

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Theoretische Grundlagen	1
1.1 Semi-klassische Erklärung des Hanle-Effekts	1
1.2 Quantenmechanische Erklärung des Hanle-Effekts	2
1.3 Die Breit-Formel	3
1.4 Anwendung der Breit-Formel auf das vorliegende Experiment	4
1.5 Coherence Narrowing und Dampfdruck	5
2 Versuchsaufbau und Durchführung	6
2.1 Aufbau	6
2.2 Durchführung	6
2.3 Vorüberlegungen zur Messung des Abkühlvorgangs	6
2.4 Kalibrierung	7
2.5 Streuungs-Messung	7
2.6 Messung des Aufwärmvorgangs	7
2.7 Messung des Abkühlvorgangs	7
3 Auswertung und Fehleranalyse	8
3.1 Bestimmung der Fehler des Oszilloskops	8
3.2 Bestimmung der Standardabweichung der Lebensdauer	8
3.3 Bestimmung der Lebensdauer aus Messdaten zu unterschiedlichen Polarisatoreinstellungen	9
3.4 Betrachtung der Aufwärmmessung	11
3.5 Auswertung der Abkühlmessung	11
4 Diskussion der Ergebnisse	15
A Anhang	16
Abbildungsverzeichnis	16
Tabellenverzeichnis	18
Literatur	31

1 Theoretische Grundlagen

Die hier dargestellten theoretischen Grundlagen orientieren sich weitestgehend an der Anleitung ([Quelle 1]) und der Staatsexamensarbeit ([Quelle 2]).

1.1 Semi-klassische Erklärung des Hanle-Effekts

Ein Hg-Atom, welches ein Photon absorbiert, kann nach der Absorption als oszillierender Dipol beschrieben werden. Die Dipolachse ist hierbei parallel zur Polarisationsrichtung des absorbierten Photons. Die Intensität der Abstrahlung dieses Dipols ist proportional zu $\sin^2 \phi$, wobei ϕ den Winkel zwischen Dipolachse und Beobachtungsrichtung angibt. Den Prozess des Zurückfallens des Elektrons wird phänomenologisch durch den Faktor $\exp(-t/\tau)$ des exponentiellen Zerfallsgesetzes beschrieben, welcher mit der Intensität multipliziert wird. Möchte man nun die Gesamtintensität einer einzelnen Anregung eines Atoms beschreiben, muss man über alle Zeiten integrieren. Man erhält

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

Wird nun senkrecht zur Oszillationsbewegung ein Magnetfeld angelegt, übt dieses ein Drehmoment auf das System aus. Dies führt dazu, dass das System in einer Ebene senkrecht zur magnetischen Flussdichte \vec{B} zu präzedieren beginnt. Das Dipolmoment wird nun als starr mit dem magnetischen Moment verbunden betrachtet. Die Bewegungsgleichung eines magnetischen Moments μ , das durch ein Niveau mit Drehimpulsquantenzahl J erzeugt wird, ist in einem schwachen Magnetfeld gegeben durch

$$\frac{d\vec{\mu}(t)}{dt} = \frac{\omega_L}{|\vec{B}|} (\vec{\mu}(t) \times \vec{B}) \quad \text{mit} \quad \omega_L = g_J \frac{\mu_B}{\hbar} |\vec{B}|. \quad (2)$$

Dies entspricht der Präzession des magnetischen Moments mit der Larmorfrequenz ω_L . Daher verändert sich bei konstanter Beobachtungsrichtung der Winkel ϕ . In Abb. 1 sind die geometrischen Zusammenhänge dargestellt.

Falls zum Zeitpunkt der Absorption die Polarisation, und somit auch die Dipolachse des Hg-Atoms, parallel zur Beobachtungsrichtung steht, gilt für den Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Dipolachse ϕ zum Zeitpunkt $t = 0$ der Zusammenhang $\phi(t = 0) = 0$. Daraus folgt für den Winkel $\phi(t)$ der Zusammenhang $\phi(t) = \omega_L t$. Somit ist die beobachtete Intensität gegeben durch

$$I = C \cdot \int_0^{\infty} \sin^2(\omega_L t) e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C\tau}{2} \left(\frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right). \quad (3)$$

Die Konfiguration, die durch Gleichung (3) beschrieben wird, wird im Weiteren als 90° -Konfiguration bezeichnet, da hier die Polarisation senkrecht zur z -Achse steht. Man bemerke, dass es sich bei dieser Beschreibung des Intensitätsverlaufs um eine invertierte Lorentzkurve handelt.

Ist jedoch zum Zeitpunkt der Absorption die Polarisation senkrecht zur Beobachtungsrichtung, so ist die zeitliche Abhängigkeit des Winkels ϕ durch $\phi(t) = \omega_L t + \frac{\pi}{2}$ gegeben. Daraus folgt für die gemessene Intensität in dieser Konfiguration die Vorschrift

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

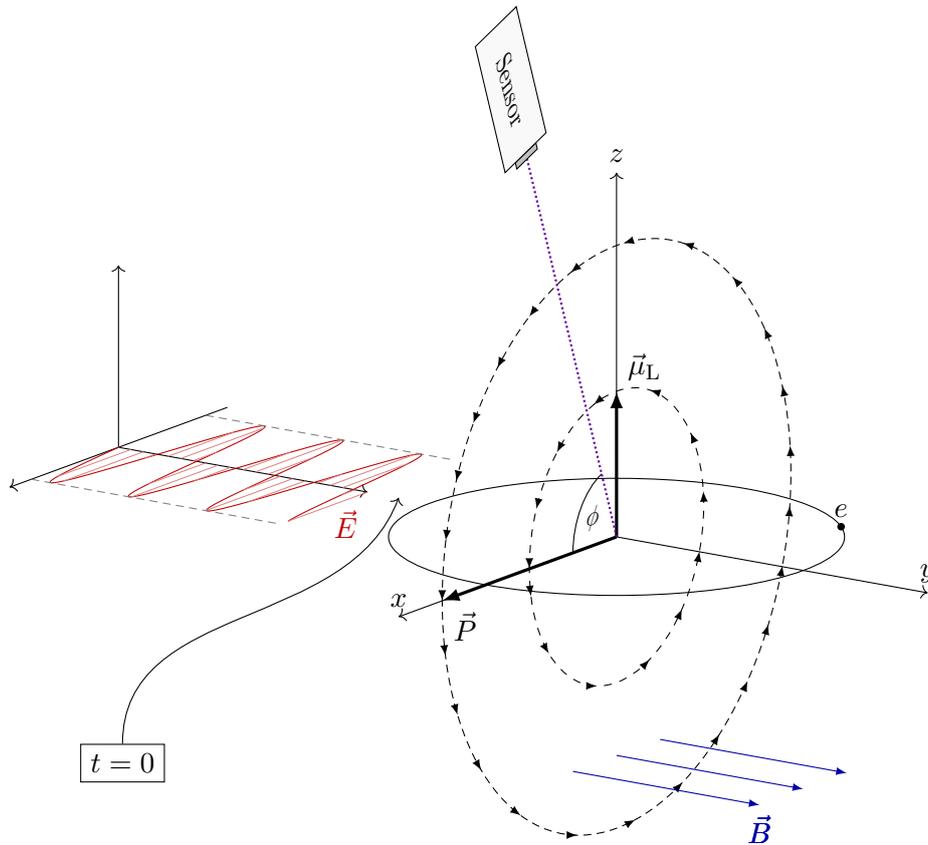


Abbildung 1: Darstellung der geometrischen Zusammenhänge der semiklassischen Erklärung des Hanle-Effekts.

Die durch Gleichung (4) beschriebene Konfiguration wird hier 0° -Konfiguration bezeichnet, da die Polarisation hier parallel zur z -Achse steht. Bei dieser Konfiguration entspricht die Beschreibung des Intensitätsverlaufs einer Lorentzkurve.

Möchte man nun einen Zusammenhang für einen beliebigen Startwinkel α , so gilt $\phi(t) = \omega_L t + \alpha$ und man erhält für die gemessene Intensität

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

1.2 Quantenmechanische Erklärung des Hanle-Effekts

Bei dem Hanle-Effekt handelt es sich um einen Spezialfall des allgemeineren Phänomens des „level-crossing“, bei einem äußeren Magnetfeld $B = 0$ T. Ohne äußeres Magnetfeld sind die verschiedenen Zeemann-Niveaus energetisch entartet. Diese Zustände sind daher energetisch ununterscheidbar. Die Aufhebung der Entartung durch ein äußeres Magnetfeld ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Bei Entartung der Zustände können diese kohärent angeregt werden. Bei der Abregung der Zustände kommt es zur Interferenz mehrerer Zustände des Atoms. Für die beobachtete Intensität gilt dann

$$I \propto (A_1 + A_2)^2, \quad (6)$$

da es sich um eine kohärente Überlagerung handelt. Liegt jedoch eine ausreichend große Energieaufspaltung vor, können alle Niveaus mit verschiedener Quantenzahl m_J einzeln

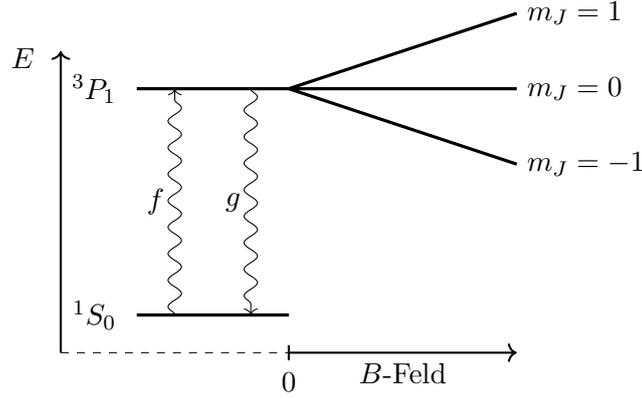


Abbildung 2: Aufhebung der Energieentartung durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds.

angeregt werden. Für die resultierende Gesamtintensität gilt dann

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

was einer nicht kohärenten Überlagerung ohne Interferenzterme entspricht.

1.3 Die Breit-Formel

In der quantenmechanischen Beschreibung wird eine allgemeine Formel zur Resonanzfluoreszenz von G. Breit und P. Franken verwendet. Sie gibt die Rate an, in welcher Photonen mit linearer Polarisationsrichtung \vec{g} von einer Probe emittiert werden, welche mit Licht bestrahlt wird, dessen Photonen die Polarisationsrichtung \vec{f} aufweisen.

Man geht hierbei von verschiedenen stabilen Grundzuständen $|m\rangle$ und mehreren angeregten Zuständen $|\mu\rangle$ aus. Es wird angenommen, dass das bestrahlte System zum Zeitpunkt $t < -2$ im Grundzustand ist. Zum Zeitpunkt $t = 0$ treffen die Photonen auf die Atome der Probe.

In Dipolnäherung ist der Hamiltonoperator der Elektron-Photon-Wechselwirkung durch

$$H_{\gamma e} = -\vec{D} \cdot \vec{E} \quad (8)$$

gegeben, wobei \vec{D} der Dipoloperator und \vec{E} der Feldoperator ist. Beachtet man außerdem, dass $\vec{D} \propto \vec{r}$ und $\vec{E} \propto \vec{f}$ ist, wobei \vec{f} die Polarisationsrichtung der einfallenden Photonen beschreibt und \vec{r} der Ortsvektor ist, folgt daraus, dass der Hamiltonoperator bis auf Konstanten gegeben ist durch

$$\hat{H}_{\gamma e} = \vec{r} \cdot \vec{f}. \quad (9)$$

Man erkennt also, dass $f_{ab} = \langle b | \vec{r} \cdot \vec{f} | a \rangle$ die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von Zustand $|a\rangle$ nach Zustand $|b\rangle$ durch Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld beschreibt. Zum Zeitpunkt $t > 0$ befindet sich das System also, abgesehen von Normierungsfaktoren im Zustand

$$|\psi\rangle = |m\rangle + \sum_{\mu} |\mu\rangle e^{(-i\omega_{\mu} + \Gamma_{\mu}/2)t}, \quad (10)$$

wobei ω_{μ} die Energie des angeregten Zustands $|\mu\rangle$ darstellt. Die Energie des Grundzustandes wurde als Nullpunkt der Energieskala festgelegt. Aufgrund verschiedener Wechselwirkungen mit der Umgebung finden dissipative Prozesse statt, welche sich hier in einem

Dämpfungsterm Γ_μ äußern. Die Zeitentwicklung ist daher nicht mehr unitär. Für den Dämpfungsterm gilt weiterhin $\Gamma_\mu = 1/\tau_\mu$, wobei τ_μ die Lebensdauer des Zustands $|\mu\rangle$ ist. Die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs in einen der Grundzustände, bei dem ein Photon der Polarisation \vec{g} emittiert wird ist folglich gegeben durch

$$R(\vec{f}, \vec{g}, t) = \sum_{mm'} |\langle m' | \vec{r} \cdot \vec{g} | \psi \rangle|^2 = \sum_{mm'} \sum_{\mu\mu'} f_{m\mu} f_{\mu'm} g_{\mu m'} g_{m'\mu'} e^{i(\omega_\mu - \omega_{\mu'}) - \Gamma_{\mu\mu'} t}. \quad (11)$$

Hierbei wurde $g_{mm'} = g_{m'm} = 0$ und $\Gamma_{\mu\mu'} = \frac{1}{2}(\Gamma_\mu + \Gamma_{\mu'})$ verwendet. Bei einer Bestrahlung von N Photonen pro Sekunde ergibt sich bis auf Vorfaktoren die Gesamtrate durch Integration über alle Zeiten $t > 0$. Man erhält

$$R(\vec{f}, \vec{g}) = N \int_0^\infty R(\vec{f}, \vec{g}, t) dt = N \sum_{mm'} \sum_{\mu\mu'} \frac{f_{m\mu} f_{\mu'm} g_{\mu m'} g_{m'\mu'}}{\Gamma_{\mu\mu'} - i(\omega_\mu - \omega_{\mu'})}. \quad (12)$$

1.4 Anwendung der Breit-Formel auf das vorliegende Experiment

Im Experiment wird der Übergang vom 3P_1 in den 1S_0 Zustand des Quecksilberatoms untersucht. Es existiert also nur ein Grundzustand. Der 3P_1 Zustand spaltet sich aufgrund des Zeemann-Effekts in drei Terme auf ($m_J = 0, \pm 1$). Daraus folgt, dass drei möglich Übergänge möglich sind, von denen jedoch nur zwei Übergänge beitragend sind, und zwar jene, die zirkular polarisierte Photonen emittieren ($m_J = \pm 1$). Wird nun die Breitsche Formel angewandt, erhält man für den Grundzustand a und die angeregten Zustände b und c den Zusammenhang

$$R = \frac{|f_{ab}|^2 |g_{ba}|^2}{\Gamma_b} + \frac{f_{ba} f_{ac} g_{ca} g_{ab}}{\Gamma - i(\omega_b - \omega_c)} + \frac{f_{ab} f_{ca} g_{ac} g_{ba}}{\Gamma_{bc} - i(\omega_c - \omega_b)} + \frac{|f_{ac}|^2 |g_{ca}|^2}{\Gamma_c} \quad (13)$$

Die Energie eines Zeemann-Niveaus beträgt $E = \hbar\omega_\mu = E_n + m_J g_J \mu_B B$ daraus ergibt sich für den Frequenzabstand

$$\Delta\omega = \omega_c - \omega_b = 2g_J \mu_J B / \hbar \quad (14)$$

Für Gleichung (13) folgt daher im Grenzfall von schwachen Magnetfeldern

$$R_{\text{kohärent}} \approx |f_{ab} g_{ba} + f_{ac} g_{ca}|^2 \quad (15)$$

Für den umgekehrten Fall großer Magnetfelder, sodass $\Delta\omega \gg \Gamma_{bc}$ gilt erhält man den nicht kohärenten Fall

$$R_{\text{seperat}} \approx |f_{ab}|^2 |g_{ba}|^2 + |f_{ac}|^2 |g_{ca}|^2. \quad (16)$$

Die für den Versuch hergeleitete Gleichung (13) lässt sich durch verschiedene Umformungsschritte und Zusammenfassen von verschiedenen Konstanten in eine Konstante C auf die Form

$$R = C \frac{1}{1 + (2\omega_L \tau)^2} \quad (17)$$

bringen, was dem semiklassisch hergeleiteten Ergebnis entspricht.

1.5 Coherence Narrowing und Dampfdruck

“Coherence Narrowing” beschreibt den Effekt, dass ein durch Abregung emittiertes Photon auf ein weiteres Atom der Probe trifft und dieses anregt, was dazu führt, dass daraufhin von dem Atom ein Photon der selben Polarisation und Ausbreitungsrichtung emittiert wird, welches von dem ersten Photon nicht zu unterscheiden ist. Dadurch erscheint die Lebensdauer des Zustands verlängert, da das Photon länger in dem System bleibt und erst verzögert gemessen werden kann.

Dieser Effekt lässt sich eliminieren, indem man bei verschiedenen Dichten misst und daraufhin gegen eine Dichte von $\rho = 0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ extrapoliert, um somit ein vom “Coherence Narrowing” unverzerrtes Ergebnis zu erhalten.

Da sich die Dichte der Probe nicht direkt messen lässt, muss ein Umweg über die Temperaturen gegangen werden. Der Druck des Quecksilberdampfes kann aus der Temperatur durch die folgende Gleichung berechnet werden.

$$\ln(p/p_c) = (T_c/T)(a_1 T_r + a_2 T_r^{1.89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8.5} + a_6 T_r^9) \quad (18)$$

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Aufbau

In diesem Versuch soll der Hanle-Effekt anhand von Quecksilber, welches mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 253,7 \text{ nm}$ bestrahlt wird, genutzt werden, um die Lebensdauer des durch eben diese Wellenlänge angeregten 3P_1 Zustandes zu bestimmen. Für die Bestrahlung der Quecksilberprobe wird eine Quecksilberdampfampe (**QL**) verwendet, deren Licht zunächst durch eine Linse (**L**) kollimiert wird und dann durch einen Interferenzfilter (**IF**) und einen Polarisator (**PF**) fällt, um anschließend durch eine weitere Linse (**L**) auf die Probe fokussiert zu werden. Die Quecksilberprobe befindet sich in einer Zelle (**QZ**), welche auf einer Wärmesenke aus Kupfer befestigt ist. Die Zelle befindet sich inmitten von Helmholtzspulen (**HS**), welche in x, y und z -Richtung ausgerichtet sind, um zunächst im Labor vorhandene Magnetfelder zu kompensieren und anschließend ein linear steigendes Magnetfeld anzulegen, um eine kontinuierliche Aufhebung der Energieentartung durch den Zeemann-Effekt (Aufspaltung nach Quantenzahl m_J) zu gewährleisten. Die Kühlung der Probe wird durch Peltier-Elemente (**PE**) realisiert, welche über ein Verdampfersystem mit der Wärmesenke verbunden sind. Die Peltier-Elemente werden weiterhin durch eine externe Wasserkühlung gekühlt. Die Detektion der von der Probe emittierten Photonen wird über einen Photomultiplier (**PM**) realisiert. Die Anordnung wird in Abb. 3 noch einmal anschaulich dargestellt.

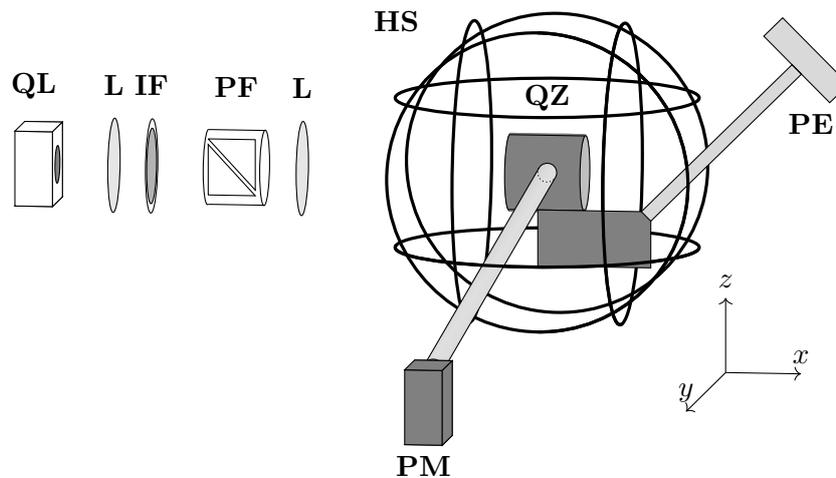


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Messaufbaus

2.2 Durchführung

2.3 Vorüberlegungen zur Messung des Abkühlvorgangs

Vorab wurde darüber nachgedacht, wie der Temperaturbereich, in dem gemessen wird, gewählt werden sollte. Da, um das in Abschnitt 1.5 erklärte “Coherence Narrowing” zu eliminieren, eine gewichtete lineare Regression über die von uns ermittelten Lebensdauern durchgeführt wird, wurde es als nicht sinnvoll empfunden, die Messung bei Raumtemperatur zu beginnen, da hier das Signal deutlich schlechter ausfiel und davon ausgegangen werden muss, dass der Fehler auf den durch einen Fit bestimmten Datenpunkt deutlich höher ist und in der linearen Regression dann kaum berücksichtigt wird. Daher wurde entschieden, die Abkühlmessung bei $T = 10^\circ\text{C}$ zu beginnen.

2.4 Kalibrierung

Zunächst wurde eine Kalibrierung des Messaufbaus durchgeführt. Hierzu wurden zunächst alle Spulenströme auf Null gesetzt und der Polarisator so eingestellt, dass ein Signal gemessen werden konnte, was dem für die 0° -Einstellung erwarteten entsprach (normale Lorentzkurve). Anschließend wurde der Spulenstrom, welcher ein Magnetfeld in x -Richtung erzeugt, auf konstant $I_x = 1$ A eingestellt, um anschließend für I_y und I_z Einstellungen zu finden, um das Intensitätssignal zu minimieren. Anschließend wird der Polarisator so eingestellt, dass das 90° -Signal (invertierter Lorentz) beobachtet werden kann; es sollte symmetrisch sein, ansonsten muss die Polarisatoreinstellung korrigiert werden. Nun werden erneut alle Ströme auf 0 A gesetzt und der Polarisator so eingestellt, dass sowohl die Intensitäten bei $I_x = 1$ A als auch bei $I_x = -1$ A gleich sind. Nun wird der Strom I_x so einjustiert, dass die Intensität minimal wird; anschließend wird dann der Strom I_z so justiert, dass die Intensität minimal wird. Anschließend wird der Strom I_x auf 1 A eingestellt und das y -Feld justiert. Diese Schritte kann man so oft wiederholen, bis keine Verbesserung mehr feststellbar ist.

Die von uns ermittelten Einstellungen waren

Winkel-Offset:	-5°
Strom I_y :	0,0189 A
Strom I_z :	$-0,2713$ A

Tabelle 1: Die in dieser Tabelle dargestellten Werte entsprechen den von uns ermittelten Einstellungen für den Messaufbau und wurden für die Messungen unverändert belassen.

2.5 Streuungs-Messung

Nach der Kalibrierung wurde eine Messung vorgenommen, welche zur besseren Fehlerbestimmung gedacht ist. Es wurden bei einer festen Temperatur von -11°C und unter Verwendung der 0° -Konfiguration 15 Messdurchgänge gemessen, um später die Streuung quantifizieren zu können.

2.6 Messung des Aufwärmvorgangs

Vor Beginn der Messung wird die Probe auf eine möglichst tiefe Temperatur (-15°C) mithilfe der Peltiers abgekühlt. Nun wird Schritt für Schritt die Peltierleistung verringert, um somit die Temperatur zu erhöhen. Nun wird in äquidistanten Schritten gemessen.

Diese Messung ist aus zeittechnischen Gründen leider zu kurz gekommen und es konnten nur Werte für zwei Temperaturen aufgenommen werden. Auf diesen Umstand wird in der Auswertung weiter eingegangen.

2.7 Messung des Abkühlvorgangs

Durch das Einstellen des Peltier-Stroms lässt sich die Temperatur der Quecksilberprobe justieren. Es wird nun in 1 bis 2 Grad Schritten gemessen, indem die Stromrampe eingeschaltet wird, welche einen linear ansteigenden Strom durch die Spule in x -Richtung generiert. Über den Zeitraum der Rampe wird die Intensität gemessen. Die sich so ergebenden Daten werden über ein Oszilloskop an einen Computer übertragen und können dort gespeichert werden. Die so erhaltenen Daten können dann mit Hilfe eines kleinsten Quadrate Fits ausgewertet werden.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Bestimmung der Fehler des Oszilloskops

Um Fehler auf die gemessene Intensität und den Spulenstrom zu bestimmen, wurden drei Messungen des Oszilloskopsignals ohne Hanlesignal aufgenommen. Von diesen drei Messungen wurde jeweils die Standardabweichung der Intensität und der Daten des Stroms berechnet. Von diesen Abweichungen wurde dann der Mittelwert berechnet und dieser als Fehler genutzt. Somit ergeben sich

$$\begin{aligned} s_{\text{Int, Osz.}} &= 0,02 \text{ A und} \\ s_{I, \text{Osz.}} &= 0,003 \text{ V.} \end{aligned} \quad (19)$$

Der Fehler auf die Intensität wurde im Folgenden genutzt, um den Fit an das Hanlesignal unter Beachtung der y-Fehler durchzuführen. Da die Schwankung der Stromstärke im Vergleich zur Höhe der Rampe von 2 A vernachlässigbar klein ist, wurde dieser nicht weiter betrachtet.

3.2 Bestimmung der Standardabweichung der Lebensdauer

Die Standardabweichung der Lebensdauer wurde mithilfe von 15 Messungen unter gleichen Bedingungen bestimmt. Diese Messungen wurden alle mit derselben Polarisierungseinstellung (hier 0°) und bei möglichst konstanter Temperatur aufgenommen. Aus den Messdaten wurde für jede Messreihe die Lebensdauer bestimmt.

Zunächst wurden die aufgenommenen Intensitäten gegen die dazugehörige Stromstärke aufgetragen und mit `scipy.optimize.curve_fit` ein Lorentzfit nach der Funktion

$$\text{Int} = A + \frac{C\tau}{2} \left(2 - \frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right) \quad \text{mit} \quad (20)$$

$$\omega_L = g_J \frac{\mu_B}{\hbar} B \quad (21)$$

gemacht (vgl. Abb. 4). Hierbei wurde außerdem für das Magnetfeld

$$B = \gamma I = (I - I_0) \cdot 3,363 \cdot 10^{-4} \frac{\text{T}}{\text{A}} \quad (22)$$

und für den Landé-Faktor $g_J = 1,4838$

verwendet. Die Werte für γ und g_J wurden [Quelle 1] entnommen. Des Weiteren wurde die in [Quelle 1] gegebene Form für den Fit durch die Lageparameter A und I_0 ergänzt, die einen genaueren Fit ermöglichen, wenn die Kurve nicht zentriert liegt, auch der in Abschnitt 3.1 bestimmte Fehler auf die gemessenen Intensitäten wurden der Funktion übergeben. Mit dieser Methode wurden alle 15 Messungen ausgewertet. Die erhaltenen Fit-Parameter sind in jedem Plot dargestellt, der Übersichtlichkeit halber sind alle weiteren Plots in Anhang A verschoben.

Die angegebenen Fehler stammen ebenfalls aus der Fitfunktion und können als Wurzel des zugehörigen Diagonalelements der Kovarianzmatrix bestimmt werden.

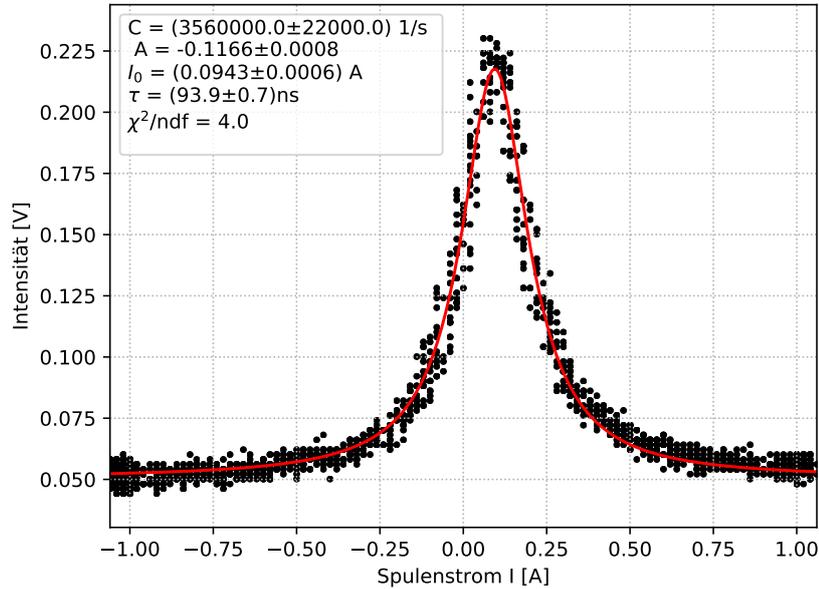


Abbildung 4: Auswertung der Streuungsmessung. Die Messdaten sind in schwarz dargestellt, der Fit ist in rot eingezeichnet. Hier und in den folgenden Abbildungen wurden die Fehlerbalken zur Wahrung der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

Um den Fit beurteilen zu können wurde des Weiteren für jede Messung ein reduziertes χ -Quadrat mit der Formel

$$N \cdot \chi^2 = \sum \left(\frac{y_i - f(x_i, \text{params})}{\sigma_{y_i}} \right)^2 \quad \text{mit} \quad (23)$$

y_i : gemessene Intensitäten

$f(x_i, \text{params})$: Funktionswert mit gefitteten Parametern

σ_{y_i} : Fehler auf y_i , hier also $s_{\text{Int, Oszi}}$.

N : Anzahl der Freiheitsgrade

bestimmt. Auch die χ -Quadrat, sowie alle gefitteten Parameter sind in Anhang A dargestellt. Aus den 15 Einzelmessungen wurde die Standardabweichung der ermittelten Lebensdauern τ zu

$$\sigma_\tau = 1,06 \text{ ns} \quad (24)$$

bestimmt. Dieser Fehler wird am Ende der Auswertung benutzt und ergänzt die einzeln bestimmten Fehler auf die Lebensdauer.

3.3 Bestimmung der Lebensdauer aus Messdaten zu unterschiedlichen Polarisatoreinstellungen

Zunächst wurde für jede aufgenommene Messreihe eine Lebensdauer mittels eines Fits bestimmt. Dabei ist es zunächst nicht relevant bei welcher Temperatur die Daten aufgenommen wurden, lediglich die Polarisatoreinstellung sollte beachtet werden, da es für jede einen eigenen Fit gibt.

Das Vorgehen, sowie die Fehlerrechnung ist für die drei unterschiedlichen Einstellungen prinzipiell gleich und wird daher gemeinsam behandelt. Zunächst werden jedoch kurz die genutzten Fitfunktionen erläutert:

Polarisation von 0° Für alle Messreihen mit einer Einstellung von 0° erhält man eine Lorentzkurve, daher wurde der selbe Fit wie in Abschnitt 3.2 verwendet, wobei auch hier als Fehler auf die gemessene Intensität der in Abschnitt 3.1 ermittelte Wert verwendet wurde. Alle Kurven wurden an Gleichung (21) angepasst. Ebenfalls wurde für jeden Fit ein reduziertes χ -Quadrat berechnet. Alle ermittelten Parameter sind in den Plots (Abb. 5, Anhang A) und in den Tabellen dargestellt. Der Fehler auf die Lebensdauer wurde hier

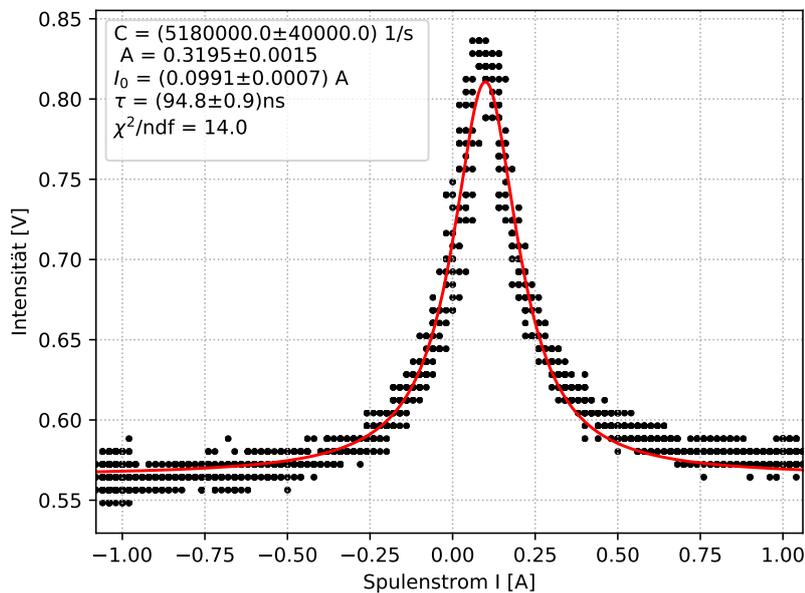


Abbildung 5: Fit (rot) an Messdaten (schwarz) bei Polarisatoreinstellung 0° und einer Temperatur von -1°C .

ebenfalls aus der Kovarianzmatrix abgelesen.

Polarisation von 45° Die 45° -Einstellung führt zu einer Dispersionskurve, die ebenfalls mit `scipy.optimize.curve_fit`, mit der Funktion

$$\text{Int} = A + \frac{C\tau}{2} \left(\frac{1 + (2\tau\omega_L)^2 - 2\tau\omega_l}{1 + (2\tau\omega_L)^2} \right) \quad (25)$$

gefittet wurde. Die einzelnen Variablen und Konstanten sind wie bei den ersten Fits auch durch Gleichung (22) gegeben. Die Formel für den Fit entsteht durch Einfügen der 45° als Phase. Auch hier wurde der Strom zum Magnetfeld umgerechnet und es wurden ebenfalls die Lageparameter A und I_0 eingeführt. Somit erhält man Fits der Form Abb. 6. Die Fehler werden über die Fitfunktion bestimmt, welche als Fehler auf die Intensität wieder die in Abschnitt 3.1 bestimmten Werte nutzt.

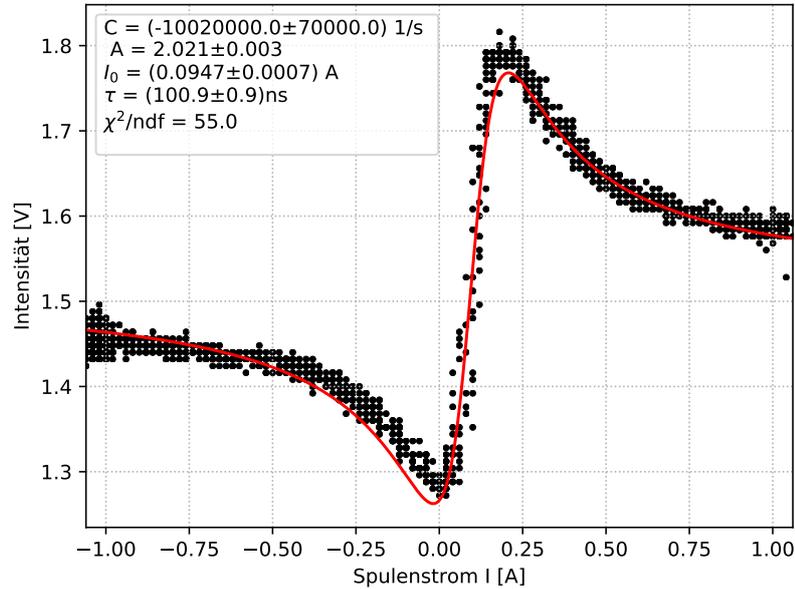


Abbildung 6: Fit (rot) der Messdaten (schwarz) bei einer Polarisation von 45° und einer Temperatur von -1°C .

Polarisation von 90° Für die 90° erhält man eine umgekehrte Lorentzkurve (vgl. Abb. 7), welche mit

$$\text{Int} = A + \frac{C\tau}{2} \left(\frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_l\tau)^2} \right), \quad (26)$$

mit den obigen Konstanten und den ebenfalls schon eingeführten Lageparametern gefittet wird. Die erhaltenen Werte und ihre Fehler sind direkt in den Plots und den Tabellen in Anhang A einzusehen.

3.4 Betrachtung der Aufwärmmessung

Die eigentliche Idee des Versuches war, eine Messreihe in der Aufwärmphase des Versuchsaufbaus und eine in der Kühlphase aufzunehmen und diese dann getrennt auszuwerten. Da die Kalibrierung bereits einige Zeit in Anspruch nimmt und 15 Messungen zur Bestimmung der Standardabweichung durchgeführt werden sollen, ist es zeitlich kaum möglich beide Messreihen vernünftig aufzunehmen. Somit enthält unser Aufwärmvorgang nur zwei Temperaturen und ist daher für die eigentliche Methode, einer Extrapolation der Daten gegen 0, nicht geeignet.

Trotzdem wurden auch für diese sechs Messwerte Fits nach dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen Prinzip durchgeführt und die Ergebnisse sind in Anhang A aufgeführt.

3.5 Auswertung der Abkühlmessung

Es wurde eine zusammenhängende Abkühlmessung durchgeführt, welche genügend Daten enthält um eine Extrapolation zur Bestimmung der Lebensdauer durchzuführen. Es wurden alle drei Polarisatoreinstellungen einzeln ausgewertet, die Auswertung wird hier im

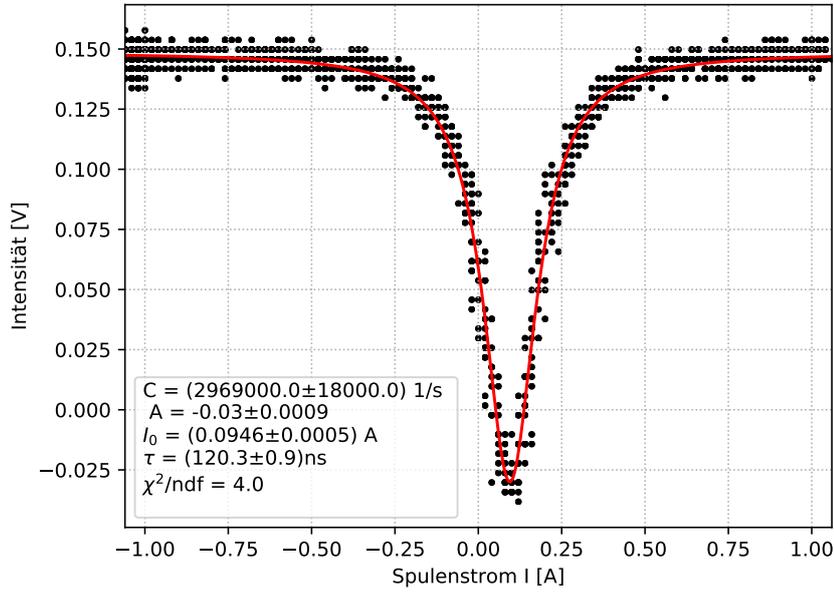


Abbildung 7: Fit (rot) der Messdaten (schwarz) bei einer Polarisation von 90° und einer Temperatur von -6°C .

Detail für die 90° -Einstellung aufgeführt, die anderen beiden Regressionen wurden analog durchgeführt.

Bestimmung des Drucks aus der Temperatur Zur Bestimmung der Lebensdauer wird eine Extrapolation der Daten gegen einen Druck von 0 Pa durchgeführt. Zunächst wurde aus den gemessenen Temperaturen mit der in [Quelle 1] gegebenen Formel

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

$$a_1 = -4,576\,183\,68$$

$$a_2 = -1,407\,262\,77$$

$$a_3 = 2,362\,635\,41$$

$$a_4 = -31,088\,998\,5$$

$$a_5 = 58,018\,395\,9$$

$$a_6 = -27,630\,454\,6$$

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

$$p_c = 1,67 \cdot 10^5\text{ Pa}$$
(27)

eine Umrechnung von Temperatur zu Druck durchgeführt. Der Fehler auf den Druck wurde mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung zu

$$\begin{aligned}
 s_p &= \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial T} s_T\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial T_r} s_{T_r}\right)^2} \text{ mit} \\
 a &= (a_1 T_r + a_2 T_r^{1.89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8.5} + a_6 T_r^9) \\
 s_{T_r} &= \frac{s_T}{T_c} \\
 \frac{\partial p}{\partial T} &= p \cdot \left(-\frac{a T_c}{T^2}\right) \\
 \frac{\partial p}{\partial T_r} &= p \cdot \left(\frac{T_c}{T} (a_1 + 1,89 a_2^{0,89} + 2 a_3 T_r + 8 a_4 T_r^7 + 8,5 a_5 T_r^{7,5} + 9 a_6 T_r^8)\right)
 \end{aligned} \tag{28}$$

bestimmt.

Kombinieren der Fehler auf die Lebensdauer Aus jedem Fit wurde ein Fehler auf die bestimmte Lebensdauer entnommen. Dieser Fehler wird nun für die Extrapolation mit dem in Abschnitt 3.2 bestimmten Fehler kombiniert. Der neue Fehler, der im Folgenden genutzt wird ergibt sich mit

$$s_\tau = \sqrt{s_{\tau, \text{fit}}^2 + \sigma_\tau^2}. \tag{29}$$

Bestimmung der Lebensdauer durch Extrapolation Nun wurden die über Lorentzfits bestimmten Lebensdauern gegen den Druck mit den oben beschriebenen Fehlern aufgetragen. Mit `scipy.optimize.curve_fit` wurde nun eine Funktion der Form $f = a + mx$ gefittet, wobei die Fehler auf τ an `curve_fit` übergeben wurden. In Abb. 8

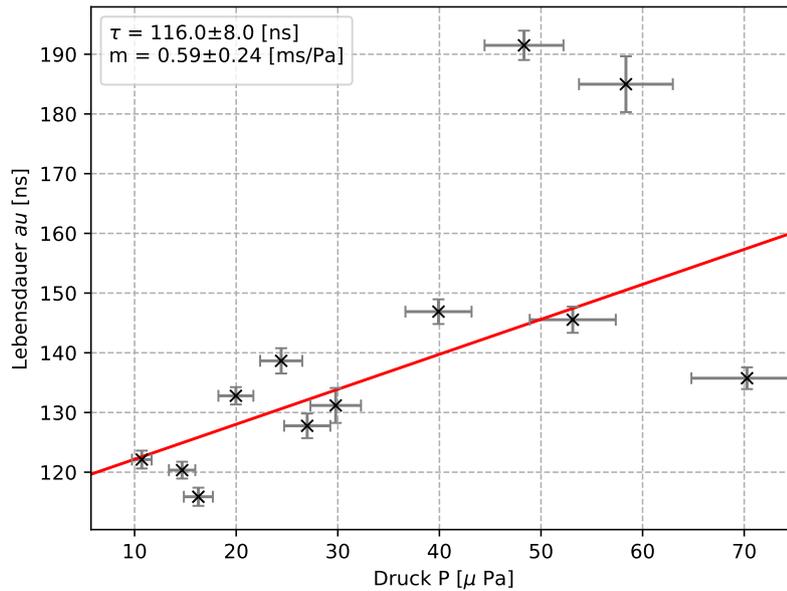
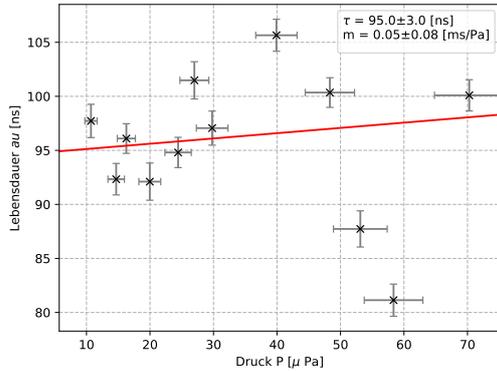
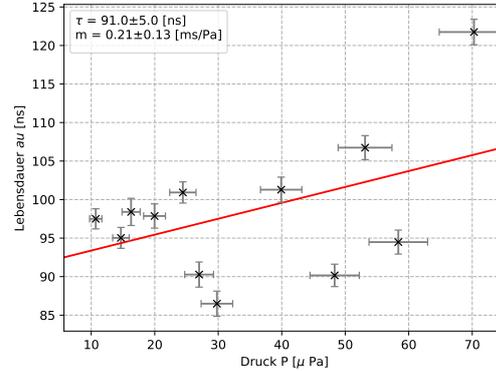


Abbildung 8: Linearer Fit an die Lebensdauern, die mit Polarisierungseinstellung 90° bestimmt wurden. Hierbei wurden die Fehler in y-Richtung gewichtet mit einbezogen.

ist eine der drei Extrapolationen dargestellt, die Lebensdauer mit Korrektur des Coherence Narrowing kann nun als Achsenabschnitt des Fits abgelesen werden. Der Fehler auf die so bestimmte Lebensdauer wurde der Kovarianzmatrix als Wurzel des dazugehörigen Diagonaleintrags entnommen.



(1) Extrapolation bei 0°



(2) Extrapolation bei 45°

Abbildung 9: Ergebnisse der weiteren zwei linearen Fits

Mit Hilfe dieser Extrapolation erhält man für jede Polarisierungseinstellung einen Wert für die Lebensdauer:

$$\begin{aligned}
 \tau_0 &= (95 \pm 3) \text{ ns} \\
 \tau_{45} &= (91 \pm 5) \text{ ns} \\
 \tau_{90} &= (116 \pm 8) \text{ ns}.
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

4 Diskussion der Ergebnisse

In dem Versuch gelang es für die Lebensdauer des 3P_1 -Zustands des Quecksilberatoms folgende drei Werte zu bestimmen:

$$\tau_0 = (95 \pm 3) \text{ ns}$$

$$\tau_{45} = (91 \pm 5) \text{ ns}$$

$$\tau_{90} = (116 \pm 8) \text{ ns.}$$

Vergleicht man diese Werte mit dem Literaturwert von 119 ns stellt man fest, dass der mit der 0° -Konfiguration bestimmte Wert 8 Standardabweichungen entfernt liegt. Der mit der 45° -Konfiguration bestimmte Wert liegt 6 Standardabweichungen vom Literaturwert entfernt. Das wohl beste Ergebniss wurde mit der 90° -Konfiguration erzielt, dieser liegt nur eine Standardabweichung vom Literaturwert entfernt. Allerdings ist der Fehler auf diesen Wert auch am größten.

Die Vorüberlegungen zur Durchführung des Experimentes erscheinen auf Grund der Ergebnisse sinnvoll. Die Streuung der Messwerte nimmt für geringere Temperaturen deutlich ab und ermöglicht somit bessere Ergebnisse. Somit hat es sich im Rahmen des FP-Experiments als sinnvoll erwiesen erst bei geringerer Temperatur eine Messreihe zu starten um den erfolgsversprechenderen Temperaturbereich genauer vermessen zu können.

Die Qualität der Fits wurde mit Hilfe eines χ -Quadrats bestimmt. Dieser Wert fällt in bei den meisten Plots zu hoch aus, was aber mit der Streuung der Daten und der Genauigkeit des Experiments vereinbar ist. Da die Werte des reduzierten χ -Quadrats in einem Großteil der Fälle in einer sehr sinnvollen Größenordnung liegen, scheint die gewählte Fitmethode der Messung angemessen zu sein.

Einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung und somit auf die Güte des Ergebnisses hatte wohl die schlecht bestimmbare Temperatur, da eine gute Kenntniss der Temperatur grundlegend ist um den nicht unerheblichen Effekt des "Coherence Narrowings" zu eliminieren.

Es muss bedacht werden, dass die Fits mit Hilfe der Methode der Kleinsten-Quadrate bestimmt wurden, welche es leider nicht ermöglicht den Fehler auf die x -Werte des Datensatzes mit einzubeziehen. Somit wurde die lineare Regression ohne Kenntniss der Fehler auf die Temperatur durchgeführt und der Fehler auf das Ergebniss somit vermutlich unterschätzt. Der Grund für die mangelhafte Messung der Temperatur liegt hierbei am Versuchsaufbau. Die Peltier-Elemente werden über den anliegenden Strom gesteuert, allerdings lag keine bekannte Zusweisung zwischen Strom und Temperatur vor, sodass davon ausgegangen werden muss, dass trotz der langen Wartezeiten zwischen den Messungen möglicherweise die Temperatur weiter gesenkt wurde. Zusätzlich dazu wird die Temperatur an der Wärmesenke der Probe gemessen was unweigerlich dazu führt, dass die Temperatur der Probe nicht genau bestimmt werden kann und das ein Aufwärmen der Probe durch die Bestrahlung nicht berücksichtigt werden kann.

Vermutlich würde das Problem erheblich minimiert werden, würde für die Messung mehr Zeit zur Verfügung stehen, da auch relativ viel Zeit für eine genaue Kalibrierung und das Bekanntmachen mit dem Messaufbau benötigt wurde. Mit einer längeren Messzeit könnte man zwischen den Messungen länger warten um somit zu gewährleisten, dass die Probe auf einer stabilen Temperatur ist.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Lebensdauer des 3P_1 -Zustands des Quecksilberatoms den Umständen entsprechend, mit den gewählten Methoden, gut bestimmt werden konnte.

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

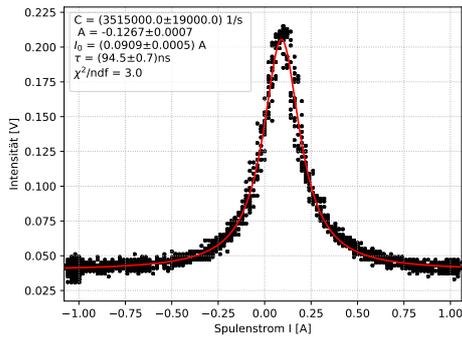
1	Darstellung der geometrischen Zusammenhänge der semiklassischen Erklärung des Hanle-Effekts.	2
2	Aufhebung der Energieentartung durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds.	3
3	Schematische Darstellung des Messaufbaus	6
4	Auswertung der Streuungsmessung. Die Messdaten sind in schwarz dargestellt, der Fit ist in rot eingezeichnet.	9
5	Fit (rot) an Messdaten (schwarz) bei Polarisatoreinstellung 0° und einer Temperatur von -1°C	10
6	Fit (rot) der Messdaten (schwarz) bei einer Polarisierung von 45° und einer Temperatur von -1°C	11
7	Fit (rot) der Messdaten (schwarz) bei einer Polarisierung von 90° und einer Temperatur von -6°C	12
8	Linearer Fit an die Lebensdauern, die mit Polarisierungseinstellung 90° bestimmt wurden. Hierbei wurden die Fehler in y-Richtung gewichtet mit einbezogen.	13
9	Ergebnisse der weiteren zwei linearen Fits	14
	(1) Extrapolation bei 0°	14
	(2) Extrapolation bei 45°	14
10	Aufwärmvorgang bei 7°C	19
	(1) Polarisierungseinstellung 0°	19
	(2) Polarisierungseinstellung 45°	19
	(3) Polarisierungseinstellung 90°	19
11	Aufwärmvorgang bei 9°C	19
	(1) Polarisierungseinstellung 0°	19
	(2) Polarisierungseinstellung 45°	19
	(3) Polarisierungseinstellung 90°	19
12	Abkühlvorgang bei 0°C	20
	(1) Polarisierungseinstellung 0°	20
	(2) Polarisierungseinstellung 45°	20
	(3) Polarisierungseinstellung 90°	20
13	Abkühlvorgang bei 1°C	20
	(1) Polarisierungseinstellung 0°	20
	(2) Polarisierungseinstellung 45°	20
	(3) Polarisierungseinstellung 90°	20
14	Abkühlvorgang bei 4°C	21
	(1) Polarisierungseinstellung 0°	21
	(2) Polarisierungseinstellung 45°	21

	(3) Polarisations-einstellung 90°	21
15	Abkühlvorgang bei 6°C	21
	(1) Polarisations-einstellung 0°	21
	(2) Polarisations-einstellung 45°	21
	(3) Polarisations-einstellung 90°	21
16	Abkühlvorgang bei 7°C	22
	(1) Polarisations-einstellung 0°	22
	(2) Polarisations-einstellung 45°	22
	(3) Polarisations-einstellung 90°	22
17	Abkühlvorgang bei 8°C	22
	(1) Polarisations-einstellung 0°	22
	(2) Polarisations-einstellung 45°	22
	(3) Polarisations-einstellung 90°	22
18	Abkühlvorgang bei 10°C	23
	(1) Polarisations-einstellung 0°	23
	(2) Polarisations-einstellung 45°	23
	(3) Polarisations-einstellung 90°	23
19	Abkühlvorgang bei -1°C	23
	(1) Polarisations-einstellung 0°	23
	(2) Polarisations-einstellung 45°	23
	(3) Polarisations-einstellung 90°	23
20	Abkühlvorgang bei -3°C	24
	(1) Polarisations-einstellung 0°	24
	(2) Polarisations-einstellung 45°	24
	(3) Polarisations-einstellung 90°	24
21	Abkühlvorgang bei -5°C	24
	(1) Polarisations-einstellung 0°	24
	(2) Polarisations-einstellung 45°	24
	(3) Polarisations-einstellung 90°	24
22	Abkühlvorgang bei -6°C	25
	(1) Polarisations-einstellung 0°	25
	(2) Polarisations-einstellung 45°	25
	(3) Polarisations-einstellung 90°	25
23	Abkühlvorgang bei -9°C	25
	(1) Polarisations-einstellung 0°	25
	(2) Polarisations-einstellung 45°	25
	(3) Polarisations-einstellung 90°	25
24	Messung 1 zur Bestimmung der Standardabweichung	26

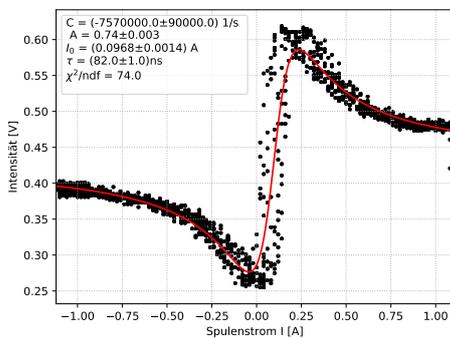
25	Messung 2 zur Bestimmung der Standardabweichung	26
26	Messung 3 zur Bestimmung der Standardabweichung	26
27	Messung 4 zur Bestimmung der Standardabweichung	26
28	Messung 5 zur Bestimmung der Standardabweichung	26
29	Messung 6 zur Bestimmung der Standardabweichung	26
30	Messung 7 zur Bestimmung der Standardabweichung	27
31	Messung 8 zur Bestimmung der Standardabweichung	27
32	Messung 9 zur Bestimmung der Standardabweichung	27
33	Messung 10 zur Bestimmung der Standardabweichung	27
34	Messung 11 zur Bestimmung der Standardabweichung	27
35	Messung 12 zur Bestimmung der Standardabweichung	27
36	Messung 13 zur Bestimmung der Standardabweichung	28
37	Messung 14 zur Bestimmung der Standardabweichung	28
38	Messung 15 zur Bestimmung der Standardabweichung	28

Tabellenverzeichnis

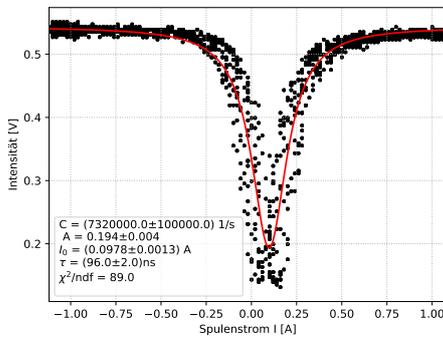
1	Die in dieser Tabelle dargestellten Werte entsprechen den von uns ermittelten Einstellungen für den Messaufbau und wurden für die Messungen unverändert belassen.	7
2	Fitparameter des Abkühlvorgangs, als Tupel mit dem dazugehörigen Fehler angegeben	29
3	Fitparameter des Aufwärmvorgangs, als Tupel mit dem dazugehörigen Fehler angegeben	30
4	Fitparameter der Abweichungsmessung, als Tupel mit dem dazugehörigen Fehler angegeben	30



(1) Polarisations-einstellung 0°

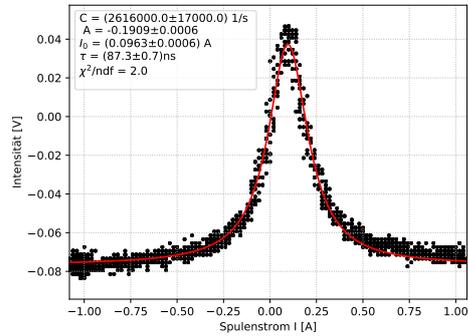


(2) Polarisations-einstellung 45°

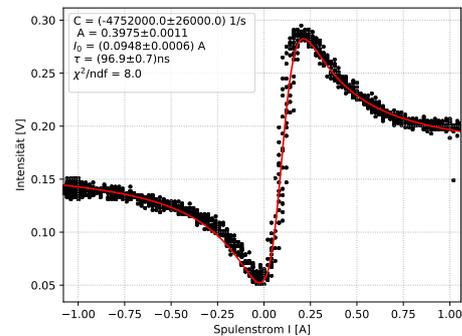


(3) Polarisations-einstellung 90°

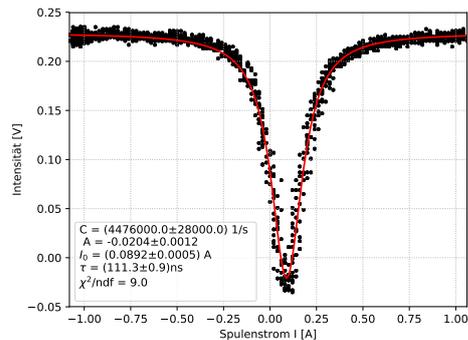
Abbildung 10: Aufwärmvorgang bei 7 °C



(1) Polarisations-einstellung 0°

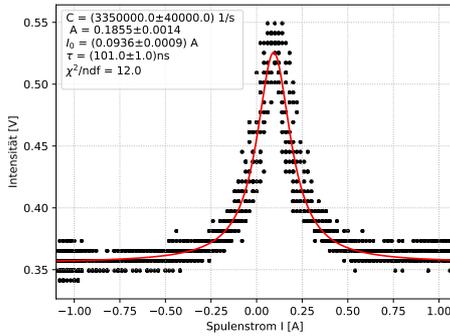


(2) Polarisations-einstellung 45°

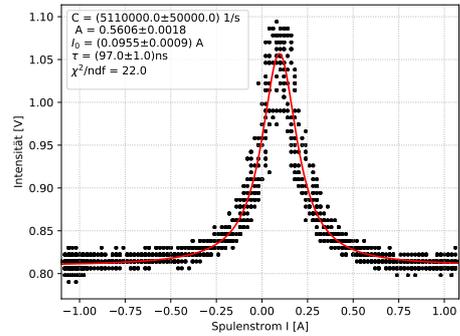


(3) Polarisations-einstellung 90°

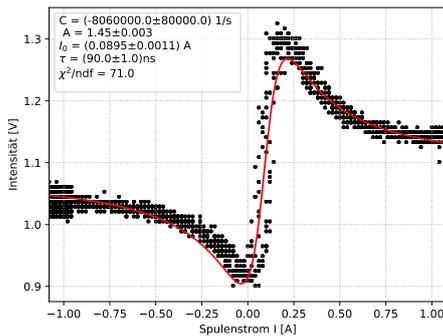
Abbildung 11: Aufwärmvorgang bei 9 °C



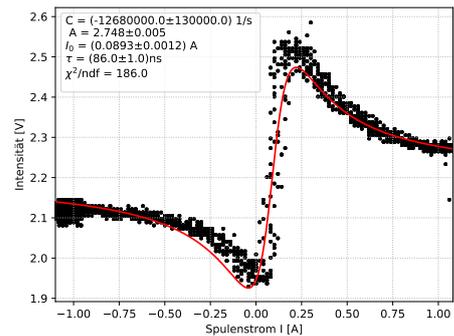
(1) Polarisationsstellung 0°



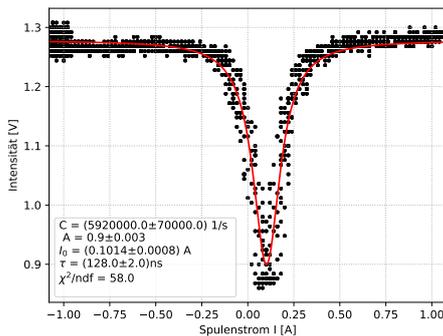
(1) Polarisationsstellung 0°



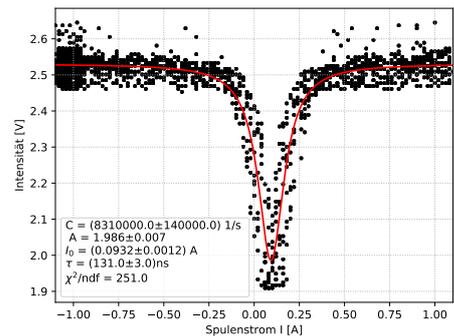
(2) Polarisationsstellung 45°



(2) Polarisationsstellung 45°



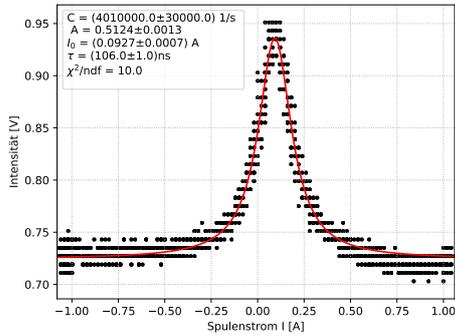
(3) Polarisationsstellung 90°



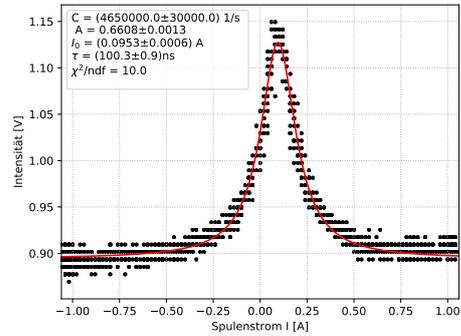
(3) Polarisationsstellung 90°

Abbildung 12: Abkühlvorgang bei 0 °C

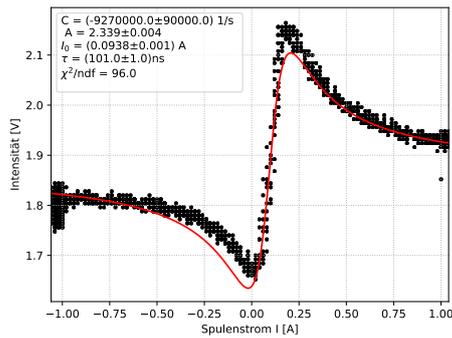
Abbildung 13: Abkühlvorgang bei 1 °C



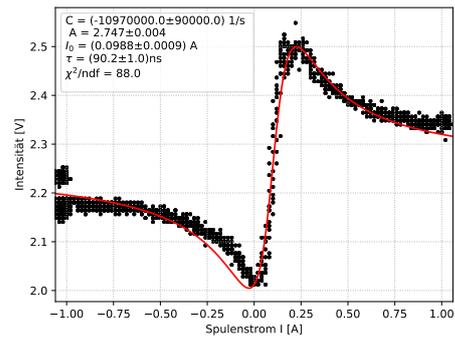
(1) Polarisationsstellung 0°



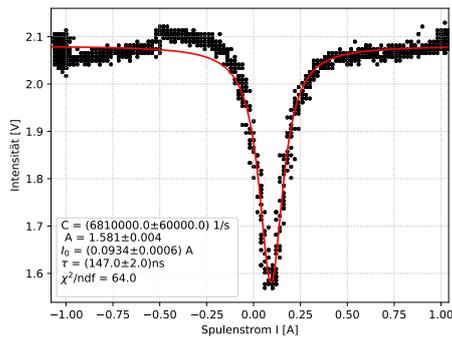
(1) Polarisationsstellung 0°



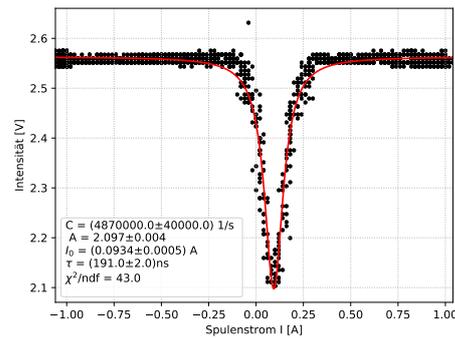
(2) Polarisationsstellung 45°



(2) Polarisationsstellung 45°



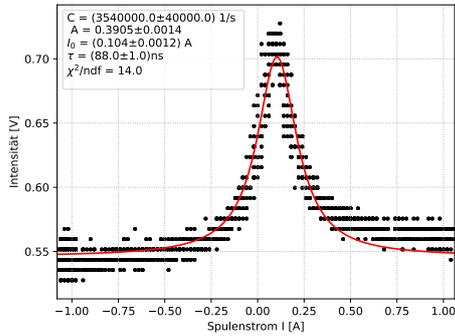
(3) Polarisationsstellung 90°



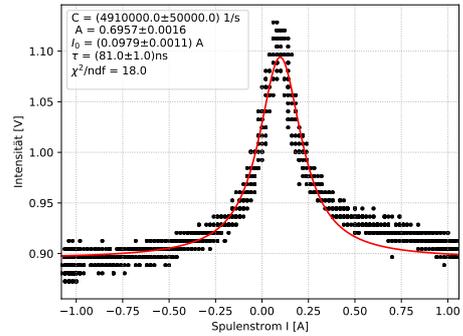
(3) Polarisationsstellung 90°

Abbildung 14: Abkühlvorgang bei 4 °C

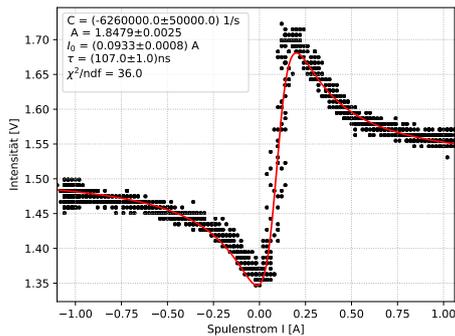
Abbildung 15: Abkühlvorgang bei 6 °C



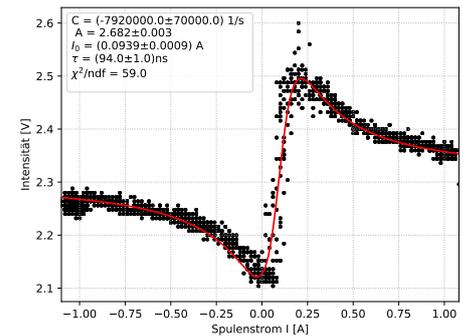
(1) Polarisationsstellung 0°



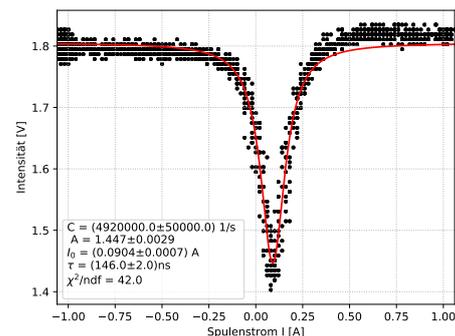
(1) Polarisationsstellung 0°



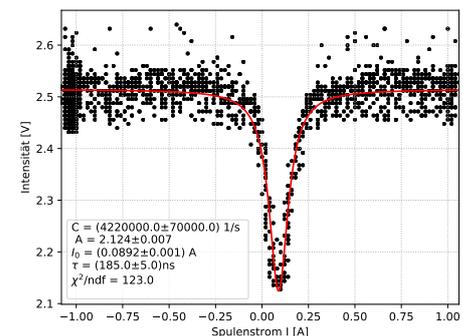
(2) Polarisationsstellung 45°



(2) Polarisationsstellung 45°



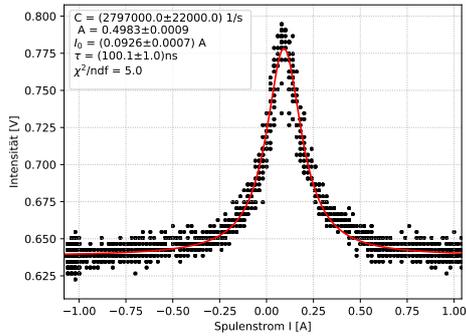
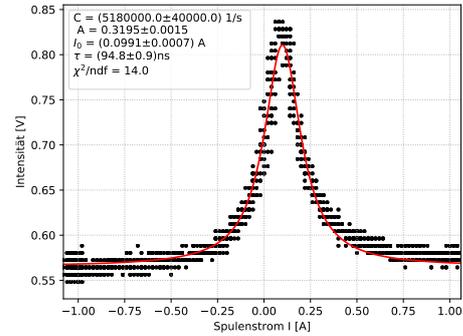
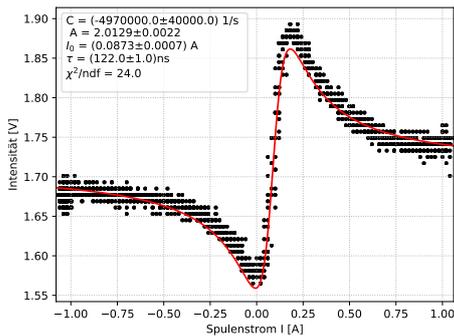
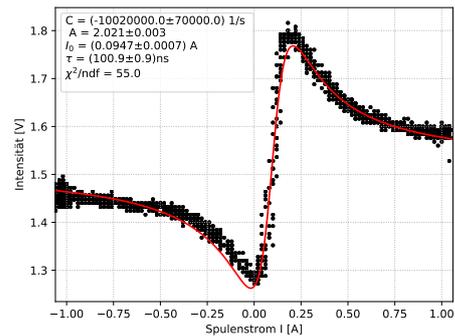
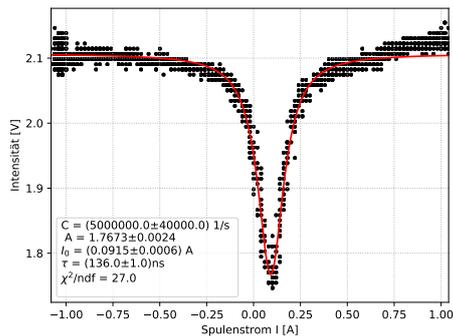
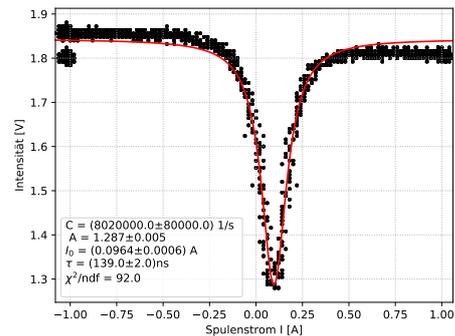
(3) Polarisationsstellung 90°

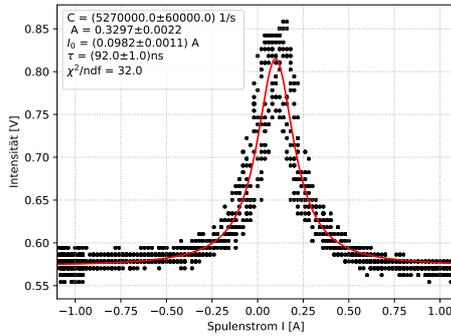


(3) Polarisationsstellung 90°

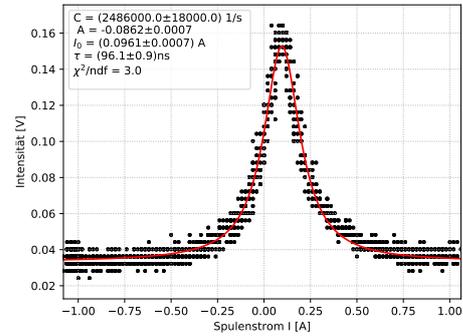
Abbildung 16: Abkühlvorgang bei 7°C

Abbildung 17: Abkühlvorgang bei 8°C

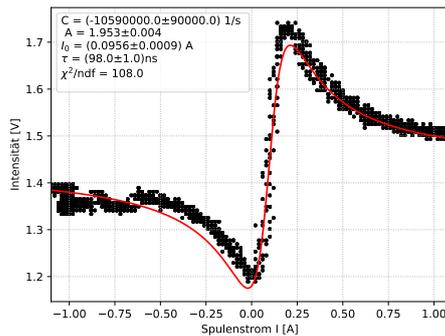
(1) Polarisationsstellung 0° (1) Polarisationsstellung 0° (2) Polarisationsstellung 45° (2) Polarisationsstellung 45° (3) Polarisationsstellung 90° (3) Polarisationsstellung 90° Abbildung 18: Abkühlvorgang bei 10°C Abbildung 19: Abkühlvorgang bei -1°C



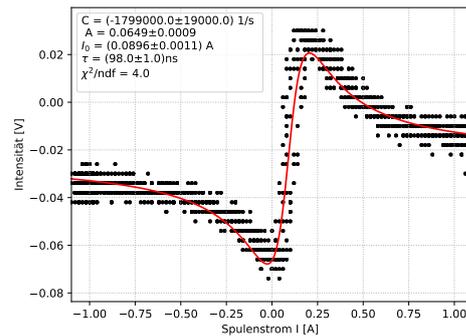
(1) Polarisations-einstellung 0°



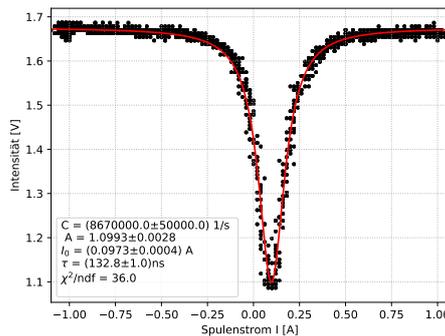
(1) Polarisations-einstellung 0°



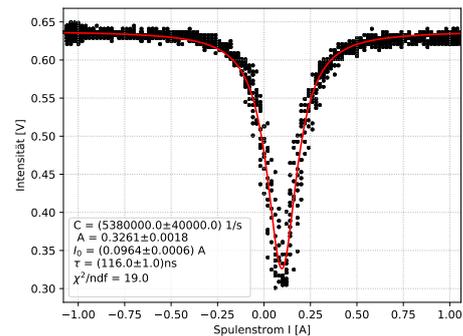
(2) Polarisations-einstellung 45°



(2) Polarisations-einstellung 45°



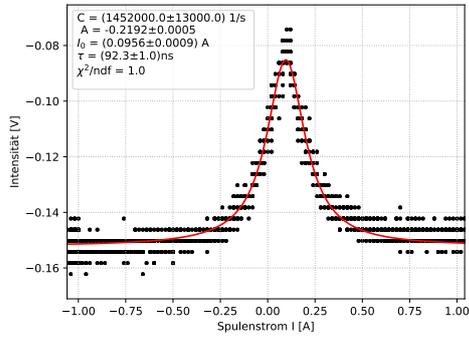
(3) Polarisations-einstellung 90°



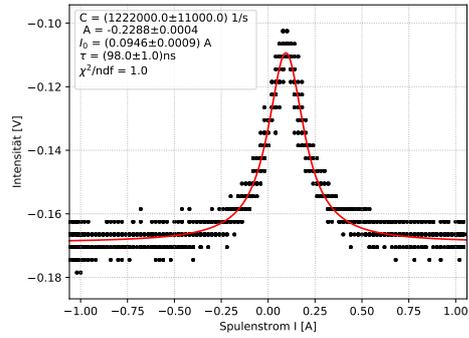
(3) Polarisations-einstellung 90°

Abbildung 20: Abkühlvorgang bei -3°C

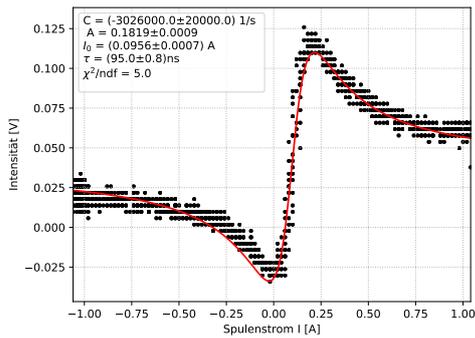
Abbildung 21: Abkühlvorgang bei -5°C



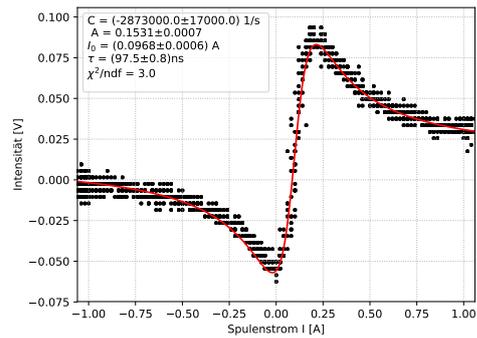
(1) Polarisations-einstellung 0°



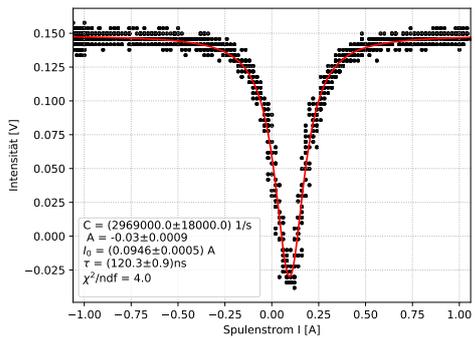
(1) Polarisations-einstellung 0°



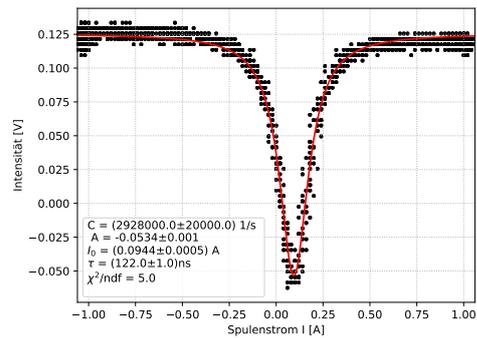
(2) Polarisations-einstellung 45°



(2) Polarisations-einstellung 45°



(3) Polarisations-einstellung 90°



(3) Polarisations-einstellung 90°

Abbildung 22: Abkühlvorgang bei -6°C

Abbildung 23: Abkühlvorgang bei -9°C

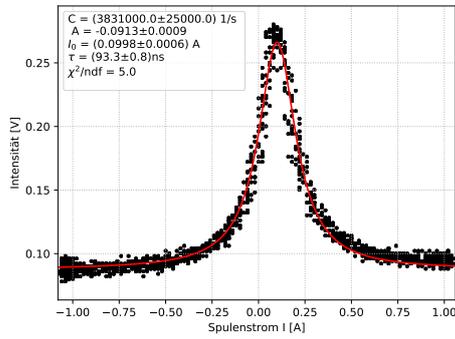


Abbildung 24: Messung 1 zur Bestimmung der Standardabweichung

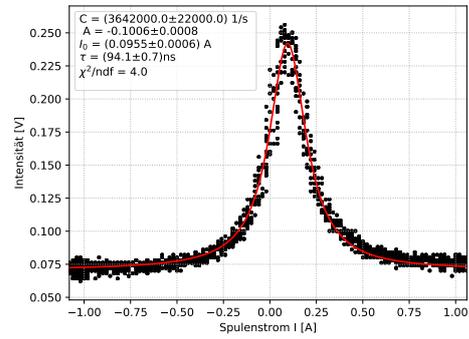


Abbildung 27: Messung 4 zur Bestimmung der Standardabweichung

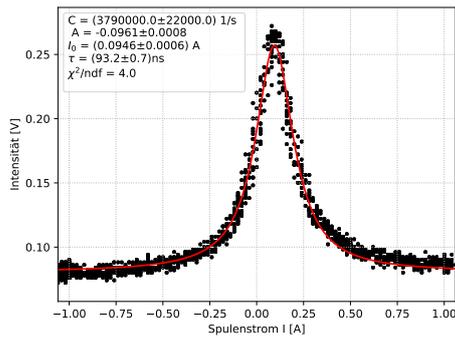


Abbildung 25: Messung 2 zur Bestimmung der Standardabweichung

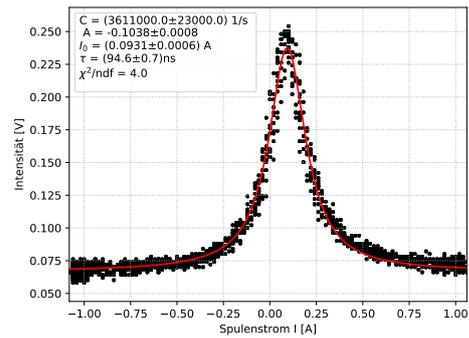


Abbildung 28: Messung 5 zur Bestimmung der Standardabweichung

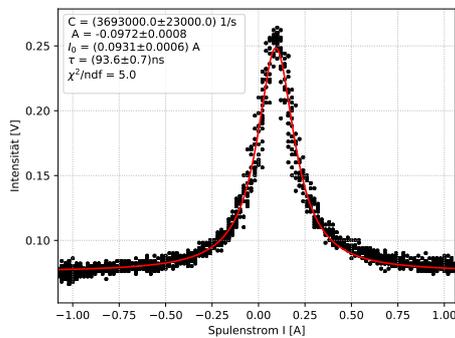


Abbildung 26: Messung 3 zur Bestimmung der Standardabweichung

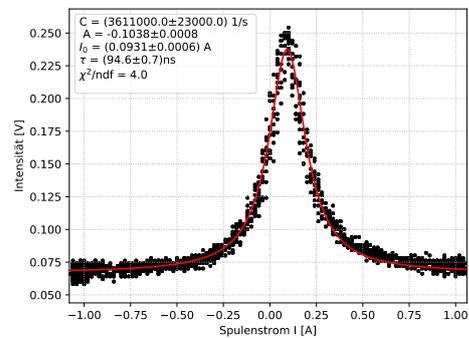


Abbildung 29: Messung 6 zur Bestimmung der Standardabweichung

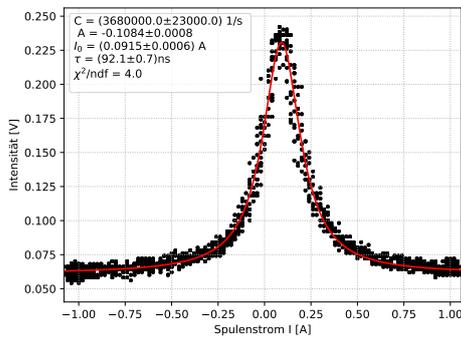


Abbildung 30: Messung 7 zur Bestimmung der Standardabweichung

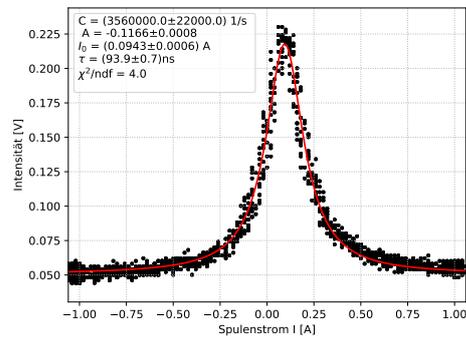


Abbildung 33: Messung 10 zur Bestimmung der Standardabweichung

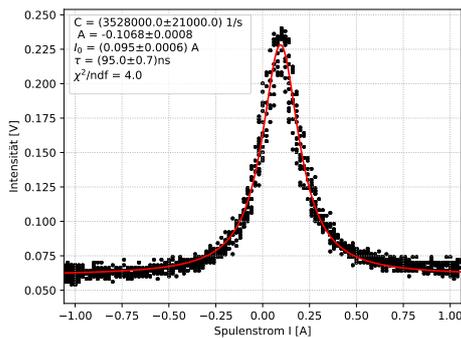


Abbildung 31: Messung 8 zur Bestimmung der Standardabweichung

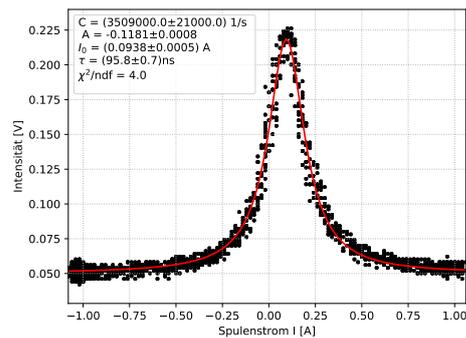


Abbildung 34: Messung 11 zur Bestimmung der Standardabweichung

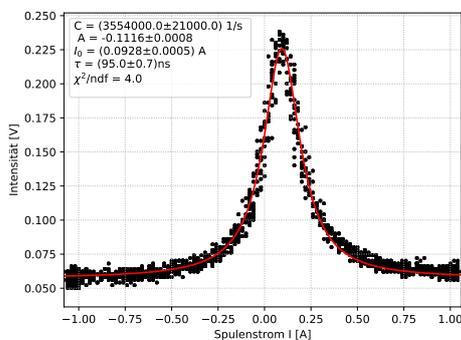


Abbildung 32: Messung 9 zur Bestimmung der Standardabweichung

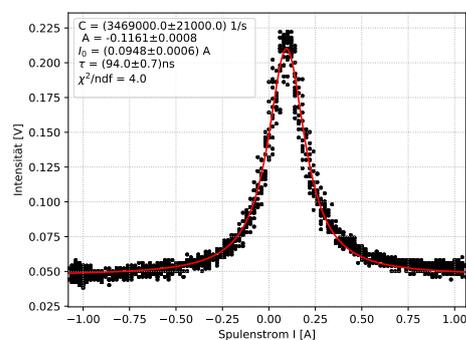


Abbildung 35: Messung 12 zur Bestimmung der Standardabweichung

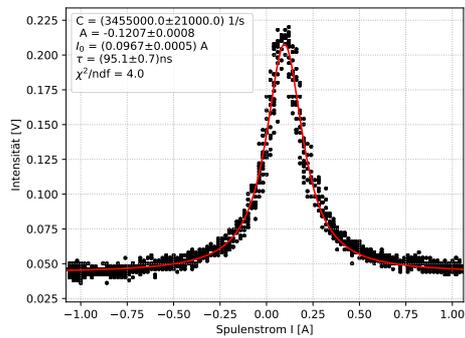


Abbildung 36: Messung 13 zur Bestimmung der Standardabweichung

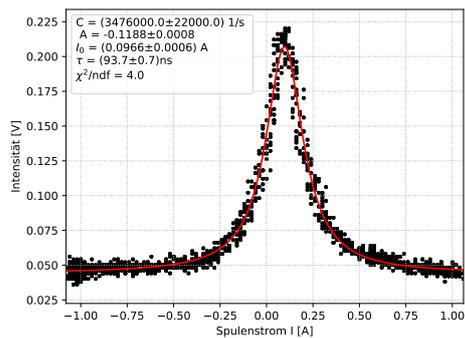


Abbildung 37: Messung 14 zur Bestimmung der Standardabweichung

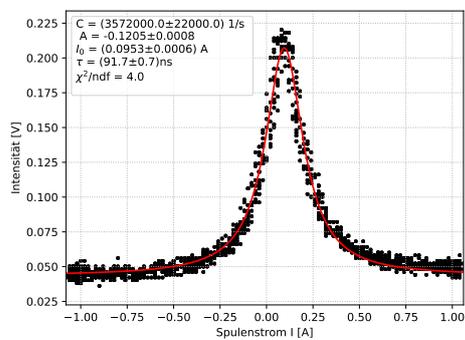


Abbildung 38: Messung 15 zur Bestimmung der Standardabweichung

Temperatur [°C] Abkühlvorgang	(τ, s_τ) [ns]	(C, s_C) [1/s]	(A, s_A)	(I_0, s_{I_0}) [A]	χ^2 (reduziert)
Pol. 0°					
10	(100.1, 1.0)	(2797000.0, 22000.0)	(0.4983, 0.0009)	(0.0926, 0.0007)	5.0
8	(81.0, 1.0)	(4910000.0, 50000.0)	(0.6957, 0.0016)	(0.0979, 0.0011)	18.0
7	(88.0, 1.0)	(3540000.0, 40000.0)	(0.3905, 0.0014)	(0.104, 0.0012)	14.0
6	(100.3, 0.9)	(4650000.0, 30000.0)	(0.6608, 0.0013)	(0.0953, 0.0006)	10.0
4	(106.0, 1.0)	(4010000.0, 30000.0)	(0.5124, 0.0013)	(0.0927, 0.0007)	10.0
1	(97.0, 1.0)	(5110000.0, 50000.0)	(0.5606, 0.0018)	(0.0955, 0.0009)	22.0
0	(101.0, 1.0)	(3350000.0, 40000.0)	(0.1855, 0.0014)	(0.0936, 0.0009)	12.0
-1	(94.8, 0.9)	(5180000.0, 40000.0)	(0.3195, 0.0015)	(0.0991, 0.0007)	14.0
-3	(92.0, 1.0)	(5270000.0, 60000.0)	(0.3297, 0.0022)	(0.0982, 0.0011)	32.0
-5	(96.1, 0.9)	(2486000.0, 18000.0)	(-0.0862, 0.0007)	(0.0961, 0.0007)	3.0
-6	(92.3, 1.0)	(1452000.0, 13000.0)	(-0.2192, 0.0005)	(0.0956, 0.0009)	1.0
-9	(98.0, 1.0)	(1222000.0, 11000.0)	(-0.2288, 0.0004)	(0.0946, 0.0009)	1.0
Pol. 45°					
10	(122.0, 1.0)	(-4970000.0, 40000.0)	(2.0129, 0.0022)	(0.0873, 0.0007)	24.0
8	(94.0, 1.0)	(-7920000.0, 70000.0)	(2.682, 0.003)	(0.0939, 0.0009)	59.0
7	(107.0, 1.0)	(-6260000.0, 50000.0)	(1.8479, 0.0025)	(0.0933, 0.0008)	36.0
6	(90.2, 1.0)	(-10970000.0, 90000.0)	(2.747, 0.004)	(0.0988, 0.0009)	88.0
4	(101.0, 1.0)	(-9270000.0, 90000.0)	(2.339, 0.004)	(0.0938, 0.001)	96.0
1	(86.0, 1.0)	(-12680000.0, 130000.0)	(2.748, 0.005)	(0.0893, 0.0012)	186.0
0	(90.0, 1.0)	(-8060000.0, 80000.0)	(1.45, 0.003)	(0.0895, 0.0011)	71.0
-1	(100.9, 0.9)	(-10020000.0, 70000.0)	(2.021, 0.003)	(0.0947, 0.0007)	55.0
-3	(98.0, 1.0)	(-10590000.0, 90000.0)	(1.953, 0.004)	(0.0956, 0.0009)	108.0
-5	(98.0, 1.0)	(-1799000.0, 19000.0)	(0.0649, 0.0009)	(0.0896, 0.0011)	4.0
-6	(95.0, 0.8)	(-3026000.0, 20000.0)	(0.1819, 0.0009)	(0.0956, 0.0007)	5.0
-9	(97.5, 0.8)	(-2873000.0, 17000.0)	(0.1531, 0.0007)	(0.0968, 0.0006)	3.0
Pol. 90°					
10	(136.0, 1.0)	(5000000.0, 40000.0)	(1.7673, 0.0024)	(0.0915, 0.0006)	27.0
8	(185.0, 5.0)	(4220000.0, 70000.0)	(2.124, 0.007)	(0.0892, 0.001)	123.0
7	(146.0, 2.0)	(4920000.0, 50000.0)	(1.447, 0.0029)	(0.0904, 0.0007)	42.0
6	(191.0, 2.0)	(4870000.0, 40000.0)	(2.097, 0.004)	(0.0934, 0.0005)	43.0
4	(147.0, 2.0)	(6810000.0, 60000.0)	(1.581, 0.004)	(0.0934, 0.0006)	64.0
1	(131.0, 3.0)	(8310000.0, 140000.0)	(1.986, 0.007)	(0.0932, 0.0012)	251.0
0	(128.0, 2.0)	(5920000.0, 70000.0)	(0.9, 0.003)	(0.1014, 0.0008)	58.0
-1	(139.0, 2.0)	(8020000.0, 80000.0)	(1.287, 0.005)	(0.0964, 0.0006)	92.0
-3	(132.8, 1.0)	(8670000.0, 50000.0)	(1.0993, 0.0028)	(0.0973, 0.0004)	36.0
-5	(116.0, 1.0)	(5380000.0, 40000.0)	(0.3261, 0.0018)	(0.0964, 0.0006)	19.0
-6	(120.3, 0.9)	(2969000.0, 18000.0)	(-0.03, 0.0009)	(0.0946, 0.0005)	4.0
-9	(122.0, 1.0)	(2928000.0, 20000.0)	(-0.0534, 0.001)	(0.0944, 0.0005)	5.0

Tabelle 2: Fitparameter des Abkühlvorgangs, als Tupel mit dem dazugehörigen Fehler angegeben

Temperatur [°C]	(τ, s_τ) [ns]	(C, s_C) [1/s]	(A, s_A)	(I_0, s_{I_0}) [A]	χ^2 (reduziert)
Aufwärmvorgang					
Pol. 0°					
7	(94.5, 0.7)	(3515000.0, 19000.0)	(-0.1267, 0.0007)	(0.0909, 0.0005)	3.0
9	(87.3, 0.7)	(2616000.0, 17000.0)	(-0.1909, 0.0006)	(0.0963, 0.0006)	2.0
Pol. 45°					
7	(82.0, 1.0)	(-7570000.0, 90000.0)	(0.74, 0.003)	(0.0968, 0.0014)	74.0
9	(96.9, 0.7)	(-4752000.0, 26000.0)	(0.3975, 0.0011)	(0.0948, 0.0006)	8.0
Pol. 90°					
7	(96.0, 2.0)	(7320000.0, 100000.0)	(0.194, 0.004)	(0.0978, 0.0013)	89.0
9	(111.3, 0.9)	(4476000.0, 28000.0)	(-0.0204, 0.0012)	(0.0892, 0.0005)	9.0

Tabelle 3: Fitparameter des Aufwärmvorgangs, als Tupel mit dem dazugehörigen Fehler angegeben

Temperatur [°C]	(τ, s_τ) [ns]	(C, s_C) [1/s]	(A, s_A)	(I_0, s_{I_0}) [A]	χ^2 (reduziert)
Untergrundmessung					
Pol. 0°					
- 11	(93.3, 0.8)	(3831000.0, 25000.0)	(-0.0913, 0.0009)	(0.0998, 0.0006)	5.0
- 11	(93.2, 0.7)	(3790000.0, 22000.0)	(-0.0961, 0.0008)	(0.0946, 0.0006)	4.0
- 11	(93.6, 0.7)	(3693000.0, 23000.0)	(-0.0972, 0.0008)	(0.0931, 0.0006)	5.0
- 11	(94.1, 0.7)	(3642000.0, 22000.0)	(-0.1006, 0.0008)	(0.0955, 0.0006)	4.0
- 11	(94.6, 0.7)	(3611000.0, 23000.0)	(-0.1038, 0.0008)	(0.0931, 0.0006)	4.0
- 11	(94.6, 0.7)	(3611000.0, 23000.0)	(-0.1038, 0.0008)	(0.0931, 0.0006)	4.0
- 11	(92.1, 0.7)	(3680000.0, 23000.0)	(-0.1084, 0.0008)	(0.0915, 0.0006)	4.0
- 11	(95.0, 0.7)	(3528000.0, 21000.0)	(-0.1068, 0.0008)	(0.095, 0.0006)	4.0
- 11	(95.0, 0.7)	(3554000.0, 21000.0)	(-0.1116, 0.0008)	(0.0928, 0.0005)	4.0
- 11	(93.9, 0.7)	(3560000.0, 22000.0)	(-0.1166, 0.0008)	(0.0943, 0.0006)	4.0
- 11	(95.8, 0.7)	(3509000.0, 21000.0)	(-0.1181, 0.0008)	(0.0938, 0.0005)	4.0
- 11	(94.0, 0.7)	(3469000.0, 21000.0)	(-0.1161, 0.0008)	(0.0948, 0.0006)	4.0
- 11	(95.1, 0.7)	(3455000.0, 21000.0)	(-0.1207, 0.0008)	(0.0967, 0.0005)	4.0
- 11	(93.7, 0.7)	(3476000.0, 22000.0)	(-0.1188, 0.0008)	(0.0966, 0.0006)	4.0
- 11	(91.7, 0.7)	(3572000.0, 22000.0)	(-0.1205, 0.0008)	(0.0953, 0.0006)	4.0

Tabelle 4: Fitparameter der Abweichungsmessung, als Tupel mit dem dazugehörigen Fehler angegeben

Literatur

- [Quelle 1] *"Versuchsanleitung Fortgeschrittenenpraktikum Teil 1, Super Conductive Interference Device, M. Köhli M. Gessner S. Fischer und M. Guth Stand 09/2019."*
- [Quelle 2] *"Bau einer Apparatur zur Messung von Lebensdauern angeregter Atomzustände mit Hilfe des Hanle-Effektes, Zulassungsarbeit zur Wissenschaftlichen Prüfung für das Lehramt an Gymnasien, Wolf-Dieter Hasenclever, Januar 1970."*

Halle

0° Signal bei -5°

$$I_1 = -0,0728 \text{ A}$$

$$I_2 = -0,2561 \text{ A}$$

90° bei 84°

$$I_1 = 0,0189 \text{ A}$$

$$I_2 = -0,2713 \text{ A}$$

$I_x = 0,9813 \text{ A}$ ist das Maximum

CH1 Eingang (Ramp) ← 50mV
→ 500mV CH2 Ausgang (Halle)

15 Untergrundmessungen bei 0°-Signal
 $T = -11$ (gespeichert als -12)

emp - 90 - mF - 1. c3V CH1 100mV

Fehler auf $T = \pm 1^\circ$

gemessene Temperaturen beim
Abkühlprozess: 10, 8, 7, 6, 4, 1, 0, -1,
-3, -5, -6, -7 °C

gemessene Temperatur beim
Aufwärmprozess: -1, -3 °C

Rauschen aufgenommen bei -3 °C

Rampe: 30 Sekunden

1/9/2019

