

Fortgeschrittenes Physik Lab SS19

Experiment: Hanle Effekt

(Durchgeführt am: 13-16.09.19 bei Fabian Kuger)

Erik Bode, Damian Lanzenstiel
(Group 103)

September 25, 2019

Abstract

In diesem Experiment geht es um den Hanle Effekt welcher bei der Wechselwirkung von Materie mit magnetischen Feldern auftritt. Quantenmechanisch wird er durch "level crossing" erklärt. Das Ziel des Experiments ist es die Lebenszeit τ von Quecksilber, bei einem Übergang von einem $6s6p$ in den Grundzustand von $6s^2$, zu bestimmen. Hierzu muss das Phänomen von "Coherence Narrowing" beachtet werden welches die Werte beeinflusst.

Die Ergebnisse für die längere Messreihe sind (118.1 ± 001.8) ns bei 0° (116.6 ± 001.7) ns bei 90° . Der Literaturwert beträgt 119 ns.

Contents

1	Theorie	2
1.1	Semiklassische Herleitung	2
1.2	Quantenmechanische Erklärung	3
1.2.1	Breit-Formel	3
1.3	Coherence Narrowing und Dampfdruck	4
1.4	Versuchsaufbau	4
2	Versuchsdurchführung	5
3	Auswertung	6
3.1	Umrechnung in Magnetfelder	6
3.2	Berechnung der Lebenszeit bei 0° und 90°	6
3.3	Extrapolation zur Ausschließung des Coherence Narrowing Effektes	8
3.3.1	Lebensdauern der Abkühlungsmessung 1	8
3.3.2	Lebensdauern der Aufwärmmessung 1	9
3.3.3	Lebensdauern der Abkühlmessung 2	10
3.4	Messungen zu 45°	11
4	Zusammenfassung	13
5	Tabellen	14
6	Bilder	14
7	Bibliograpy	14
	Literatur	14
8	Anhang	14

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.

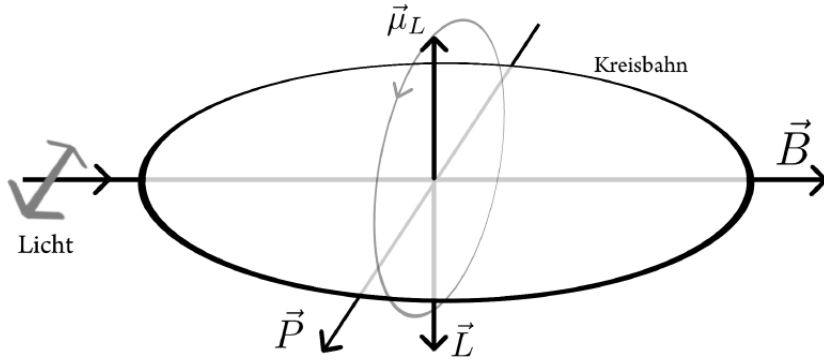


Figure 1: Darstellung der Präzessionsbewegung eines Elektrons mit Dipolmoment \vec{P} , Drehimpuls \vec{L} und magnetischem Moment μ_L bei angelegtem Magnetfeld der Flussdichte B . [1]

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:

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

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:

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

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:

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

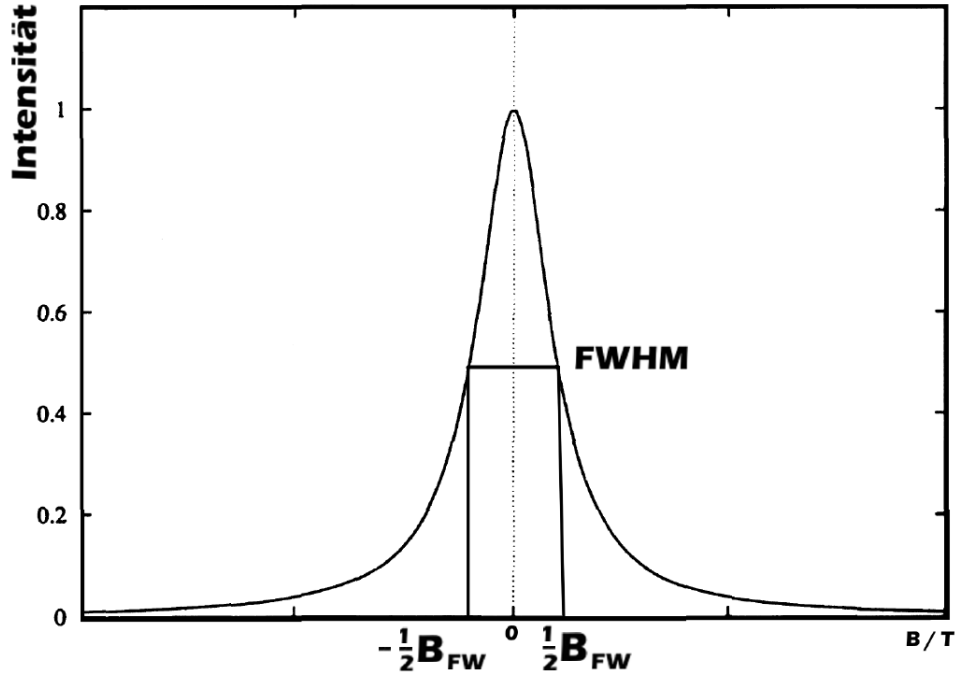


Figure 2: Lorentzkurve mit sichtbare Intensität in Beobachtungsrichtung 0° mit FWHM eingezeichnet.[1]

Durch das Einfügen einer Phase in Gleichung 5 kann man die Gleichung 7 erhalten die von dem Winkel unabhängig ist. Durch einen Fit kann man hier direkt τ ablesen.

$$I = C \cdot \int_0^\infty \cos(\omega_L t + \phi)^2 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C\tau}{2} \left(\frac{1 + (2\tau\omega_L)^2 + \cos(2\phi) - 2\omega_L\tau \sin(2\phi)}{1 + (2\tau\omega_L)^2} \right) \quad (7)$$

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

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

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

$$I \propto A_1^2 + A_2^2 \quad (9)$$

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:

$$R(\vec{f}, \vec{g}) = N \int_0^\infty R(\vec{f}, \vec{g}, t) dt = N \sum_{m, m'}^{\mu, \mu'} \frac{f_{m\mu} f_{\mu' m} g_{\mu m'} g_{m', \mu'}}{L_{\mu, \mu'} - i(\omega_\mu - \omega_{\mu'})} \quad (10)$$

Eine genauere Herleitung findet sich in der Versuchsanleitung[1] oder in der 'Interference Effects in the Resonance Fluorescence of "Crossed" Excited Atomic States' by P.A.Franken.[3]

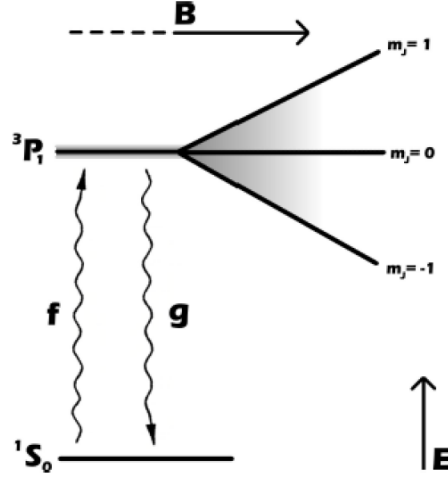


Figure 3: Aufspaltung der Energieniveaus durch m_j in einem Magnetfeld.[1]

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 [1] beschrieben die Form:

$$R = C \frac{1}{1 + (2\omega_L \tau)^2} \quad (11)$$

Diese entspricht dem Semiklassischen Ergebnis in Gleichung 4.

1.3 Coherence Narrowing und Dampfdruck

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:

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T}\right)(a_1 T_r + a_2 T_r^{1.89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8.5} + a_6 T_r^9) \quad (12)$$

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 Quecksilberdampflampe 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 Polarisations-einstellung ausbildet.

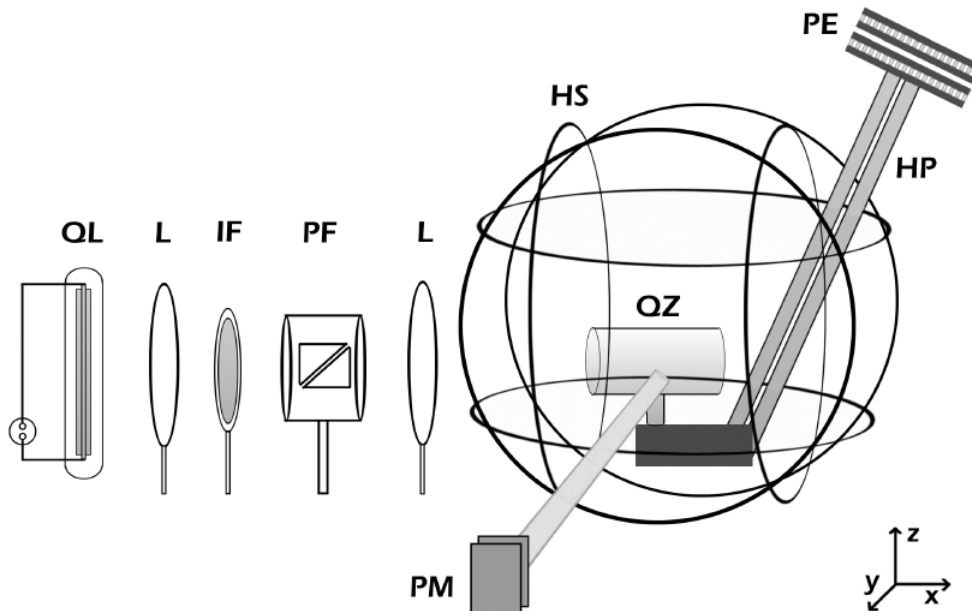


Figure 4: Versuchsaufbau des Experiments. Quecksilberdampflampe (QL), Linse (L), Interferenzfilter (IF), Polarisationsfilter (PF), Quecksilberdampf-Resonanzzelle (QZ), Heatpipes (HP), Peltierelemente (PE), Helmholtz-spulen (HS), Photomultiplier (PM). [1]

2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Experiments musste als erstes die Magnetfelder in y und z Richtung so kalibriert werden, dass diese das Erdmagnetfeld kompensieren. 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 des Stroms der Helmholtz Spulen in y und z verbessert werden. So war zu Beginn die Kurve nicht sehr symmetrisch. Dies wurde nochmal für 90° durchgeführt, was sich an vielen Stellen als sehr schwierig und Zeitaufwendig herausstellte. Besonders bei 45° wurde keine besonders schöne Symmetrie erreicht.

$$I_y = (-0.0217 \pm 0.0001) \text{ A} \quad (13)$$

$$I_z = (-0.2957 \pm 0.0001) \text{ A} \quad (14)$$

Nachdem eine geeignete Einstellungen (vgl.13,14) gefunden wurden, wurden bei 0° 15 Messungen der Lorentzkurve gemacht. Danach wurde das System mit Hilfe der Peltierelemente stückweise abgekühlt, um die Kurven für die Unterschiedlichen Polarisationsrichtungen bei verschiedenen Temperaturen, beziehungsweise Drücken, gemessen. Aus Zeitgründen wurde diese erste Messung kurzgehalten und anschließend eine Messung bei steigender Temperatur durchgeführt. Am nächsten Tag wurde nochmal eine Kühlmessung mit mehr Messpunkten aufgenommen.

3 Auswertung

3.1 Umrechnung in Magnetfelder

Zu Beginn der Auswertung musste die Zeitachse des Oszilloskops in Tesla umgerechnet werden um die B_{FW} zu bestimmen, welches in Gleichung 6 zu nutzen. Hierfür wurde eine gerade durch die Rampenspannung angepasst. Hierfür wurde aus dem Python Paket `scipy.optimize`[2] das Modul `curve_fit` verwendet. Für den Fit wurde die Form $f(x) = mx + b$ angenommen und an alle Werte zwischen -1 V und 1 V als angepasst. Es wurde exakt dieser Bereich gewählt, da der echte Magnetfeld erzeugende Strom nur in diesem Bereich liegen kann und so auch die Platos vor Beginn und nach dem Ende der Rampe kategorisch ausgeschlossen werden können. Mit dieser Kurve kann nun die Messwerte der x-Achse in Tesla umgerechnet werden. Dies wurde für jede CSV Datei einzeln durchgeführt. In Abbildung 5 ist ein Fit beispielhaft eingezeichnet.

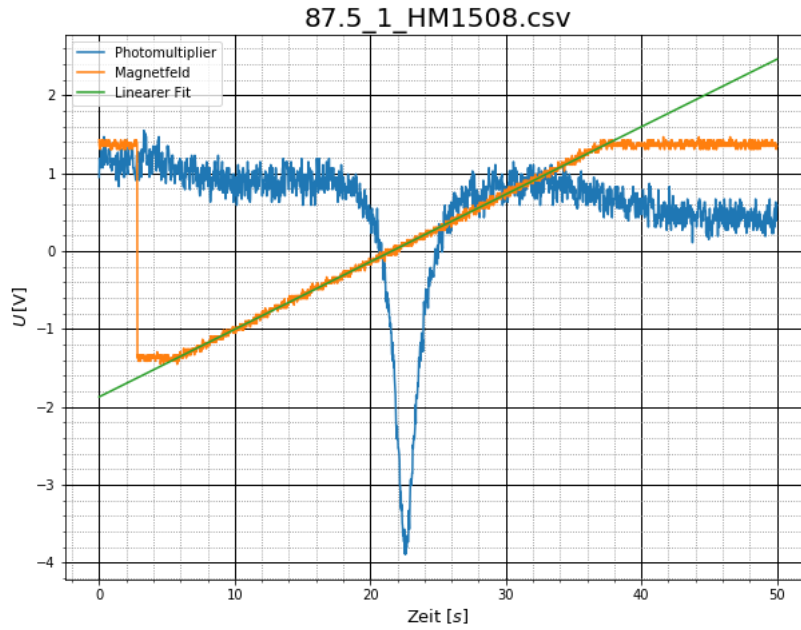


Figure 5: Beispiel für den Fit der Rampenspannung einer 90° Messung. In blau die gemessenen Verlauf der Spannung des Photomultipliers. In orange die Rampenspannung und in grün der Fit.

3.2 Berechnung der Lebenszeit bei 0° und 90°

Zur Bestimmung der Lebenszeit wurden Lorentzkurven an die Messpunkte mit der neuen x-Achse angepasst. Hierfür wurde wie zuvor `curve_fit` verwendet. Die Fehler der Umrechnung des Magnetfeldes wurden nicht mitgenommen da `curve_fit` keine Fehler in x-Achse zulässt. Der Fit ist diesmal in der Form:

$$f(x) = \frac{a}{1 + \frac{(x-x_0)^2}{\gamma^2}} + b \quad (15)$$

Der Parameter γ ist hierbei $\frac{B_{FW}}{2}$ also die halbe Halbwertsbreite. Damit ergibt sich aus Gleichung 6:

$$\tau = \frac{\hbar}{gJ\mu_B 2\gamma} \quad (16)$$

Der Fehler σ_τ ergibt sich durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung mit Gleichung 17

$$\sigma_\tau = \frac{\hbar}{gJ\mu_B 2\gamma^2} \sigma_\gamma \quad (17)$$

Für die zwei Winkel sind Abbildung 6 und 7 beispielhaft dargestellt.

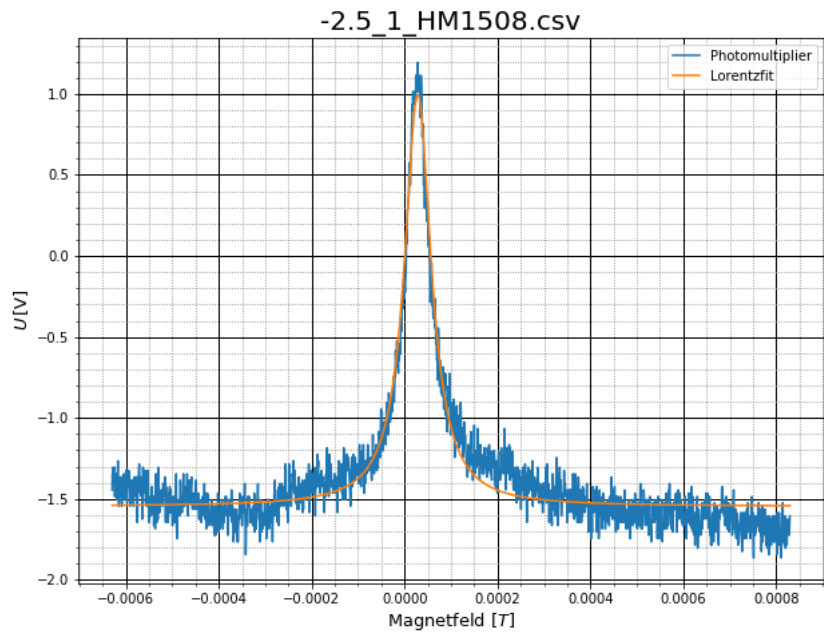


Figure 6: Fit der Messung bei 0° mit dem dazugehörigen Fit als Beispiel.

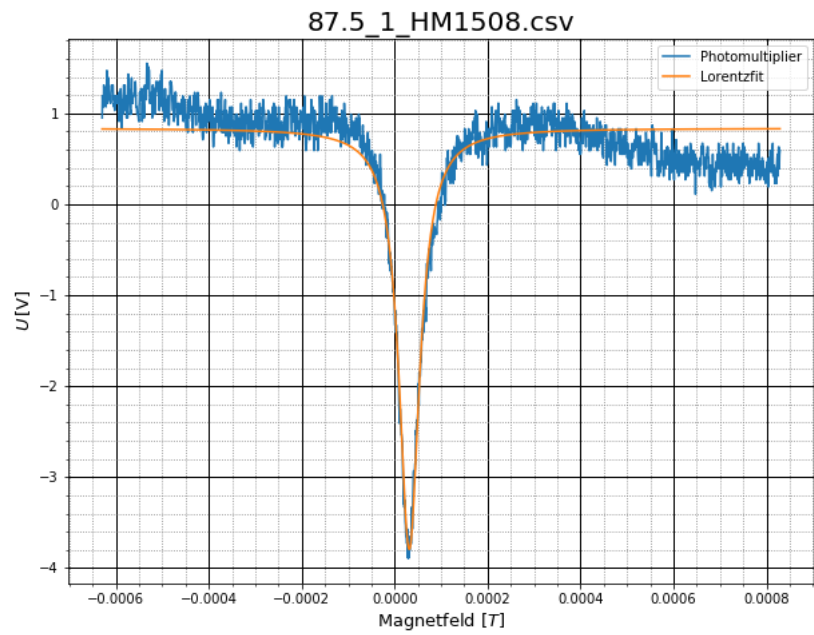


Figure 7: Fit der Messung bei 90° mit dem dazugehörigen Fit als Beispiel.

Zur Bestimmung des Fehlers wurde die Messung bei 0° 15 mal bei gleicher Temperatur von 20° wiederholt um eine bessere Einschätzung des statistischen Fehlers auf die Lebenszeit zu bekommen (Abbildungen sind im Anhang). Als erstes wurde ein Histogramm mit den Werten von γ (vgl. Fig. 15) erstellt und anschließend versucht, darüber eine Gaußkurve zu fitten um den Fehler zu bestimmen. Hierbei ergab sich die Grafik in Abbildung 8. Da sich hier keine schöne Gaußkurve ergab wurde alternativ die Streuung der Parameter bestimmt. Hierfür wurde die folgende Gleichung verwendet:

$$\sigma_{\tau \text{Streuung}} = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)} \quad (18)$$

Der hierdurch erhaltene Fehler von $\sigma_{\tau \text{Streuung}} = 6,1 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ wird von nun zu den Fehler des Parameters in allen zukünftigen Fits quadratisch addiert.

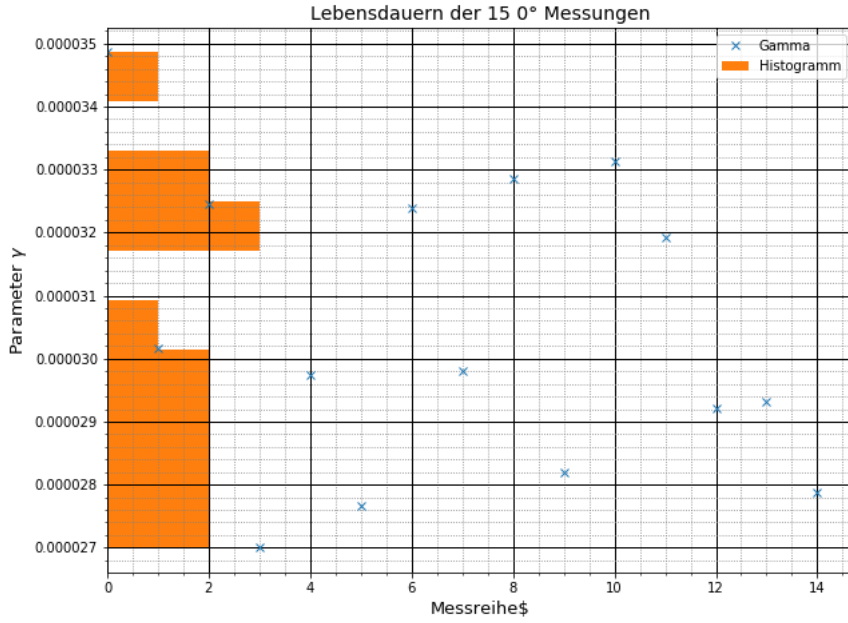


Figure 8: Histogramm der Fit Parameter γ von 15 0° Messungen bei selber Temperatur.

3.3 Extrapolation zur Ausschließung des Coherence Narrowing Effektes

Die für verschiedene Temperaturen kann nun mit der Gleichung 12 der Druck bestimmt werden. Der Fehler des Drucks σ_p wird mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt:

$$\sigma_p = \frac{\partial p}{\partial T} \sigma_T \quad (19)$$

Der Messfehler für die Temperatur wurde auf 0.5 K geschätzt.

Um Coherence Narrowing auszuschließen werden nun der aus der Temperatur bestimmte Druck gegen die Lebensdauer gezeichnet. Hierbei wurde wieder ein linearer Fit der Form $f(x) = mx + b$ gewählt und mit `curve_fit` erstellt. Der Fehler der Lebensdauer wurde mit berücksichtigt. Mit einer Extrapolation kann man die Lebensdauer am Punkt $p = 0 \text{ Pa}$ also dem Parameter b bestimmen. Diese ist dann die echte Lebenszeit ohne Coherence Narrowing.

3.3.1 Lebensdauern der Abkühlungsmessung 1

Für die erste Abkühlungsmessung ergeben sich die nachfolgenden Werte aus den angepassten Kurven in Fig. 9:

$$f(p)_{0^\circ} = (2.4 \pm 1.4) \cdot 10^{-11} \frac{\text{s}}{\mu\text{Pa}} \cdot p + (1.224 \pm 0.022) \cdot 10^{-7} \text{s}$$

$$f(p)_{90^\circ} = (9.0 \pm 2.6) \cdot 10^{-11} \frac{\text{s}}{\mu\text{Pa}} \cdot p + (1.222 \pm 0.020) \cdot 10^{-7} \text{s}$$

Hierbei ist der y-Achsen Abschnitt jeweils die gesuchte Lebensdauer.

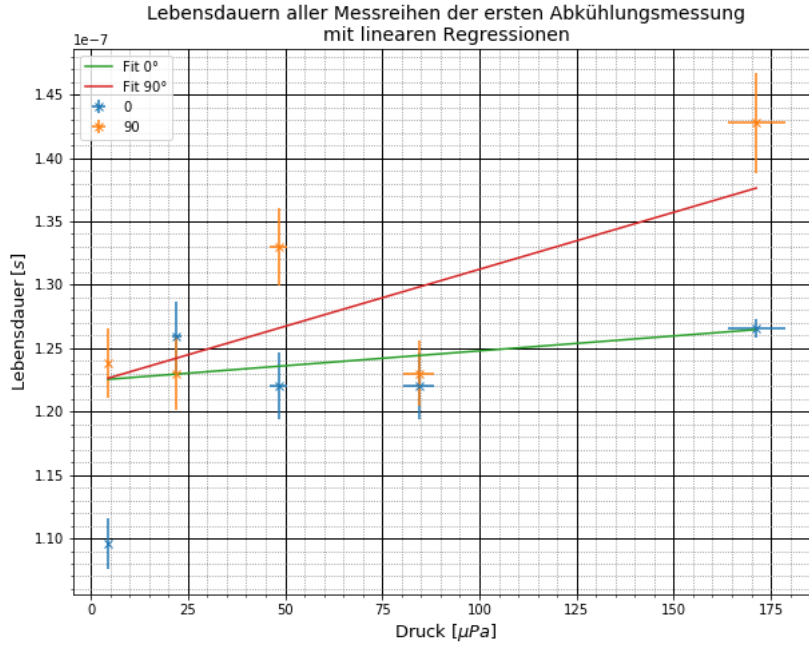


Figure 9: Abkühlungsmessung der ersten Messreihe einmal für 90° und einmal für 0° . Die Datenpunkte sind mit Fehlern für Lebensdauer und Druck aber für den Fit wurden nur die dominanteren der Lebensdauer verwendet. Der Messpunkt bei ca. $0 \mu\text{Pa}$ der 0° Messreihe wurde als Ausreißer nicht bei der Regression berücksichtigt.

3.3.2 Lebensdauern der Aufwärmmessung 1

Für die Aufwärmmessung erhält man für die Angepassten Kurven (vgl. fig. 10):

$$f(p)_{0^\circ} = (1.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-10} \frac{\text{s}}{\mu\text{Pa}} \cdot p + (1.028 \pm 0.013) \cdot 10^{-7} \text{s}$$

Hierbei ist der y-Achsen Abschnitt jeweils die gesuchte Lebensdauer.

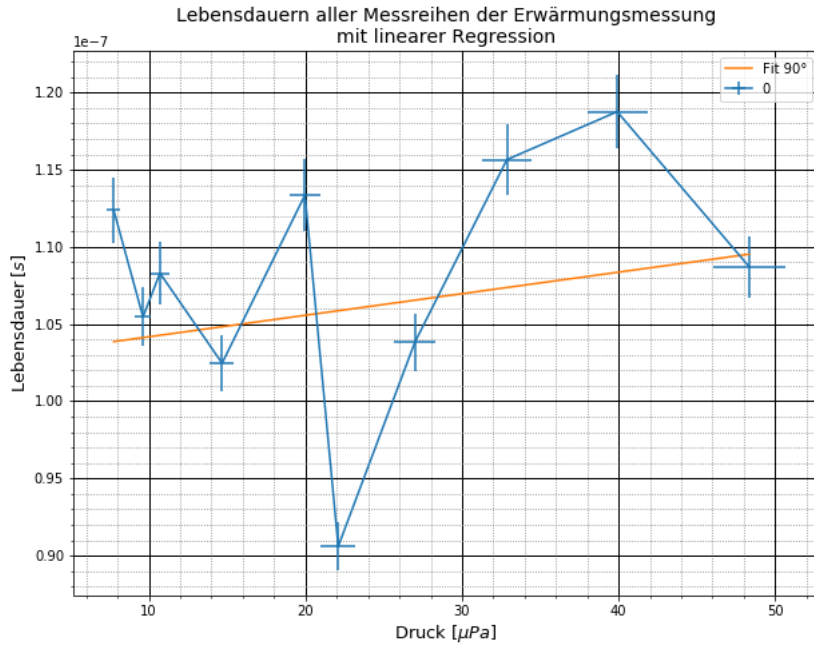


Figure 10: Aufwärmmessung der ersten Messreihe für 0°. Die Datenpunkte sind mit Fehlern für Lebensdauer und Druck aber für den Fit wurden nur die dominanteren der Lebensdauer verwendet.

3.3.3 Lebensdauern der Abkühlmessung 2

Für die zweite Abkühlungsmessung ergeben die nachfolgenden Parameter aus den Angepassten Kurven in Fig. 11:

$$f(p)_{0^\circ} = (8.2 \pm 2.7) \cdot 10^{-11} \frac{\text{s}}{\mu\text{Pa}} \cdot p + (1.166 \pm 0.017) \cdot 10^{-7} \text{s}$$

$$f(p)_{90^\circ} = (1.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-11} \frac{\text{s}}{\mu\text{Pa}} \cdot p + (1.181 \pm 0.018) \cdot 10^{-7} \text{s}$$

Hierbei ist der y-Achsen Abschnitt jeweils die gesuchte Lebensdauer.

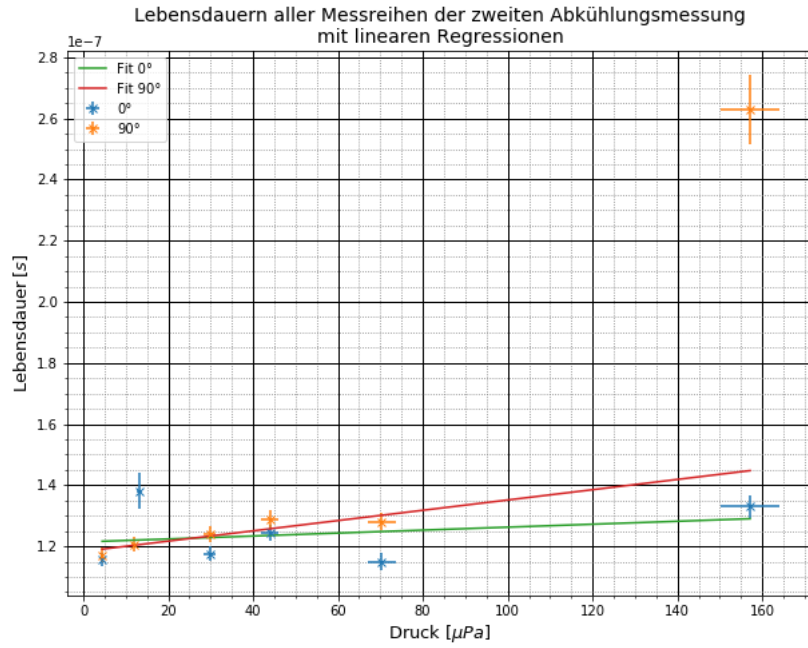


Figure 11: Abkühlungsmessung der zweiten Messreihe einmal für 90° und einmal für 0° . Die Datenpunkte sind mit Fehlern für Lebensdauer und Druck aber für den Fit wurden nur die dominanteren der Lebensdauer verwendet. Der Messpunkt bei ca. $160 \mu\text{Pa}$ der 90° Messreihe wurde als Ausreißer nicht mit zur Regression verwendet.

3.4 Messungen zu 45°

Ursprünglicher weise wurden mehrere Messungen bei einem Winkel von 45° durchgeführt. Jedoch gelang es weder die Ableitung von Formel 15 nach x (vgl. Fig. 12) noch die Formel 7 ausreichend bzw. generell zu fitten.

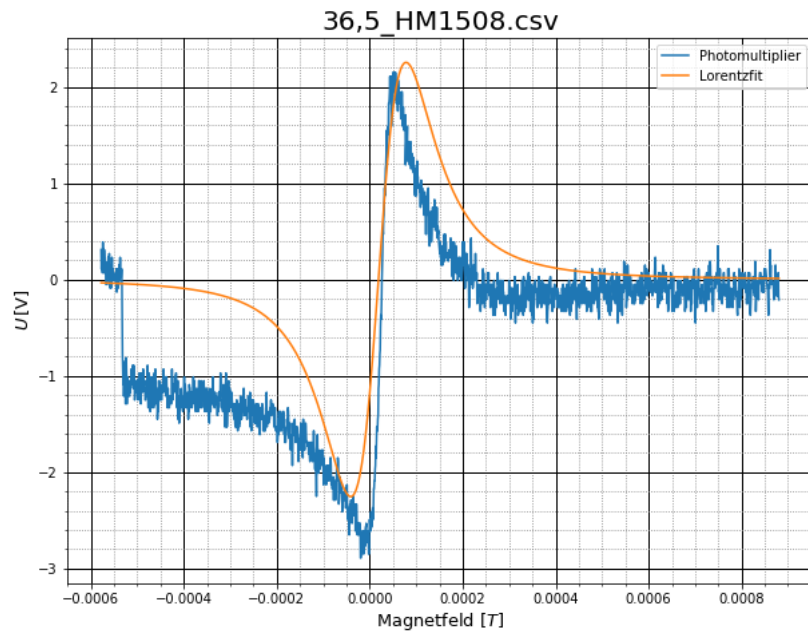


Figure 12: Die Daten der ersten 45° Messung der ersten Abkühlungsmessreihe mit dem Fit nach der Ableitung von Formel 15. Es ist sichtbar, dass die gefittete Funktion den Daten ähnelt, jedoch die Parameter nicht hinreichend optimiert wurden konnten um quantitative Aussagen treffen zu können.

4 Zusammenfassung

Wenn man die gemessenen Werte mit denen des Literatur Wertes von 119 ns mit der Formel 20 vergleicht erhält man die in Tabelle 1 beschriebenen Werte.

$$t = \frac{x_M - x_{Literatur}}{\sigma_x} \quad (20)$$

Messreihe	Lebensdauer τ [ns]	Vergleichswert t
Abkühlen 1 bei 0°	(122.4 ± 0.022) ns	1.5
Abkühlen 1 bei 90°	(122.2 ± 2.0) ns	1.6
Aufwärmen bei 0°	(102.8 ± 1.3) ns	12.5
Abkühlen 2 bei 0°	(116 ± 1.7) ns	1.4
Abkühlen 2 bei 90°	(118.1 ± 1.8) ns	0.5

Table 1: Bestimmte Lebensdauern und Vergleich zum Literaturwert von 119ns.

Man erkennt schnell, dass alle gemessenen Werte bis auf die Aufwärmessung mit dem Literaturwert kompatibel sind. Die große Diskrepanz kann man dadurch erklären, dass für die Messung während des Aufwärmvorgangs nicht gewartet wurde bis die Temperatur des Thermometers mit der der Probe angeglichen hat. Dies hat zur Folge, dass wir eine andere Temperatur an der Probe haben als wir gemessen haben. Dadurch ziehen wir einen großen systematischen Fehler mit welcher die Unverträglichkeit erklären könnte.

Ein weiteres Problem ist sicher die geringe Anzahl an Messpunkten, die wir in den ersten zwei Messreihen hatten, wodurch sich natürlich unsere Messreihe verschlechtert haben. Die letzte Messreihe wurde ausführlicher und präziser aufgenommen etwas was man auch an dem guten Wert für 90° von $t = 0.5$ sehen kann. Trotzdem wären sicher mehr Messpunkte hilfreich gewesen um eine höhere Statistische Relevanz zu erhalten was aus Zeitgründen leider nicht möglich war.

Weitere Gründe für Fehler sind die nicht präzise genug eingestellten Helmholtz-Spulen. Diese hätte man wieder mit etwas mehr Zeit noch genauer einstellen können wie man besonders bei der 45° Messung erkennt welche sehr unsymmetrisch ausgefallen ist. Auch die Einstellungen des Polarisationsfilters sind möglicher Weise nicht perfekt gewählt oder haben sich während der Messung verschoben. Dies könnte z.B. den großen Ausreißer des letzten Messpunktes in Abbildung 11 erklären.

5 Tabellen

List of Tables

1	Ergebnisse	13
---	----------------------	----

6 Bilder

List of Figures

1	Semiklassische Darstellung des Hanle Effekts	2
2	Lorentzkurve	3
3	Zeeman-Effekt	4
4	Versuchsaufbau	5
5	Magnetfeld Kalibration	6
6	Fit der Lorentzkurve bei Nullgrad	7
7	Fit der Lorentzkurve bei für 90Grad	7
8	Histogramm zur Bestimmung der Fehler	8
9	Druck zu Lebensdauer Fit für Abkühlung 1	9
10	Druck zu Lebensdauer Fit für Aufwärmung	10
11	Druck zu Lebensdauer Fit für Abkühlung 2	11
12	Druck zu Lebensdauer Fit für eine Beliebige 45° Messung	12
13	Labor Aufschrieb	15
14	Labor Aufschrieb	16
15	Labor Aufschrieb	17
16	Labor Aufschrieb	18

7 Bibliograpy

References

- [1] *Versuchsanleitung: Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1 Der Hanle-Effekt.*
- [2] Eric Jones, Travis Oliphant, Pearu Peterson, et al. Python3 package `scipy.optimize` for curve fitting, 2001–.
- [3] 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.

8 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	$Y = 0,1351$ $Z = 0,1049$ $A = 0,0348$ $0,0054$ 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°)	$Y = 1,220$ $Y = 1,0217$ $Z = 1,145$ $3,7,5$ $Z = 3,655$ $3,6(1.5V)$ $-2,5(-x.1.5V)$ $2,5(1.5V)$ $-1,20457$ $3,6(1.5V)$ $-2,5(-x.1.5V)$ $2,5(1.5V)$ 16:27 sprechen von Kurven mit einem V. von $87,5$ 1.5V oben: $236,50$ Skalenwahl: 10^{-3} V 10^{-6} A: 55 $10 \cdot 10^{-3}$ A / 10^{-6} Supp. 20 V 30s $2,2$ V UP LOW (J.V) (Start from)

Figure 13: Labor Aufschrieb

Messung herabgekühlt
 16:25 start 20°C
 7,52 A für 2 min
 1 A 16:40 8°C
 3,4 A 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 Scale oben 1V/IV
 -2,5° 0-2.CSV 10×10^{-9} 1V/IV
 12°C am Ende der Messung 10×10^{-9} A 2V/IV
 10×10^{-9} A 10V/IV

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

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

7,5 A kühlen -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 14: Labor Aufschrieb

16 Kühlmessers

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 $10 \times 10^{-9} A$

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

20:48 -6°C O-W-4-CSV

~~20:54 - 21:05~~
~~21:05 - 21:15~~
~~21:15 - 21:25~~
~~21:25 - 21:35~~
~~21:35 - 21:45~~
~~21:45 - 21:55~~
~~21:55 - 22:05~~
~~22:05 - 22:15~~
~~22:15 - 22:25~~
~~22:25 - 22:35~~
~~22:35 - 22:45~~
~~22:45 - 22:55~~
~~22:55 - 23:05~~
~~23:05 - 23:15~~
~~23:15 - 23:25~~
~~23:25 - 23:35~~
~~23:35 - 23:45~~
~~23:45 - 23:55~~
~~23:55 - 00:05~~
~~00:05 - 00:15~~
~~00:15 - 00:25~~
~~00:25 - 00:35~~
~~00:35 - 00:45~~
~~00:45 - 00:55~~
~~00:55 - 01:05~~
~~01:05 - 01:15~~
~~01:15 - 01:25~~
~~01:25 - 01:35~~
~~01:35 - 01:45~~
~~01:45 - 01:55~~
~~01:55 - 02:05~~
~~02:05 - 02:15~~
~~02:15 - 02:25~~
~~02:25 - 02:35~~
~~02:35 - 02:45~~
~~02:45 - 02:55~~
~~02:55 - 03:05~~
~~03:05 - 03:15~~
~~03:15 - 03:25~~
~~03:25 - 03:35~~
~~03:35 - 03:45~~
~~03:45 - 03:55~~
~~03:55 - 04:05~~
~~04:05 - 04:15~~
~~04:15 - 04:25~~
~~04:25 - 04:35~~
~~04:35 - 04:45~~
~~04:45 - 04:55~~
~~04:55 - 05:05~~
~~05:05 - 05:15~~
~~05:15 - 05:25~~
~~05:25 - 05:35~~
~~05:35 - 05:45~~
~~05:45 - 05:55~~
~~05:55 - 06:05~~
~~06:05 - 06:15~~
~~06:15 - 06:25~~
~~06:25 - 06:35~~
~~06:35 - 06:45~~
~~06:45 - 06:55~~
~~06:55 - 07:05~~
~~07:05 - 07:15~~
~~07:15 - 07:25~~
~~07:25 - 07:35~~
~~07:35 - 07:45~~
~~07:45 - 07:55~~
~~07:55 - 08:05~~
~~08:05 - 08:15~~
~~08:15 - 08:25~~
~~08:25 - 08:35~~
~~08:35 - 08:45~~
~~08:45 - 08:55~~
~~08:55 - 09:05~~
~~09:05 - 09:15~~
~~09:15 - 09:25~~
~~09:25 - 09:35~~
~~09:35 - 09:45~~
~~09:45 - 09:55~~
~~09:55 - 10:05~~
~~10:05 - 10:15~~
~~10:15 - 10:25~~
~~10:25 - 10:35~~
~~10:35 - 10:45~~
~~10:45 - 10:55~~
~~10:55 - 11:05~~
~~11:05 - 11:15~~
~~11:15 - 11:25~~
~~11:25 - 11:35~~
~~11:35 - 11:45~~
~~11:45 - 11:55~~
~~11:55 - 12:05~~
~~12:05 - 12:15~~
~~12:15 - 12:25~~
~~12:25 - 12:35~~
~~12:35 - 12:45~~
~~12:45 - 12:55~~
~~12:55 - 13:05~~
~~13:05 - 13:15~~
~~13:15 - 13:25~~
~~13:25 - 13:35~~
~~13:35 - 13:45~~
~~13:45 - 13:55~~
~~13:55 - 14:05~~
~~14:05 - 14:15~~
~~14:15 - 14:25~~
~~14:25 - 14:35~~
~~14:35 - 14:45~~
~~14:45 - 14:55~~
~~14:55 - 15:05~~
~~15:05 - 15:15~~
~~15:15 - 15:25~~
~~15:25 - 15:35~~
~~15:35 - 15:45~~
~~15:45 - 15:55~~
~~15:55 - 16:05~~
~~16:05 - 16:15~~
~~16:15 - 16:25~~
~~16:25 - 16:35~~
~~16:35 - 16:45~~
~~16:45 - 16:55~~
~~16:55 - 17:05~~
~~17:05 - 17:15~~
~~17:15 - 17:25~~
~~17:25 - 17:35~~
~~17:35 - 17:45~~
~~17:45 - 17:55~~
~~17:55 - 18:05~~
~~18:05 - 18:15~~
~~18:15 - 18:25~~
~~18:25 - 18:35~~
~~18:35 - 18:45~~
~~18:45 - 18:55~~
~~18:55 - 19:05~~
~~19:05 - 19:15~~
~~19:15 - 19:25~~
~~19:25 - 19:35~~
~~19:35 - 19:45~~
~~19:45 - 19:55~~
~~19:55 - 20:05~~
~~20:05 - 20:15~~
~~20:15 - 20:25~~
~~20:25 - 20:35~~
~~20:35 - 20:45~~
~~20:45 - 20:55~~
~~20:55 - 21:05~~
~~21:05 - 21:15~~
~~21:15 - 21:25~~
~~21:25 - 21:35~~
~~21:35 - 21:45~~
~~21:45 - 21:55~~
~~21:55 - 22:05~~
~~22:05 - 22:15~~
~~22:15 - 22:25~~
~~22:25 - 22:35~~
~~22:35 - 22:45~~
~~22:45 - 22:55~~
~~22:55 - 23:05~~
~~23:05 - 23:15~~
~~23:15 - 23:25~~
~~23:25 - 23:35~~
~~23:35 - 23:45~~
~~23:45 - 23:55~~
~~23:55 - 00:05~~
~~00:05 - 00:15~~
~~00:15 - 00:25~~
~~00:25 - 00:35~~
~~00:35 - 00:45~~
~~00:45 - 00:55~~
~~00:55 - 01:05~~
~~01:05 - 01:15~~
~~01:15 - 01:25~~
~~01:25 - 01:35~~
~~01:35 - 01:45~~
~~01:45 - 01:55~~
~~01:55 - 02:05~~
~~02:05 - 02:15~~
~~02:15 - 02:25~~
~~02:25 - 02:35~~
~~02:35 - 02:45~~
~~02:45 - 02:55~~
~~02:55 - 03:05~~
~~03:05 - 03:15~~
~~03:15 - 03:25~~
~~03:25 - 03:35~~
~~03:35 - 03:45~~
~~03:45 - 03:55~~
~~03:55 - 04:05~~
~~04:05 - 04:15~~
~~04:15 - 04:25~~
~~04:25 - 04:35~~
~~04:35 - 04:45~~
~~04:45 - 04:55~~
~~04:55 - 05:05~~
~~05:05 - 05:15~~
~~05:15 - 05:25~~
<

21:02 - 10°C $\phi_{w-5} = 0.03V$

21.11 + 10°C 0-W-7. (SV)

21:23 2°C 0-W-8. C5V

21:35 4°C QW-CSV

21:44 6°C $\theta_{W-10-C5V}$

Ende de Messagero

Figure 15: Labor Aufschrieb

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
	$10 \times 10^{-8} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$		7°C
10:35				4°C
10:50				5°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
	$10 \times 10^{-10} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$	3A	-9°C
11:47				-7°C
12:02				-7°C
12:20				-7°C
12:25	0-6.csv	90-6.csv	4A/8,9V	-7°C
	$10 \times 10^{-10} A$	$0,03 \times 10^{-6} A$		-8°C
12:34		90-7.csv	7,5A	-17°C
13:02	0-7.csv		15,9V	
		12.8.13		

Figure 16: Labor Aufschrieb