

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Semi-klassische Erklärung des Hanle-Effekts	2
2.2	Quantenmechanische Erklärung des Hanle-Effekts	3
2.3	Die Breit-Formel	4
2.4	Anwendung der Breit-Formel auf den Versuch	5
2.5	Dampfdruck und Coherence Narrowing	6
3	Versuchsaufbau	7
4	Versuchsdurchführung	7
5	Auswertung und Fehleranalyse	11
5.1	Abschätzung der statistischen Unsicherheiten	11
5.1.1	Bestimmung der Streuung einer Langzeitmessung	11
5.1.2	Bestimmung der Streuung der Fit-Parameter bei Mehrfachmessung	12
5.2	Bestimmung der Hanle-Kurven	15
5.3	Berechnung des Dampfdrucks	16
5.4	Extrapolation der Lebensdauern	16
6	Diskussion der Ergebnisse	19
A	Anhang	22
	Abbildungsverzeichnis	23
	Tabellenverzeichnis	23
	Literaturverzeichnis	23
A.1	Endergebnisse für Aufwärmmessung 1	25
A.2	Endergebnisse für Aufwärmmessung 2	26
A.3	Endergebnisse für die Abköhlmessung	26
A.4	Auftragung der Temperatur gegen den Peletierstrom	27
A.5	Extrapolation der Lebensdauer für die einzelnen Messreihen und Polarisat- toreinstellungen	28
A.6	Für die Auswertung verwendete Anpassungen	37
A.6.1	Streumessungen zur Bestimmung der Standardabweichung	37
A.6.2	Messungen zur Bestimmung der Lebensdauern	52
A.7	Messprotokoll	72

1 Einleitung

In diesem Versuch wird mithilfe des Hanle-Effekts die Lebensdauer des angeregten 3P_1 -Zustands von Quecksilber bestimmt. In dichten Medien können allerdings durch Abregung emittierte Photonen wieder absorbiert werden, was zu einer effektiven Verlängerung der beobachteten Lebensdauer führt. Deswegen wird die Lebensdauer in diesem Versuch in mehreren Messreihen bei unterschiedlicher Temperatur gemessen, und die tatsächliche Lebensdauer durch Extrapolation bestimmt.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die für diesen Versuch wichtigen theoretischen Grundlagen beschrieben. Dabei werden sowohl der Hanle-Effekt als auch Coherence Narrowing und die Anwendung auf dieses Experiment behandelt. Die in diesem Abschnitt verwendeten Informationen wurden, soweit nicht anders gekennzeichnet, der Anleitung [1] entnommen.

2.1 Semi-klassische Erklärung des Hanle-Effekts

Der Hanle-Effekt beschreibt die Abhängigkeit der Polarisation der bei Resonanzfluoreszenz emittierten Strahlung von einem äußeren Magnetfeld.

Wenn ein Quecksilberatom ein Photon absorbiert und dadurch angeregt wird, kann das daraufhin angeregte Quecksilberatom durch einen oszillierenden elektrischen Dipol beschrieben werden. Die Dipolachse ist dabei parallel zur Polarisation des eingestrahlteten Photons. Die Intensität der Dipolstrahlung hängt zum einen vom Beobachtungswinkel φ ab, sie ist proportional zu $\sin^2(\varphi)$. Der andere wesentlich Einfluss auf die Intensität ergibt sich durch die Lebensdauer τ des angeregten Zustands. Phänomenologisch lässt sich das Zurückfallen des Elektrons in den Grundzustand durch den Faktor $\exp(-t/\tau)$ an die Intensität beschreiben. Die Gesamtintensität der Abstrahlung eines einzelnen Atoms ergibt sich dann durch Integration über die Zeit

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

wobei C eine Konstante ist. Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, wird ein Drehmoment auf den Dipol ausgeübt. Der Dipol beginnt in der Ebene senkrecht zur magnetischen Flussdichte \mathbf{B} zu präzedieren, wodurch ein magnetischer Dipol induziert wird. Das Dipolmoment wird als starr mit dem magnetischen Moment betrachtet. In einem schwachen Magnetfeld ergibt sich für die Zeitentwicklung eines magnetischen Moments μ , das durch ein Niveau mit Drehimpulsquantenzahl J hervorgerufen wird,

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{\omega_L}{|\mathbf{B}|} (\mu(t) \times \mathbf{B}). \quad (2)$$

Dies entspricht einer Präzession mit der Larmorfrequenz

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

Deswegen verändert sich bei einem angelegten Magnetfeld und konstanter Beobachtungsrichtung der Winkel φ mit der Zeit.

Ist zum Zeitpunkt $t = 0$ die Polarisation und damit auch die Dipolachse parallel zur Beobachtungsrichtung, so ist $\varphi(0) = 0$ und somit $\varphi(t) = \omega_L t$. Aus [Gleichung \(2\)](#) lässt sich dann die Gesamtintensität

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

berechnen. Der Intensitätsverlauf entspricht einer invertierten Lorentzkurve. Da der Winkel zwischen z -Achse und Polarisation 90° beträgt, wird diese Konfiguration als 90° -*Einstellung* bezeichnet.

Ist dagegen die Polarisation zum Zeitpunkt $t = 0$ senkrecht zur Beobachtungsrichtung, gilt $\varphi(0) = \pi/2$ und somit $\varphi(t) = \omega_L t + \pi/2$. Anwendung von [Gleichung \(2\)](#) ergibt

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

Dies entspricht einer normalen Lorentzkurve. Da hier der Winkel zwischen z -Achse und Polarisationsrichtung 0° beträgt, wird diese Konfiguration mit 0° -*Einstellung* bezeichnet.

Für einen beliebigen Startwinkel φ_0 zwischen z -Achse und Polarisation ist $\varphi(0) = \varphi_0$ und es gilt $\varphi(t) = \omega_L t + \varphi_0$. Für die Gesamtintensität ergibt sich

$$I = C \cdot \int_0^\infty \cos^2(\omega_L t + \varphi_0) e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{C_\tau}{2} \left(\frac{1 + (2\omega_L \tau)^2 + \cos(2\varphi_0) - 2\tau\omega_L \sin(2\varphi_0)}{1 + (2\omega_L \tau)^2} \right). \quad (6)$$

Einsetzen des in diesem Versuch betrachteten Spezialfalls von $\varphi_0 = 45^\circ$ ergibt

$$I = \frac{C_\tau}{2} \left(1 - \frac{2\omega_L \tau}{1 + (2\omega_L \tau)^2} \right). \quad (7)$$

2.2 Quantenmechanische Erklärung des Hanle-Effekts

Quantenmechanisch betrachtet ist der Hanle-Effekt ein Spezialfall des sogenannten *level-crossing*, der bei einem äußeren Magnetfeld von $B = 0$ T auftritt. Falls die Gesamtdrehimpulsquantenzahl J nicht verschwindet, sind ohne äußeres Magnetfeld die Zeeman-Niveaus verschiedener m_J -Quantenzahlen entartet. Sie lassen sich energetisch nicht unterscheiden. Legt man ein Magnetfeld an, wird diese Entartung aufgehoben. Ist das Magnetfeld groß genug, können die verschiedenen m_J -Niveaus separat an- und abgeregert werden. Die beobachtete Intensität I ist dann proportional zu der Summe der Quadrate der einzelnen Amplituden A_i

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

Dies entspricht einer nicht-kohärenten Überlagerung ohne Interferenz. Ist allerdings das Magnetfeld klein, können die verschiedenen m_J -Zustände kohärent angeregt werden. Bei

Abregung interferieren diese Zustände dann, und die beobachtete Gesamtintensität ist proportional zum Quadrat der Summe der Amplituden

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

Eine Skizze der Aufspaltung ist in [Abb. 1](#) zu sehen.

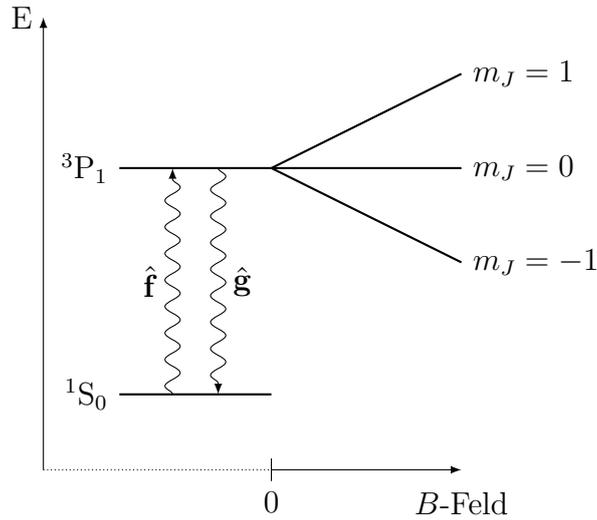


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Aufspaltung des 3P_1 -Quecksilberenergieniveaus in verschiedene m_J -Quantenzahlen bei zunehmendem Magnetfeld B . Das 1S_0 -Niveau wurde dabei von einem Photon der Polarisationsrichtung \hat{f} angeregt, die Abregung in den 3P_1 -Zustand erfolgt unter Emission eines Photons mit Polarisationsrichtung \hat{g} .

2.3 Die Breit-Formel

Die Breit-Formel ist eine allgemeine Formel zur Resonanzfluoreszenz in der Quantenmechanik. Sie beschreibt, in welcher Rate Photonen mit linearer Polarisationsrichtung \hat{g} emittiert werden, wenn die Anregung des Systems durch ein Photon mit Polarisationsrichtung \hat{f} erfolgt ist.

Dabei wird von einem quantenmechanischem System mit verschiedenen stabilen Grundzuständen $|m\rangle$ und angeregten Zuständen $|\mu\rangle$, das sich zur Zeit $t < 0$ in einem der Grundzustände befindet, ausgegangen. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird dann das System durch die eingestrahelten Photonen angeregt.

Der Hamiltonoperator der Elektron-Photon-Wechselwirkung ist in Dipolnäherung durch

$$\hat{H}_{e\gamma} = -\hat{\mathbf{D}} \cdot \hat{\mathbf{E}} \quad (10)$$

gegeben. Dabei beschreibt $\hat{\mathbf{D}}$ den Dipoloperator und $\hat{\mathbf{E}}$ den Operator des elektrischen Felds. Da der Dipoloperator $\hat{\mathbf{D}}$ proportional zum Ortsoperator $\hat{\mathbf{r}}$ und der Feldoperator $\hat{\mathbf{E}}$ proportional zur Polarisationsrichtung $\hat{\mathbf{f}}$ der einfallenden Photonen sind, ergibt sich unter Vernachlässigung konstanter Vorfaktoren

$$\hat{H}_{e\gamma} = -\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{f}}. \quad (11)$$

Die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von Zustand $|a\rangle$ nach Zustand $|b\rangle$ durch Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld ist durch das Übergangsmatrixelement $f_{ba} = \langle b|\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{f}}|a\rangle$ gegeben. Die Probe befindet sich also zum Zeitpunkt $t > 0$ in einem Zustand

$$|\Psi_m\rangle = |m\rangle + \sum_{\mu} f_{\mu m} |\mu\rangle \exp\left\{\left(-i\omega_{\mu} + \frac{\Gamma_{\mu}}{2}\right)t\right\}, \quad (12)$$

wobei ω_{μ} die Energie des angeregten Zustands $|\mu\rangle$ angibt. Aufgrund von Wechselwirkung mit der Umgebung entstehen dissipative Prozesse, die durch den Dämpfungsterm Γ_{μ} beschreiben werden. Dadurch ist die Zeitentwicklung nicht mehr unitär. Für den Dämpfungsterm gilt $\Gamma_{\mu} = 1/\tau_{\mu}$, wobei τ_{μ} die Lebensdauer des Zustands $|\mu\rangle$ bezeichnet.

Die Wahrscheinlichkeit P , dass ein von einem Photon mit Polarisation $\hat{\mathbf{f}}$ angeregter Zustand unter Emission eines Photons mit Polarisation $\hat{\mathbf{g}}$ in den Grundzustand übergeht, lässt sich dann über

$$\begin{aligned} P(\hat{\mathbf{f}}, \hat{\mathbf{g}}, t) &= \sum_{m, m'} |\langle m' | \hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{g}} | \Psi \rangle|^2 \\ &= \sum_{m, m'} \sum_{\mu, \mu'} f_{m\mu} f_{\mu' m'} g_{\mu m'} g_{m' \mu'} \exp\{i(\omega_{\mu} - \omega_{\mu'}) - \Gamma_{\mu\mu'} t\} \end{aligned} \quad (13)$$

berechnen. Hierbei wurden verschiedene Grundzustände als orthogonal angenommen ($g_{mm'} = 0$) und $\Gamma_{\mu\mu'} := 1/2(\Gamma_{\mu} + \Gamma_{\mu'})$ verwendet. Die beobachtete Gesamtintensität R bei einer Strahlrate von N Photonen pro Sekunde lässt sich durch Integration über die Zeit ausrechnen

$$R(\hat{\mathbf{f}}, \hat{\mathbf{g}}) = N \int_0^{\infty} P(\hat{\mathbf{f}}, \hat{\mathbf{g}}, t) dt = N \sum_{m, m'} \sum_{\mu, \mu'} \frac{f_{m\mu} f_{\mu' m'} g_{\mu m'} g_{m' \mu'}}{\Gamma_{\mu\mu'} - i(\omega_{\mu} - \omega_{\mu'})} \quad (14)$$

2.4 Anwendung der Breit-Formel auf den Versuch

In diesem Versuch geht es um den Quecksilberübergang von 3P_1 nach 1S_0 . Es gibt also nur einen Grundzustand 1S_0 . Bei einem angelegten äußeren Magnetfeld spaltet sich der 3P_1 Zustand in drei Terme auf, die den Quantenzahlen $m_J = -1, 0, 1$ entsprechen. Es gibt also drei mögliche Übergänge in den Grundzustand. Allerdings sind in diesem Versuch nur die Interferenzen der Zustände zirkular polarisierten Photonen, also $\Delta m_J = \pm 1$, beitragend. Es gibt in diesem Fall also nur zwei mögliche Übergänge. Für den Grundzustand a und die angeregten Zustände b und c erhält man mit der Breit-Formel

$$R = \frac{|f_{ab}|^2 + |g_{ba}|^2}{\Gamma_b} + \frac{f_{ba} f_{ac} g_{ca} g_{ab}}{\Gamma_{bc} - i(\omega_b - \omega_c)} + \frac{f_{ab} f_{ca} g_{ca} g_{ba}}{\Gamma_{cb} - i(\omega_c - \omega_b)} + \frac{|f_{ac}|^2 + |g_{ca}|^2}{\Gamma_c}. \quad (15)$$

Die Energie eines Zeeman-Niveaus ist gegeben durch $E = \hbar\omega_{\mu} = E_n + m_J g_J \mu_B B$. Daraus lässt sich der Frequenzabstand

$$\Delta\omega = \omega_c - \omega_b = 2g_J \mu_B \frac{B}{\hbar} \quad (16)$$

berechnen. Für den Grenzfall schwacher Magnetfelder ist $\Delta\omega$ also klein, und aus [Gleichung \(15\)](#) ergibt sich

$$R_{\text{koh}} \approx |f_{ab}g_{ba} + f_{ac}g_{ca}|^2. \quad (17)$$

Diese Gleichung hat die Form einer kohärenten Superposition von Resonanzfluoreszenztermen. Für starke Magnetfelder hingegen ist $\Delta\omega \gg \Gamma_{bc}$. Aus [Gleichung \(15\)](#) ergibt sich der nicht-kohärente Fall

$$R_{\text{sep}} \approx |f_{ab}|^2|g_{ba}|^2 + |f_{ac}|^2|g_{ca}|^2. \quad (18)$$

Dies stimmt mit dem semi-klassisch Ergebnis überein.

Setzt man nun $A = f_{ba}f_{ac}g_{ca}g_{ab}$ und $\Gamma = \Gamma_{bc}$, lässt sich [Gleichung \(14\)](#) umformen

$$\begin{aligned} R &= R_{\text{sep}} + \frac{A}{\Gamma + i\Delta\omega} + \frac{A^*}{\Gamma - i\Delta\omega} \\ &= R_{\text{sep}} + 2 \Re\left\{ \frac{A}{\Gamma + i\omega} \right\} \\ &= R_{\text{sep}} + 2 \Re\{A\} \frac{\Gamma}{\Gamma^2(\Delta\omega)^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Mit $\Gamma = 1/\tau$ ergibt sich

$$R = C \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right) = C \cdot \left(\frac{(2\omega_L\tau)^2}{1 + (2\omega_L\tau)^2} \right), \quad (20)$$

wobei wieder die Lamorfrequenz $\omega_L = \Delta\omega/2$ verwendet wurde und C ein konstanter Vorfaktor ist.

2.5 Dampfdruck und Coherence Narrowing

Wird ein Photon durch die Abregung eines Atoms emittiert, hat dieses genau die nötige Wellenlänge zur Anregung eines weiteres Atoms. Auch dieses angeregte Atom fällt nach einer gewissen Dauer in den Grundzustand zurück, wobei es ein Photon derselben Polarisation und Ausbreitungsrichtung wie das ursprüngliche Photon emittiert. Dadurch ist dieses Photon nicht vom ursprünglichen anregenden Photon unterscheidbar. Dieser Prozess kann sich mehrfach wiederholen, und führt, da die Photonen ununterscheidbar sind, zu einer scheinbar längeren Lebensdauer des angeregten Atomzustands. Dieser Effekt wird mit *Coherence Narrowing* bezeichnet.

Um den Einfluss dieses Effekts zu eliminieren, kann die Lebensdauer bei verschiedenen Gasdichten gemessen und gegen eine Dichte von $\rho = 0 \text{ kg m}^{-3}$, entsprechend einem Druck von $p = 0 \text{ Pa}$, extrapoliert werden. Dadurch erhält man ein von Coherence-Narrowing unverfälschtes Ergebnis.

Die Dichte lässt sich allerdings in diesem Versuch nicht messen. Deswegen werden Temperatur und Druck verwendet. Die Temperatur lässt sich direkt messen, der Druck des Quecksilberdampfes lässt sich über die empirische Formel

$$\log\left(\frac{p}{p_c}\right) = \frac{T}{T_c} \cdot \left(a_1 T_r + a_2 T_r^{1,89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8,5} + a_6 T_r^9 \right) \quad (21)$$

aus der Temperatur bestimmen. Dabei ist $T_r = 1 - T/T_c$, mit der kritischen Temperatur $T_c = (1764 \pm 1)$ K und dem kritischen Druck $p_c = (167 \pm 3)$ MPa. Die Parameter a_i in Gleichung (21) sind durch

$$\begin{aligned} a_1 &= -4,576\,183\,68 & a_2 &= -1,407\,262\,77 & a_3 &= 2,362\,635\,41 \\ a_4 &= -31,088\,998\,5 & a_5 &= 58,018\,395\,9 & a_6 &= -27,630\,454\,6 \end{aligned} \quad (21a)$$

gegeben [1].

3 Versuchsaufbau

In diesem Versuch soll mithilfe des Hanle-Effekts die Lebensdauer des 3P_1 -Zustands ($6s6p$) untersucht werden. Dieser fällt unter Emission eines Photons mit einer Wellenlänge von $253,7$ nm zurück in den Grundzustand 1S_0 ($6s^2$). Um die Quecksilberprobe wie gewünscht anzuregen, wird sie mit dem Licht einer Quecksilberdampfampe (QL) bestrahlt. Das Licht der Quecksilberdampfampe wird zunächst mit einer Linse (L) kollimiert. Als nächstes wird es durch einen Intensitätsfilter (IF) geleitet, der die gewünschte Wellenlänge von $253,7$ nm herausfiltert. Anschließend trifft das Licht auf einen Polarisationsfilter (PF), an dem die Position eingestellt werden kann, und wird schließlich mit einer weiteren Linse (L) auf die Quecksilberprobe fokussiert. Die Quecksilberprobe befindet sich in einer Zelle (QZ), die auf einer Kupferwärmesenke montiert ist, wobei Öl als Wärmeleitflüssigkeit zwischen Quecksilberzelle und Kupferwärmesenke verwendet wird. Sie ist zudem in drei Raumrichtungen von jeweils einem Paar von Helmholtz-Spulen (HS) umgeben. Zwei der drei Spulenpaare (in y - und z -Richtung) dienen der Neutralisierung des Erdmagnetfeldes in den entsprechenden Raumrichtungen, mit der dritten (in x -Richtung) wird ein steigendes Magnetfeld angelegt, das dann das Hanle-Signal erzeugt. Die Kupferwärmesenke ist über Heat-Pipes (HP) mit einem weiteren Kupferblock verbunden, der durch Peletierelemente gekühlt wird. Diese werden wiederum über eine Wasserkühlung gekühlt. Innerhalb der Heat-Pipes befindet sich das Kühlmittel Freon, das über Verdampfen am unteren Ende und Kondensation am oberen Ende die Wärme abführt. Die Wärmeleitung ist nötig, da zum Betrieb der Kühlung große Ströme verwendet werden, die störende Magnetfelder erzeugen. Daher muss sich die Kühlung außerhalb der Helmholtz-Spulenpaare befinden.

Die Intensität des von der Quecksilberzelle emittierten Lichts wird mit einem Photomultiplier (PM) gemessen. Der Photomultiplier sowie die Rampenspannung, die das Helmholtz-Spulenpaar in x -Richtung steuert, sind mit einem Oszilloskop verbunden. Ein Thermometer, an dem die Temperatur der Quecksilberzelle abgelesen werden kann, ist am mit der Zelle verbundenen Kupferblock angebracht.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 skizziert.

4 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wurden die Wasserkühlung und die Peletierelemente eingeschaltet, um direkt nach der Kalibrierung mit einer Aufwärmessung starten zu können. Da in

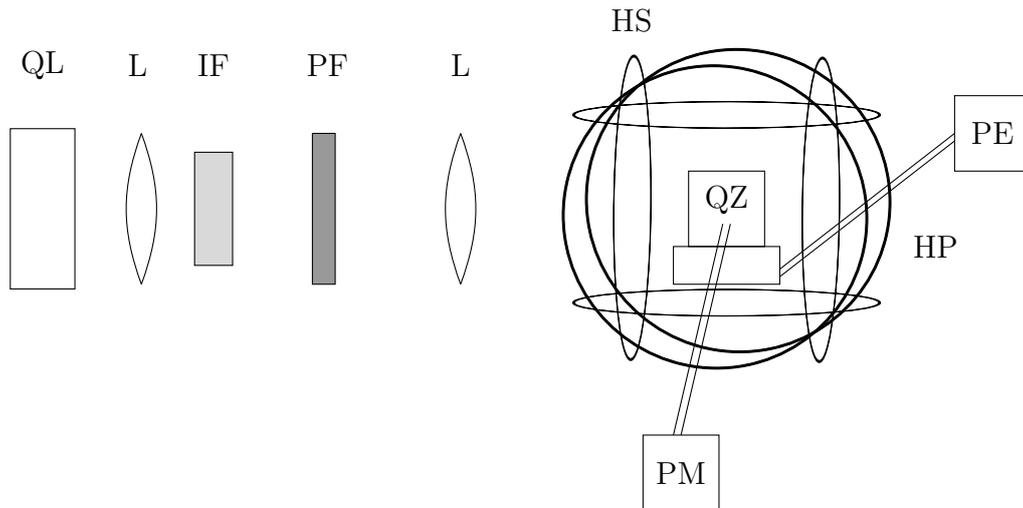


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

der Auswertung die Extrapolation auf tiefe Temperaturen erfolgen soll, sollten so viele Daten wie möglich bei möglichst tiefen Temperaturen aufgenommen werden. Deswegen wurden in diesem Versuch auch zwei von drei Messreihen als Aufwärmessungen gewählt. Da die Temperatur die Intensität des Hanle-Signals, nicht aber die Form, beeinflusst, hat das Kühlen keinen Einfluss auf die Kalibration.

Für die Kalibration wurden zunächst die y - und z -Ströme auf 0 A gesetzt. Der Polarisator wurde auf 0° eingestellt. Dann wurde die Rampe (x -Strom) über den gesamten zur Verfügung stehenden Bereich von $-0,5138$ A bis $0,5214$ A gefahren. Der Trigger vom Oszilloskop wurde auf das Rampensignal eingestellt, so dass das resultierende Bild möglichst zentriert war. Eine Abbildung des auf dem Oszilloskop sichtbaren Rampenstroms ist in [Abb. 3](#) zu sehen.

Das Hanle-Signal wurde zusammen mit dem Rampensignal am Oszilloskop dargestellt. Die Polarisatoreinstellung wurde leicht geändert und die Rampe erneut durchgefahren, bis das Hanle-Signal so symmetrisch wie möglich aussah. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Signal bei sehr großem und sehr kleinem Rampenstrom möglichst die gleiche Intensität hat. Das wurde bei einer Polarisatoreinstellung von -1° erreicht. Anschließend wurde der Rampenstrom auf einen festen Wert gesetzt. Dann wurden abwechselnd die y - und z -Ströme variiert, bis das Signal und somit auch die Magnetfeldbeiträge aus y - und z -Richtung minimal waren.

Anschließend wurde der Polarisator auf 90° gestellt. Wieder wurde die genaue Polarisatorposition unter durchfahrender Rampe variiert, bis ein möglichst symmetrisches Signal zu sehen war. Dies war der Fall bei einer Einstellung von 86° . Anschließend wurde der Rampenstrom auf den maximalen Ausschlag des Hanle-Signals gestellt, und wieder wurden y - und z -Strom variiert, bis das Signal minimal war.

Schließlich wurde der Polarisator auf 45° gestellt und unter durchfahrender Rampe variiert, bis das Hanle-Signal symmetrisch war. Dies war der Fall bei einer Polarisatoreinstellung von



Abbildung 3: Spannungssignal des durchfahrenden Rampenstroms wie es am Oszilloskop aufgezeichnet wurde.

44°. Im Folgenden werden die Polarisatoreinstellungen mit den im Hanle-Signal sichtbaren Polarisationsrichtungen, also 0° , 45° und 90° , bezeichnet.

Die letztendlich gewählten Ströme sind 4,8 A in y -Richtung und 2,9 A in z -Richtung.

Sie sind zusammen mit den Polarisatoreinstellungen in [Tabelle 1](#) aufgelistet.

Polarisatoreinstellungen [deg]		
0	45	90
-1	44	86

(a) Polarisatoreinstellungen.

y -Strom [A]	z -Strom [A]
4,8	2,9

(b) Stromeinstellungen.

Tabelle 1: Für die Kalibrierung gewählte Einstellungen. In [Tabelle 1a](#) sind die Einstellungen des Polarisators aufgelistet, in [Tabelle 1b](#) die gewählten y - und z -Ströme.

Anschließend wurde mit der Aufwärmessung begonnen. Zunächst wurde die Temperatur am Thermometer abgelesen und notiert. Auch Peletierstrom und -spannung wurden aufgeschrieben. Dann wurde mit den oben genannten Polarisatoreinstellungen das Hanle-Signal bei 0° , 45° und 90° mit dem Oszilloskop aufgenommen und als csv-Datei gespeichert. Schließlich wurde der Peletierstrom um 0,5 A verringert und eine Stoppuhr von 20 min gestellt. Nach 20 min wurden diese Schritte wiederholt. Am ersten Tag wurde die Aufwärmessung bis zu einer Temperatur von 16°C durchgeführt.

Am zweiten Tag wurde auch mit einer Aufwärmessung begonnen. Dabei wurde in jedem Schritt der Strom um 0,7 A verringert. Die Zeit zwischen den Messungen wurde bei 20 min belassen. Bei einem Peletierstrom von 0,9 A wurde die Abkühlmessung begonnen, hierbei wurde dann bei jedem Messschritt der Strom um 0,7 A erhöht.

Um eine Einschätzung der Streuung der Intensität des Hanle-Signals zu erhalten, wurde am Morgen des zweiten Messtages eine Langzeitaufnahme des Hanle-Signals bei fester Rampenspannung über 120 s aufgenommen. Die Temperatur betrug -15° , der Polarisator war auf 90° eingestellt.

Um außerdem den Fehler auf die Parameter der Fits an die Hanle-Signale, aus deren Halbwertsbreite schließlich die Lebensdauer bestimmt werden soll, besser abschätzen zu können, wurden am Morgen des ersten Messtages, am Abend des ersten Messtages und am Morgen des zweiten Messtages bei Temperaturen von -15°C , 17°C und -15°C jeweils 25 Mal das Hanle-Signal bei einer Polarisatoreinstellung von 0° aufgenommen. Damit kann aus der Streuung der ermittelten Lebenszeiten eine Abschätzung der tatsächlichen Unsicherheit auf die Lebenszeiten abgeschätzt werden.

5 Auswertung und Fehleranalyse

5.1 Abschätzung der statistischen Unsicherheiten

5.1.1 Bestimmung der Streuung einer Langzeitmessung

Um auf die Lebensdauer τ des $^3\text{P}_1$ -Zustands von Quecksilber zurückschließen zu können, wurden die Hanle-Kurven für Polarisatoreinstellungen von $\varphi_0 = 0^\circ$, 45° und 90° für verschiedene Temperaturen aufgenommen. Gemäß der theoretischen Herleitung wird bei Auftragen der gemessenen Intensität am Photomultiplier gegen das von der Rampe durchgeführte B -Feld der charakteristische Hanle-Verlauf aus [Gleichung \(6\)](#) erwartet.

Um zunächst eine Abschätzung der statistischen Unsicherheit der Messwerte am Oszilloskop durchzuführen, wurde eine Langzeitmessung bei gleichbleibender Einstellung durchgeführt. Diese ist in [Abb. 4](#) dargestellt.

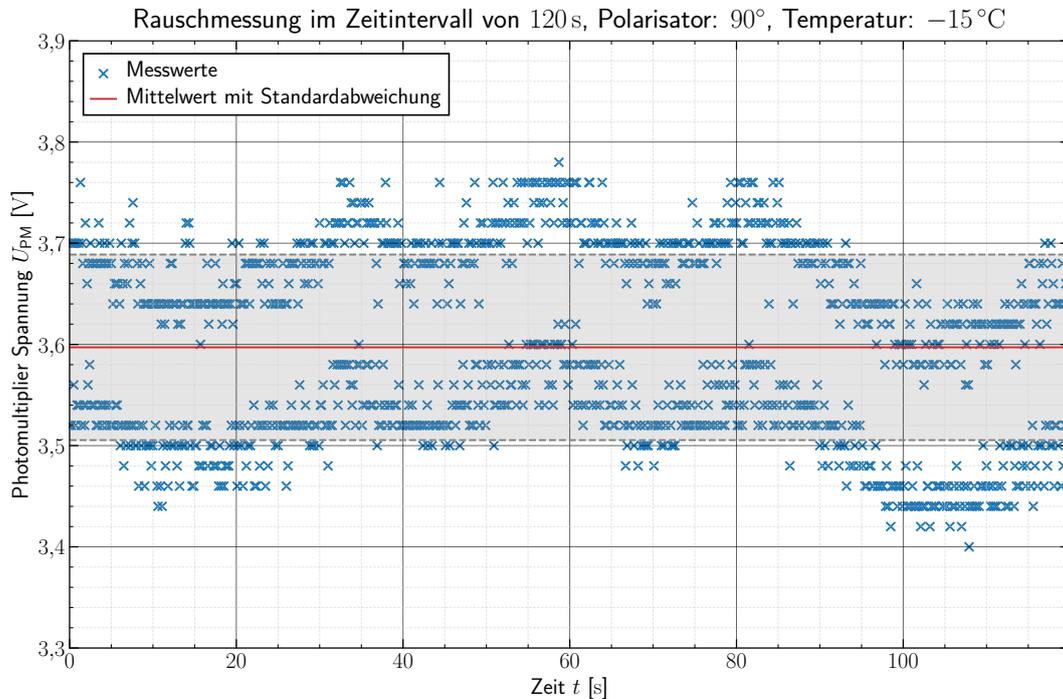


Abbildung 4: Langzeitmessung zum Abschätzen der statistischen Schwankungen des Oszilloskops. Die Messung wurden bei gleichbleibenden Einstellungen über einen Zeitraum von 120 s durchgeführt. Mittelwert und Standardabweichung über alle Werte wurden eingezeichnet.

Über alle Messwerte wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Diese ergeben sich zu

$$\bar{U}_{\text{PM}} = (3,60 \pm 0,09) \text{ V} . \quad (22)$$

Da die Standardabweichung sehr gering im Vergleich zur Spannung selbst ist und nur einer relativen Unsicherheit von ungefähr 2,5 % entspricht, wurde diese Unsicherheit im Nachhinein als vernachlässigbar im Vergleich zur Streuung der folgenden Messwerte einge-

schätzt. Alle weiteren Fits werden daher ungewichtet durchgeführt, da die Schwankungen der Messwerte diese statistische Unsicherheit bei weitem übersteigen.

5.1.2 Bestimmung der Streuung der Fit-Parameter bei Mehrfachmessung

Da während der Messung größere Veränderungen der Amplitude und Form der Hanle-Signale bei gleichbleibenden Einstellungen festgestellt wurden, wurden zu drei verschiedenen Zeitpunkten Streuungsmessungen durchgeführt (siehe [Abb. 26](#) bis [40](#)). Dafür wurden direkt hintereinander jeweils 25 Rampenspannungen und Signale aufgenommen. Ziel der Messungen ist es, die verschiedenen Lebensdauern τ zu bestimmen und aus den Standardabweichungen eine Unsicherheit für alle weiteren Lebensdauern im Experiment zu bestimmen.

Um von der gemessenen Signalspannung am Oszilloskop auf den Spulenstrom B zurückzuschließen zu können, wurde zunächst die Rampenspannung analysiert.

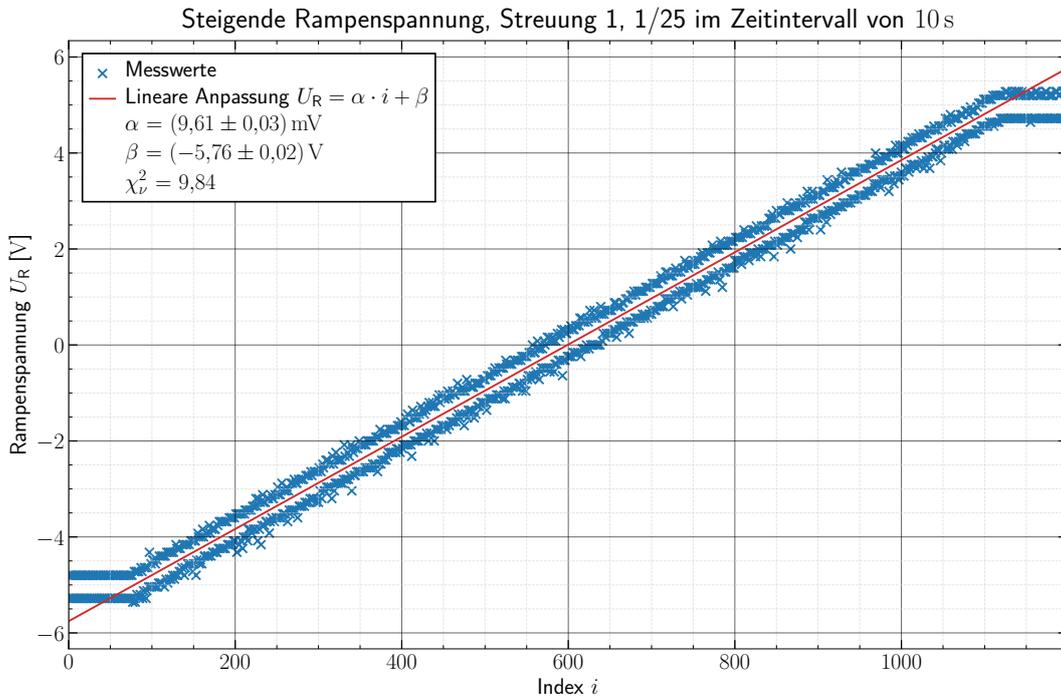


Abbildung 5: Messung der Rampenspannung U_R über ein Zeitintervall von 10 s. Der Index i ist dabei proportional zur vergangenen Zeit t . Die Messung wurde während der ersten Streumessung aufgenommen und zeigt klar eine Doppellinie. Um die tatsächliche Rampenspannung zu extrapolieren wurde eine lineare Regression der Form $U_R = \alpha \cdot i + \beta$ durchgeführt.

Wie in [Abb. 5](#) dargestellt, ist eine klare Doppellinie zu sehen, welche vermutlich auf Rückstreuungen im Versuchsaufbau zurückzuführen ist. Da mit diesem Signal eine Auftragung des Hanle-Signals gegen die berechnete magnetische Feldstärke nicht sinnvoll ist, wurde eine ungewichtete lineare Regression der Form

$$U_R = \alpha \cdot i + \beta \quad (23)$$

mit `scipy.optimize.curve_fit` durchgeführt, um die mittlere Rampenspannung zu bestimmen. Diese ist ebenfalls in [Abb. 5](#) dargestellt. Die Anpassung wurde nur für den mittleren, nicht konstanten Bereich der Messwerte durchgeführt, in dem sich die Rampenspannung auch tatsächlich änderte. Die Regression wurde ohne Berücksichtigung möglicher y -Unsicherheiten durchgeführt, da keine Unsicherheiten für das Oszilloskop bekannt waren und die Schwankungen der Messwerte um das Modell alle weiteren Messunsicherheiten bei weitem überragen.

Mit dieser Regression ist es nun möglich, auf das Magnetfeld der Spulen zurückzuschließen. Dafür muss die Spannung des Oszilloskops in einen Spulenstrom umgerechnet werden. Da beide gleichzeitig am Rampengenerator sichtbar waren, wurden gemittelte Anfangs- und Endwerte für Spannung und Strom bestimmt, die vor bzw. nach Durchlaufen der Rampenspannung eingestellt waren. Diese ergaben sich zu

$$\begin{aligned} U_0 &= -5.05 & U_1 &= 5.123 \\ I_0 &= -0.5138 & I_1 &= 0.5214. \end{aligned}$$

Die Umrechnung zwischen den Werten wurde als linear angenommen. Mit dem Umrechnungsfaktor zwischen Spulenstrom und Magnetfeld der Helmholtzspule von $3,363 \cdot 10^{-4}$ [1] ergibt sich damit die Berechnung des Magnetfeldes aus der Spannung zu

$$B = \left(\frac{(U_R - U_0) \cdot (I_1 - I_0)}{U_1 - U_0} + I_0 \right) \cdot 3,363 \cdot 10^{-4}. \quad (24)$$

Wird nun die gemessene Spannung am Photomultiplier U_{PM} gegen das berechnete Magnetfeld aufgetragen, sind die Hanle-Kurven gut sichtbar. Ein Beispiel aus der ersten Streumessung ist in [Abb. 6](#) dargestellt.

Um die Lebensdauer aus den Daten zu bestimmen, wurde ein Hanle-Fit an die Daten durchgeführt, da die Spannung U_{PM} am Photomultiplier als proportional zur Intensität I des Hanle-Signals angesehen werden kann. Um mögliche Offsets und Proportionalitäten zu berücksichtigen, wurden zusätzlich die Parameter C_τ , I_0 und B_0 eingeführt. Bei Berücksichtigung der Offsets lauten die Formeln für die Larmorfrequenz ω_L und die Spannung am Photomultiplier U_{PM} in Abhängigkeit der Magnetfeldstärke B

$$\omega_L(B) = g_J \frac{\mu_B}{\hbar} |B - B_0| \quad (25)$$

$$U_{\text{PM}}(B) = \frac{C_\tau}{2} \left(\frac{1 + (2\omega_L(B)\tau)^2 + \cos(2\varphi_0) - 2\tau\omega_L(B)\sin(2\varphi_0)}{1 + (2\omega_L(B)\tau)^2} \right) + I_0. \quad (26)$$

Für die Anpassung wurde dann [Gleichung \(26\)](#) verwendet. Die Anpassung selbst wurde in einer ungewichteten Regression mit `scipy.optimize.curve_fit` durchgeführt, wobei hier der Anfangswinkel der Polarisatoreinstellung, also $\varphi_0 = 0^\circ$ entspricht. Auf diese Weise wurden die Lebensdauern für alle Streumessungen bestimmt. Die Ergebnisse sind in [Tabelle 5](#) zu sehen.

Um die Messungen quantitativ miteinander zu vergleichen, wurde ein Boxplot unter Berücksichtigung aller Einzelwerte der jeweiligen Messreihen erstellt. Dieser ist in [Abb. 7](#)

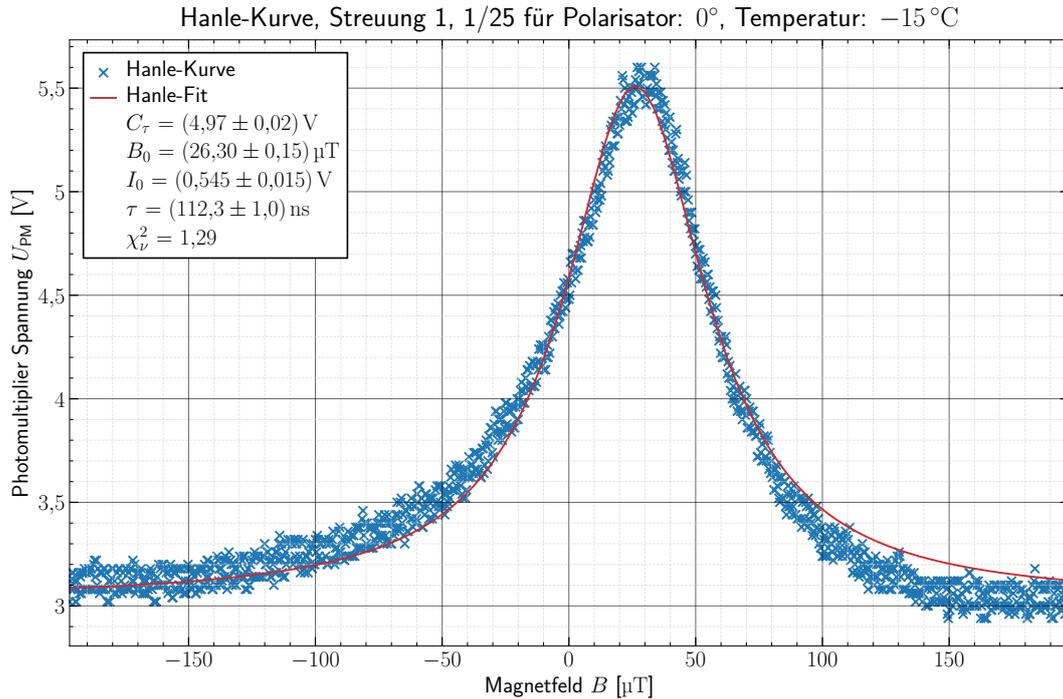


Abbildung 6: Messung eines Hanle-Signals in der Spannung am Photomultiplier U_{PM} über ein Zeitintervall von 10 s. Die Messung wurde während der ersten Streumessung bei einer Temperatur von -15°C und einer Polarisatoreinstellung von 0° aufgenommen. Der Hanle-Fit wurde gemäß [Gleichung \(26\)](#) mit `scipy.optimize.curve_fit` in einer ungewichteten Regression durchgeführt.

zu sehen. Wie erwartet hängen die berechneten Lebensdauern von der Temperatur ab. Allerdings ist auch klar zu erkennen, dass die Werte bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedlich stark streuen. Außerdem ist deutlich sichtbar, dass sich die Lebensdauern unterschiedlicher Messreihen bei gleicher Thermometeranzeige für die -15°C -Messungen stark unterscheiden. Außerdem sind bei der ersten -15° -Messung deutliche Ausreißer zu erkennen.

Die gemittelten Endwerte und Standardunsicherheiten der Lebenszeiten sind in [Tabelle 2](#) dargestellt.

Messung 1	Messung 2	Messung 3
τ [ns]	τ [ns]	τ [ns]
$110,7 \pm 1,5$	130 ± 3	$114,0 \pm 1,3$

Tabelle 2: Gemittelte Fitparameter τ aus den verschiedenen Streumessungen. Alle Messungen wurden bei Polarisatoreinstellungen von 0° durchgeführt. Die angezeigten Temperaturen waren -15°C bei Messung 1 und 3 und 17°C bei Messung 2. Die Hanle-Kurven sind zusammen mit allen Parameter Bestwerten [Abb. 26 bis 40](#) in [Anhang A](#) dargestellt. Die Unsicherheiten wurden als Standardabweichung über alle berechneten Lebensdauern bestimmt.

Für alle weiteren Anpassungen können diese Standardunsicherheiten als statistische Unsi-

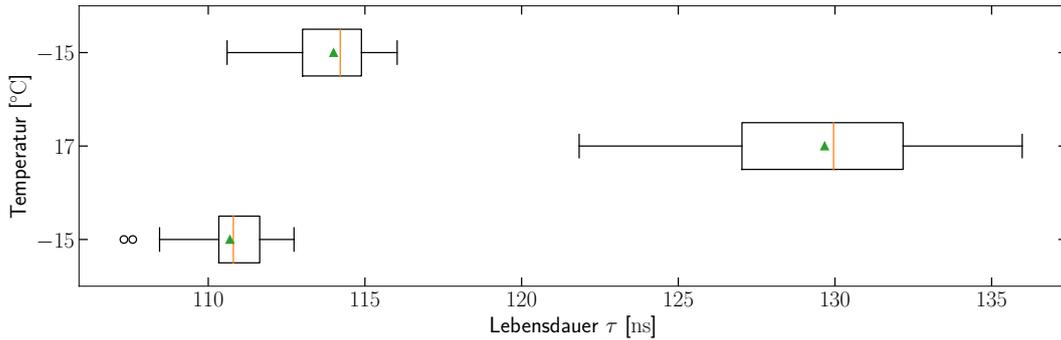


Abbildung 7: Kastengraphik der drei Streumessreihen, bei denen bei einer Polarisatoreinstellung von 0° bei -15°C , 17°C und -15°C jeweils 25 Messungen durchgeführt wurden. Die unterste der -15°C -Messungen stammt dabei vom ersten Tag, die obere vom zweiten. Die Antennen geben die Lage der 0,05 %- und 0,95 %-Quantile an. Der Median ist Linie in orange eingezeichnet, der Mittelwert als grünes Dreieck. Die beiden Kreise stellen Ausreißer dar.

cherheit der Lebenszeiten berücksichtigt werden.

5.2 Bestimmung der Hanle-Kurven

Da nun eine Abschätzung der statistischen Einflüsse auf die Fit-Parameter möglich ist, kann die Auswertung der Hanle-Kurven durchgeführt werden. Die Messwerte wurden in zwei Aufwärmessreihen und einer Abkühlmessreihe aufgenommen. Die eingestellten Temperaturen und Polarisatoreinstellungen sind dem Messprotokoll in [Abb. 61 bis 64](#) zu entnehmen. Da die gemessenen Rampenspannungen abermals eine deutliche Doppellinie aufwiesen, musste wie in [Abschnitt 5.1.2](#) beschrieben für jede Rampenspannung eine lineare Anpassung durchgeführt werden. Für jede Messung wurde im Anschluss die Spannung am Photomultiplier U_{PM} gegen das nach [Gleichung \(24\)](#) berechnete Magnetfeld der Helmholtzspule aufgetragen.

Gemäß [Gleichung \(26\)](#) wurde für jede dieser Hanle-Kurven eine ungewichtete Anpassung mit `scipy.optimize.curve_fit` durchgeführt. Dabei wurde der Anfangswinkel φ_0 auf den jeweils eingestellten Winkel zwischen z -Achse und Polarisator $\varphi_0 = [0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$ gesetzt um die korrekte Form der Anpassung zu erhalten. Die Hanle-Kurven und dazugehörigen Anpassungen sind in [Abb. 41 bis 60](#) zu sehen.

Für jede Anpassung wurde ein reduzierter χ^2 -Wert berechnet, unter Annahme der in [Abschnitt 5.1.1](#) ermittelten statistischen Unsicherheit der Photomultiplier-Spannung von 0,09 V. Alle Parameter-Bestwerte und χ^2_ν -Werte können ebenfalls [Abb. 41 bis 60](#) im [Anhang A](#) entnommen werden.

Da, wie in [Abschnitt 5.1.2](#) beschrieben, die statistische Unsicherheit auf die Lebensdauer τ durch den Fit selbst unterschätzt wird, wurden die berechneten Standardabweichungen aus [Tabelle 2](#) für die Abschätzung der tatsächlichen Unsicherheiten der Lebensdauern mitberücksichtigt. Da es sich in allen Fällen um statistische Unsicherheiten handelt, kann

die Gesamtunsicherheit der Lebensdauern mit

$$s_{\text{tau}} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\sigma_{\tau, \text{Streu}, i})^2 + (s_{\tau, \text{Fit}})^2} \quad (27)$$

berechnet werden.

Die resultierenden Lebensdauern für alle Anpassungen können [Tabellen 6 bis 8](#) entnommen werden.

5.3 Berechnung des Dampfdrucks

Um eine Extrapolation gegen einen Dampfdruck von 0 Pa durchzuführen, kann der Dampfdruck der Quecksilberzelle nach [Gleichung \(21\)](#) aus der gemessenen Temperatur berechnet werden. Hierzu werden die Konstanten aus [Gleichung \(21a\)](#) benötigt, sowie die Temperatur in Kelvin. Die Umrechnung erfolgt über

$$T_K = T_{\circ C} + 273,15. \quad (28)$$

Die Unsicherheit der Temperatur wurde aufgrund von Schwankungen auf 1 K geschätzt.

Um eine Unsicherheit auf den berechneten Druck zu abzuschätzen, wurde eine Gauß'sche Fehlerfortpflanzung unter Annahme fehlerfreier Konstanten a_1 bis a_6 durchgeführt. Unter Einführung der Hilfsvariablen T_r und A folgt aus [Gleichung \(21\)](#)

$$p = p_c \cdot \exp\left\{\frac{1}{1 - T_r} \cdot A\right\} \quad (29)$$

$$s_p = p_c \cdot \exp\left\{\frac{1}{1 - T_r} \cdot A\right\} \cdot \sqrt{\left(\frac{s_{p_c}}{p_c}\right)^2 + \left(\left(\frac{A}{(1 - T_r)^2} + \frac{1}{1 - T_r} \cdot \frac{\partial A}{\partial T_r}\right) s_{T_r}\right)^2}$$

mit

$$T_r = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (29a)$$

$$s_{T_r} = \sqrt{\left(\frac{s_T}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_c^2} \cdot s_{T_c}\right)^2}$$

$$A = a_1 T_r + a_2 T_r^{1,89} + a_3 T_r^2 + a_4 T_r^8 + a_5 T_r^{8,5} + a_6 T_r^9 \quad (29b)$$

$$\frac{\partial A}{\partial T_r} = a_1 + 1,89 \cdot a_2 T_r^{0,89} + 2 \cdot a_3 T_r + 8 \cdot a_4 T_r^7 + 8,5 \cdot a_5 T_r^{7,5} + 9 \cdot a_6 T_r^8.$$

Die aus dieser Umrechnung erhaltenen Dampfdrücke für die gemessenen Temperaturen können für jede Messreihe in [Tabellen 6 bis 8](#) in [Anhang A](#) gefunden werden.

5.4 Extrapolation der Lebensdauern

Nun können die aus den Hanle-Fits nach [Gleichung \(26\)](#) bestimmten Parameter-Bestwerte für die Lebenszeit τ mit ihren Unsicherheiten nach [Gleichung \(27\)](#) gegen die dazugehörigen

Dampfdrücke nach Gleichung (29) aufgetragen werden. Um mögliche Regelmäßigkeiten und Tendenzen festzustellen, wurde dabei jede Messreihe und jeder Winkel separat ausgewertet. Auch wurden drei Extrapolationen für die Aufwärm- und Abkühlmessungen durchgeführt, die alle Polarisatorstellung berücksichtigen und drei Extrapolationen, die die Polarisatorstellungen getrennt auswerten dabei dafür alle Messreihen berücksichtigen.

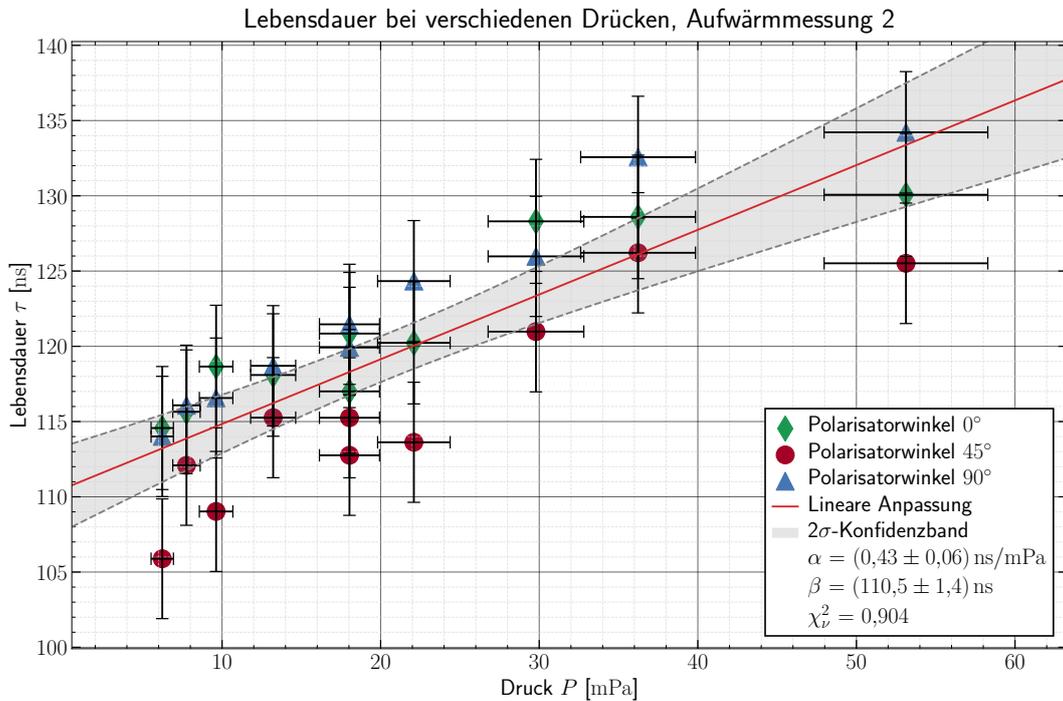


Abbildung 8: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für Aufwärmmessung 2. Die Polarisatorstellungen für $\varphi_0 = [0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$ sind unterschiedlich gekennzeichnet. Die lineare Anpassung wurde mit Hilfe von `scipy.odr` durchgeführt um die x - und y -Unsicherheiten der Messwerte zu berücksichtigen. Das 2σ -Konfidenzband wurde aus den Unsicherheiten der Messwerte berechnet und ist ebenfalls dargestellt.

Die Extrapolation für Aufwärmmessung 2 ist exemplarisch in Abb. 8 dargestellt, die Extrapolation für die Polarisatorstellung von 90° in Abb. 9. Alle Extrapolationen sind in Abb. 11 bis 25 im Anhang A dargestellt.

Um auf den Dampfdruck von 0 Pa zu extrapolieren, wurde jeweils eine orthogonale Regression mit `scipy.odr` durchgeführt, die sowohl x - als auch y -Unsicherheiten der Messwerte zu berücksichtigen. Dabei wurde die Unsicherheit der Fit-Parameter aus den Unsicherheiten der einzelnen Messwerte bestimmt.

Die extrapolierten Werte für die Lebensdauer τ des $^3\text{P}_1$ -Zustands können für die einzelnen Regressionen in Abb. 11 bis 25 gefunden werden und sind in Tabelle 3 dargestellt.

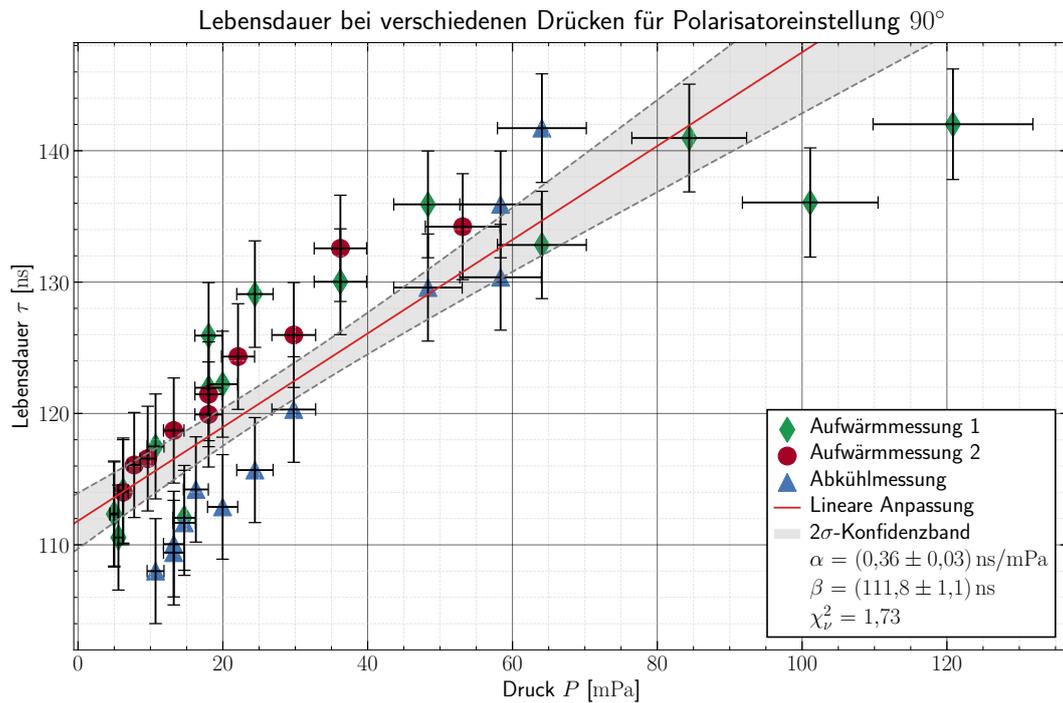


Abbildung 9: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für die Polarisatoreinstellung von $\varphi_0 = 90^\circ$. Die dazugehörigen Messreihen sind unterschiedlich gekennzeichnet. Die lineare Anpassung wurde mit Hilfe von `scipy.odr` durchgeführt um die x - und y -Unsicherheiten der Messwerte zu berücksichtigen. Das 2σ -Konfidenzband wurde aus den Unsicherheiten der Messwerte berechnet und ist ebenfalls dargestellt.

6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Versuch wurde die Lebensdauer des $^3\text{P}_1$ -Zustands von Quecksilber für drei verschiedene Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Polarisation des einfallenden Lichts bestimmt. Dabei wurde zunächst die Lebensdauer für jede Messung und jeden Beobachtungswinkel einzeln bestimmt. Dann wurde noch einmal die Lebensdauern für die verschiedenen Messreihen unter Berücksichtigung aller Winkel sowie für die verschiedenen Winkel unter Berücksichtigung aller Messreihen bestimmt. Dadurch ist es einfacher, eine Systematik in den Einzelwerten festzustellen. Alle Endergebnisse für die Lebensdauern sind in [Tabelle 3](#) aufgelistet.

τ in ns	0°	45°	90°	Für jede Messreihe
Aufwärmmessung 1	113,5 ± 1,4	107,2 ± 1,4	114,4 ± 1,4	111,7 ± 0,8
Aufwärmmessung 2	113 ± 2	109 ± 2	114 ± 2	110,5 ± 1,4
Abkühlmessung 1	103 ± 2	96 ± 2	103 ± 2	100,4 ± 1,3
Für jeden Winkel	112,4 ± 1,0	105,5 ± 1,0	111,8 ± 1,1	

Tabelle 3: Auflistung der verschiedenen berechneten Werte für die Lebensdauer τ . Für jede Messreihe und jeden Winkel wurden die Lebensdauern getrennt berechnet. Diese sind in der entsprechend Tabellenzelle zu finden. Außerdem wurden die Lebensdauer noch einmal getrennt für jede Messreihe unter Berücksichtigung aller Winkel, sowie einmal getrennt für jeden Winkel unter Berücksichtigung aller Messreihen bestimmt. Diese Lebensdauern sind in der Spalte ganz rechts bzw. in der Zeile ganz unten aufgelistet. Der Literaturwert beträgt $\tau_{\text{lit}} = 119 \text{ ns}$ [1].

t -Werte	0°	45°	90°	Für jede Messreihe
Aufwärmmessung 1	3,87	8,50	3,28	8,67
Aufwärmmessung 2	2,32	4,06	2,20	6,02
Abkühlmessung 1	6,70	9,70	6,80	14,0
Für jeden Winkel	6,38	13,1	6,77	

Tabelle 4: Auflistung der t -Werte der bestimmten Lebensdauern im Vergleich mit dem Literaturwert $\tau_{\text{lit}} = 119 \text{ ns}$ [1]. Die Lebensdauern sind in [Tabelle 3](#) aufgelistet. Im Allgemeinen deutet ein t -Wert von unter 2 auf eine gute Verträglichkeit der zu vergleichenden Werte hin, je größer der t -Wert desto schlechter ist die Verträglichkeit.

Bei Vergleich der Lebensdauern in [Tabelle 3](#) mit dem Literaturwert $\tau_{\text{lit}} = 119 \text{ ns}$ [1] fällt auf, dass alle Werte der Abkühlmessung eine große Abweichung vom Literaturwert haben. Auch alle bei einer Polarisation von 45° gemessenen Werte weichen stärker ab als die der anderen Polarisationen.

Dies spiegelt sich auch in den zugehörigen t -Werten wieder. Diese sind in [Tabelle 4](#) für die jeweiligen Ergebnisse in [Tabelle 3](#) aufgelistet. Im Allgemeinen deutet ein t -Wert von unter 2 auf eine gute Verträglichkeit der zu vergleichenden Werte hin, je größer der t -Wert desto schlechter ist die Verträglichkeit. Die t -Werte der Abkühlmessung liegen zwischen 6 und 9,

die der Aufwärmessungen zwischen 2 und 8, und die t -Werte der 45°-Einstellung liegen zwischen 4 und 9, während die der anderen Einstellungen zwischen 2 und 6 liegen.

Die Abweichungen in der Abkühlmessung stammt vermutlich vor allem von den Temperaturen, bei denen Messwerte aufgenommen wurden. Da zur Bestimmung der Lebensdauer eine Extrapolation auf sehr niedrige Temperaturen verwendet wurde, führt eine größere Anzahl von Messwerten bei niedrigen Temperaturen zu genaueren Ergebnissen. Bei der Abkühlmessung lag die niedrigste Temperatur, bei der Daten aufgenommen wurden, bei -9°C , bei den Aufwärmessungen bei -16°C und -14°C . Dementsprechend ist es auch nicht überraschend, dass die Werte der Aufwärmessungen besser mit dem Literaturwert übereinstimmen als die der Abkühlmessung.

Der Grund für die Abweichungen der 45°-Einstellung lässt sich vermutlich vor allem in der Kalibrierung finden. Bei den 0°- und 90°-Einstellungen liegt ein symmetrisches Hanle-Signal vor. Deswegen war es auch einfacher, durch Vergleich der Intensität bei sehr hohem und niedrigem Magnetfeld die Polarisatoreinstellung so vorzunehmen, dass die Kurve möglichst symmetrisch ist. Bei der 45°-Einstellung dagegen ist das Hanle-Signal punktsymmetrisch, und es war schwieriger abzuschätzen, ob die Symmetrie erhalten war. Deswegen ist es wahrscheinlich, dass der Polarisator bei der 45°-Einstellung nicht optimal kalibriert war.

Ein großes Problem im gesamten Versuchsaufbau ist die Kühlung und Temperaturmessung. Bei der Kühlung wurde bei jedem Messschritt der Peletierstrom angepasst, die Temperatur konnte allerdings nur vom Thermometer abgelesen werden. Hier liegt schon ein Problem des Aufbaus. Das Thermometer ist nicht direkt an der Quecksilberzelle, sondern an der Kupferwärmesenke angebracht. Wenn also die Kühlung eingeschaltet wird, misst das Thermometer schon zu einem Zeitpunkt kältere Temperaturen, an dem sich die Quecksilberzelle noch nicht abgekühlt hat. Dadurch werden die aufgenommenen Hanle-Signale falschen Temperaturen zugeordnet. Auch das erklärt die Abweichung der Abkühlmessung von den Aufwärmessungen. Bei der Abkühlmessung war die tatsächliche Temperatur vermutlich etwas höher als die gemessene, und bei den Aufwärmessungen vermutlich etwas tiefer.

Es lässt sich auch nicht abschätzen, wie schnell der Versuchsaufbau auf eine Änderung des Peletierstroms reagiert. Um diesen unabschätzbaren Faktor zumindest als systematischen Fehler einfließen zu lassen, wurde in 20 min-Schritten gemessen und die Zeit zwischen den Messungen nicht variiert. Dieses Vorgehen funktioniert allerdings auch nur, wenn die Reaktionszeit des Aufbaus auf die Änderung des Peletierstroms unabhängig von der Temperatur ist. Auch das ließ sich bei diesem Aufbau nicht abschätzen. Zudem war bei den Aufwärmessungen nicht bekannt, wie lange der Aufbau vor Beginn der Messung vorgekühlt wurde.

Die Verzögerung der Kühlung und der Messung lässt sich auch sehr gut beobachten, wenn man für die verschiedenen Messreihen die angezeigte Temperatur gegen den Peletierstrom aufträgt. Die Auftragung ist in [Abb. 10](#) im [Anhang A](#) abgebildet. Es ist klar erkennbar, dass die Messwerte der Abkühlmessung über denen der Aufwärmessungen liegen. In der Abkühlmessung und der ersten Aufwärmessung wurde auch noch Werte aufgenommen,

nachdem der Strom nicht mehr verändert wurde. Es ist in [Abb. 10](#) zu sehen, dass sich hier die Temperatur bei gleichem Strom noch deutlich verändert hat und es somit eine zeitliche Versetzung gab. Allerdings lässt sich kein konstanter Offset erkennen, und Vergleich der beiden Aufwärmessung zeigt auch Abweichungen, die scheinbar keiner Systematik folgen.

Trotz der eher schlecht abschätzbaren systematischen Fehler fällt bei Vergleich der beiden Aufwärmessungen in [Tabelle 3](#) auf, dass die Werte bei allen Polarisatoreinstellungen sehr ähnlich sind, obwohl sie an unterschiedlichen Tagen bei unterschiedlicher Vorkühldauer aufgenommen wurden und die Streuungsmessung in [Abb. 7](#) bei gleicher Temperatur starke Abweichungen zeigt. Deswegen lässt sich sagen, dass die festen Messabstände vermutlich die Systematik in der fehlerhaften Temperaturmessung erhalten haben. Bei Vergleich der t -Werte in [Tabelle 4](#) könnte man darauf schließen, dass die zweite Messung aufgrund der geringeren t -Werte genauere Ergebnisse liefern konnte. Allerdings muss man hier aufpassen. Bei Betrachtung der tatsächlich berechneten Lebensdauern in [Tabelle 3](#) fällt auf, dass die bessere Verträglichkeit hauptsächlich von den geringeren Unsicherheiten, die durch die Fits entstehen, bewirkt wird. Dementsprechend lässt sich trotz unterschiedlicher t -Werte keine Aussage darüber treffen, ob eine der beiden Messreihen bessere Ergebnisse liefert.

In [Tabelle 3](#) fällt zudem auf, dass die Lebensdauern, bei denen entweder alle Polarisatoreinstellungen innerhalb der Messreihe oder alle Messreihen für einzelne Polarisatoreinstellungen verwendet wurden, im Allgemeinen schlechtere Verträglichkeit mit dem Literaturwert aufweisen als die Einzelwerte. Das liegt vermutlich daran, dass in jedem dieser gesammelten Werte ein Wert der Abkühlmessung oder ein Wert bei 45° das Ergebnis verfälschen.

Ein weiteres Problem in der Auswertung ergab sich durch das Signal selbst. Bei Auftragung der Rampenspannung waren klar zwei statt der erwarteten einen Linie erkennbar. Am Oszilloskop konnte beobachtet werden, dass die Doppellinie verschwand, wenn der Rampenstrom nicht an die Helmholtz-Spule weitergegeben wurde. Deswegen stammt diese Doppellinie vermutlich von einer Reflexion des Signals in der Signalverarbeitung. Das führt allerdings auch dazu, dass das Hanle-Signal, das durch Weitergabe des Rampenstroms an die Helmholtz-Spule verursacht wird, auch durch die Reflexion verfälscht wurde. Ganz klar zu sehen ist dies in der in [Abb. 4](#) dargestellten Langzeitaufnahme des Hanle-Signals bei fester Rampenspannung.

Insgesamt gab es an vielen Stellen im Versuchsaufbau systematische Fehler, die nicht in der Messung berücksichtigt werden konnten. Das macht die Bestimmung der Lebensdauer und vor allem eine sinnvolle Fehlerrechnung sehr schwierig. Trotzdem konnten für einzelne Einstellungskombinationen sinnvolle Ergebnisse berechnet werden. Eine gute Übereinstimmung mit dem Literaturwert konnte allerdings nicht erreicht werden.

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

1	Aufspaltung	4
2	Versuchsaufbau	8
3	Rampensignal	9
4	Langzeitmessung	11
5	Messung einer Rampenspannung	12
6	Messung eines Hanle-Signals	14
7	Auswertung der Streumessung	15
8	Extrapolation für Aufwärmmessung 2	17
9	Extrapolation für Polarisatoreinstellung 90°	18
10	Temperatur gegen Peletierstrom	27
11	Extrapolation für Aufwärmmessung 1, Polarisatoreinstellung 0°	28
12	Extrapolation für Aufwärmmessung 1, Polarisatoreinstellung 45°	29
13	Extrapolation für Aufwärmmessung 1, Polarisatoreinstellung 90°	29
14	Extrapolation für Aufwärmmessung 2, Polarisatoreinstellung 0°	30
15	Extrapolation für Aufwärmmessung 2, Polarisatoreinstellung 45°	30
16	Extrapolation für Aufwärmmessung 2, Polarisatoreinstellung 90°	31
17	Extrapolation für die Abkühlmessung, Polarisatoreinstellung 0°	31
18	Extrapolation für die Abkühlmessung, Polarisatoreinstellung 45°	32
19	Extrapolation für die Abkühlmessung, Polarisatoreinstellung 90°	32
20	Extrapolation für Aufwärmmessung 1, alle Polarisatoreinstellungen	33
21	Extrapolation für Aufwärmmessung 2, alle Polarisatoreinstellungen	33
22	Extrapolation für die Abkühlmessung, alle Polarisatoreinstellungen	34
23	Extrapolation für alle Messreihen, Polarisatoreinstellung 0°	35
24	Extrapolation für alle Messreihen, Polarisatoreinstellung 45°	35
25	Extrapolation für alle Messreihen, Polarisatoreinstellung 90°	36
26	Streumessung 1, Anpassungen 1 - 6	37
27	Streumessung 1, Anpassungen 7 - 12	38
28	Streumessung 1, Anpassungen 13 - 18	39
29	Streumessung 1, Anpassungen 19 - 24	40
30	Streumessung 1, Anpassung 25	41
31	Streumessung 2, Anpassungen 1 - 6	42
32	Streumessung 2, Anpassungen 7 - 12	43
33	Streumessung 2, Anpassungen 13 - 18	44
34	Streumessung 2, Anpassungen 19 - 24	45
35	Streumessung 2, Anpassung 25	46
36	Streumessung 3, Anpassungen 1 - 6	47
37	Streumessung 3, Anpassungen 7 - 12	48
38	Streumessung 3, Anpassungen 13 - 18	49
39	Streumessung 3, Anpassungen 19 - 24	50
40	Streumessung 3, Anpassung 25	51
41	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 1 - 6	52

42	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 7 - 12	53
43	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 13 - 17	54
44	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 18 - 22	55
45	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 23 - 28	56
46	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 29 - 34	57
47	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 35 - 40	58
48	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 41 - 46	59
49	Aufwärmmessung 1, Anpassungen 47 - 49	60
50	Aufwärmmessung 2, Anpassungen 1 - 6	61
51	Aufwärmmessung 2, Anpassungen 7 - 12	62
52	Aufwärmmessung 2, Anpassungen 13 - 18	63
53	Aufwärmmessung 2, Anpassungen 19 - 24	64
54	Aufwärmmessung 2, Anpassungen 25 - 30	65
55	Abkühlmessung, Anpassungen 1 - 6	66
56	Abkühlmessung, Anpassungen 7 - 12	67
57	Abkühlmessung, Anpassungen 13 - 18	68
58	Abkühlmessung, Anpassungen 19 - 24	69
59	Abkühlmessung, Anpassungen 25 - 30	70
60	Abkühlmessung, Anpassungen 31 - 36	71

Tabellenverzeichnis

1	Kalibrierung	9
2	Gemittelte Ergebnisse der Streumessung	14
3	Lebensdauern für verschiedene Einstellungen	19
4	t-Werte für die berechneten Lebensdauern	19
5	Ergebnisse der Streumessung	24
6	Endergebnisse für Aufwärmmessung 1	25
7	Endergebnisse für Aufwärmmessung 2	26
8	Endergebnisse für die Abkühlmessung	26

Literaturverzeichnis

- [1] M. Köhli u. a. *Fortgeschrittenen Praktikum Teil I, Der Hanle-Effekt*. Institut für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2018, März 2019.

Ergebnisse der Streumessung

Messung 1		Messung 2		Messung 3	
τ [ns]		τ [ns]		τ [ns]	
112,3±	1,0	127,6±	1,4	110,6±	0,9
110,9±	1,0	127,0±	1,4	112,1±	1,3
110,0±	1,0	133,1±	1,6	115,1±	1,1
110,6±	1,1	132,6±	1,7	114,1±	1,2
107,3±	1,0	128,7±	1,6	112,7±	1,0
107,6±	1,0	136,0±	1,8	114,7±	1,2
112,1±	1,0	130,6±	1,4	114,0±	1,1
110,3±	1,1	132,2±	1,7	112,9±	1,1
108,4±	1,0	121,8±	1,4	114,9±	1,2
111,6±	1,1	135,5±	1,7	115,3±	1,0
110,7±	1,1	131,5±	1,6	114,3±	1,2
112,4±	1,0	125,3±	1,3	113,4±	1,0
111,2±	1,1	128,7±	1,6	112,6±	1,1
110,8±	1,0	128,4±	1,4	115,1±	1,1
111,0±	1,2	132,7±	1,6	114,0±	1,1
110,5±	1,1	126,7±	1,3	113,0±	1,2
109,0±	0,9	127,0±	1,4	114,9±	1,1
112,7±	1,1	130,0±	1,5	114,6±	1,0
111,6±	1,1	129,4±	1,8	114,2±	1,1
109,0±	1,0	133,9±	1,9	113,5±	1,1
110,5±	1,0	126,2±	1,4	114,7±	1,2
110,7±	1,1	130,1±	1,5	112,8±	1,0
111,6±	1,2	130,6±	1,5	116,0±	1,1
112,4±	1,1	124,9±	1,3	114,8±	1,1
111,8±	1,0	131,4±	1,5	115,8±	1,2

Tabelle 5: Fitparameter τ aus den verschiedenen Streumessungen. Alle Messungen wurden bei Polarisatoreinstellungen von 0° durchgeführt. Die angezeigten Temperaturen waren auf -15° bei Messung 1 und 3 und 17° bei Messung 2. Die Hanle-Kurven sind zusammen mit allen Parameter Bestwerten [Abb. 26](#) bis [40](#) in [Anhang A](#) dargestellt.

A.1 Endergebnisse für Aufwärmessung 1

T [°C]	P [mPa]	$\varphi_0 = 0^\circ$ τ [ns]	$\varphi_0 = 45^\circ$ τ [ns]	$\varphi_0 = 90^\circ$ τ [ns]
-15,0± 1,0	5,6± 0,6	111± 4	104± 4	111± 4
-16,0± 1,0	5,0± 0,6	110± 4	103± 4	112± 4
-16,0± 1,0	5,0± 0,6	108± 4	104± 4	112± 4
-14,0± 1,0	6,2± 0,7	112± 4	107± 4	114± 4
-11,0± 1,0	8,6± 1,0	114± 4	107± 4	-
-9,0± 1,0	10,7± 1,2	116± 4	111± 4	117± 4
-6,0± 1,0	14,7± 1,6	-	110± 4	112± 4
-4,0± 1,0	18,0± 1,9	120± 4	114± 4	126± 4
-4,0± 1,0	18,0± 1,9	117± 4	114± 4	122± 4
-3,0± 1,0	20 ± 2	117± 4	113± 4	122± 4
-1,0± 1,0	24 ± 3	121± 4	117± 4	129± 4
3,0± 1,0	36 ± 4	125± 4	124± 4	130± 4
6,0± 1,0	48 ± 5	127± 4	127± 4	136± 4
9,0± 1,0	64 ± 6	129± 4	127± 4	133± 4
12,0± 1,0	84 ± 8	128± 4	126± 4	141± 4
14,0± 1,0	101 ± 9	123± 4	127± 4	136± 4
16,0± 1,0	121 ± 11	128± 4	128± 4	142± 4

Tabelle 6: Ergebnisse aus Aufwärmessung 1. Aus der Temperatur T mit der geschätzten Unsicherheit von 1 °C wurde mit [Gleichung \(29\)](#) der Dampfdruck sowie die dazugehörige Unsicherheit berechnet. Die Lebensdauern τ wurden nach [Gleichung \(26\)](#) mit den in [Abb. 41 bis 49](#) dargestellten Anpassungen bestimmt. Die Unsicherheiten ergeben sich nach [Gleichung \(27\)](#).

A.2 Endergebnisse für Aufwärmmessung 2

T [°C]	P [mPa]	$\varphi_0 = 0^\circ$ τ [ns]	$\varphi_0 = 45^\circ$ τ [ns]	$\varphi_0 = 90^\circ$ τ [ns]
$-14,0 \pm 1,0$	$6,2 \pm 0,7$	115 ± 4	106 ± 4	114 ± 4
$-12,0 \pm 1,0$	$7,8 \pm 0,9$	116 ± 4	112 ± 4	116 ± 4
$-10,0 \pm 1,0$	$9,6 \pm 1,1$	119 ± 4	109 ± 4	117 ± 4
$-7,0 \pm 1,0$	$13,2 \pm 1,4$	118 ± 4	115 ± 4	119 ± 4
$-4,0 \pm 1,0$	$18,0 \pm 1,9$	117 ± 4	113 ± 4	120 ± 4
$-4,0 \pm 1,0$	$18,0 \pm 1,9$	121 ± 4	115 ± 4	121 ± 4
$-2,0 \pm 1,0$	22 ± 2	120 ± 4	114 ± 4	124 ± 4
$1,0 \pm 1,0$	30 ± 3	128 ± 4	121 ± 4	126 ± 4
$3,0 \pm 1,0$	36 ± 4	129 ± 4	126 ± 4	133 ± 4
$7,0 \pm 1,0$	53 ± 5	130 ± 4	126 ± 4	134 ± 4

Tabelle 7: Ergebnisse aus Aufwärmmessung 2. Aus der Temperatur T mit der geschätzten Unsicherheit von 1°C wurde mit [Gleichung \(29\)](#) der Dampfdruck sowie die dazugehörige Unsicherheit berechnet. Die Lebensdauern τ wurden nach [Gleichung \(26\)](#) mit den in [Abb. 50](#) bis [54](#) dargestellten Anpassungen bestimmt. Die Unsicherheiten ergeben sich nach [Gleichung \(27\)](#).

A.3 Endergebnisse für die Abköhlmessung

T [°C]	P [mPa]	$\varphi_0 = 0^\circ$ τ [ns]	$\varphi_0 = 45^\circ$ τ [ns]	$\varphi_0 = 90^\circ$ τ [ns]
$8,0 \pm 1,0$	58 ± 6	132 ± 4	123 ± 4	136 ± 4
$9,0 \pm 1,0$	64 ± 6	131 ± 4	126 ± 4	142 ± 4
$8,0 \pm 1,0$	58 ± 6	132 ± 4	124 ± 4	130 ± 4
$6,0 \pm 1,0$	48 ± 5	128 ± 4	119 ± 4	130 ± 4
$1,0 \pm 1,0$	30 ± 3	118 ± 4	112 ± 4	120 ± 4
$-1,0 \pm 1,0$	24 ± 3	117 ± 4	110 ± 4	116 ± 4
$-3,0 \pm 1,0$	20 ± 2	114 ± 4	104 ± 4	113 ± 4
$-5,0 \pm 1,0$	$16,3 \pm 1,7$	112 ± 4	102 ± 4	114 ± 4
$-6,0 \pm 1,0$	$14,7 \pm 1,6$	110 ± 4	105 ± 4	112 ± 4
$-7,0 \pm 1,0$	$13,2 \pm 1,4$	109 ± 4	105 ± 4	109 ± 4
$-7,0 \pm 1,0$	$13,2 \pm 1,4$	108 ± 4	101 ± 4	110 ± 4
$-9,0 \pm 1,0$	$10,7 \pm 1,2$	109 ± 4	100 ± 4	108 ± 4

Tabelle 8: Ergebnisse aus Abköhlmessung. Aus der Temperatur T mit der geschätzten Unsicherheit von 1°C wurde mit [Gleichung \(29\)](#) der Dampfdruck sowie die dazugehörige Unsicherheit berechnet. Die Lebensdauern τ wurden nach [Gleichung \(26\)](#) mit den in [Abb. 55](#) bis [60](#) dargestellten Anpassungen bestimmt. Die Unsicherheiten ergeben sich nach [Gleichung \(27\)](#).

A.4 Auftragung der Temperatur gegen den Peletierstrom

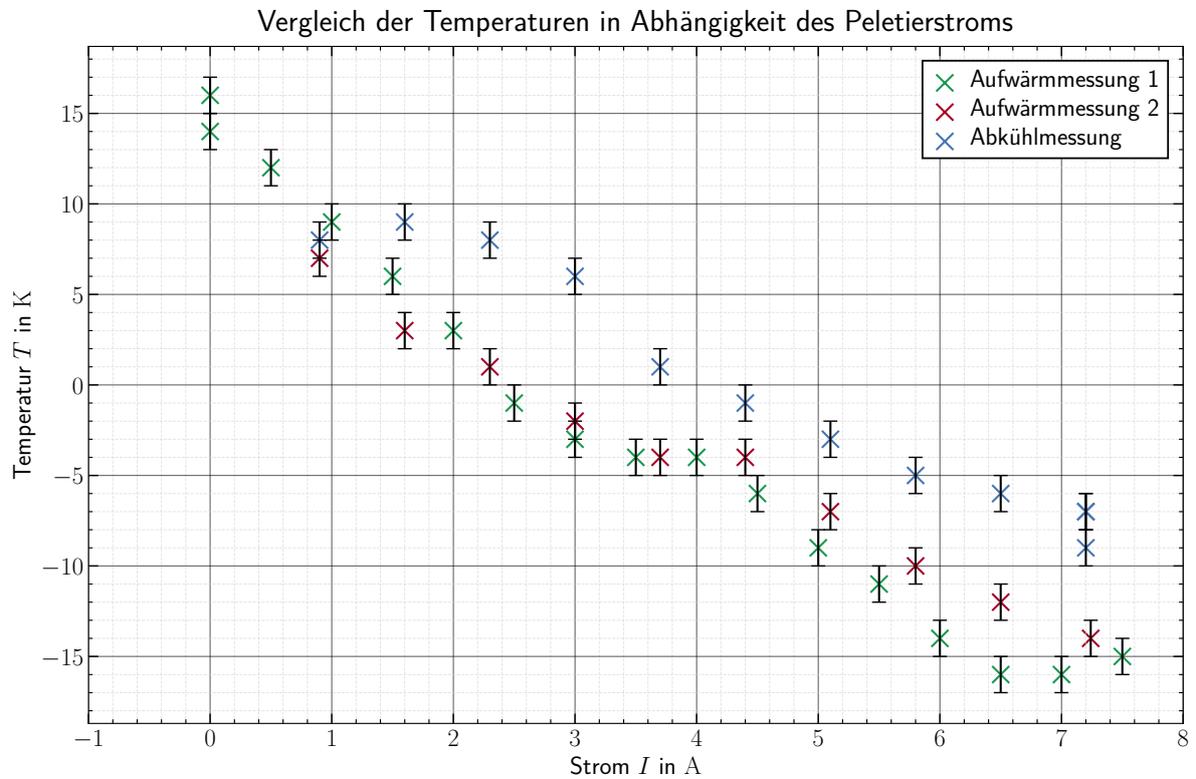


Abbildung 10: Auftragung der vom Thermometer angezeigten Temperatur gegen den an der Kühlung eingestellten Peletierstrom.

A.5 Extrapolation der Lebensdauer für die einzelnen Messreihen und Polarisatoreinstellungen

Dargestellt sind die für [Tabelle 3](#) verwendeten Extrapolationen der Lebensdauern gegen $P = 0$ Pa für die verschiedenen Messreihen und Polarisatoreinstellungen. Die linearen Anpassungen wurde mit Hilfe von `scipy.odr` durchgeführt um die x - und y -Unsicherheiten der Messwerte zu berücksichtigen. Das 2σ -Konfidenzband wurde aus den Unsicherheiten der Messwerte berechnet und ist ebenfalls dargestellt. Die Fit-Parameter, Unsicherheiten und reduzierten χ^2 -Werte sind den Plots zu entnehmen.

Extrapolation für Aufwärmmessung 1, Polarisatoreinstellung 0°

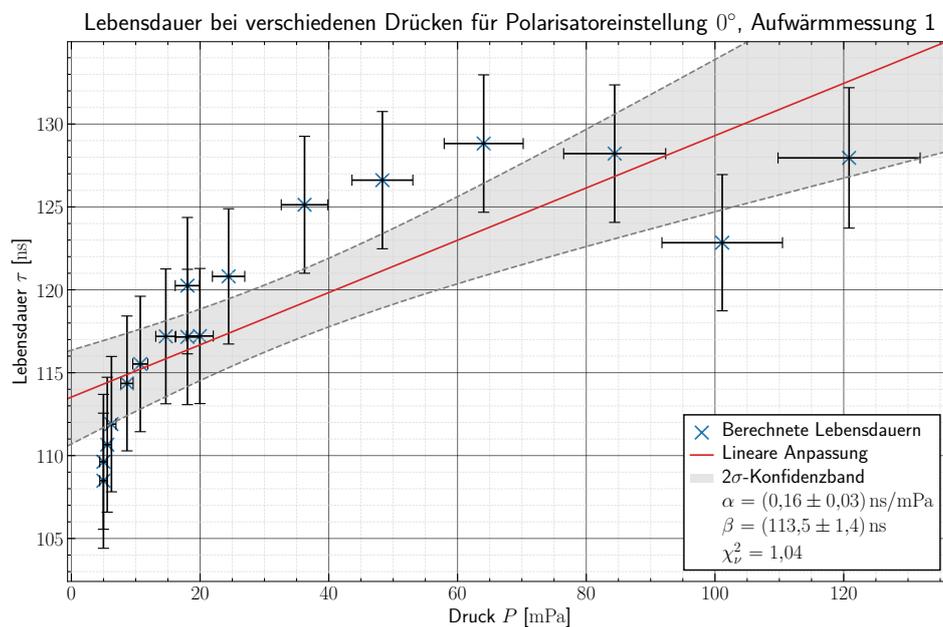


Abbildung 11: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0$ Pa für Aufwärmmessung 1 und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 0^\circ$.

Extrapolation für Aufwärmmessung 1, Polarisatoreinstellung 45°

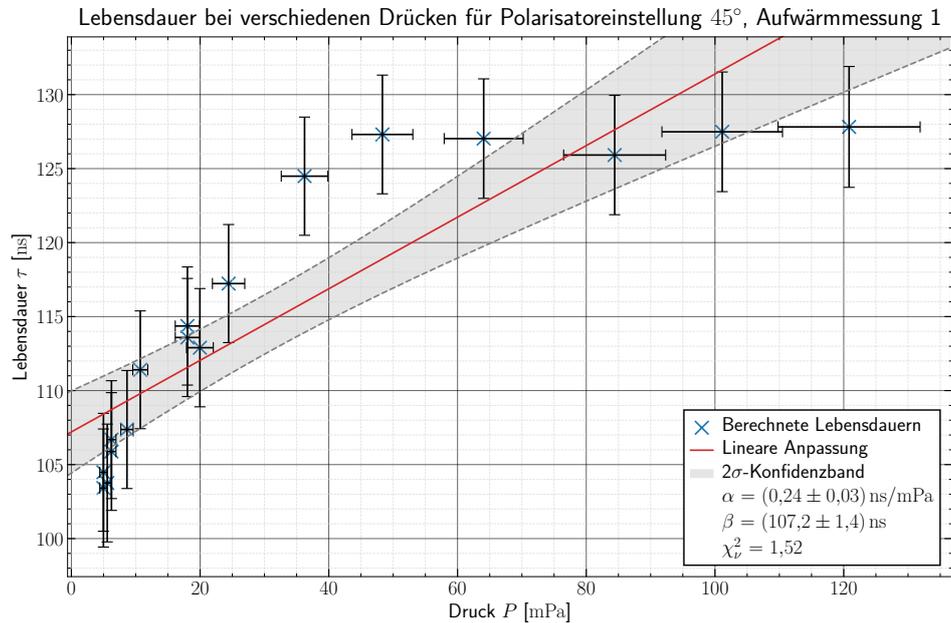


Abbildung 12: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für Aufwärmmessung 1 und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 45^\circ$.

Extrapolation für Aufwärmmessung 1, Polarisatoreinstellung 90°

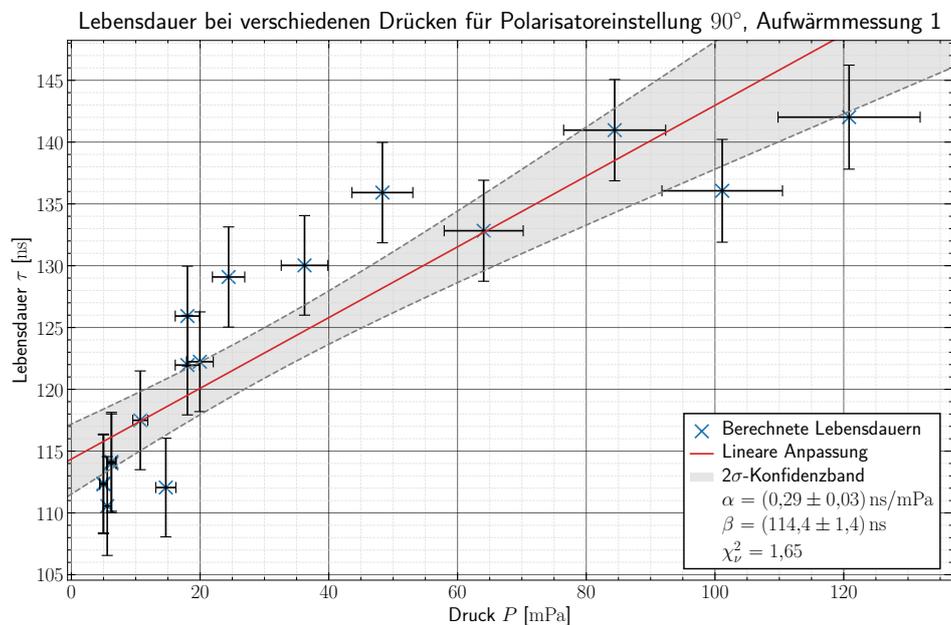


Abbildung 13: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für Aufwärmmessung 1 und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 90^\circ$.

Extrapolation für Aufwärmessung 2, Polarisatoreinstellung 0°

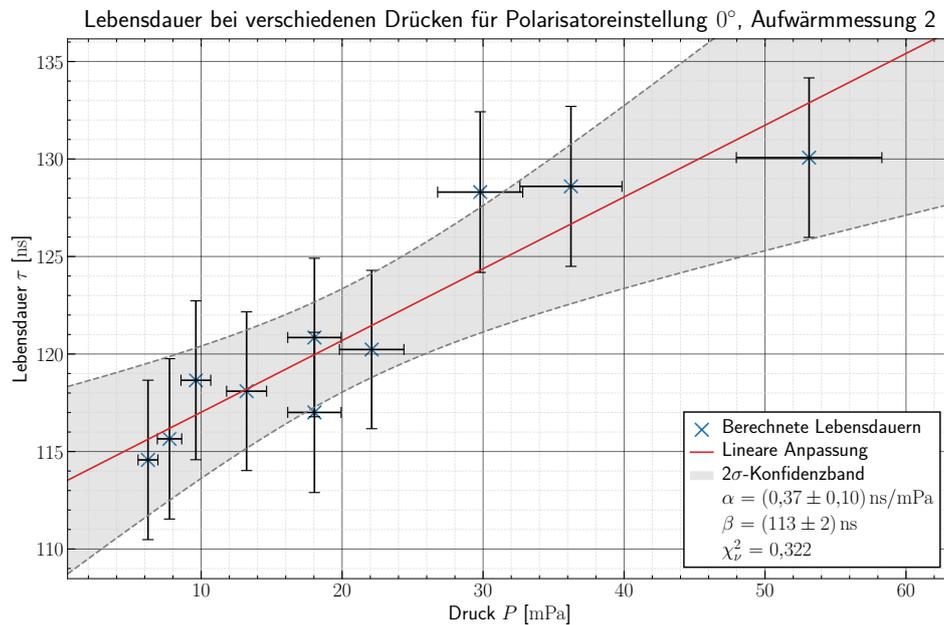


Abbildung 14: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für Aufwärmessung 2 und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 0^\circ$.

Extrapolation für Aufwärmessung 2, Polarisatoreinstellung 45°

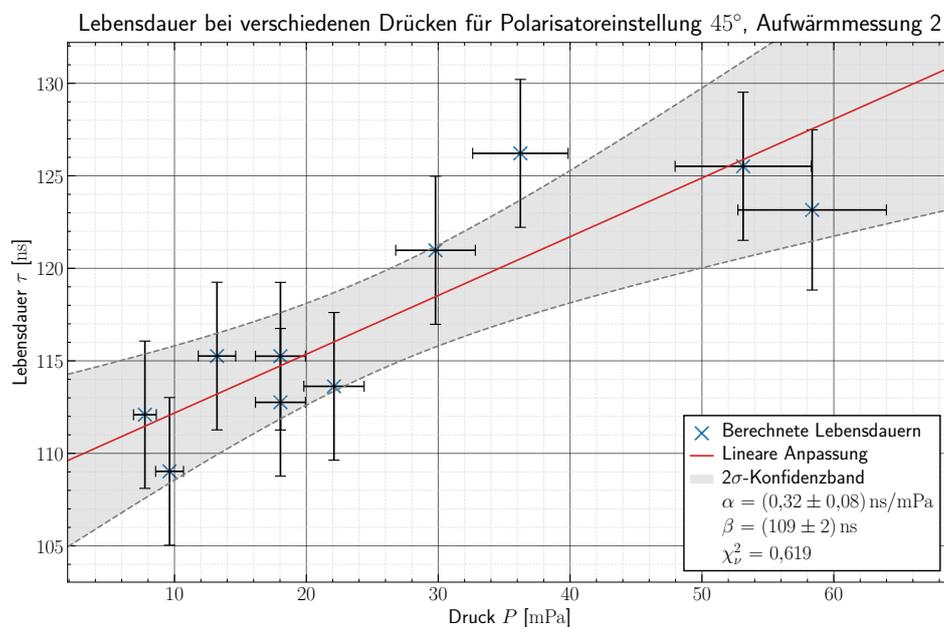


Abbildung 15: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für Aufwärmessung 2 und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 45^\circ$.

Extrapolation für Aufwärmmessung 2, Polarisatoreinstellung 90°

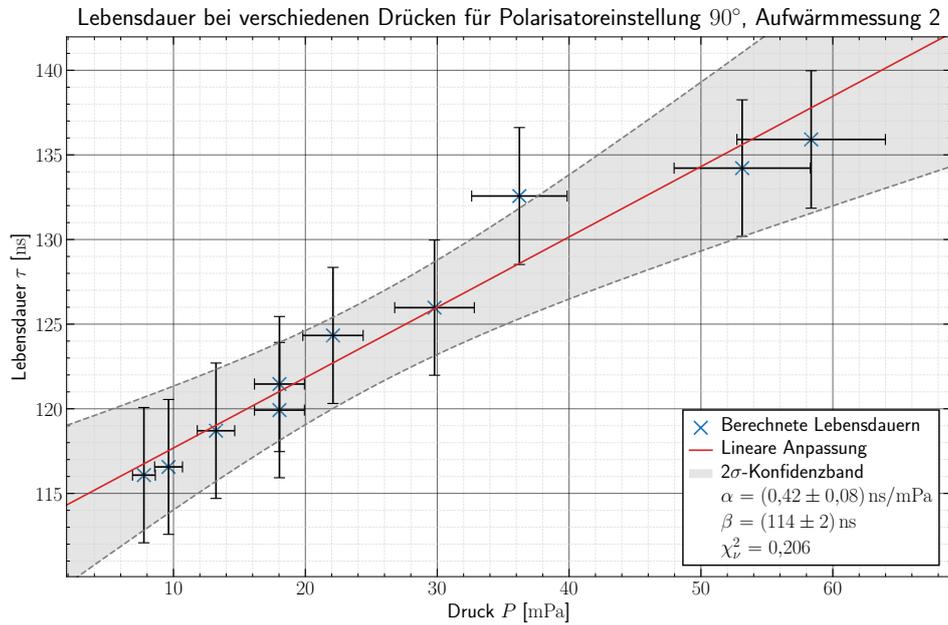


Abbildung 16: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für Aufwärmmessung 2 und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 90^\circ$.

Extrapolation für die Abkühlmessung, Polarisatoreinstellung 0°

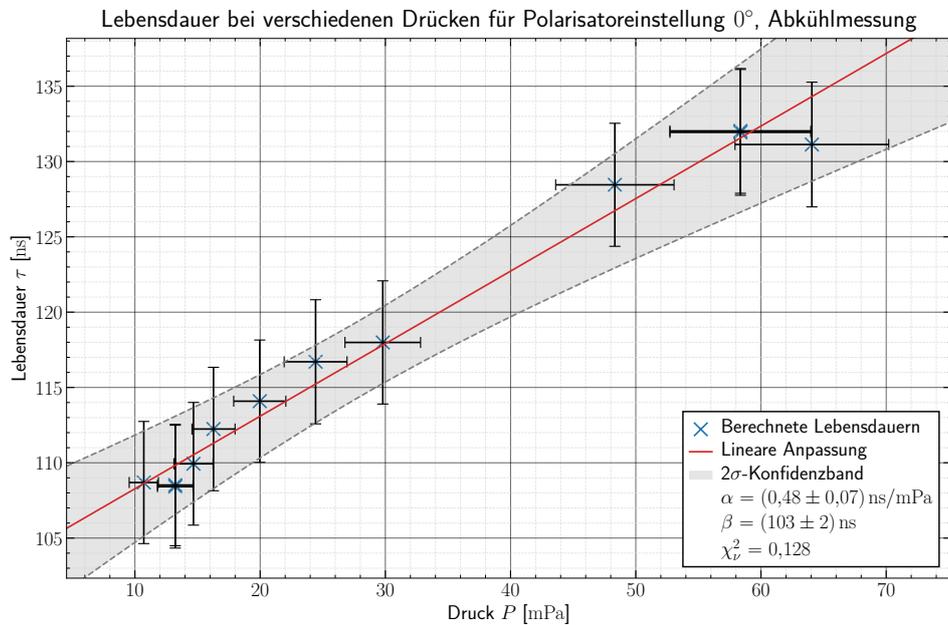


Abbildung 17: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für die Abkühlmessung und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 0^\circ$.

Extrapolation für die Abkühlmessung, Polarisatoreinstellung 45°

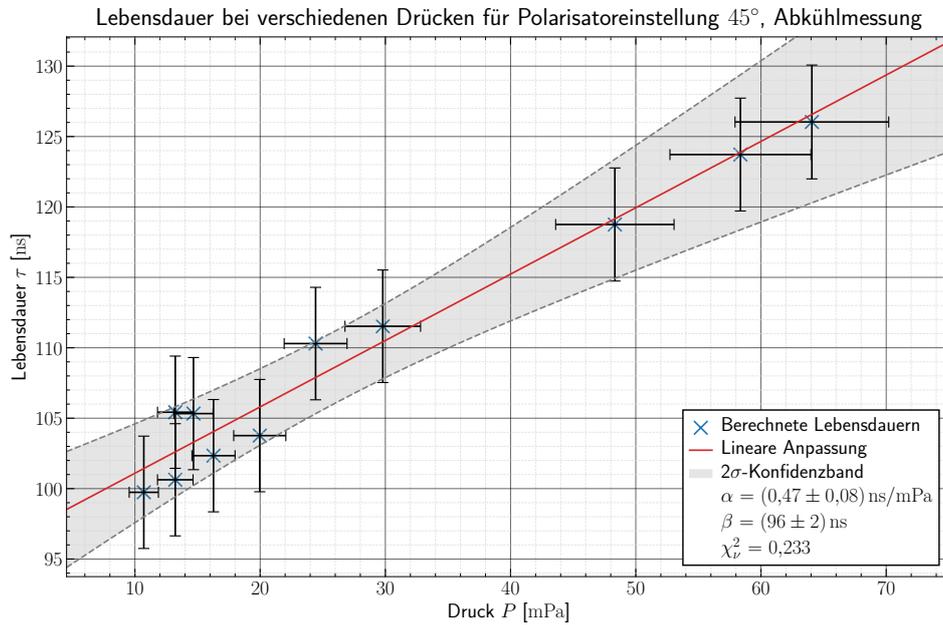


Abbildung 18: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für die Abkühlmessung und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 45^\circ$.

Extrapolation für die Abkühlmessung, Polarisatoreinstellung 90°

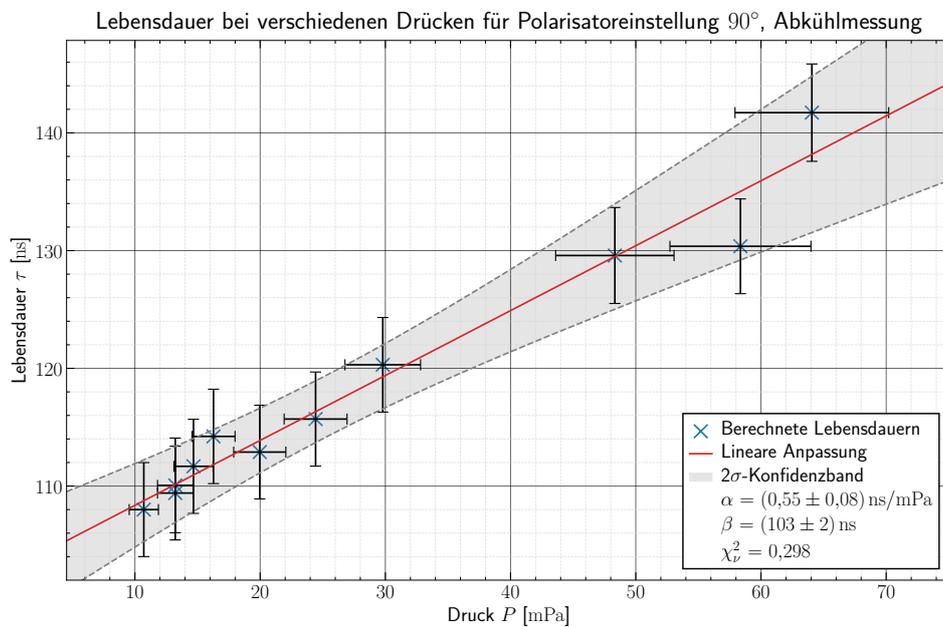


Abbildung 19: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für die Abkühlmessung und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 90^\circ$.

Extrapolation für Aufwärmessung 1, für alle Polarisatoreinstellungen

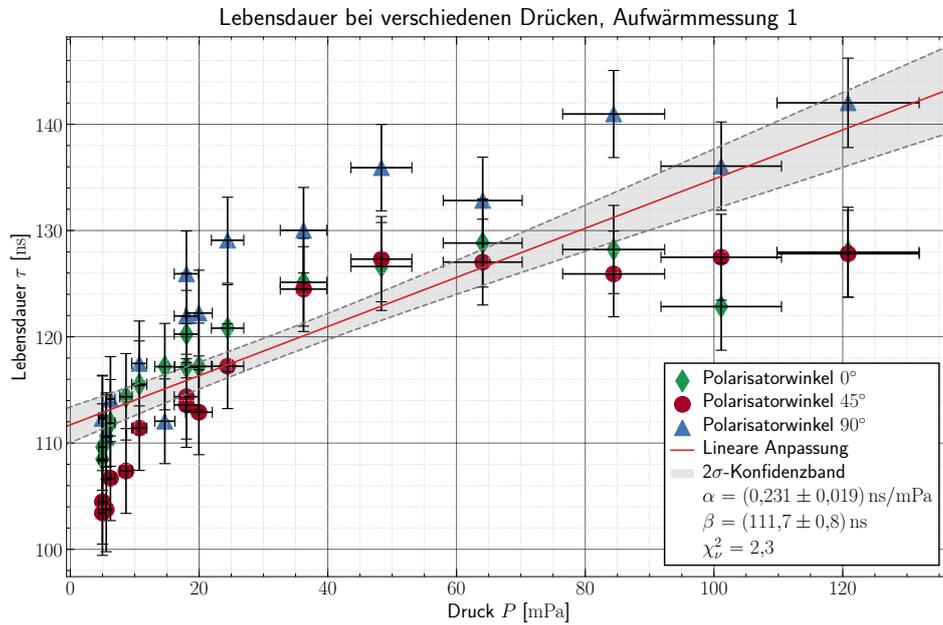


Abbildung 20: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0$ Pa für Aufwärmessung 1 und alle Polarisoreinstellungen.

Extrapolation für Aufwärmessung 2, für alle Polarisoreinstellungen

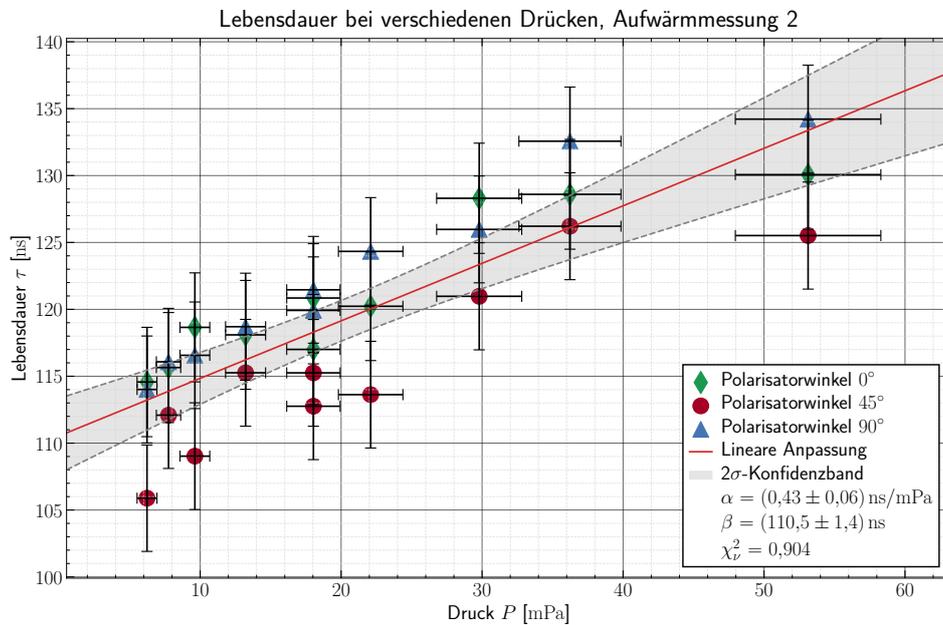


Abbildung 21: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0$ Pa für Aufwärmessung 2 und alle Polarisoreinstellungen.

Extrapolation für die Abköhlmessung, für alle Polarisatoreinstellungen

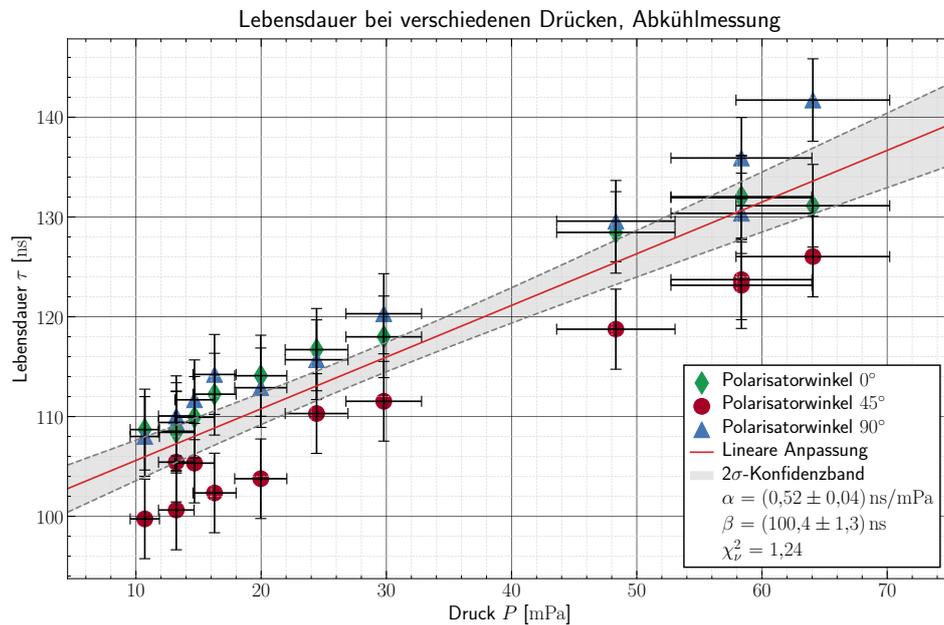


Abbildung 22: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für die Abköhlmessung und alle Polarisoreinstellungen.

Extrapolation für alle Messreihen, Polarisatoreinstellung 0°

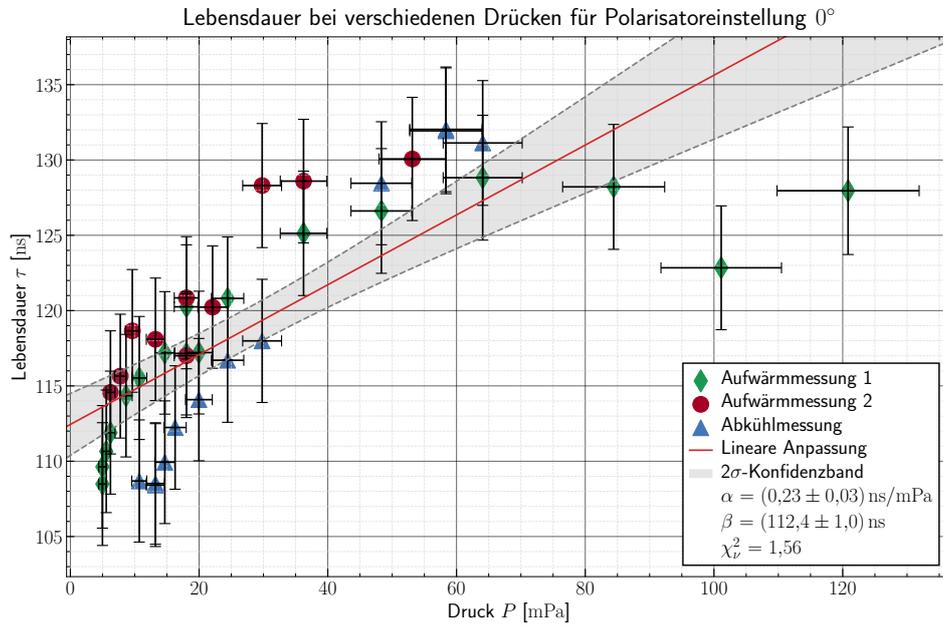


Abbildung 23: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für alle Messreihen und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 0^\circ$.

Extrapolation für alle Messreihen, Polarisatoreinstellung 45°

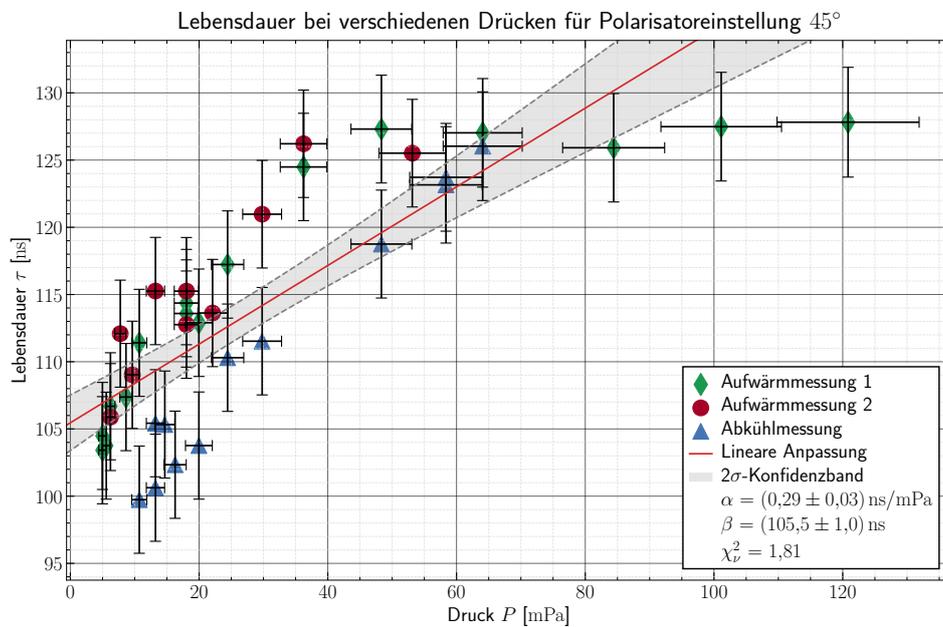


Abbildung 24: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für alle Messreihen und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 45^\circ$.

Extrapolation für alle Messreihen, Polarisatoreinstellung 90°

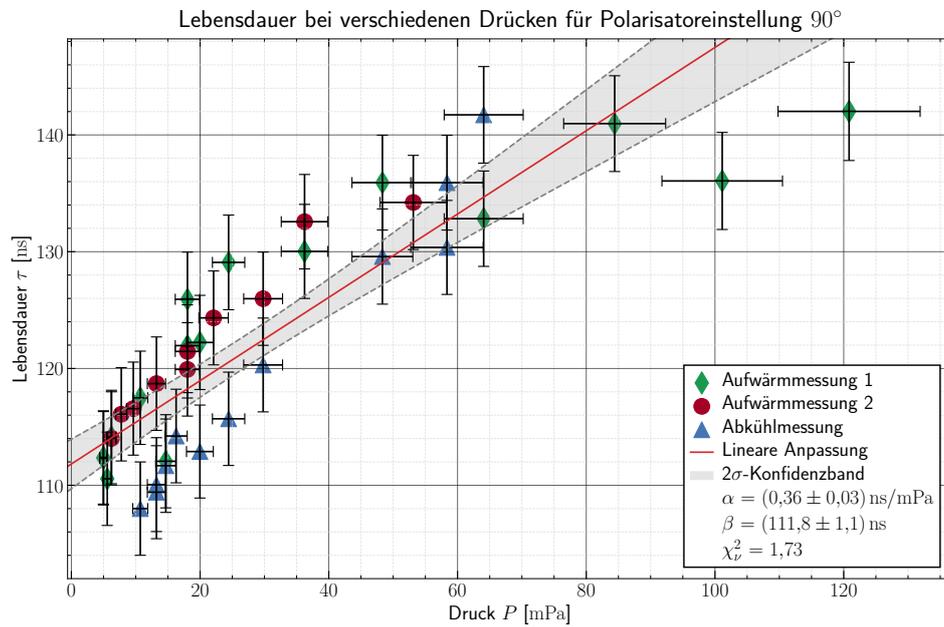


Abbildung 25: Extrapolation der Lebensdauern gegen $P = 0 \text{ Pa}$ für alle Messreihen und Polarisatoreinstellung $\varphi_0 = 90^\circ$.

A.6 Für die Auswertung verwendete Anpassungen

A.6.1 Streumessungen zur Bestimmung der Standardabweichung

Dargestellt sind die zur Abschätzung der Streuung der Lebensdauer verwendeten Anpassungen. Es wurden drei Messreihen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt und separat ausgewertet, wie in [Abb. 7](#) zu sehen. Die Anpassungen wurden als ungewichtete Regression mit `scipy.optimize.curve_fit` gemäß [Gleichung \(26\)](#) durchgeführt. Die zugrunde liegenden Einstellungen, Parameter-Bestwerte und reduzierten χ^2 -Werte sind den Plots zu entnehmen.

Streuung 1, Anpassungen 1 - 6

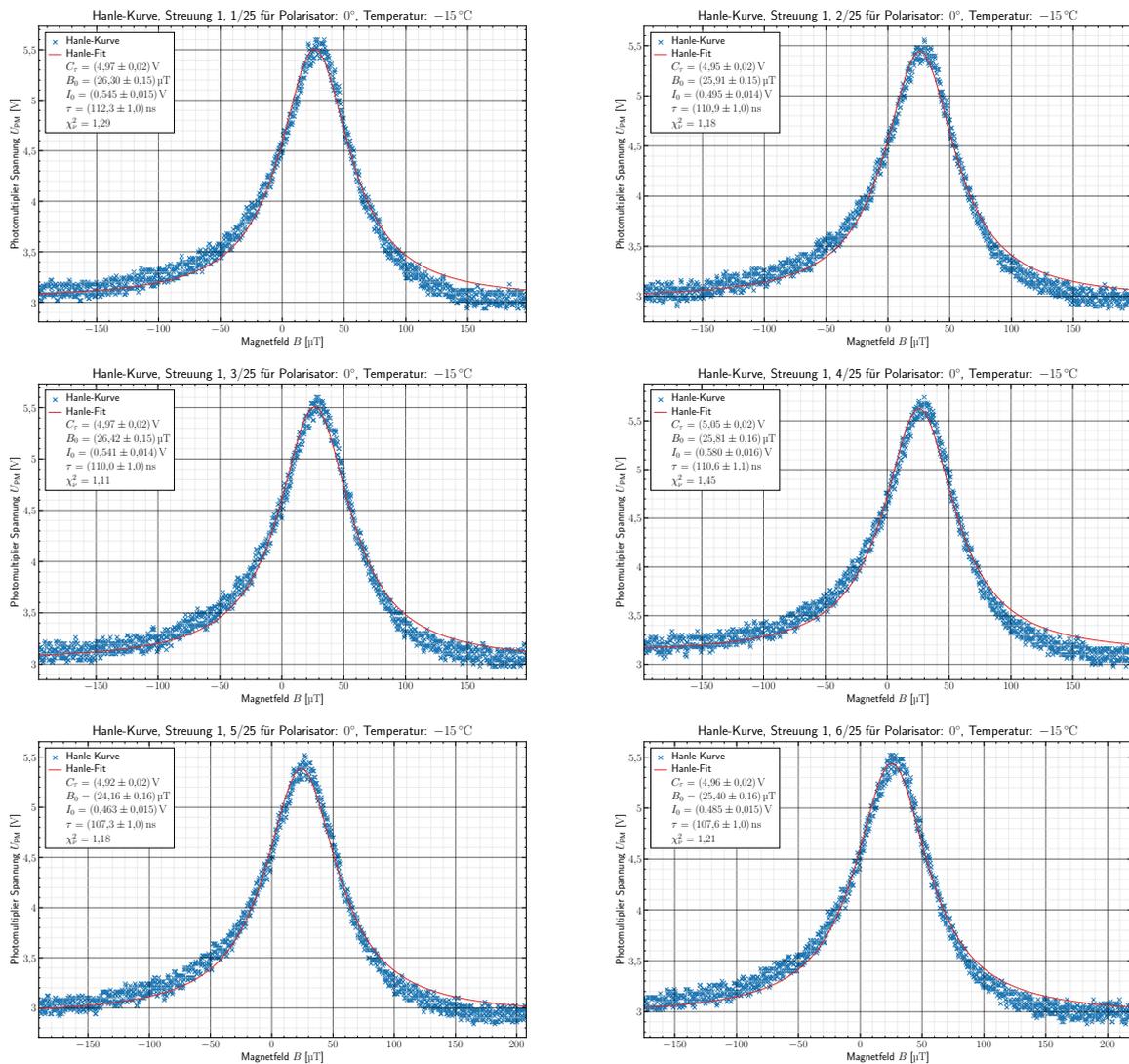


Abbildung 26: Messwerte für Streumessung 1, Anpassungen 1 - 6.

Streuung 1, Anpassungen 7 - 12

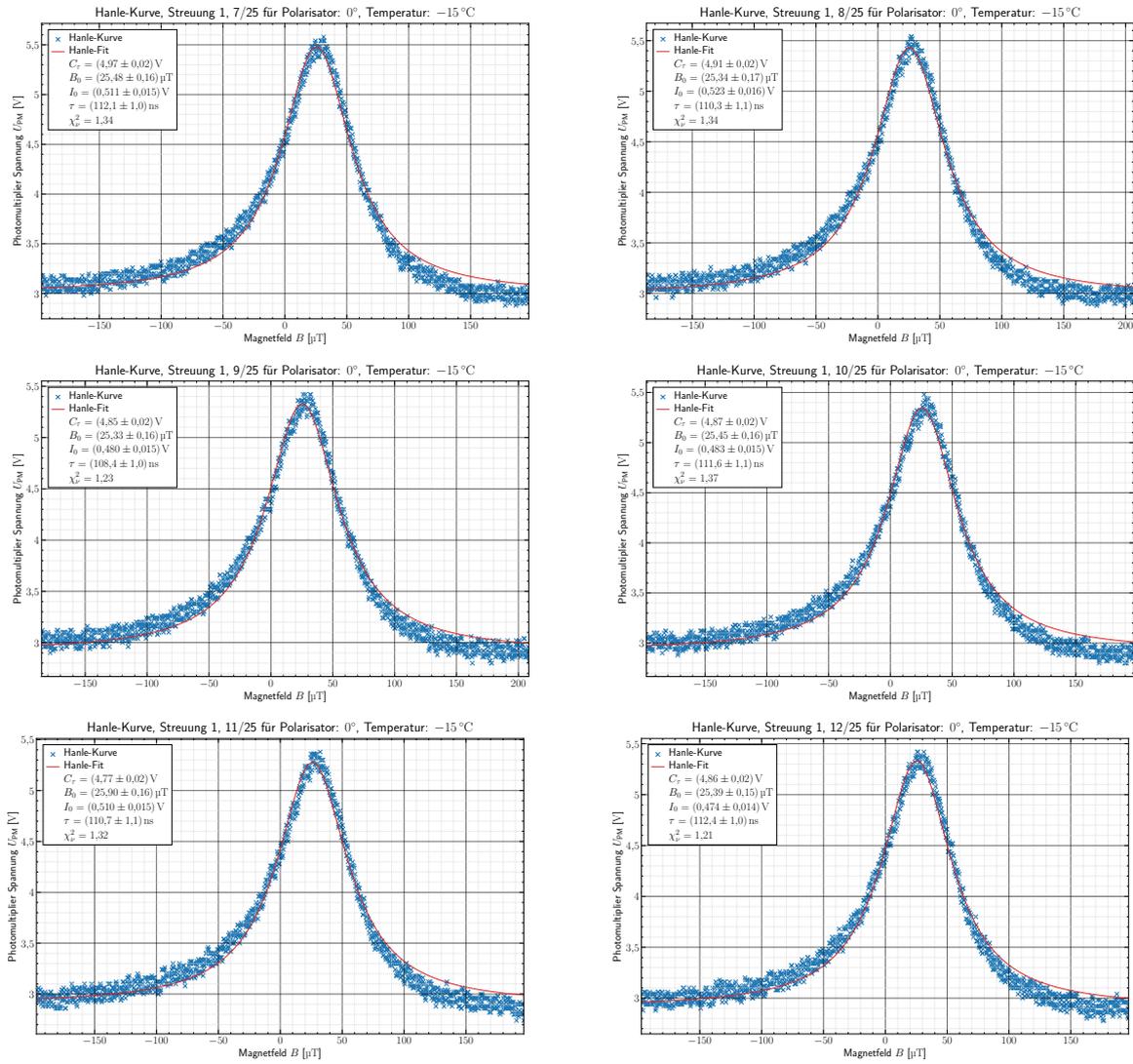


Abbildung 27: Messwerte für Streumessung 1, Anpassungen 7 - 12.

Streuung 1, Anpassungen 13 - 18

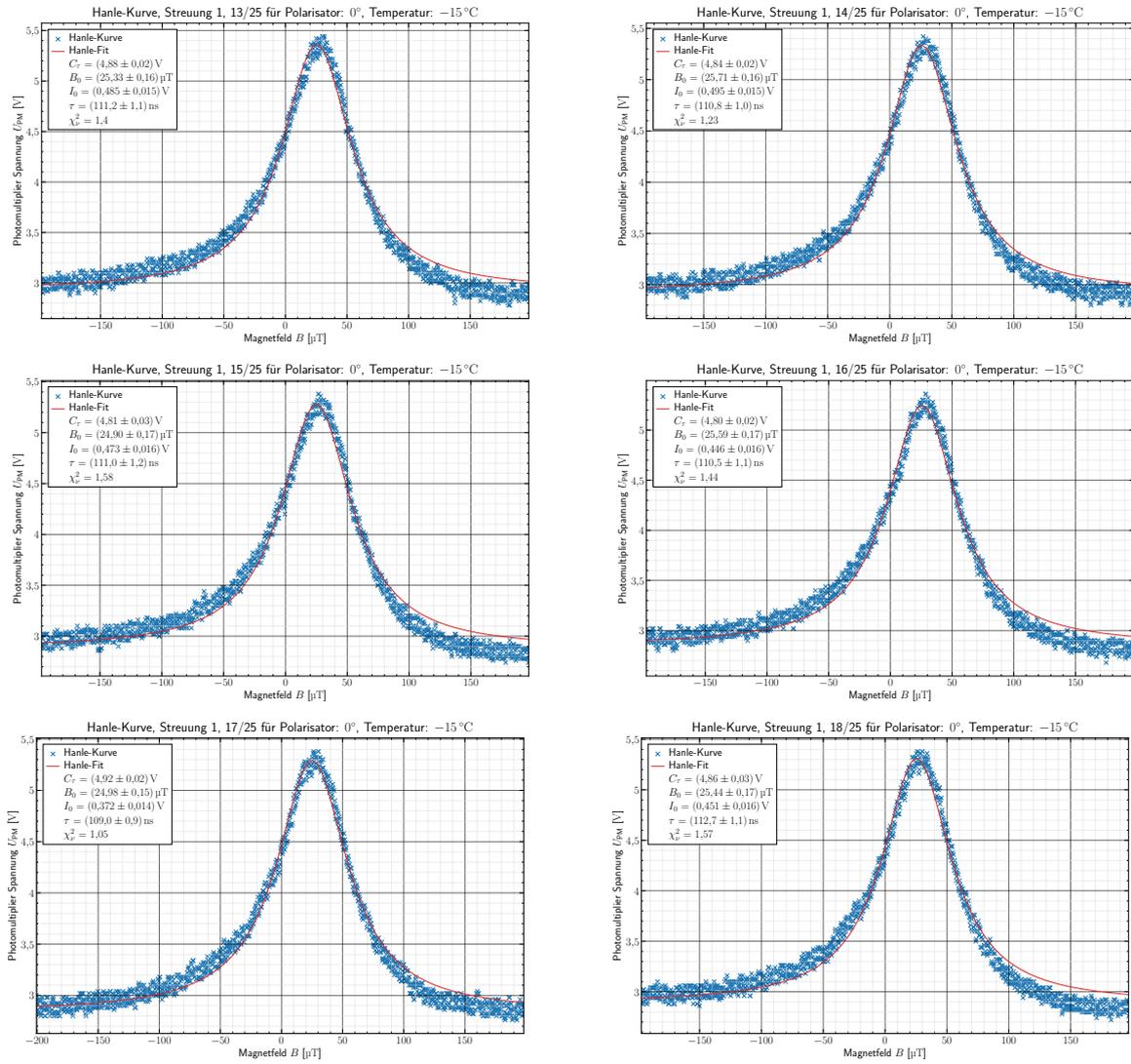


Abbildung 28: Messwerte für Streumessung 1, Anpassungen 13 - 18.

Streuung 1, Anpassungen 19 - 24

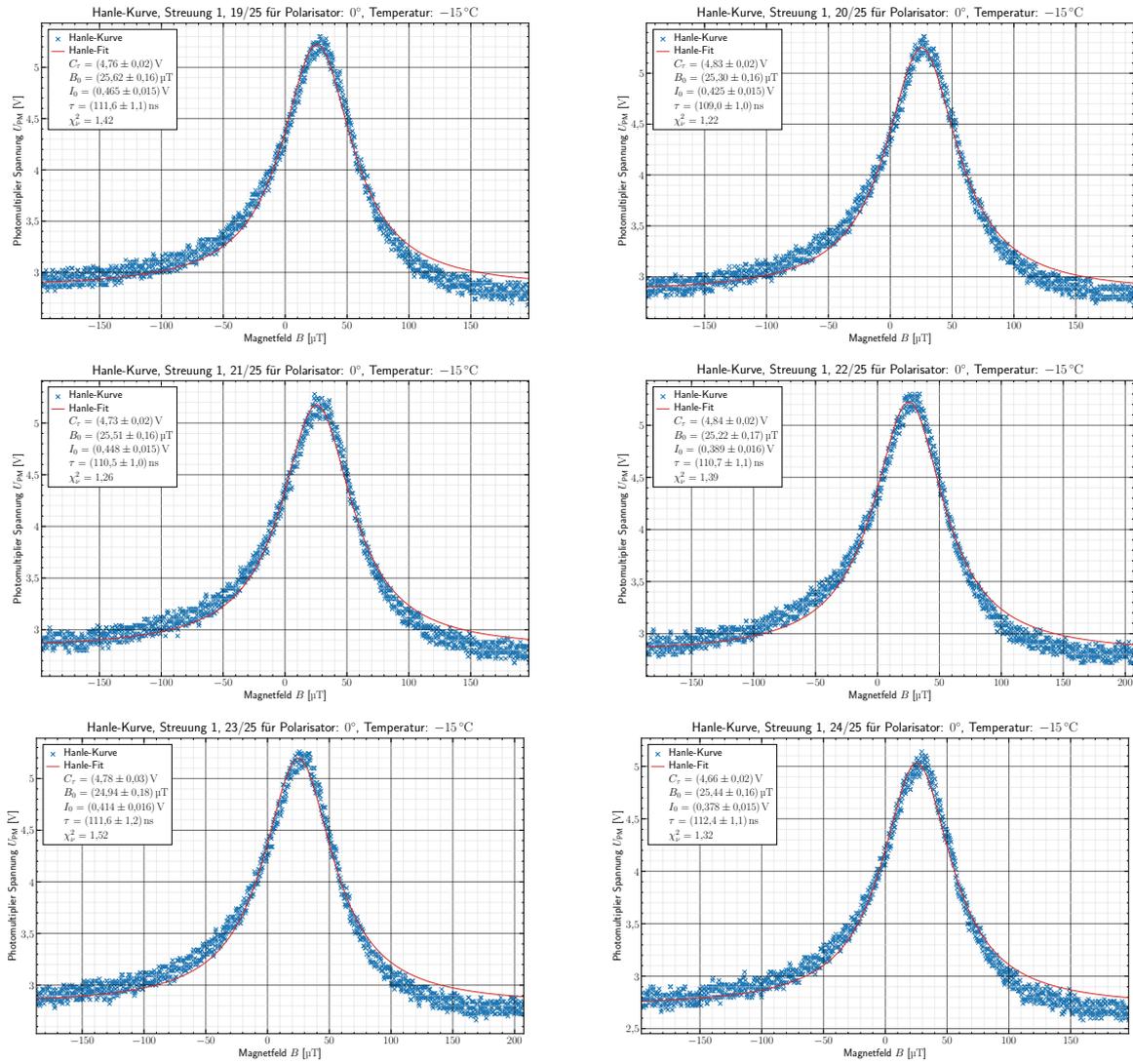


Abbildung 29: Messwerte für Streumessung 1, Anpassungen 19 - 24.

Streumessung 1, Anpassung 25

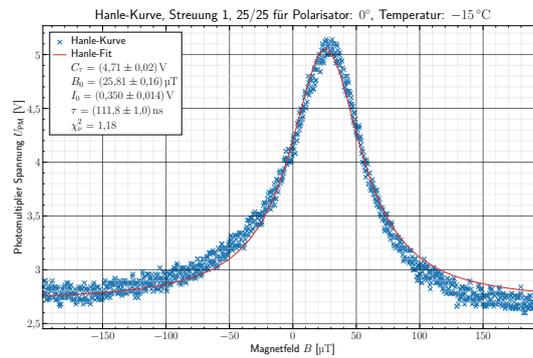


Abbildung 30: Messwerte für Streumessung 1, Anpassung 25.

Streuung 2, Anpassungen 1 - 6

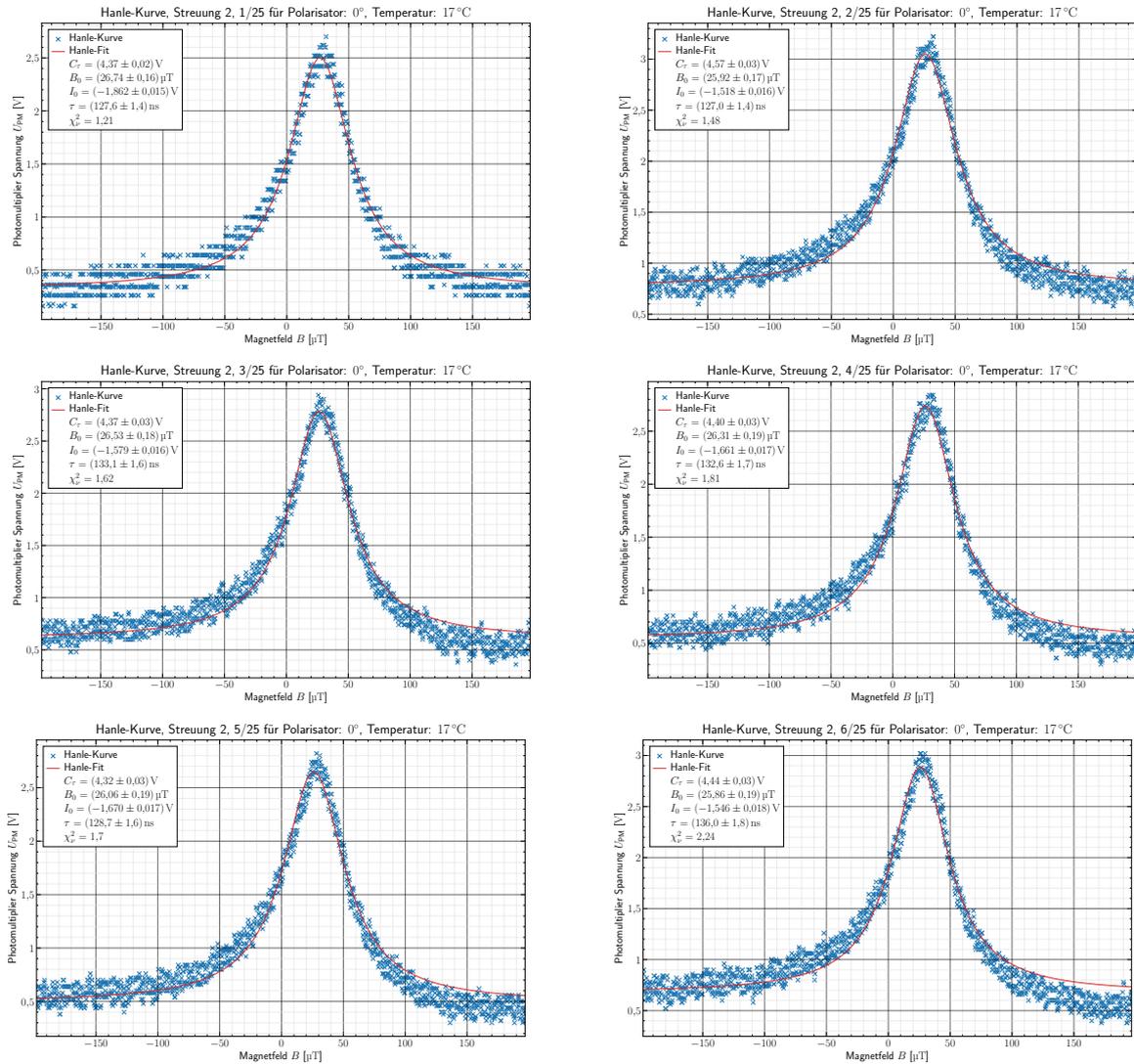


Abbildung 31: Messwerte für Streumessung 2, Anpassungen 1 - 6.

Streuung 2, Anpassungen 7 - 12

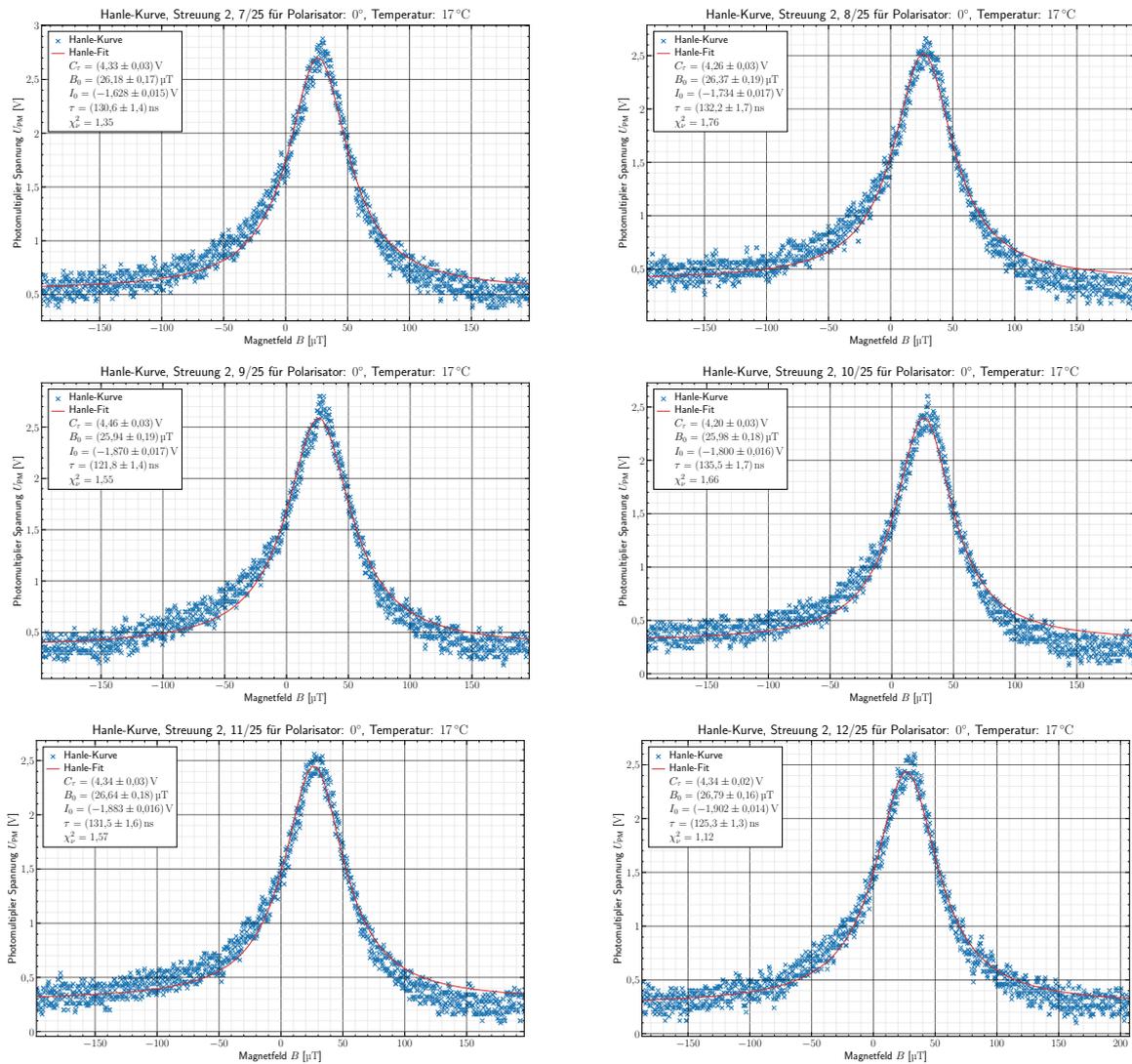


Abbildung 32: Messwerte für Streuung 2, Anpassungen 7 - 12.

Streuung 2, Anpassungen 13 - 18

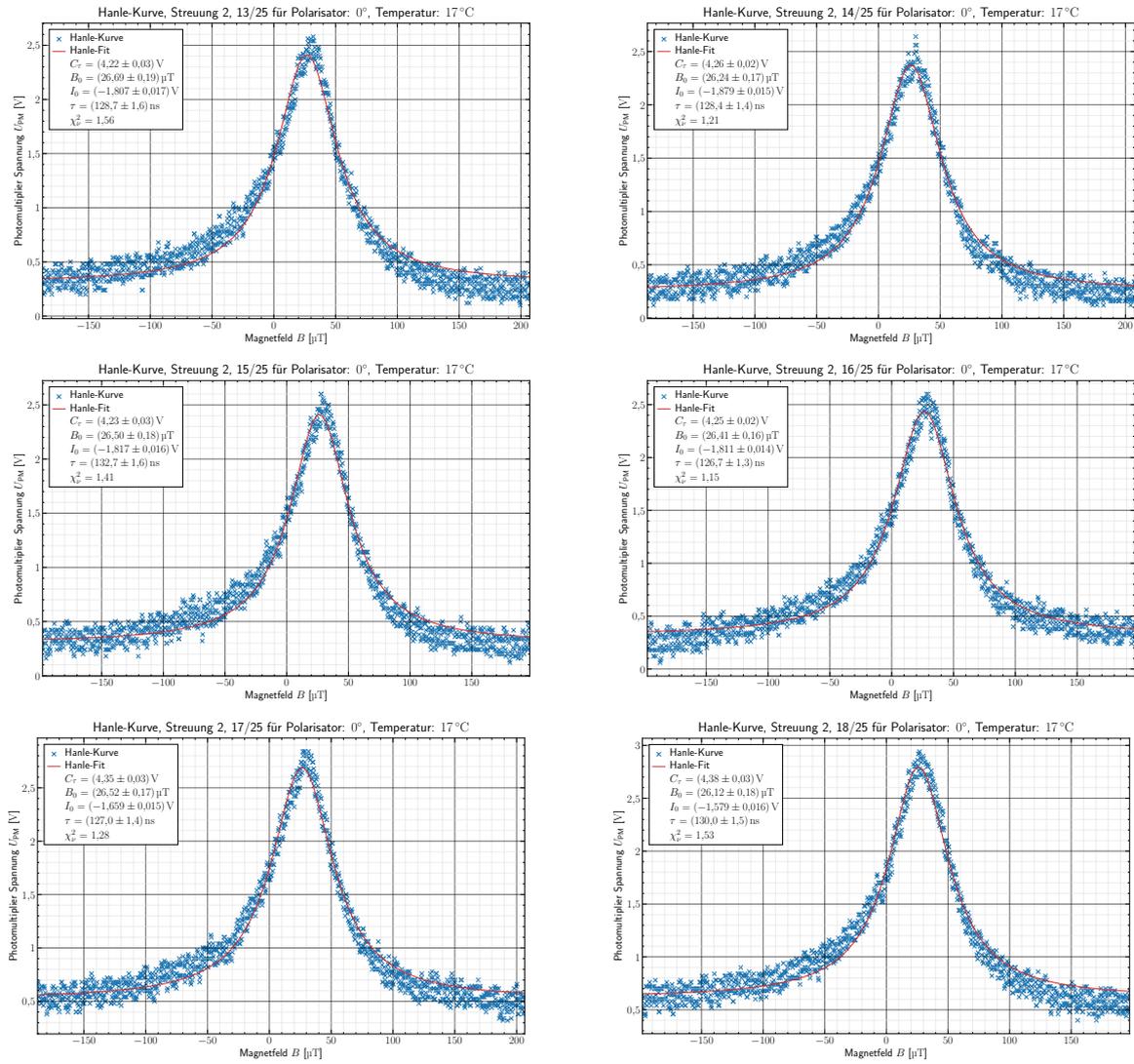


Abbildung 33: Messwerte für Streumessung 2, Anpassungen 13 - 18.

Streuung 2, Anpassungen 19 - 24

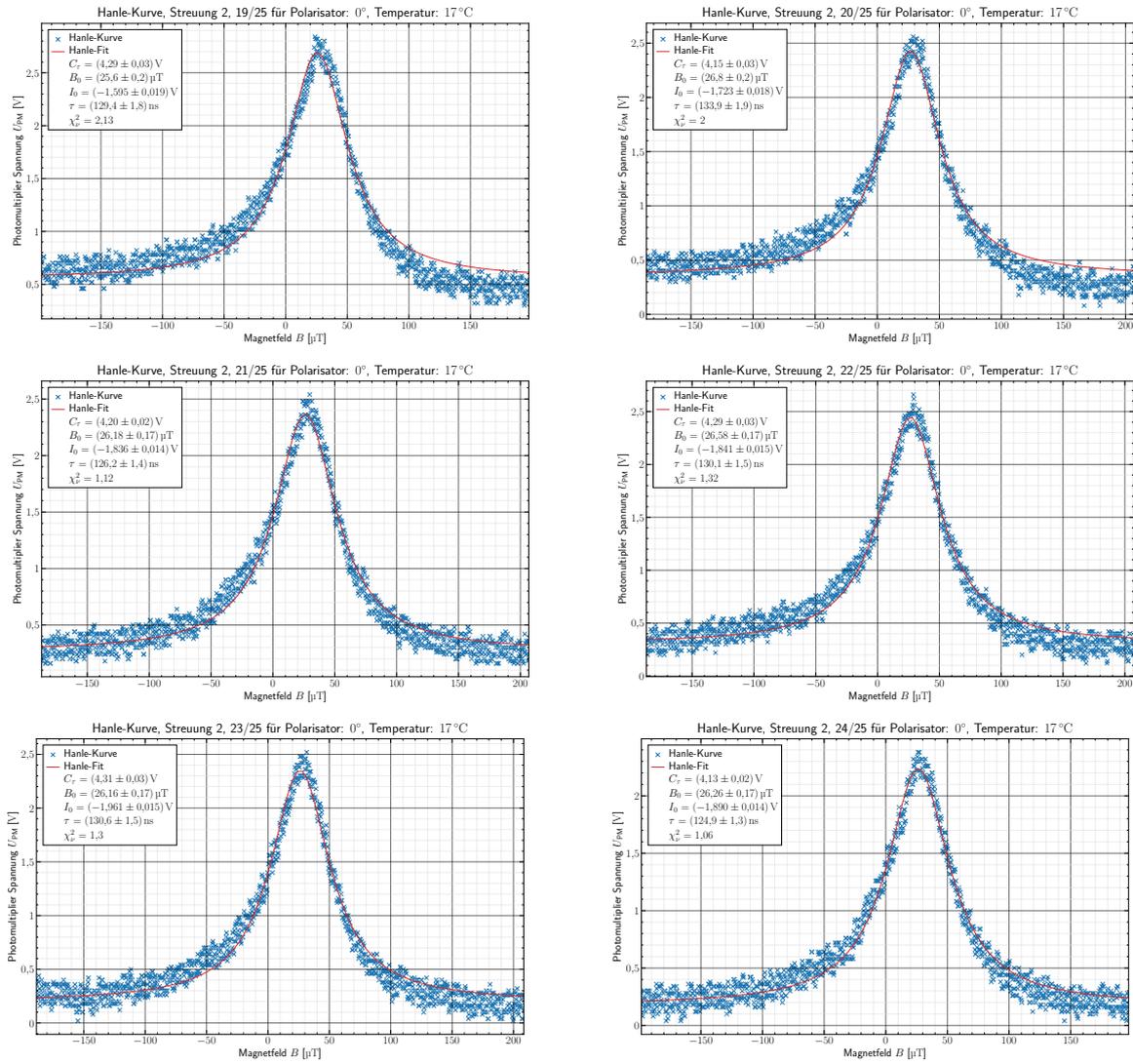


Abbildung 34: Messwerte für Streumessung 2, Anpassungen 19 - 24.

Streumessung 2, Anpassung 25

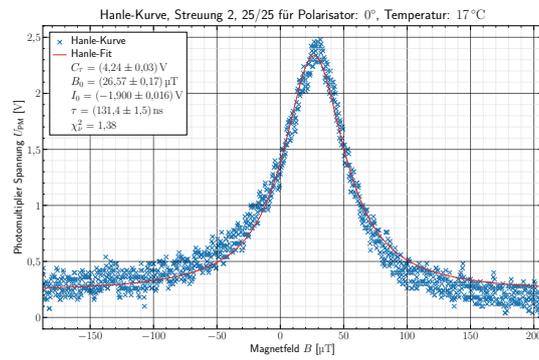


Abbildung 35: Messwerte für Streumessung 2, Anpassung 25.

Streuung 3, Anpassungen 1 - 6

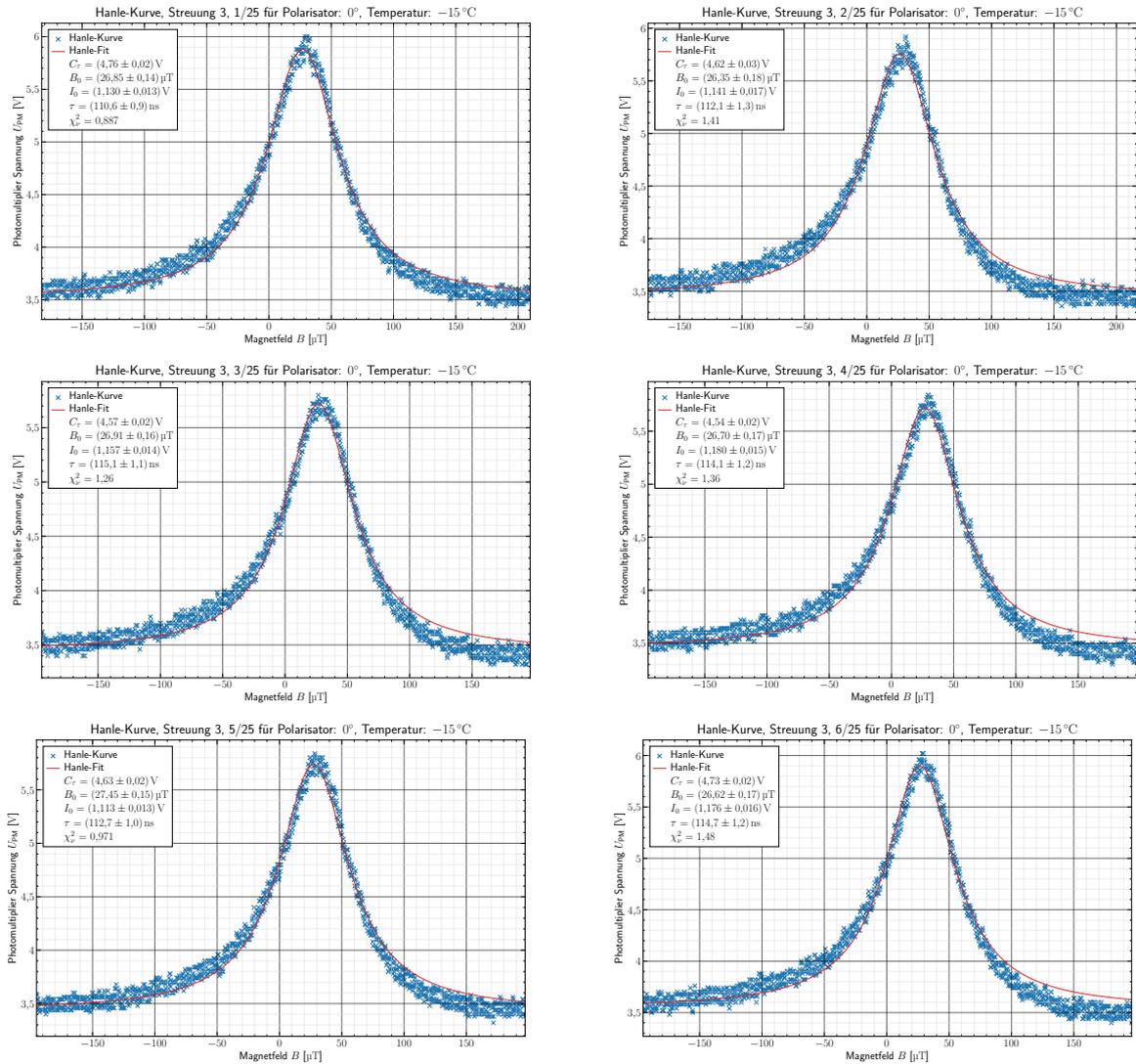


Abbildung 36: Messwerte für Streumessung 3, Anpassungen 1 - 6.

Streuung 3, Anpassungen 7 - 12

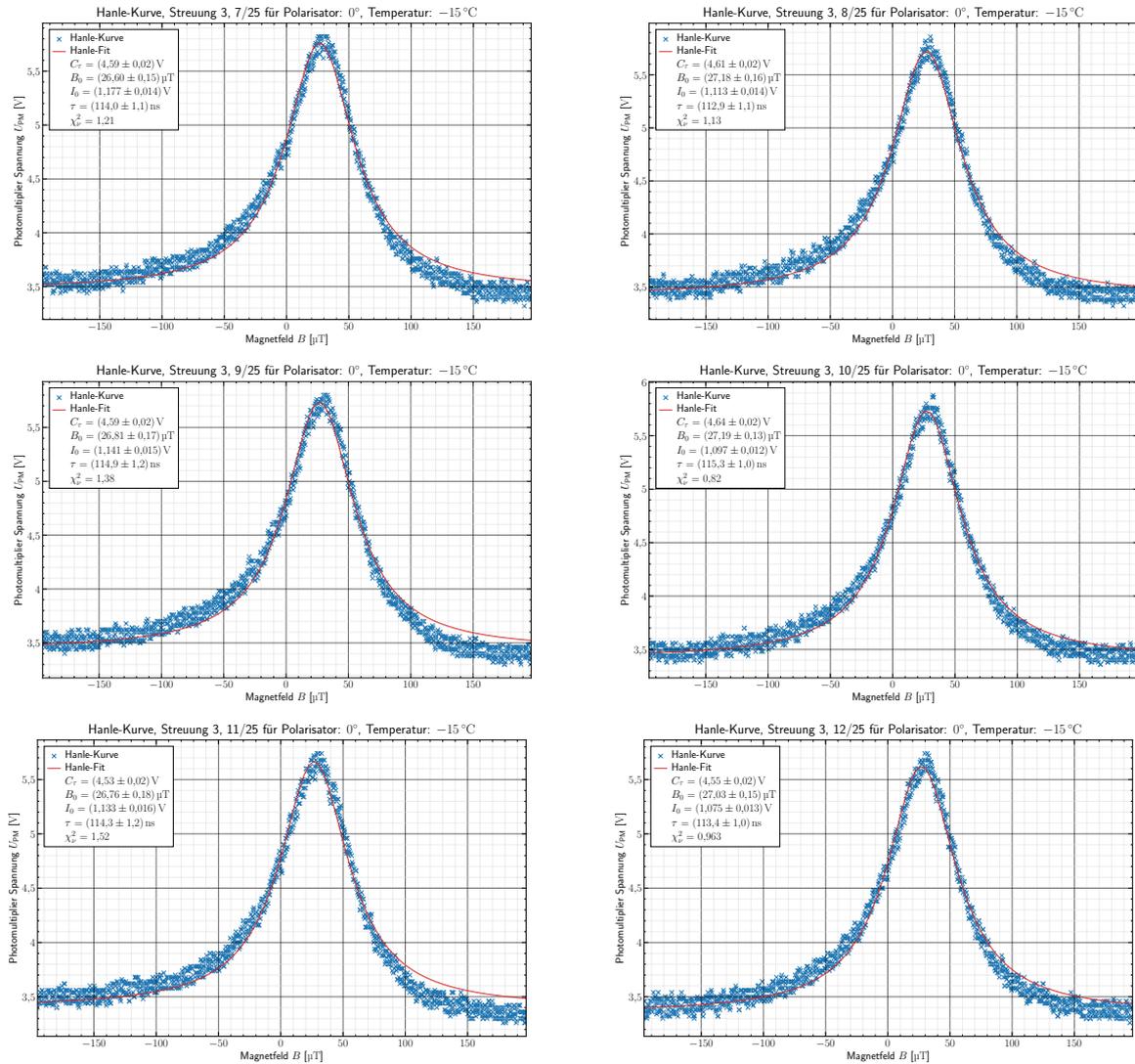


Abbildung 37: Messwerte für Streumessung 3, Anpassungen 7 - 12.

Streuung 3, Anpassungen 13 - 18

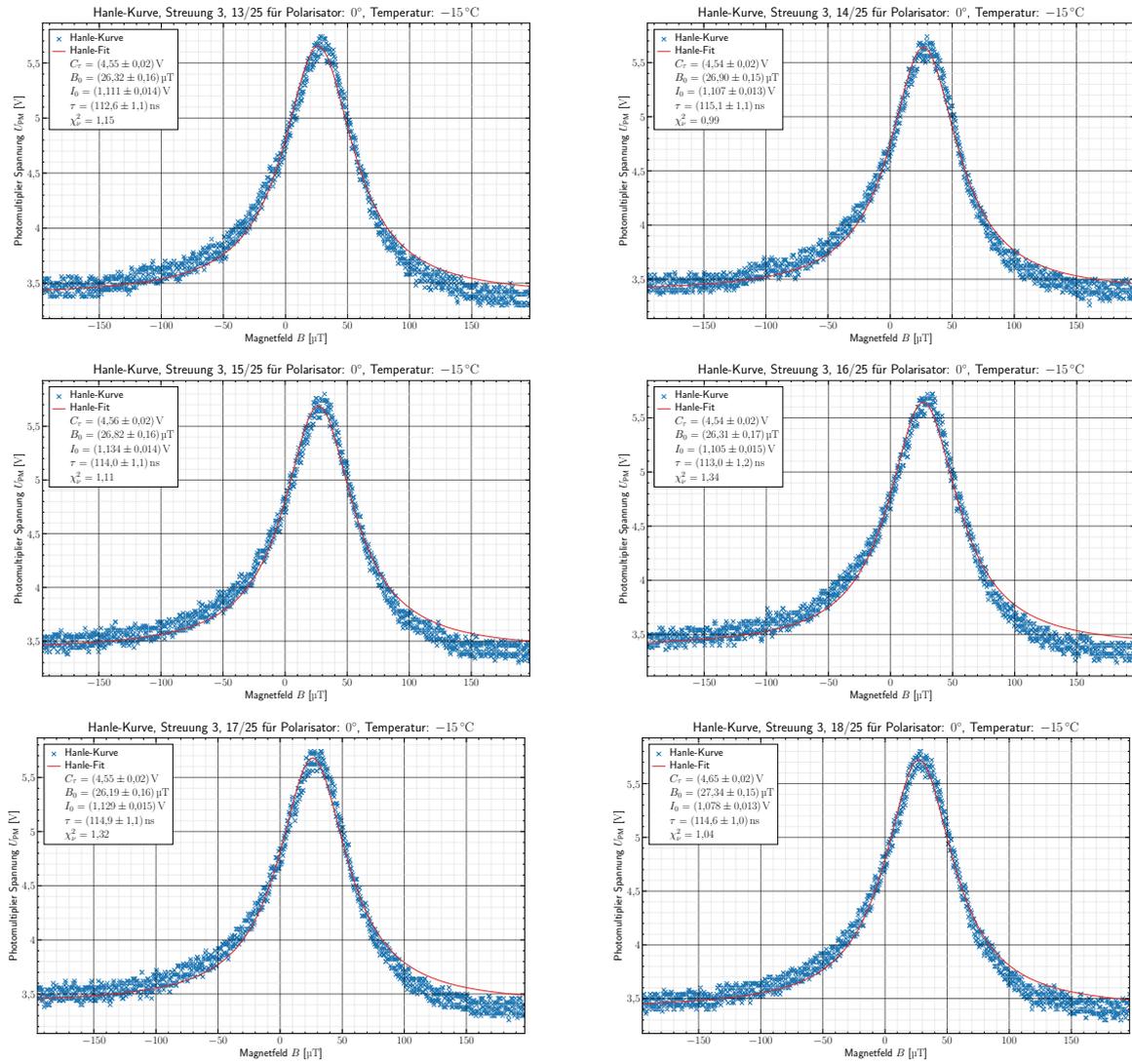


Abbildung 38: Messwerte für Streumessung 3, Anpassungen 13 - 18.

Streuung 3, Anpassungen 19 - 24

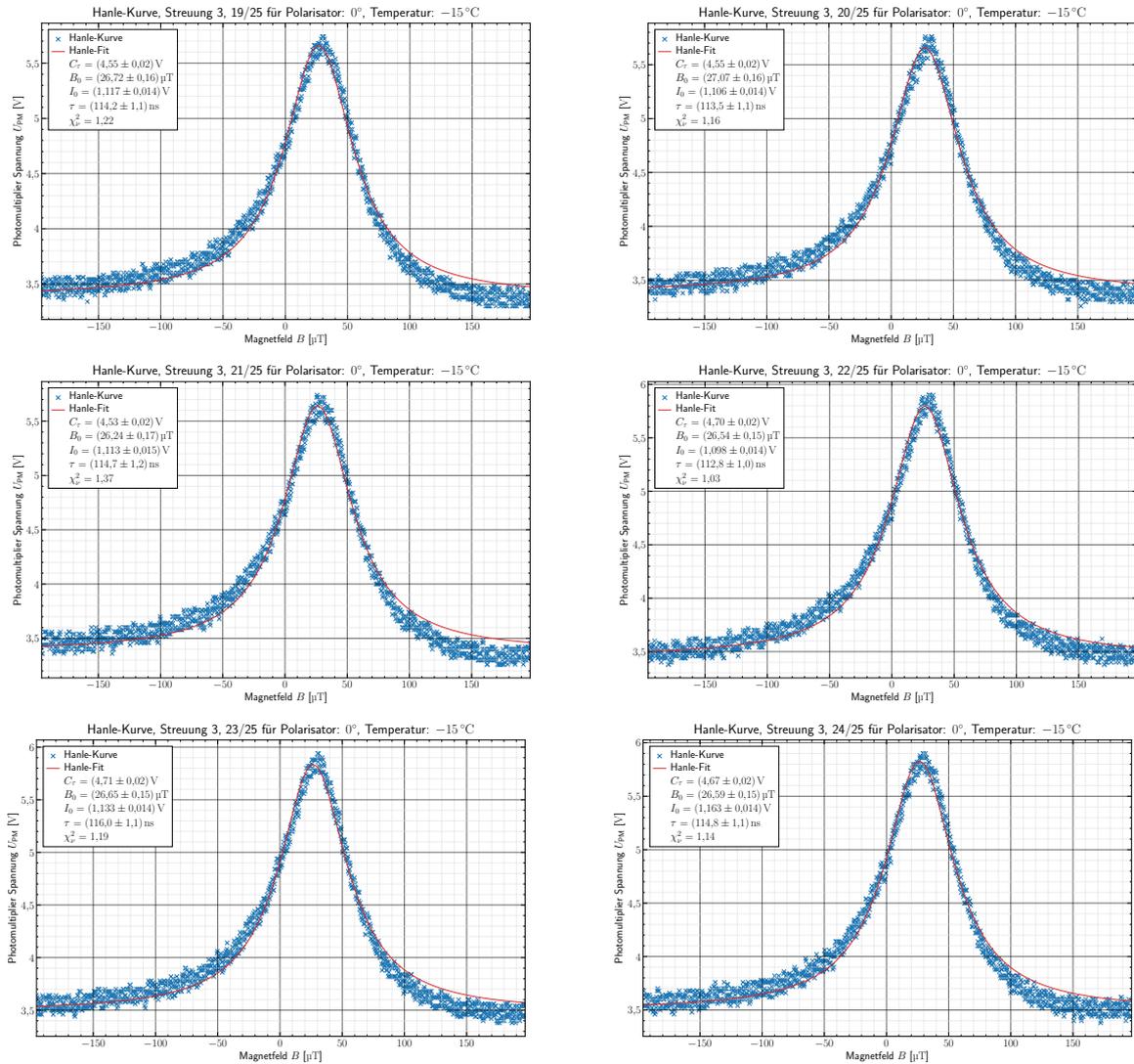


Abbildung 39: Messwerte für Streumessung 3, Anpassungen 19 - 24.

Streumessung 3, Anpassung 25

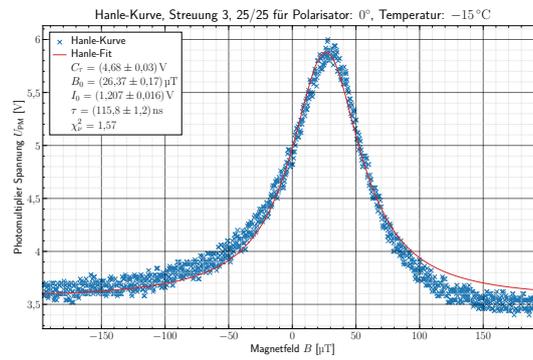


Abbildung 40: Messwerte für Streumessung 3, Anpassung 25.

A.6.2 Messungen zur Bestimmung der Lebensdauern

Dargestellt sind die zur Bestimmung der Lebensdauern verwendeten Anpassungen. Es wurden drei Messreihen (Messreihe 1 und 2 bei aufsteigender Temperatur, Messreihe 3 bei abfallender Temperatur) durchgeführt. Die Endergebnisse sind in [Abb. 11 bis 25](#) dargestellt und in [Tabellen 6 bis 8](#), sowie [Tabelle 3](#) aufgetragen. Die Anpassungen wurden als ungewichtete Regression mit `scipy.optimize.curve_fit` gemäß [Gleichung \(26\)](#) durchgeführt. Die zugrunde liegenden Einstellungen, Parameter-Bestwerte und reduzierten χ^2 -Werte sind den Plots zu entnehmen. Zwei Anpassungen mussten aufgrund von fehlerhaften Rampensignalen verworfen werden und sind daher nicht gezeigt.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 1 - 6

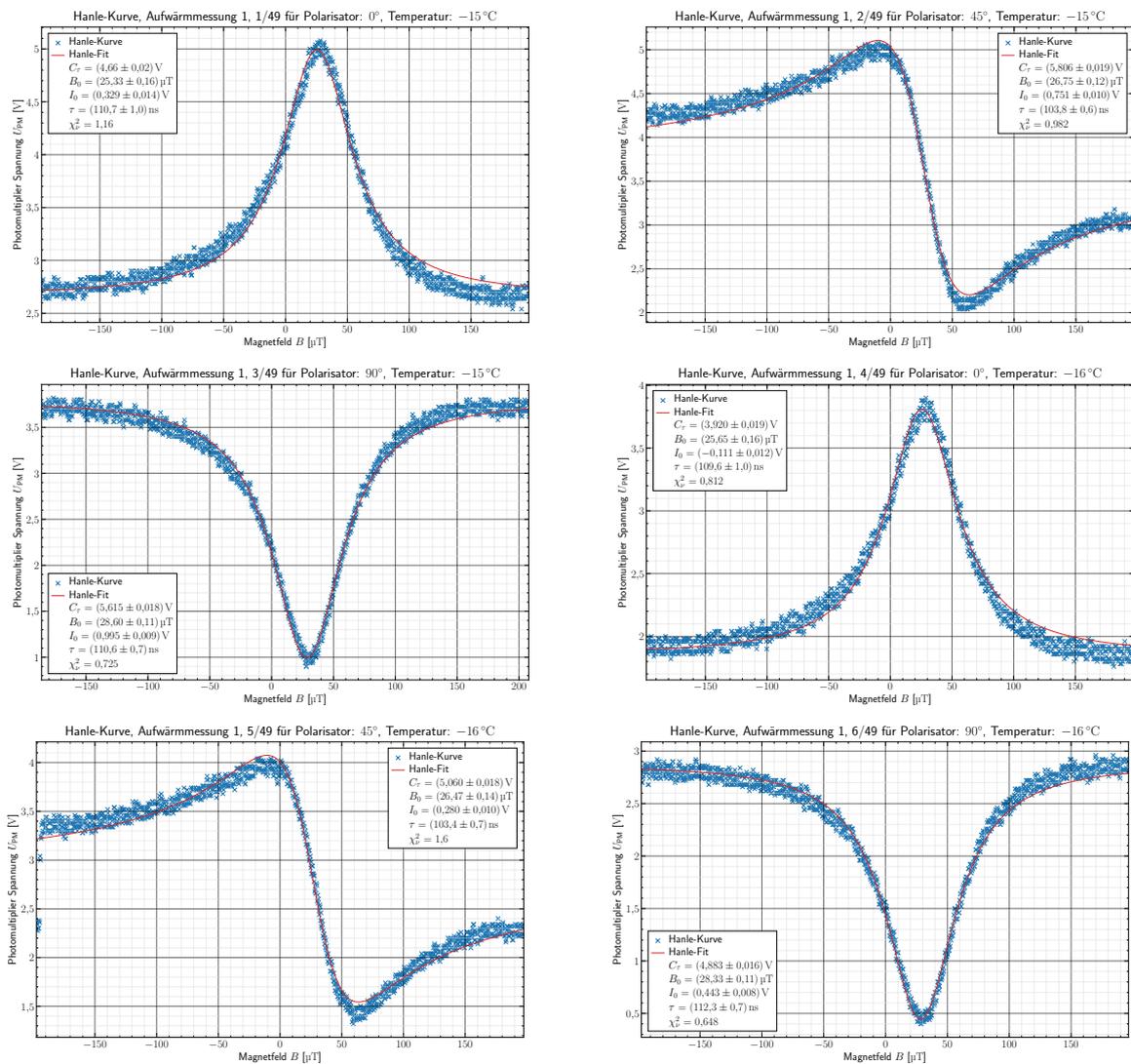


Abbildung 41: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 1 - 6.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 7 - 12

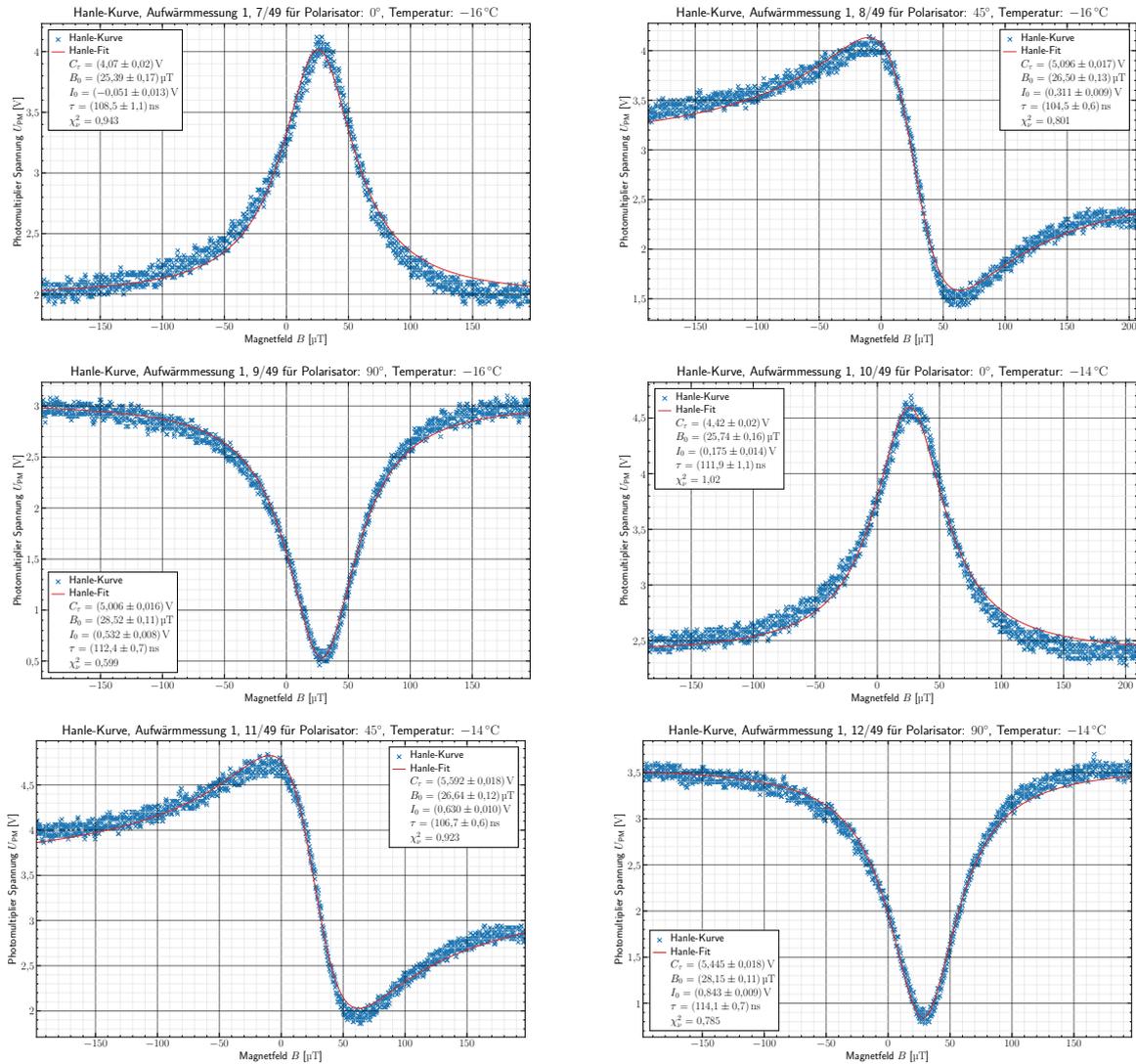


Abbildung 42: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 7 - 12.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 13 - 17

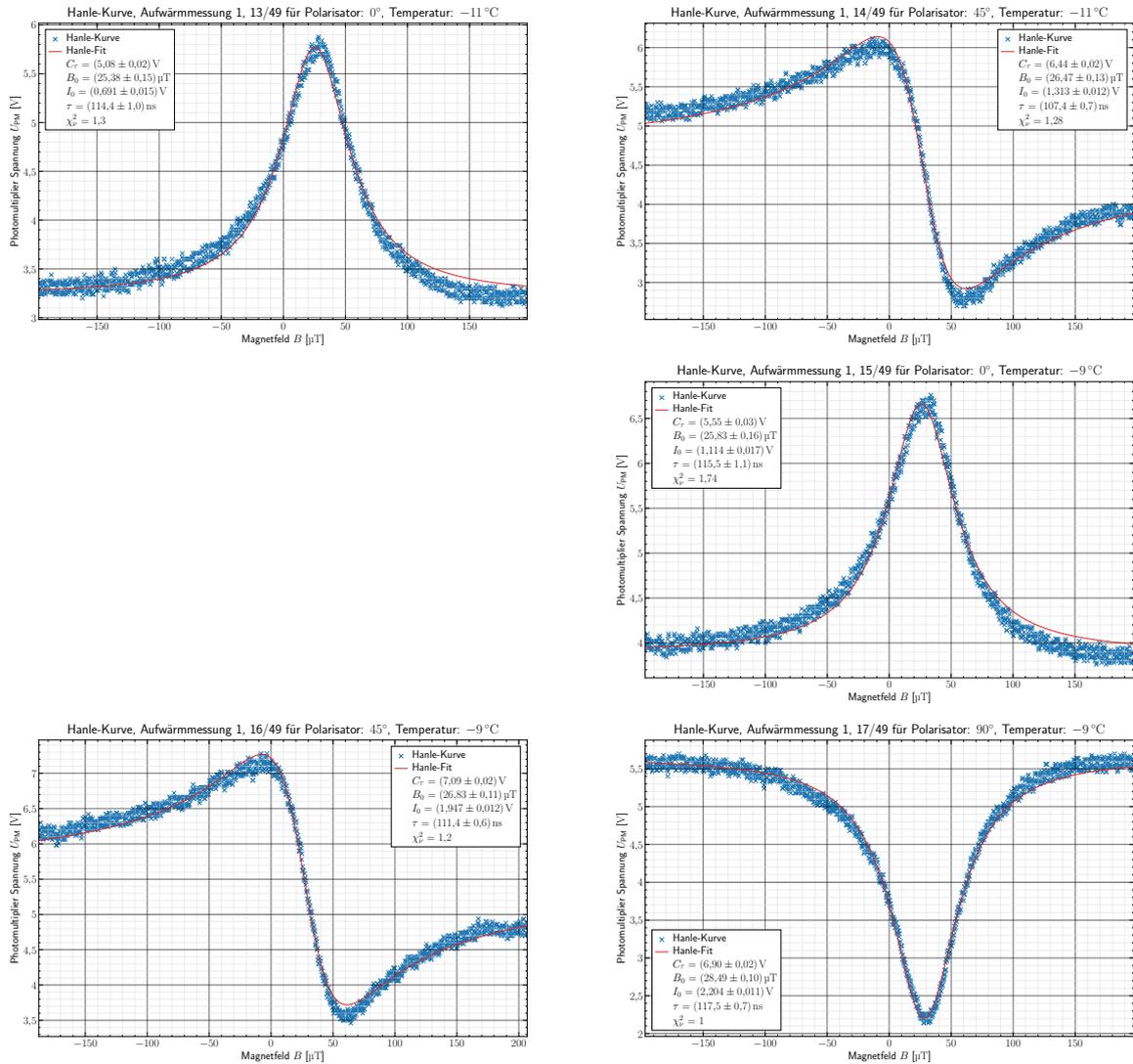


Abbildung 43: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 13 - 17.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 18 - 22

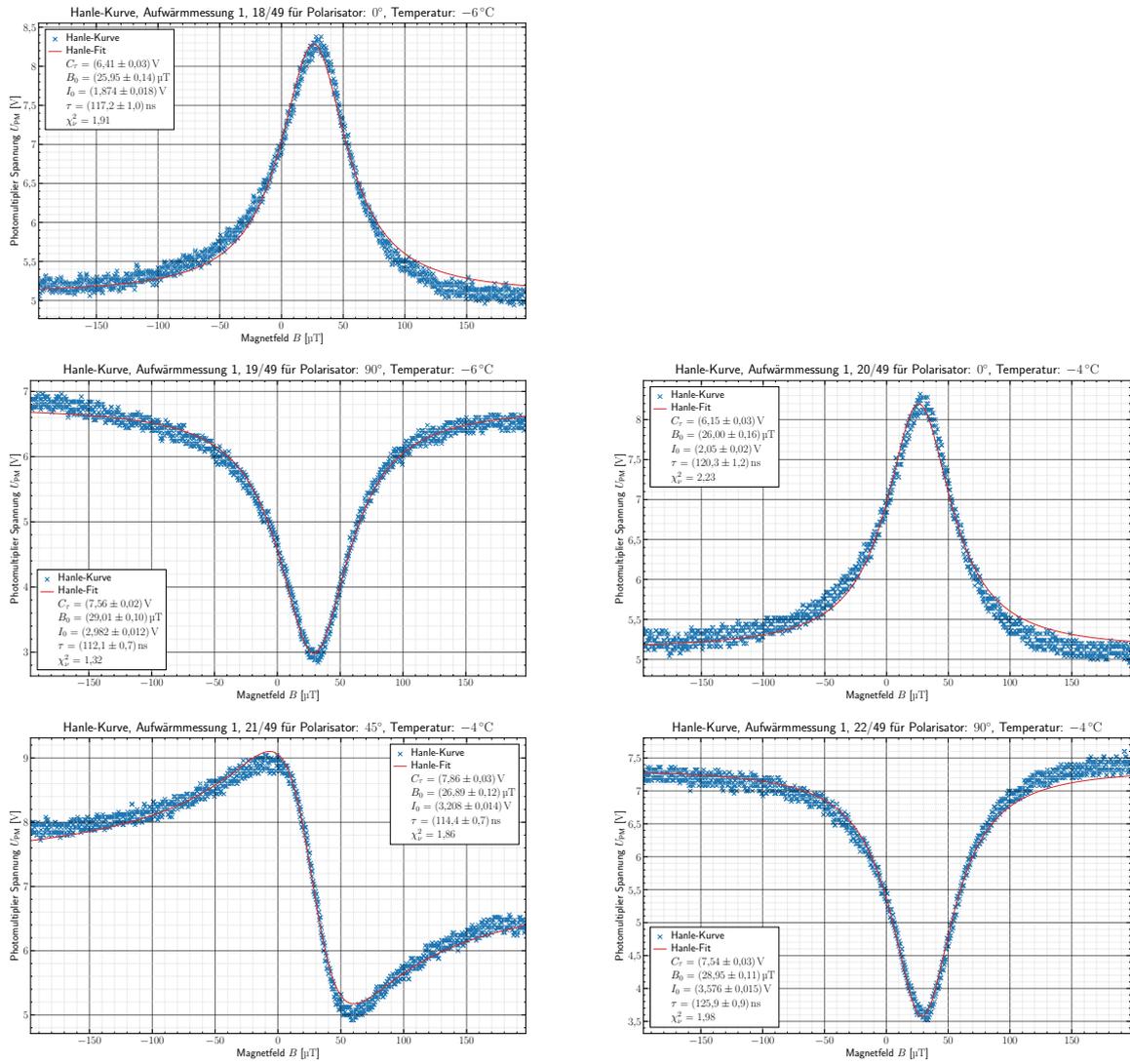


Abbildung 44: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 18 - 22.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 23 - 28

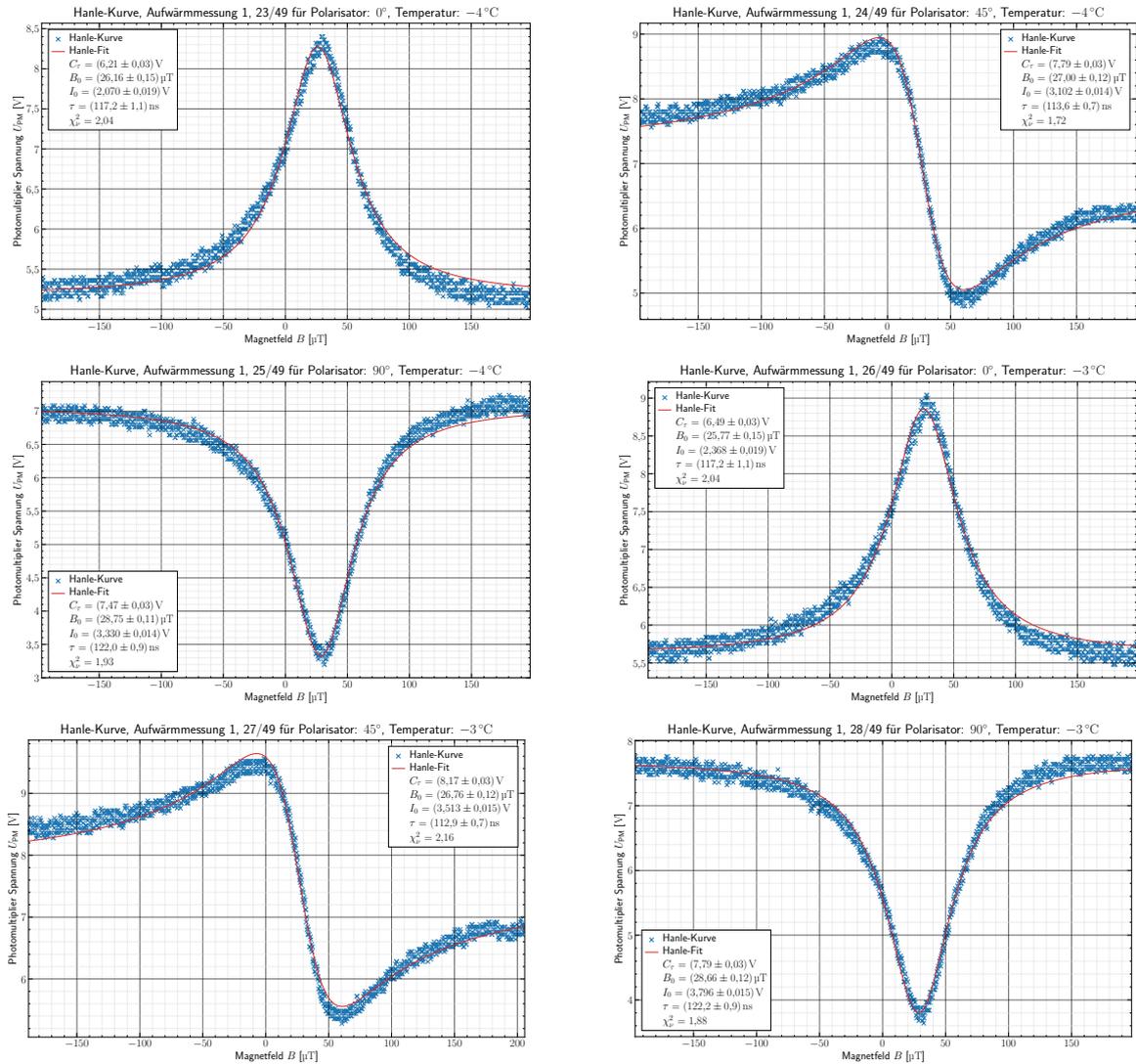


Abbildung 45: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 23 - 28.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 29 - 34

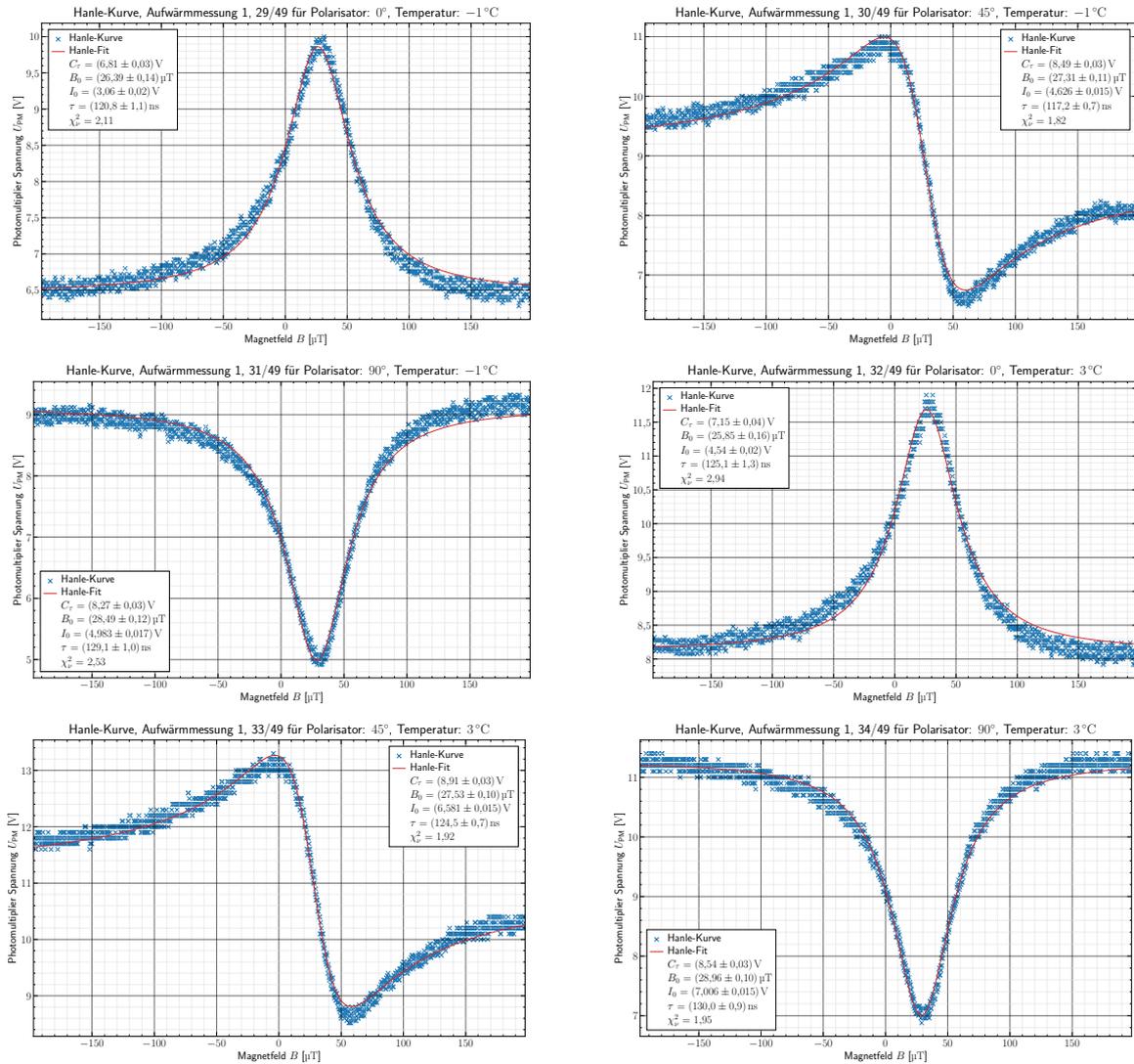


Abbildung 46: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 29 - 34.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 35 - 40

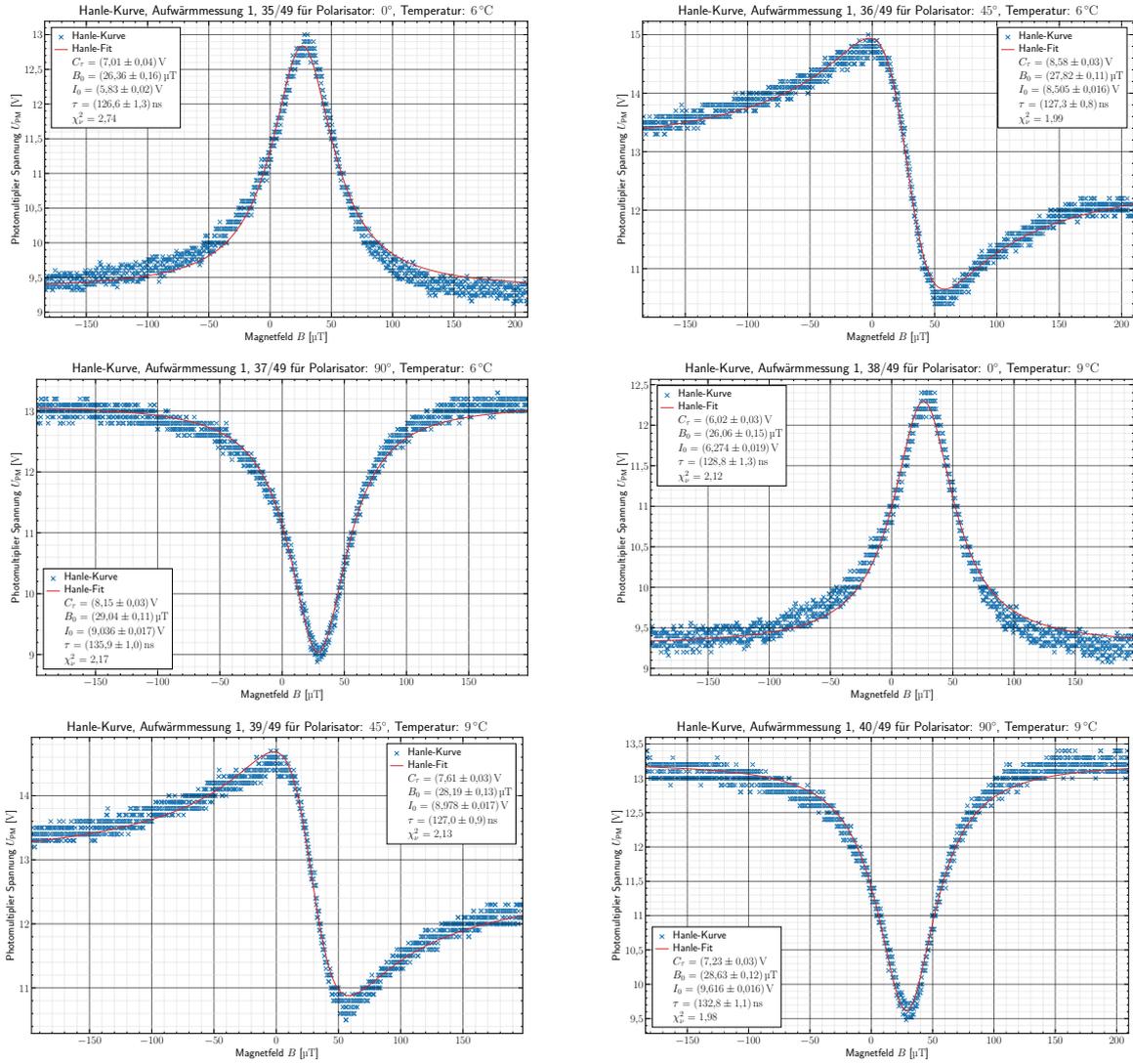


Abbildung 47: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 35 - 40.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 41 - 46

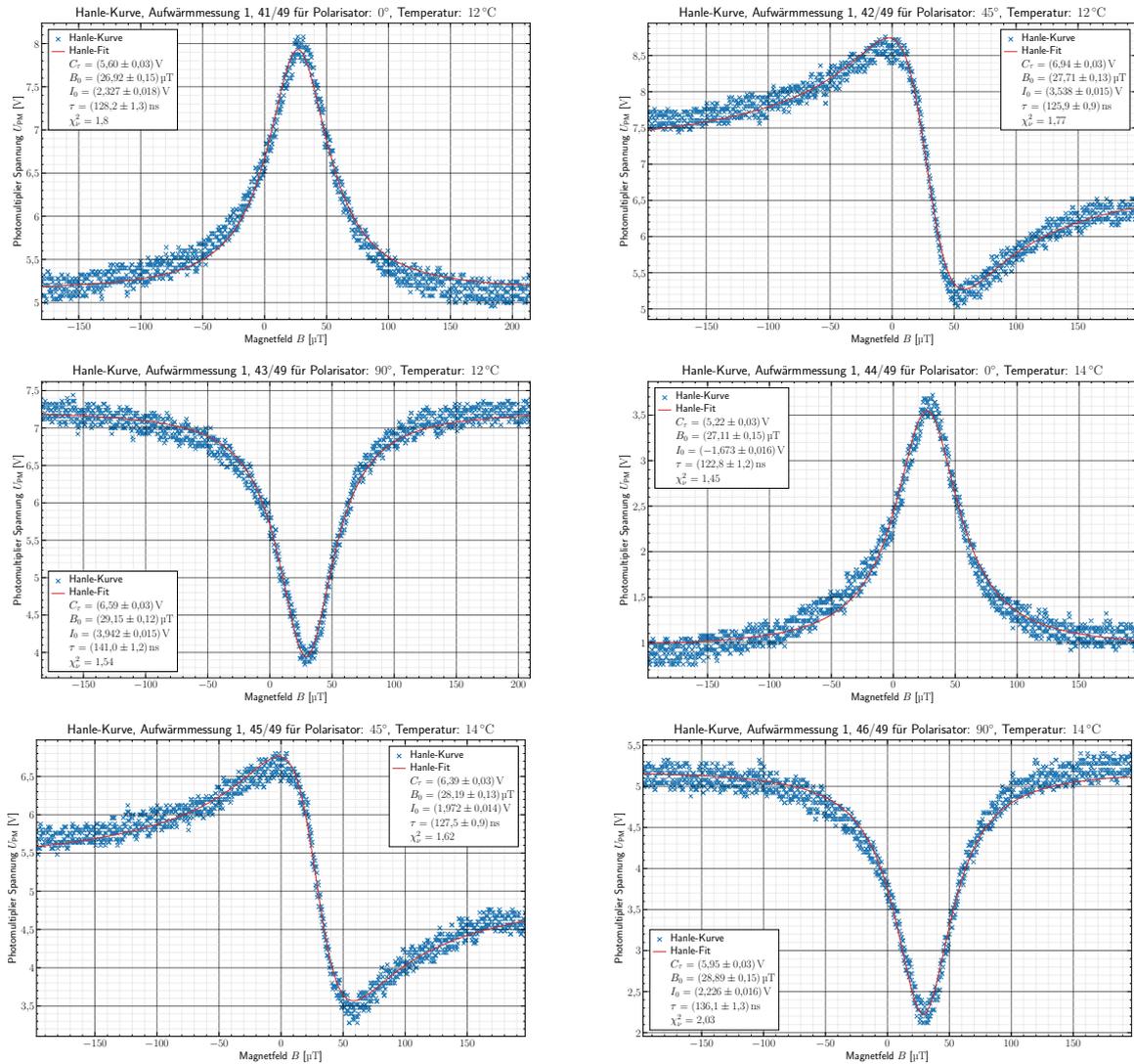


Abbildung 48: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 41 - 46.

Aufwärmmessung 1, Anpassungen 47 - 49

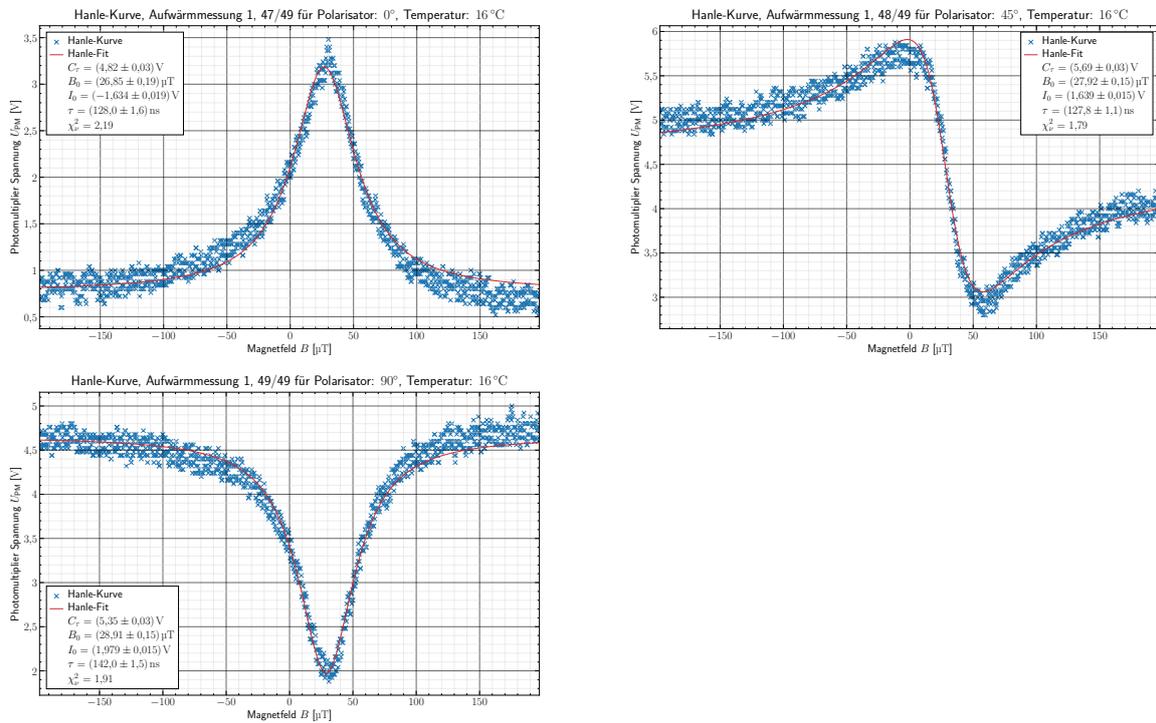


Abbildung 49: Messwerte für Aufwärmmessung 1, Anpassungen 47 - 49.

Aufwärmmessung 2, Anpassungen 1 - 6

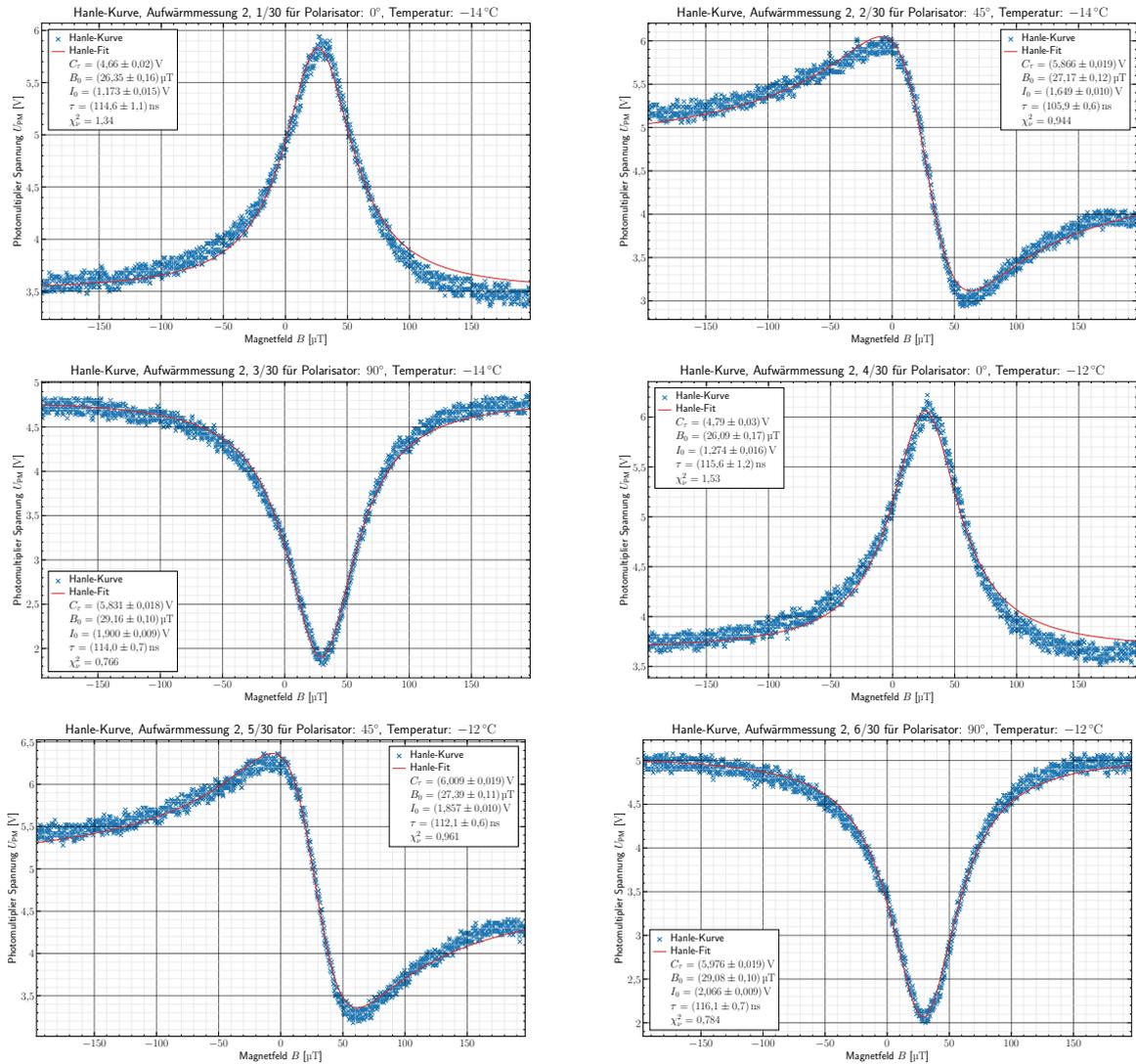


Abbildung 50: Messwerte für Aufwärmmessung 2, Anpassungen 1 - 6.

Aufwärmmessung 2, Anpassungen 7 - 12

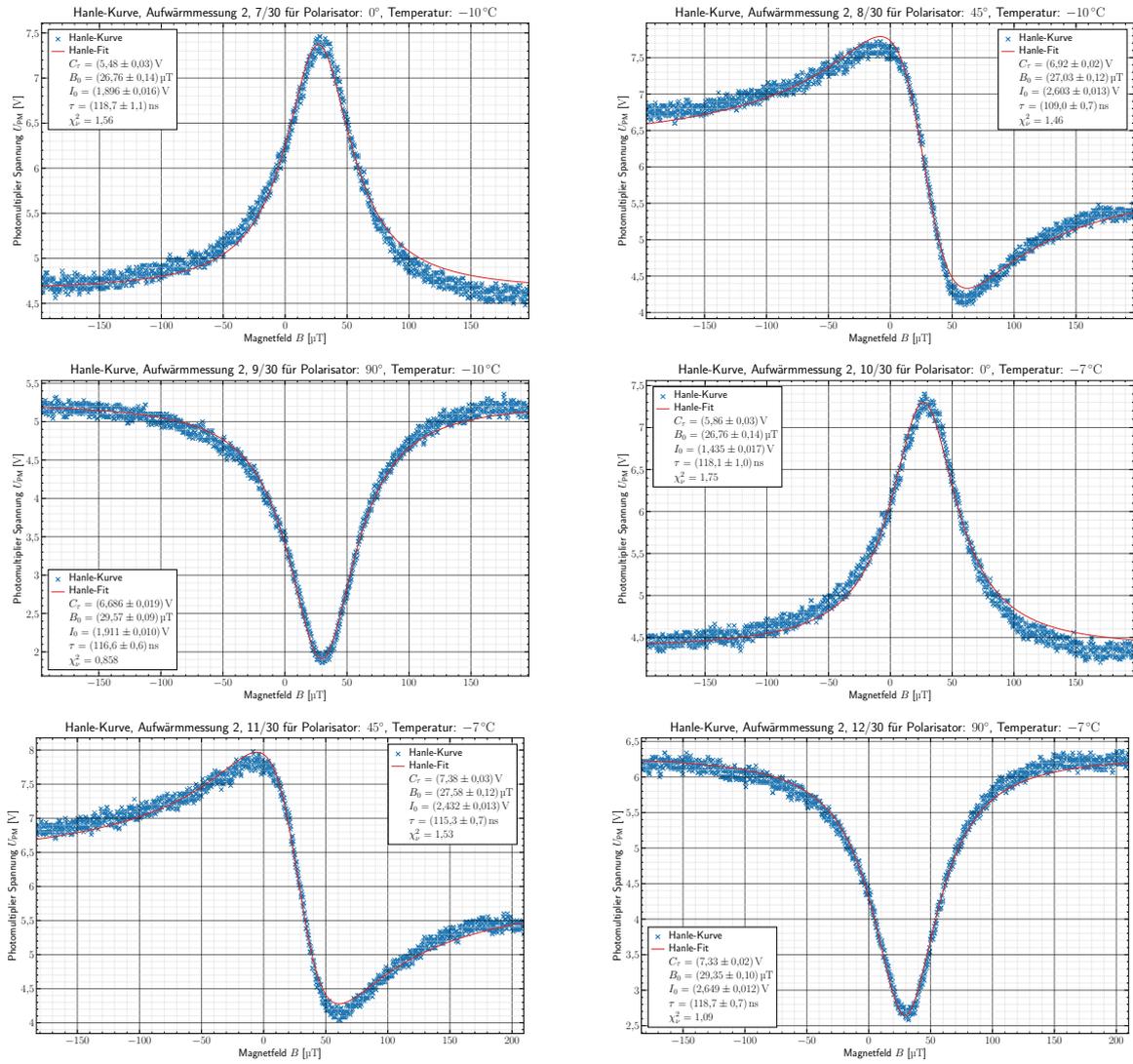


Abbildung 51: Messwerte für Aufwärmmessung 2, Anpassungen 7 - 12.

Aufwärmmessung 2, Anpassungen 13 - 18

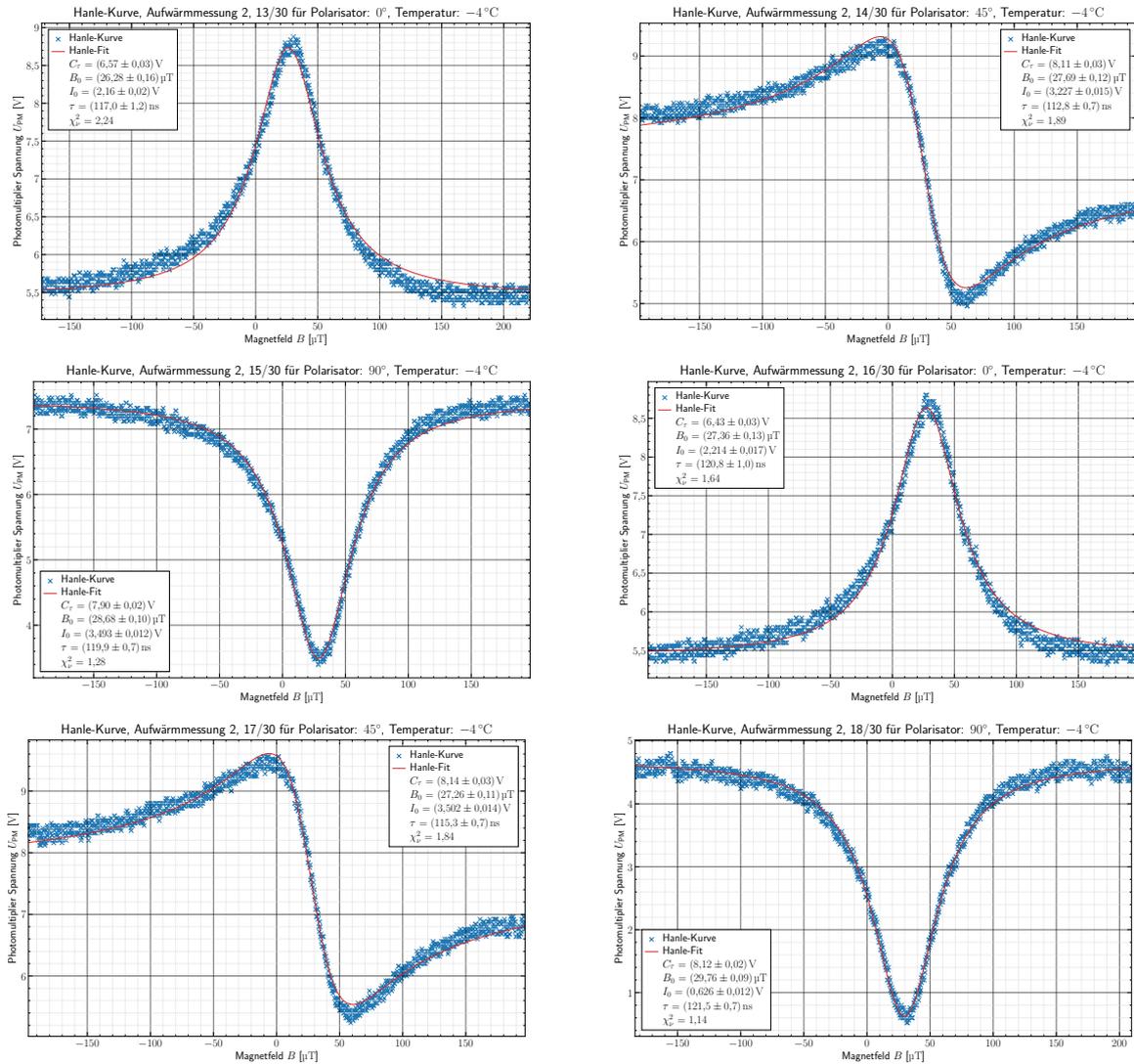


Abbildung 52: Messwerte für Aufwärmmessung 2, Anpassungen 13 - 18.

Aufwärmmessung 2, Anpassungen 19 - 24

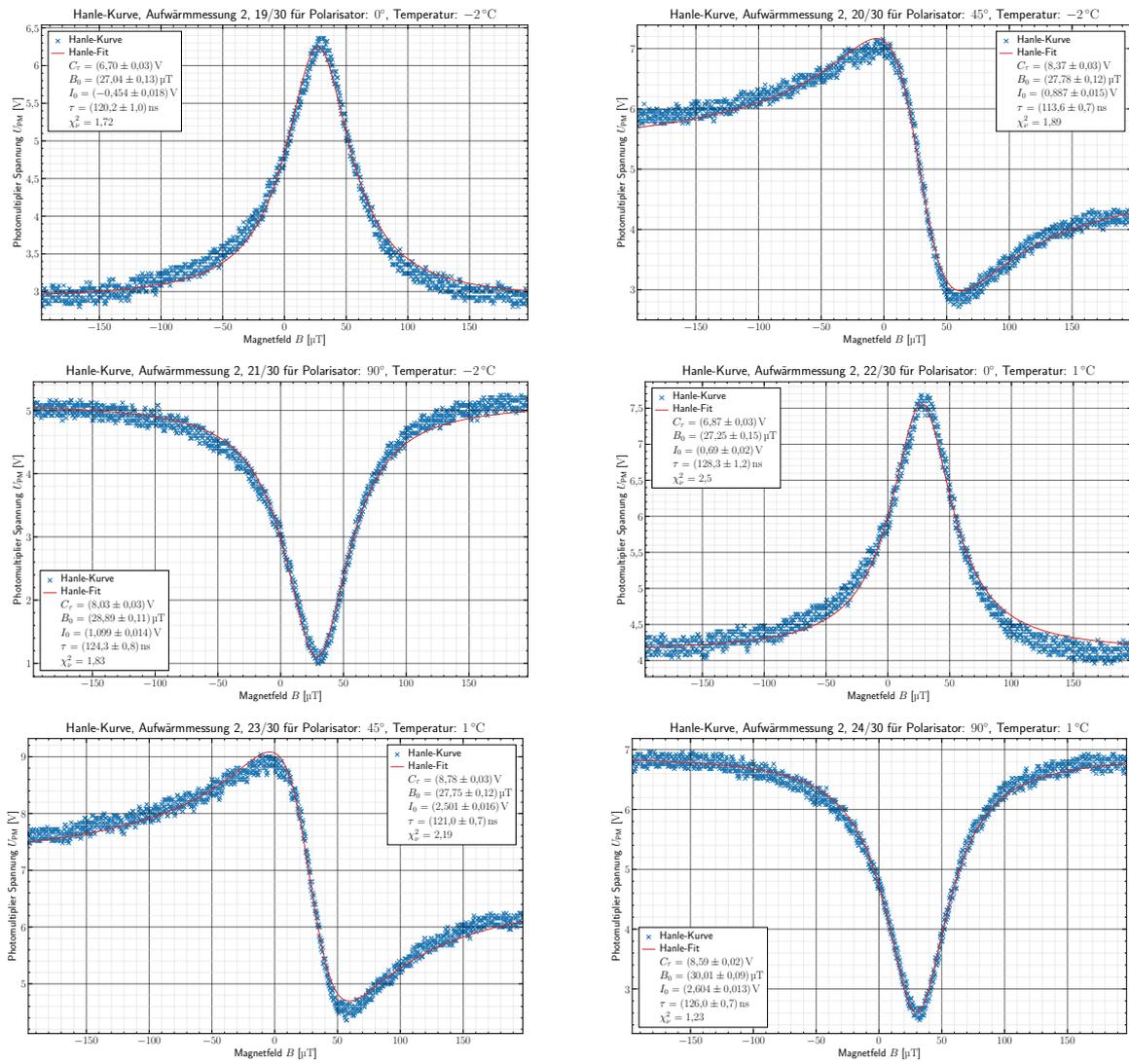


Abbildung 53: Messwerte für Aufwärmmessung 2, Anpassungen 19 - 24.

Aufwärmmessung 2, Anpassungen 25 - 30

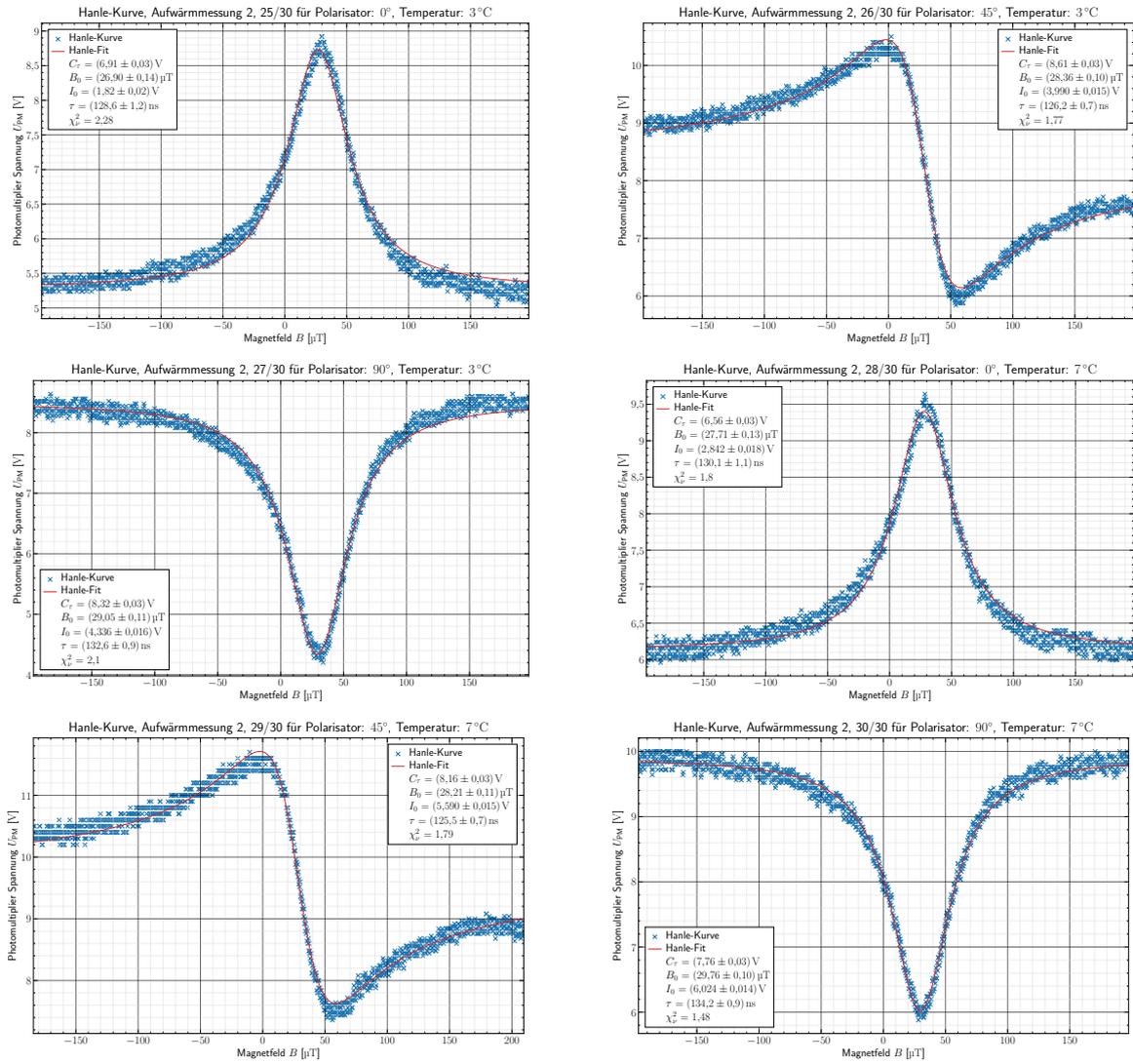


Abbildung 54: Messwerte für Aufwärmmessung 2, Anpassungen 25 - 30.

Abkühlmessung, Anpassungen 1 - 6

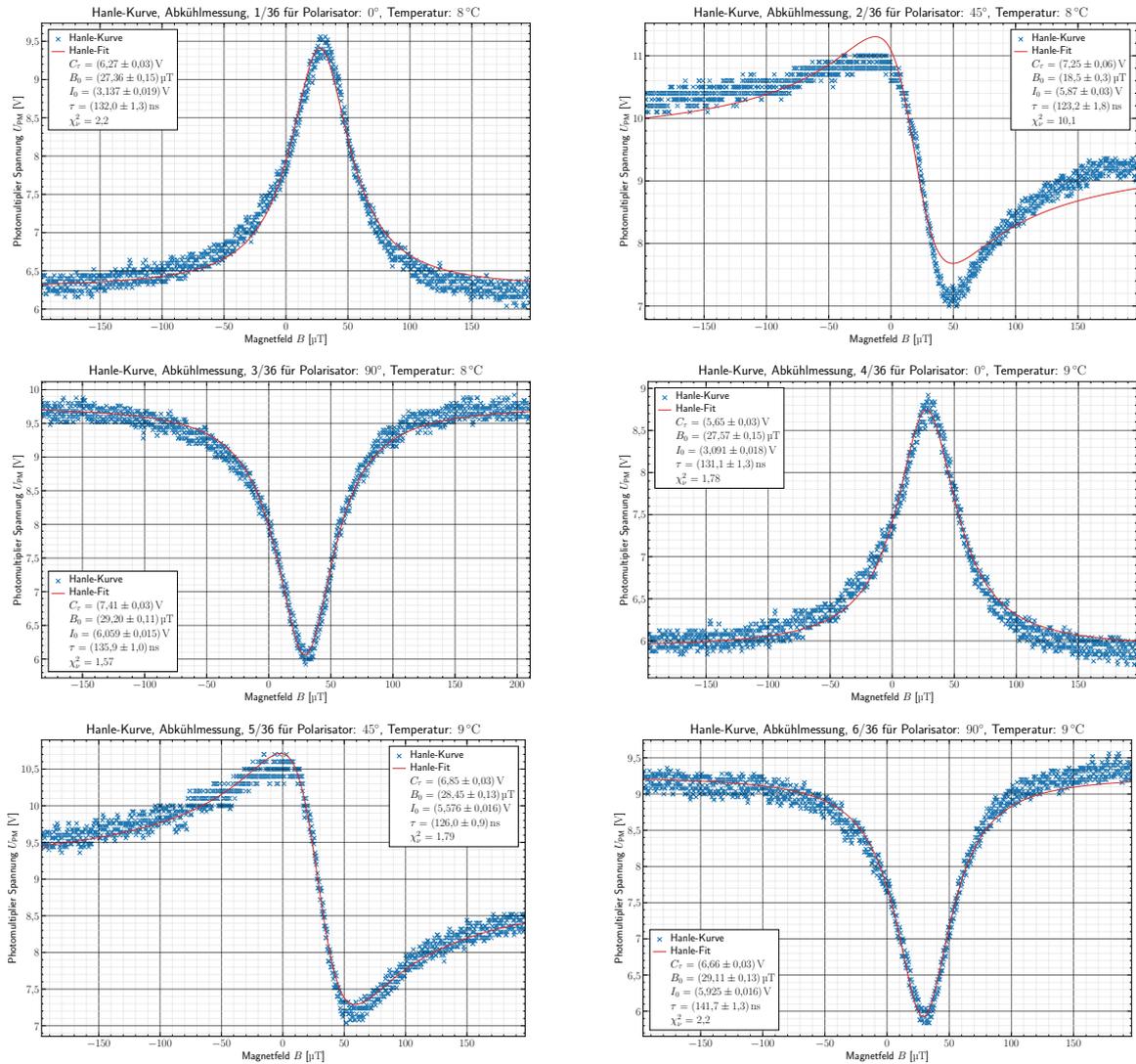


Abbildung 55: Messwerte für die Abkühlmessung, Anpassungen 1 - 6.

Abkühlmessung, Anpassungen 7 - 12

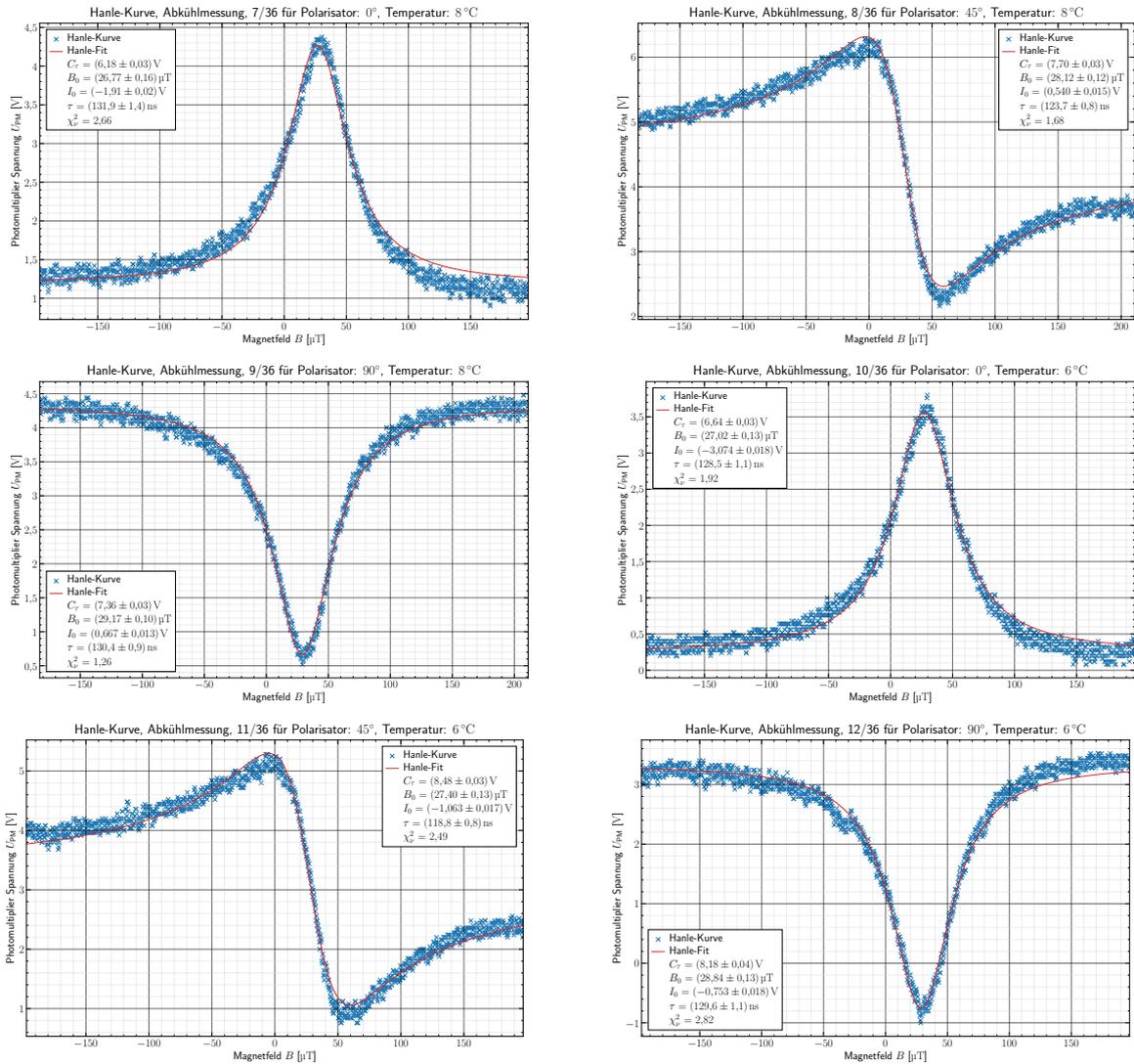


Abbildung 56: Messwerte für die Abkühlmessung, Anpassungen 7 - 12.

Abkühlmessung, Anpassungen 13 - 18

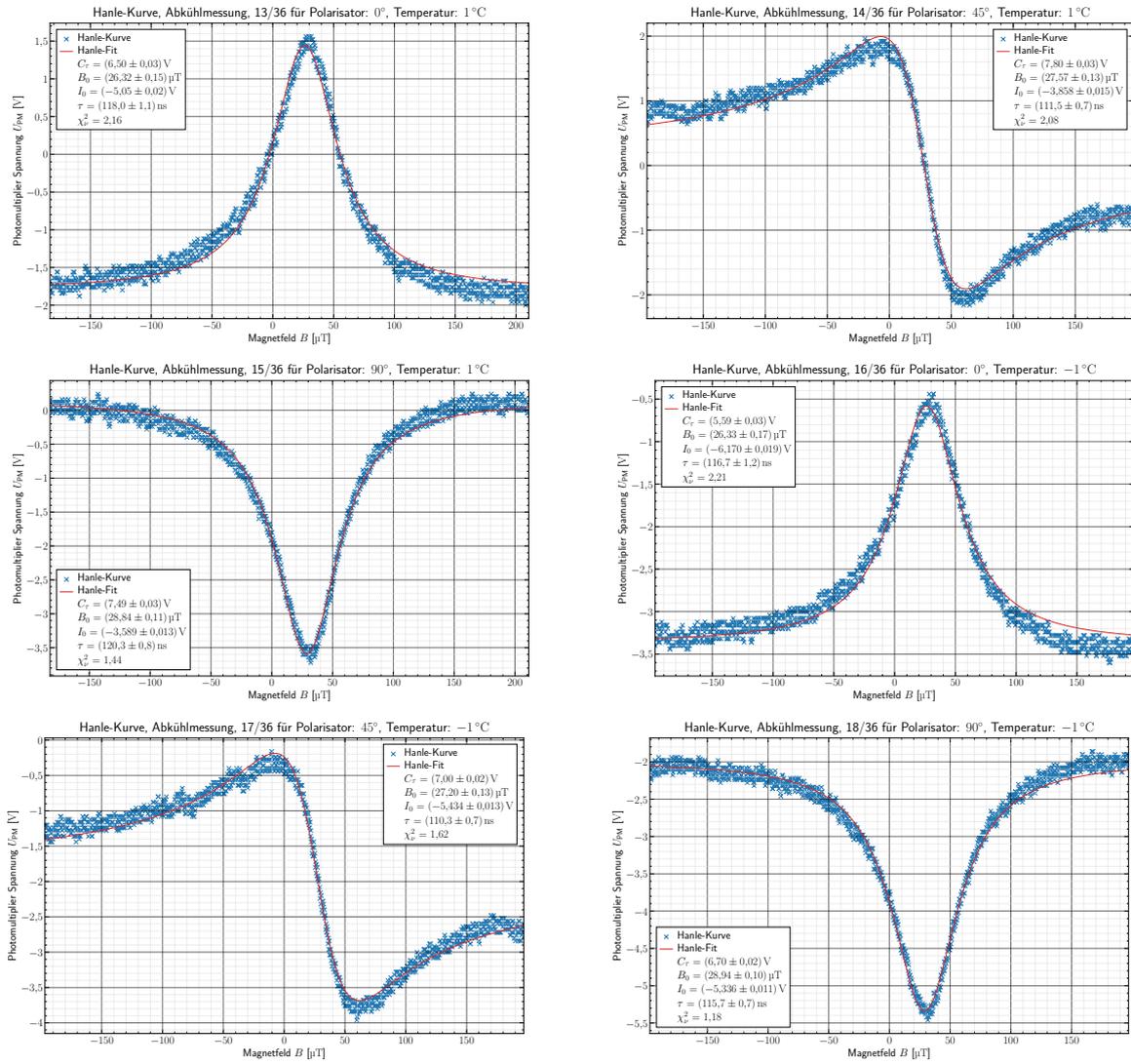


Abbildung 57: Messwerte für die Abkühlmessung, Anpassungen 13 - 18.

Abkühlmessung, Anpassungen 19 - 24

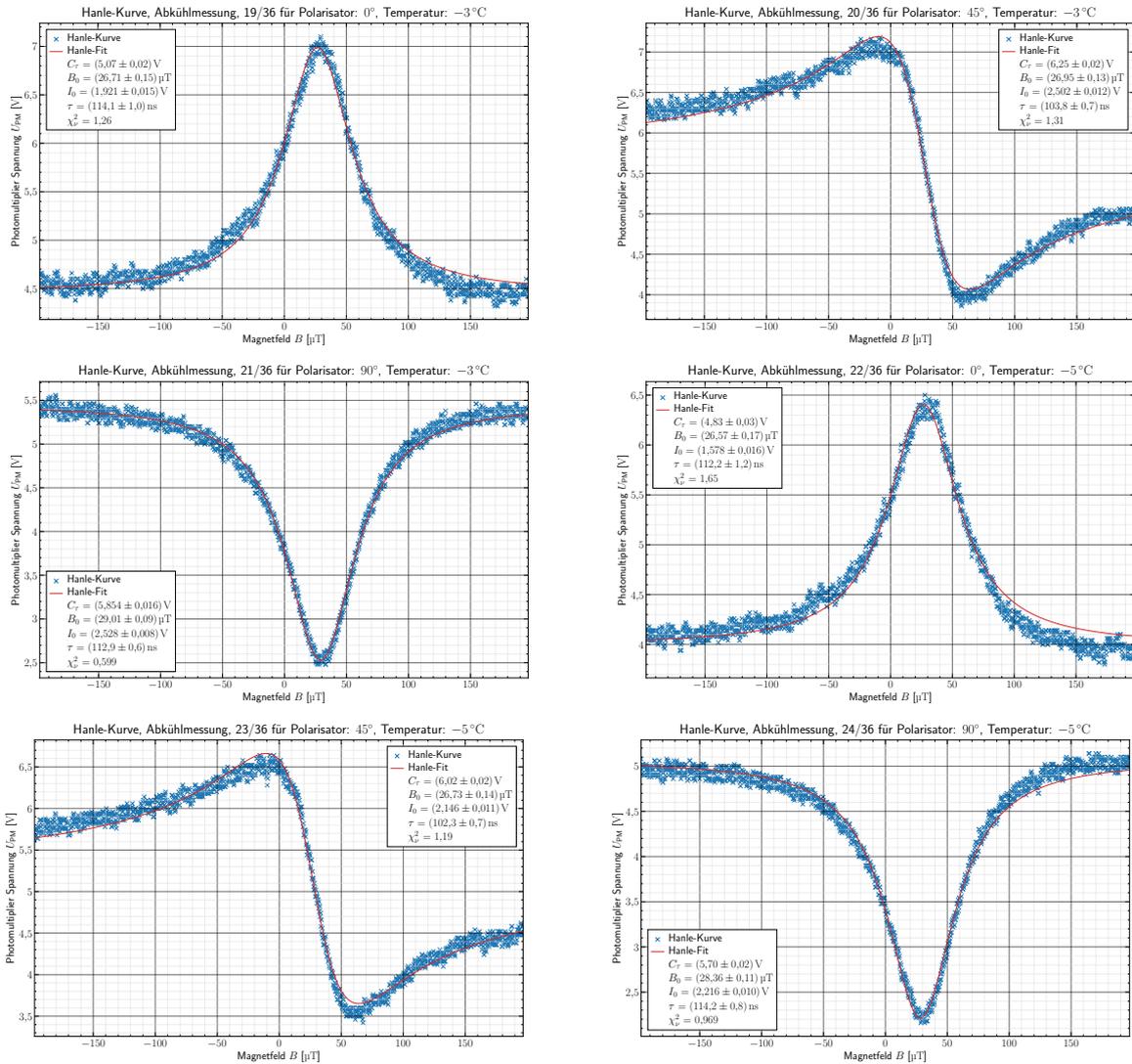


Abbildung 58: Messwerte für die Abkühlmessung, Anpassungen 19 - 24.

Abkühlmessung, Anpassungen 25 - 30

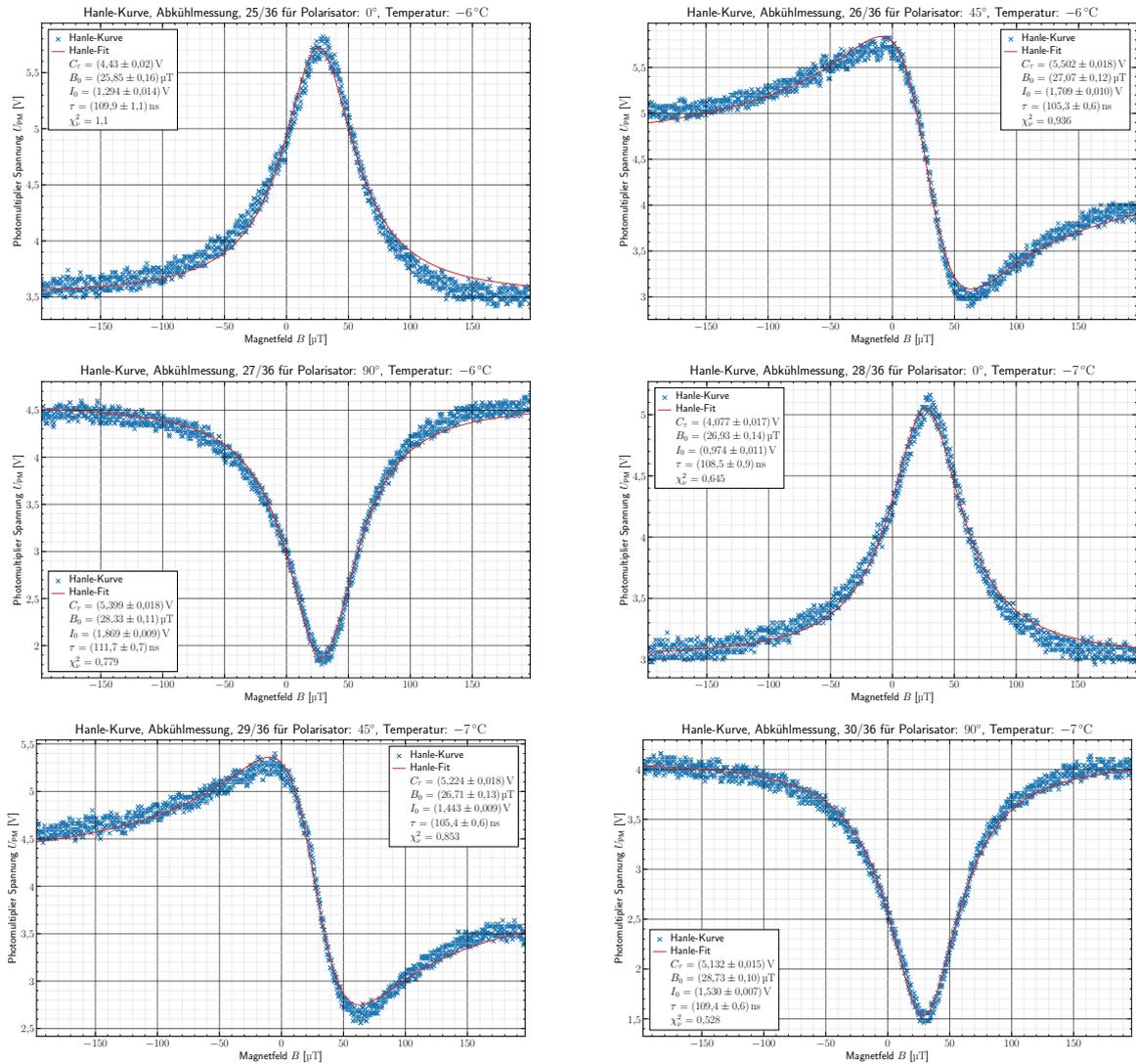


Abbildung 59: Messwerte für die Abkühlmessung, Anpassungen 25 - 30.

Abkühlmessung, Anpassungen 31 - 36

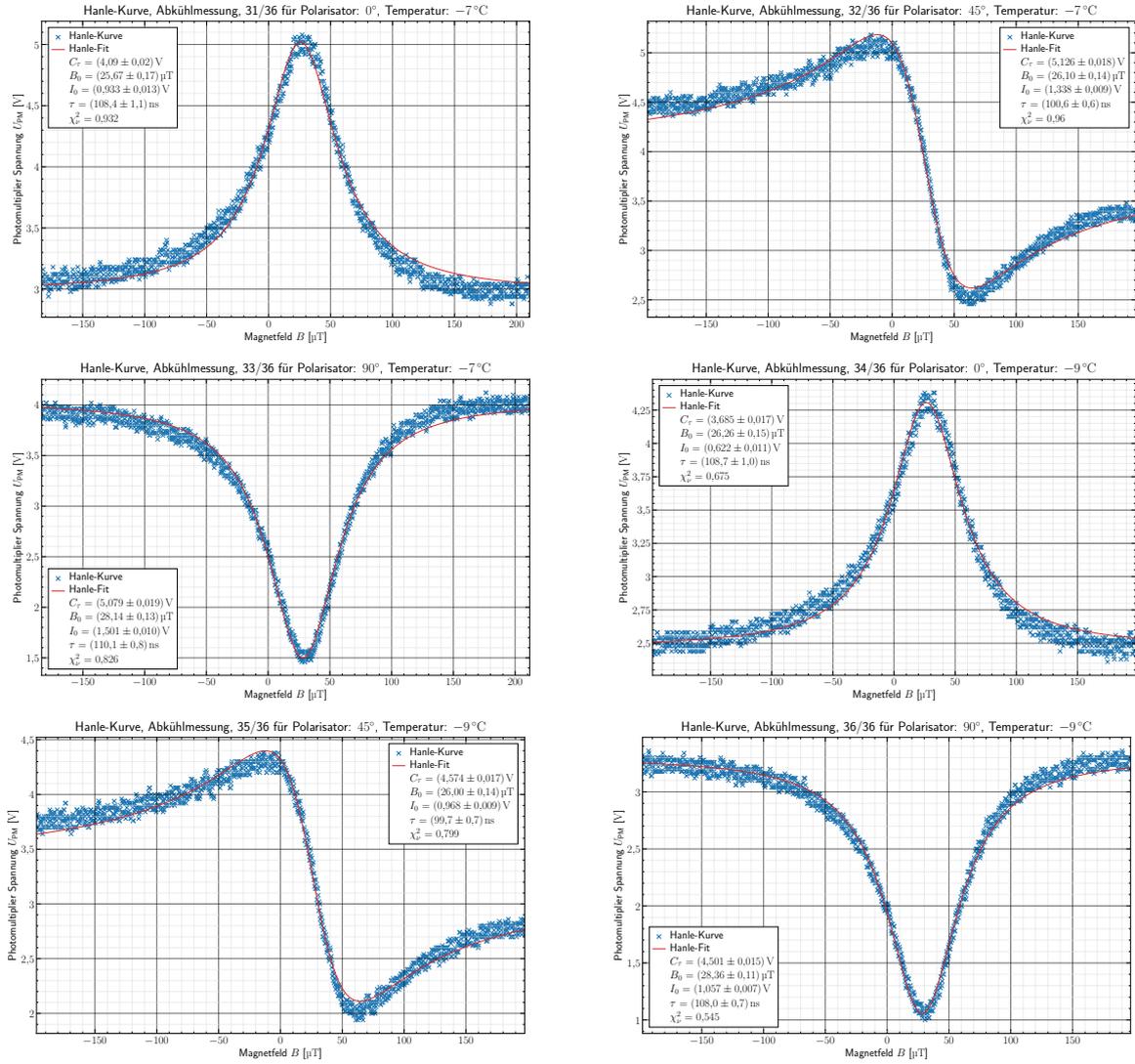


Abbildung 60: Messwerte für die Abkühlmessung, Anpassungen 31 - 36.

A.7 Messprotokoll

Halle: 06.10.22-07.10.22

Polarisator-einstellung: ~~108°/118°~~ $0^\circ = -1,0^\circ$
 $90^\circ = 86^\circ$

Streuungsmessung

Range: $0,3 \cdot 10^{-6}$ A (PM)

Anfangsspannung: $-5,050$ V Endspannung: $+5,123$ V } x (Ramp) / Range: $0-15/1,2$ A
 " Strom: $-0,5132$ A " Strom: $+0,5214$ A
~~y/z: Spannung: Range: $0-7,5$ V, Strom: $0-0,6$ A~~
 y: Spannung: $10,0$ Strom: $4,8$
 z: " : $10,0$ " : $2,3$

Streuungsmessung

Temperatur	Peltierstrom	Peltierspannung	Datipfad: halle/streuung/	Polarisation
-15°	$7,5$ A	$16,4$ V	Newfile 1 - Newfile 25	0°
17°	$0,0$ A	$0,0$ V	halle/streuung-2/ Newfile 1 - Newfile 25	0°
-15°	$7,24$ A	$15,5$ V	halle/streuung-3/Newfile 1 - Newfile 25	0° <small>z-strom 2,3</small>

Langzeitmessung

Temperatur	Peltierstrom [A]	Schleusspannung [V]	Dauer	Polarisation	Datipfad
17°	$0,0$	$0,0$	120 s	30°	halle/noise/Newfile 1
-15°	$7,24$	$15,3$	120 s	30°	halle/noise / Newfile 2

Abbildung 61: Messprotokoll Seite 1

Aufwärmung 1
~~Pol. Einstellung~~ Pol. Einstellungen: $0^\circ - -10^\circ$ $45^\circ - 44^\circ$ $90^\circ - 86^\circ$
 Zeit zwischen Messungen: 20 min
 Messdauer 10s

Temperat [°C] | Polarisstr. [mV] | Poltenspannung [V] | Polarisations: 0° 45° 90° | Dateipfad: hunk / ~~messprot~~ / Newfile...
 raw f

-15	7,50	15,9	X		1	
"	"	"		X	2	
"	"	"			X	3
-16	7,00	15,0	X		4	
"	"	"	X	X	5	
"	"	"			X	6
-16	6,50	14,0	X		7	
"	"	"		X	8	
"	"	"			X	9
-14	6,00	13,1	X		10	
"	"	"		X	11	
"	"	"			X	12
-11	5,50	12,3	X		13	
"	"	"		X	14	
"	"	"			X	15
-9	5,00	11,4	X		16	
"	"	"		X	17	
"	"	"			X	18
-6	4,50	10,5	X		19	
"	"	"		X	20	
"	"	"			X	21
-4	4,00	9,5	X		22	
"	"	"		X	23	
"	"	"			X	24
-3	3,50	8,2	X		25	
"	"	"		X	26	
"	"	"			X	27
-1	3,00	7,1	X		28	
"	"	"		X	29	
"	"	"			X	30
-1	2,50	6,1	X		31	
"	"	"		X	32	
"	2,00	"			X	33
+3	2,00	5,1	X		34	
"	"	"		X	35	
"	"	"			X	36
+6	1,50	3,9	X		37	
"	"	"		X	38	
"	"	"			X	39
+9	1,00	2,9	X		40	
"	"	"		X	41	
"	"	"			X	42
+12	0,50	1,7	X		43	
"	"	"		X	44	
"	"	"			X	45
+14	0,00	0,4	X		46	
"	"	"		X	47	
"	"	"			X	48
+16	0,00	0,0	X		49	
"	"	"		X	50	

Abbildung 62: Messprotokoll Seite 2

Aufwärmmessung 2 Pol. Einstellungen: $0^\circ \hat{=} -1,0^\circ$ $45^\circ \hat{=} 44^\circ$ $90^\circ \hat{=} 86^\circ$
 Zeit zwischen Messungen: 20 min.
 Messdauer 10s

Temperatur [°C]	Peltierstrom [A]	Peltierspannung [V]	Pol.achse: 0° 45° 90°	Drehp. Grad hunde/ant-7/Neufile -
-14	7,24	15,3	X	1
"	"	"	X	2
"	"	"	X	3
-12	6,50	14,2	X	4
"	"	"	X	5
"	"	"	X	6
-10	5,80	12,9	X	7
"	"	"	X	8
"	"	"	X	9
-7	5,10	11,7	X	10
"	"	"	X	11
"	"	"	X	12
-4	4,40	10,4	X	13
"	"	"	X	14
"	"	"	X	15
-4	3,70	8,8	X	16
"	"	"	X	17
"	"	"	X	18
-2	3,00	7,2	X	19
"	"	"	X	20
"	"	"	X	21
+1	2,30	5,7	X	22
"	"	"	X	23
"	"	"	X	24
+3	1,60	4,3	X	25
"	"	"	X	26
"	"	"	X	27
+7	0,90	2,7	X	28
"	"	"	X	29
"	"	"	X	30

Abbildung 63: Messprotokoll Seite 3

Abkühlmessung Pol. Einstellungen $0^\circ = -10^\circ$ $45^\circ = 44^\circ$ $90^\circ = 86^\circ$
 Zeit zwischen Messungen = 20s
 Abschauer = 10s

Temperatur [°C]	Peltierstrom [A]	Peltierspannung [V]	Polarisation 0° 45° 90°	Datierfeld Handknoten/Neufile
+8	0,90	3,4		1
"	"	"	X	2
"	"	"	X	3
+9	1,60	4,2	X	4
"	"	"	X	5
"	"	"	X	6
+8	2,30	5,4	X	7
"	"	"	X	8
"	"	"	X	9
+6	3,00	7,0	X	10
"	"	"	X	11
"	"	"	X	12
+1	3,70	8,0	X	13
"	"	"	X	14
"	"	"	X	15
-1	4,40	8,5	X	16
"	"	"	X	17
"	"	"	X	18
-3	5,10	11,0	X	19
"	"	"	X	20
"	"	"	X	21
-5	5,80	12,7	X	22
"	"	"	X	23
"	"	"	X	24
-6	6,50	14,2	X	25
"	"	"	X	26
"	"	"	X	27
-7	7,20	15,5	X	28
"	"	"	X	29
"	"	"	X	30
-7	7,20	15,4	X	31
"	"	"	X	32
"	"	"	X	33
-9	7,20	15,3	X	34
"	"	"	X	
"	"	"	X	

02.10.2022
 Siemend

Abbildung 64: Messprotokoll Seite 4