab	2.645670	0.226057	0.001441	0.997178	0.006357
data/0GRAD/37.tab	3.165984	0.231297	0.001424	0.974587	0.006000
data/0GRAD/38.tab	3.282371	0.227460	0.001359	0.991027	0.005921
data/0GRAD/39.tab	3.175136	0.227708	0.001343	0.989948	0.005839
data/0GRAD/40.tab	3.978974	0.229434	0.001354	0.982501	0.005798
data/0GRAD/41.tab	4.082765	0.220653	0.001282	1.021600	0.005936
data/0GRAD/42.tab	3.855403	0.223088	0.001244	1.010449	0.005635
data/0GRAD/43.tab	4.288555	0.220826	0.001215	1.020799	0.005617
data/0GRAD/44.tab	4.073039	0.220824	0.001183	1.020809	0.005469
data/0GRAD/45.tab	5.062763	0.225861	0.001228	0.998043	0.005426
data/0GRAD/46.tab	5.063409	0.219074	0.001150	1.028963	0.005401
data/0GRAD/47.tab	4.704863	0.215145	0.001160	1.047754	0.005649
data/0GRAD/48.tab	4.830039	0.220390	0.001211	1.022819	0.005620
data/0GRAD/49.tab	4.985590	0.218862	0.001175	1.029960	0.005530
data/0GRAD/50.tab	5.196461	0.216842	0.001200	1.039554	0.005753
data/0GRAD/51.tab	7.110914	0.224177	0.001218	1.005540	0.005463
data/0GRAD/52.tab	5.121936	0.220204	0.001230	1.023683	0.005718
data/0GRAD/53.tab	5.142061	0.215641	0.001211	1.045344	0.005870
data/0GRAD/54.tab	3.837783	0.214423	0.001234	1.051282	0.006050
data/0GRAD/55.tab	3.947853	0.212972	0.001237	1.058444	0.006148
data/0GRAD/56.tab	4.877161	0.221841	0.001267	1.016129	0.005803

